

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



Numéro de série.....

Numéro d'inscription.....

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ouvrages Hydrauliques

THEME

Etude de sensibilité de l'érosion hydrique et des zones à risques d'inondations aux pluies extrêmes dans les bassins versants (K'sob) Hodna / (Boussellam) Soummam

Présentée Par

MORAD BENAICHE

Soutenue le : 27 / 05 / 2025

Devant le jury composé de :

<u>Nom & Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Qualité</u>
Dougha Mostafa	Professeur	Univ. de M'sila	Président
Mokhtari Elhadj	Professeur	Univ. de M'sila	Encadreur
Berghout Ali	MCA	Univ. de M'sila	Co-Encadreur
Berreksi Ali	Professeur	Univ. de Bejaia	Examineur
Hasbaia Mahmoud	Professeur	Univ. de M'sila	Examineur
Ikni Tahar	MCA	Univ. de Bejaia	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

*Je suis très reconnaissant de l'opportunité qui m'a été offerte de poursuivre mes études de doctorat à l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila. Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, le Professeur **Mokhtari El Hadj**, pour son encadrement rigoureux, son soutien indéfectible et ses conseils avisés tout au long de ce parcours. Son dévouement, sa disponibilité et sa volonté constante de promouvoir l'excellence scientifique dans les domaines de l'érosion hydrique et des inondations ont eu un impact profond sur mon développement académique. Son approche pédagogique et son expertise m'ont permis de mieux appréhender la complexité de ces phénomènes et m'ont encouragé à persévérer dans la recherche avec rigueur et passion.*

*J'adresse également mes vifs remerciements à mon co-encadreur, M. **Berghout Ali**, Professeur à l'Université de M'sila, pour sa supervision bienveillante, ses conseils pertinents et son accompagnement constant durant toutes les années de doctorat.*

*Par ailleurs, je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Dr. **Abdelkebir Ibrahim**, actuellement enseignant à l'Université de Ghardaïa, pour son soutien fidèle et ses orientations éclairées qui ont jalonné l'ensemble de mon parcours doctoral.*

*Je remercie très chaleureusement M. **Zekay Şen**, Professeur à l'Université Medipol d'Istanbul, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire durant deux semaines et pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée pendant ce stage. Sa disponibilité, son encouragement et ses remarques constructives m'ont permis de renforcer ma confiance en moi et de faire avancer mon travail avec sérénité.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur **Bernard Engel**, de l'Université Purdue à West Lafayette (États-Unis), pour les informations scientifiques de grande valeur qu'il a partagées, ainsi que pour son appui constant et ses conseils pertinents qui ont enrichi considérablement ce travail.*

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et pour leurs remarques enrichissantes.

*Je souhaite adresser mes remerciements les plus respectueux à mes enseignants du département d'hydraulique de l'Université de M'sila pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité et leur soutien. Une mention particulière aux Professeurs **M. mahmoud hasbaia, M. Mostafa DOUGHA, M. salim djerbouai et M. Djamaledine Djemiat**, dont les apports académiques et humains ont marqué mon parcours.*

*Je n'oublie pas mes collègues et amis de promotion, notamment **Lakhdar Seraiche, Kamel Deia et Mohamed Rafik Berini**, pour leur camaraderie, leur entraide et les moments de partage précieux que nous avons vécus ensemble tout au long de cette aventure scientifique.*

Enfin, j'adresse ma gratitude à ma famille et à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu, motivé et encouragé à croire en mes capacités et à aller jusqu'au bout de ce travail.

ملخص

تُعدّ التعرية المائية والفيضانات من بين أخطر الظواهر الطبيعية التي تهدد المناطق الهشة بيئياً، خاصةً في ظل تسارع التغيرات المناخية وغياب التدابير الوقائية الفعالة. تهدف هذه الدراسة إلى إعداد خرائط لحساسية المناطق المعرضة لهذين الخطرين، بالاعتماد على تقنيات التحليل متعدد المعايير (AHP و FAHP) ونماذج التعرية (RUSLE و EPM) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (SIG)، مع دمج مجموعة من العوامل البيئية والمناخية لتحسين دقة التقييم.

في المرحلة الأولى، تم إعداد خرائط لحساسية التعرية المائية وفق فترات عودة مختلفة (2، 5، 10، 100 و 1000 سنة) باستخدام نماذج (RUSLE، EPM، AHP و FAHP). وقد شمل التحليل عدة عوامل منها الانحدار، التساقطات، خصائص التربة، استخدامات الأراضي، وكثافة الغطاء النباتي. أظهرت النتائج تبايناً واضحاً في مستويات الحساسية، مع تسجيل أعلى نسب التأثر في شمال المنطقة وبعض الأجزاء الغربية والجنوبية. كما بيّنت منحنيات ROC تفوق نموذج FAHP ($AUC = 0.806$) على نموذج AHP (0.783)، في حين كانت دقة RUSLE و EPM أقل ($AUC = 0.618$ و $AUC = 0.638$) على التوالي.

أما المرحلة الثانية من الدراسة، فقد خُصّصت لتحليل حساسية الفيضانات باستخدام نفس المنهجين (AHP و FAHP)، مع دمج عدة متغيرات مثل الانحدار، الارتفاع، التساقطات، نوع الصخور، TWI، NDVI، MNDWI، واستعمالات الأراضي والمسافة من المجاري المائية. أظهرت النتائج أن المناطق الأكثر عرضة للفيضانات تتركز في أحواض بوسلام وكسوب، خاصة في المناطق ذات الارتفاع المنخفض، حيث تراوحت نسبة المناطق عالية الخطورة بين 2.19% و 25.55% حسب AHP، وبين 1.53% و 24.51% حسب FAHP. كما أظهرت تحاليل ROC أداءً عالياً للنموذجين ($AUC = 0.839$) لنموذج AHP و $AUC = 0.835$ بالنسبة لنموذج FAHP).

تُبرز هذه النتائج أهمية استخدام أدوات التحليل متعدد المعايير ونظم المعلومات الجغرافية في تحسين تقييم المخاطر الطبيعية ودعم استراتيجيات التكيف المستدام وتعزيز قدرة المجتمعات على مواجهة الظواهر المناخية القصوى.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات، التعرية، RUSLE، الهطول المطري الشديد، AHP، حواض بوسلام والقصب.

Résumé

L'érosion hydrique et les inondations figurent parmi les phénomènes naturels les plus menaçants, notamment pour les zones écologiquement fragiles, en raison de l'accélération du changement climatique et de l'absence de mesures de prévention efficaces. Cette étude a pour objectif de cartographier la sensibilité des zones à ces risques en combinant des méthodes d'analyse multicritères (AHP et FAHP) avec des modèles d'érosion (RUSLE et EPM), dans un environnement SIG, en intégrant une série de facteurs environnementaux et climatiques pour améliorer la précision de l'évaluation.

Dans une première étape, des cartes de sensibilité à l'érosion hydrique ont été élaborées pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000 ans) à partir des modèles AHP, FAHP, RUSLE et EPM. Plusieurs facteurs ont été pris en compte, tels que la pente, les précipitations, les caractéristiques du sol, l'occupation du sol et la couverture végétale. Les zones ont été classées en cinq niveaux de sensibilité, révélant une forte exposition à l'érosion notamment au nord, à l'ouest et au sud du périmètre d'étude. Les courbes ROC ont montré que le modèle FAHP (AUC = 0,806) présente une meilleure performance que AHP (0,783), tandis que RUSLE (0,618) et EPM (0,638) ont affiché une précision plus faible.

Dans la seconde partie, la sensibilité aux inondations a été évaluée en utilisant également les méthodes AHP et FAHP, en intégrant divers paramètres : courbure, pente, altitude, précipitations, lithologie, TWI, NDVI, MNDWI, occupation et couverture du sol, densité de drainage et distance aux cours d'eau. Les résultats ont montré que les zones à haut risque sont concentrées dans les bassins de Boussellam et K'sob, principalement dans les zones à faible altitude. La superficie des zones à risque varie entre 2,19 % et 25,55 % selon AHP, et entre 1,53 % et 24,51 % selon FAHP. Les performances des deux modèles ont été jugées satisfaisantes (AUC = 0,839 pour AHP, 0,835 pour FAHP) pour une période de retour de deux ans.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'utilisation de méthodes multicritères couplées aux SIG pour améliorer la gestion des risques naturels, en appui à des stratégies d'adaptation durables et à la résilience des territoires face aux événements climatiques extrêmes.

Mots-clés :

Inondations. Erosion hydrique. RUSLE. Pluies extrêmes. AHP. Bassins versants de Boussellam et Ksob.

Abstract

Water erosion and floods are among the most threatening natural hazards, particularly in ecologically fragile areas, due to the acceleration of climate change and the lack of effective preventive measures. This study aims to map the sensitivity of areas at risk by combining multi-criteria analysis techniques (AHP and FAHP) with erosion models (RUSLE and EPM) in a GIS environment, integrating various environmental and climatic factors to improve the accuracy of risk assessment.

In the first phase, sensitivity maps for water erosion were produced based on different return periods (2, 5, 10, 100, and 1000 years), using AHP, FAHP, RUSLE, and EPM models. Several factors were analyzed, including slope, precipitation, soil characteristics, land use, and vegetation cover. The results revealed significant variations in sensitivity, with the most affected areas concentrated in the north and some parts of the west and south of the study area. ROC curves showed that the FAHP model performed best (AUC = 0.806), followed by AHP (0.783), while RUSLE (0.618) and EPM (0.638) showed lower predictive accuracy.

The second part of the study focused on flood sensitivity mapping using the same AHP and FAHP methods. Several variables were considered, such as curvature, slope, elevation, rainfall, lithology, TWI, NDVI, MNDWI, land use, and proximity to watercourses. The results showed that high-risk flood zones are mainly concentrated in the Boussellam and K'sob sub-basins, particularly in low-altitude areas. According to the AHP model, high-risk zones covered between 2.19% and 25.55% of the study area, while under the FAHP model, they ranged from 1.53% to 24.51%. ROC analysis confirmed the strong performance of both models (AUC = 0.839 for AHP and 0.835 for FAHP).

These findings highlight the importance of using spatial analysis tools and multi-criteria decision-making methods to improve natural hazard risk assessment and support sustainable adaptation strategies, enhancing infrastructure planning and community resilience to extreme weather events.

Keywords: Flooding, Erosion, RUSLE, Extreme Rainfall, AHP, Boussellam and K'sob Watersheds.

Sommaire

	Page
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur l'érosion et l'inondation	
1.1 Introduction.....	6
1.2. Définition de l'érosion hydrique	6
1.3. Les processus et origine de l'érosion hydrique	6
1.3.1 Détachement des particules de sol.....	7
1.3.2. Transport des particules de sol	8
1.3.3. La sédimentation	9
1.4. Les différentes formes d'érosion hydrique	9
1.5. Conséquences de l'érosion hydrique	11
1.6. Causes d'érosion et facteurs de résistance du milieu	12
1.7. L'impact de l'érosion à l'échelle Mondiale	14
1.8. Approches d'évaluation de l'érosion hydrique	15
1.8.1 Mesures sur le terrain	15
1.8.2 Mesures physiques	15
1.8.3. Utilisation de systèmes de télédétection et d'information géographique pour évaluer l'érosion hydrique	16
1.8.4 La modélisation	16
1.9. Rappel Bibliographique des travaux sur l'érosion en Algérie	22
1.10. Inondation	23
1.10.1. Cause des inondations	23
1.10.2. Effets des inondations	24
1.10.3. Type des inondations	25
1.10.3.1 Les inondations littorales ou submersions marines	25
1.10.3.2 Les inondations de plaine et torrentielles	26
1.11. Aléa	26
1.12. Vulnérabilité	27
1.13. Risque	28
1.14. Historique des inondations dans le monde et en Algérie	31
1.15. Gestion du risque d'inondation	33
1.15.1. Les méthodes de prévision des crues	34

1.15.1.1. Méthodes statistiques et empiriques	34
1.15.1.2. Modèles hydrologiques déterministes	34
1.15.1.3. Modèles hydrauliques.....	34
1.15.1.4. Modèles de prévisions couplées	34
1.15.1.5. Utilisation des systèmes d'information géographique (SIG)	35
1.15.1.6. Prévision par assimilation de données	35
1.16. Les crues	36
1.16.1 Le processus de formation des crues	36
1.16.2 La période de retour de crues	37
1.16.3 Mesures techniques de protection contre les inondations	38
1.17. Rappel Bibliographique des travaux sur les inondations	39
1.18. Conclusion	42

Chapitre 2. Description de la zone d'étude

2.1. Introduction	43
2.2. Un aperçu historique de la zone d'étude	43
2.2.1. Bassin versant de l'oued Boussellam	44
2.2.2. Bassin versant de l'oued K'sob	46
2.3. Géologie de la zone d'étude	47
2.3.1 Géologie du bassin versant de l'oued K'sob	47
2.3.2 Géologie du bassin versant de l'oued Boussellam	48
2.3.2.1. Contexte géologique régional	48
2.3.2.2. Types de roches	48
2.3.2.3. Structures tectoniques	49
2.4 Sols et végétation de la zone d'étude	50
2.4.1.1 Type de sols de bassin versant de l'oued K'sob	50
2.4.1.2 Type de sols de bassin versant de l'oued Boussellam	51
2.4.2.1 Couvert végétal du bassin versant de l'oued K'sob	52
2.4.2.2 Couvert végétal du bassin versant de l'oued Boussellam	52
2.5. Analyse des pentes	53
2.5.1 Pentés du bassin versant de l'oued k'sob	54
2.5.2 Pentés du bassin versant de l'oued Boussellam	55
2.6. Les caractères physiques et morphologiques	57
2.6.1 La forme K	57

2.6.2 Le rectangle équivalent	58
2.6.3 Caractéristiques des hypsométries	59
2.6.4 Caractéristiques des altitudes	61
2.6.5 Dénivelée simple	62
2.7 Caractéristiques des indices des pentes	62
2.7.1 Indice de pente globale I_g	62
2.7.2 Dénivelée spécifique D_s	63
2.8 Caractéristiques du réseau hydrographique	64
2.8.1 Organisation et classification du réseau hydrographique.....	64
2.8.2 La pente moyenne brute du cours d'eau principal	65
2.8.3 La longueur du cours d'eau principal	65
2.8.4 La densité de drainage	66
2.8.5 La densité hydrographique	66
2.8.6 Le coefficient de torrentialité	67
2.8.7 Temps de concentration	67
2.8.8 Vitesse d'écoulement de l'eau.....	68
2.9 Conclusion.....	69

Chapitre 3 : Analyse des précipitations dans les bassins versants de K'sob et de Boussellam

3.1 Introduction.....	71
3.2 Données des stations pluviométriques	71
3.3 Variabilité des précipitations.....	72
3.3.1 Précipitations moyennes annuelles	73
3.3.2 Précipitations maximales journalières moyennes	73
3.4 Choix de la loi d'ajustement	74
3.4.1 Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel (Méthode des moments).....	75
3.4.2 Ajustement des pluies annuelles à la loi de loi Gauss	83
3.5 Situation climatique).....	84
3.5.1 Température	84
3.5.1.1 La température dans le bassin de l'oued k'sob.....	84
3.5.1.2 La température dans le bassin de l'oued Boussellam	85
3.5.2 Les vents	86
3.5.2.1 Les vents dans le bassin de l'oued k'sob	86

3.5.2.2 Les vents dans le bassin de l'oued Boussellam	87
3.5.3 L'humidité relative	87
3.6 Conclusion	88

Chapitre 4. Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique

4.1 Introduction	89
4.2 Présentation des modèles	89
4.2.1 Processus Hiérarchique Analytique (AHP).....	89
4.2.1.1. Étapes du Modèle AHP	90
4.2.2 Analyse Floue des Processus Hiérarchiques (FAHP).....	92
4.2.2.1. Les composantes de base du FAHP	93
4.2.2.2. Étapes du Modèle FAHP	94
4.2.3 Équation universelle révisée de perte en terre (RUSLE).....	95
4.2.4 Méthode D'érosion Estimée (EPM)	96
4.2.4 Source de données et préparation des couches géo spatiales	97
4.2.5 Modélisation spatiale de la vulnérabilité à l'érosion des sols	116
4.2.7 Validation et Évaluation de la Performance de la Carte d'Érosion des Sols	117
4.3 Carte de sensibilité à l'érosion	119
4.3.1 Processus Analytique Hiérarchique (AHP).....	119
4.3.2 Analyse Floue des Processus Hiérarchiques (FAHP).....	122
4.3.3 Équation Universelle Révisée des Pertes en terre (RUSLE et EPM).....	125
4.4 Validation des résultats.....	126
4.5. Conclusion.....	129

Chapitre 5 : Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

5.1 Introduction.....	130
5.2 Méthodologie	130
5.2.1 Hypothèses et limites	132
5.2.2 Traitement des données	132
5.3 Facteurs de conditionnement des inondations	133
5.4 Le processus de hiérarchisation analytique (AHP).....	144
5.5 Modèle Fuzzy AHP	147
5.6 Vérification et évaluation de l'efficacité des cartes de sensibilité pour les zones inondables	147
5.7 Résultats et discussion	149
5.7.1 Modèle Processus analytique hiérarchique	149

5.7.2 Modèle Fuzzy AHP	153
5.7.3 Validation	156
5.7.4 Comparaison des prévisions du modèle avec les données historiques sur les inondations	157
5.8 Conclusions	159
Conclusion Générale et perspectives	160
Références bibliographiques	164

Lite des figures

	Page
Figure 1.1. Processus de l'érosion hydrique.....	7
Figure 1.2. L'effet des gouttes de pluie sur les particules du sol (effet seplash).....	7
Figure 1.3: mode de transporte des particules dans les cours d'eau.....	9
Figure 1.4. Érosion en nappe dans la zone d'étude.....	10
Figure 1.5. Érosion linéaire.....	11
Figure 1.6 – L'aléa.....	26
Figure 1.7 – Vulnérabilité.....	27
Figure 1.8 Définition du risque d'inondation.....	28
Figure 1.9 Courbe d'iso risque.....	29
Figure 1.10 Répartition des zones inondables dans le monde.....	31
Figure 2.1. Localisation de la zone d'étude.....	44
Figure 2.2. Situation géographique de bassin versant de L'Oued Boussellam.....	45
Figure 2.3. Situation géographique de bassin versant de l'Oued K'sob.....	47
Figure 2.4. Carte géologique de la zone d'étude.....	50
Figure 2.6. Carte des types de sols de la zone d'étude.....	51
Figure 2.7. Carte de l'occupation du sol dans la zone d'étude	53
Figure 2.8. Carte des pentes du bassin versant de l'oued k'sob.....	54
Figure 2.9. Répartition des classes de pentes sur le bassin versant de l'oued k'sob.....	55
Figure 2.10. Carte des pentes du bassin versant de l'oued Boussellam.....	56
Figure 2.11. Répartition des classes de pentes sur le bassin versant de l'oued Boussellam.....	56
Figure 2.12. Courbes hypsométriques des deux bassins versants.....	60
Figure 2.13 : Réseau hydrographique des bassins versants.....	65
Figure 3.1. Précipitations moyennes annuelles.....	73
Figure 3.2. Précipitations maximales journalières.....	74
Figure 3.3. Ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Bordj Ghdir (050904).....	78
Figure 3.4. Ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Sidi Yahia (150904).....	79
Figure 3.5. Pente de la ligne d'ajustement (Gd).....	80
Figure 3.6. Valeurs P_0 (Position paramètre in mm) pour chaque station.....	81
Figure 3.7. Cartes des précipitations pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000 ans, moyenne annuelle).....	82
Figure 3.8. Distribution des précipitations annuelles moyennes dans la zone d'étude.....	84
Figure 3.9. Évolution mensuelle des températures horaires à la station de Bordj Bou Arreridj (1990-2010).....	85
Figure 4.1. Cartes des précipitations pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000	99

ans).....	
Figure 4.2. Distribution spatiale des paramètres RUSLE : (a) facteur R, (b) facteur P, (c) facteur LS, (d) facteur K, et (e) facteur C.....	103
Figure 4.3. Distribution spatiale des paramètres EPM : (a) facteur T, (b) facteur Z, (c) facteur Xa, (d) facteur Y, (e) facteur ϕ , et facteur Ja.....	108
Figure 4.4. Distribution régionale des paramètres sélectionnés pour l'effet de la zone d'érosion du sol : (a) Élévation, (b) Pente, (c) Aspect, (d) Courbure, (e) LULC, (f) Densité de drainage.....	113
Figure 4.5. Distribution spatiale des paramètres sélectionnés pour l'effet de la zone d'érosion du sol : (a) (NDWI), (b) (NDVI), (c) Lithologie, (d) Erosivité des précipitations (k) Sol.....	115
Figure 4.6. Méthodologie utilisée dans l'étude.....	117
Figure 4.7. Points de validation sur l'image de Google Earth.....	119
Figure 4.8: Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour diverses cartes de spatiale des zones à risque d'érosion du sol à l'aide du modèle AHP.....	120
Figure 4.8. Cartes de la distribution spatiale des zones à risque d'érosion du sol aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide du modèle AHP.....	121
Figure 4.10: Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour diverses cartes de spatiale des zones à risque d'érosion du sol à l'aide du modèle FAHP.....	123
Figure 4.11. Cartes de la distribution spatiale des zones à risque d'érosion du sol aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide du modèle FAHP.....	124
Figure 4.12.a. Cartographie spatiale des zones à risque d'érosion des sols dans les sous-bassins versants à l'aide du modèle RUSLE.....	126
Figure 4.12.b. Cartographie spatiale des zones à risque d'érosion des sols dans les sous-bassins versants à l'aide du modèle EPM.....	127
Figure 4.13. Courbe ROC pour chacun des trois modèles de susceptibilité (RUSLE, EPM, AHP et FAHP).....	128
Figure 5.2. Cartes des différents éléments qui influencent la sensibilité des zones inondables : (a) Élévation, (b) Pente, (c) Densité de drainage (d) Distance à la rivière, (e) LULC.....	138
Figure 5.2. Cartes des différents éléments qui influencent la sensibilité des zones inondables : (f) Indice d'humidité topographique (TWI), (g) Lithologie, (h) Courbure (Cu), (j) Indice de végétation par différence normalisée, (NDVI) (k) Indice d'eau par différence normalisée modifié.....	142
Figure 5.3. Représentation schématique de la procédure générale de cartographie de la sensibilité aux inondations pour différentes périodes de retour.....	144

Figure 5.4. Données d'inventaire des inondations pour la zone d'étude.....	148
Figure 5.5. Cartes de la sensibilité des zones inondables aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide du modèle AHP...	151
Figure 5.6 : Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour différentes cartes de sensibilité des zones inondables à l'aide du modèle AHP.....	152
Figure 5.7. Cartes de la sensibilité des zones inondables aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide de l'algorithme FAHP modal.....	155
Figure 5.8. Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour diverses cartes de sensibilité des zones inondables à l'aide de FAHP.....	155
Figure 5.9. Courbes ROC pour vérifier la fiabilité des modèles de sensibilité (AHP, FAHP)...	157
Figure 5.10. Photos illustrant les impacts de diverses inondations ayant touché la ville de Bordj Bou Arreridj, située dans la zone d'étude.....	158

Liste des tableaux

	Page
Tableau 1.1 : Formes d'érosion hydrique	11
Tableau 1.2: Méthodes d'estimation des crues du type de données et des objectifs.....	35
Tableau 2.1 : Classification des pentes	54
Tableau 2.2 : Résultats des Indices de Forme des Deux Bassins Versants Étudiés.....	58
Tableau 2.3 : Altitudes et surfaces cumulées des bassins versants	59
Tableau 2.4 : Répartition des altitudes des deux bassins versants étudiés	61
Tableau 2.5 : La dénivelée (D) entre les altitudes H95% et H5% des deux bassins versants étudiés	62
Tableau 2.6. Classification du relief selon Ig de l'O.R.S.T.O.M.....	62
Tableau 2.7 : Classification du relief selon Ds	63
Tableau 2.8 : Synthèse des caractéristiques géométriques et hydromorphométriques des deux bassins versants	68
Tableau 3.1 : Stations pluviométriques des bassins versants de l'oued K'sob et de l'oued bousellam.....	71
Tableau 3.2 : Résultats de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Bordj Ghdir (050904).....	75
Tableau 3.3 : Résultats du test Khi –deux.....	76
Tableau 3.4 : Résultats de l'ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Sidi Yahia (150904).....	77
Tableau 3.5 : Résultats du test Khi –deux.....	77
Tableau 3.6 : Valeurs moyennes pour les données de chaque station.....	78
Tableau 3.7 : Valeurs moyennes pour les données de chaque station.....	82
Tableau 3.8 : Températures moyennes mensuelles en degrés Celsius corrigées de la région d'étude.....	85
Tableau 3.9 : Vitesses des vents moyennes mensuelles interannuelles [1980-2009] (station de BBA).....	85
Tableau 3.10 : Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003).....	86
Tableau 3.11 : Humidité relative (%) enregistrée en 2003.....	87
Tableau 4.1. Échelle d'importance relative de la construction de la matrice par paire de l'AHP	90
Tableau 4.2. Matrice des comparaisons par paire et pondération des paramètres géophysiques et de vulnérabilité dans AHP.....	91
Tableau 4.3. Échelle d'importance relative de la construction de la matrice par paire de FAHP	93
Tableau 4.4. Sources d'information et méthodes utilisées pour créer des couches de données thématiques.....	96

Tableau 4.5. : (Xa) en fonction de l'occupation du sol par la végétation.....	104
Tableau 4.6. : Valeurs du coefficient EPM du coefficient d'érosion.....	106
Tableau 4.7. Précision de la valeur AUC.....	117
Tableau 4.8. Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude en utilisant le modèle AHP pour différentes périodes de retour.....	121
Tableau 4.9. Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude en utilisant le modèle FAHP pour différentes périodes de retour.....	122
Tableau 5.1. Sources d'information et méthodologies employées pour générer des couches de données thématiques.....	131
Tableau 5.2. Poids des paramètres de vulnérabilité et des paramètres géophysiques dans la méthode AHP et matrice pour les comparaisons par paire.....	144
Tableau 5.3 Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude à l'aide du modèle AHP pour différentes périodes de retour.....	149
Tableau 5.4. Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude à l'aide du modèle FAHP pour différentes périodes de retour.....	152

Introduction Générale

Introduction Générale

La dégradation des terres due à l'érosion des sols est l'un des problèmes environnementaux les plus graves de notre époque. Ce phénomène est un processus graduel qui élimine d'abord la couche superficielle la plus fertile, entraînant une diminution de la productivité au fil du temps à des taux qui ne sont pas perceptibles, mais qui affectent de manière significative la durabilité des sols et des ressources naturelles (Scholten et Seitz 2019). Des facteurs tels que le taux de précipitations, la rugosité de la surface, l'état des cultures et la couverture végétale sont des déterminants clés de la gravité de l'érosion du sol, qui peut être classée en trois catégories : légère, modérée ou grave (Liu, Chen et al. 2001). L'intensité, la durée, la fréquence et l'ampleur des précipitations influencent à la fois la production de ruissellement et la production de sédiments (dos Santos, de Andrade et al. 2017). On s'attend à ce que les tempêtes de pluie fréquentes et violentes constituent une menace croissante pour de nombreuses régions dans un avenir proche. Les sols agricoles font partie des écosystèmes les plus vulnérables à cette menace, en raison de l'impact des fortes précipitations, notamment sur les surfaces nues, ce qui accroît les taux d'érosion des sols et nuit à leur fertilité ainsi qu'à leur durabilité (Marzen, Iserloh et al. 2017). Par ailleurs (Mostephaoui, Merdas et al. 2013) ont souligné que l'Algérie est confrontée à une menace croissante de désertification et d'érosion hydrique à grande échelle, avec environ 50 millions d'hectares exposés à ce phénomène, dont près de 14 millions d'hectares situés en zones montagneuses, ce qui reflète l'ampleur des défis environnementaux auxquels le pays est confronté.

Malgré les grands défis auxquels l'Algérie est confrontée en termes d'érosion hydrique, le risque d'inondation est considéré comme plus grave, car il affecte directement de nombreuses villes, menaçant des vies et des biens. Ce phénomène a créé un état d'anxiété même dans les sociétés développées, en raison de la sous-estimation de ses risques et de l'absence de mesures suffisantes pour en atténuer les effets. Ce problème est exacerbé par le changement climatique, qui a entraîné des fluctuations imprévisibles des régimes pluviométriques, rendant plus difficile la prévision des inondations et renforçant la nécessité d'élaborer des stratégies de gestion et d'adaptation efficaces. L'Algérie est confrontée à des défis similaires à ceux que connaissent de nombreux pays dans le monde en ce qui concerne les inondations dévastatrices. Il est essentiel de comprendre l'évolution de l'intensité, de la fréquence et de l'impact des inondations pour minimiser leurs conséquences sociales, économiques et environnementales. Cela implique l'adoption de stratégies intégrées d'atténuation des risques, le renforcement des systèmes d'alerte

précoce et l'amélioration de la planification urbaine et des infrastructures pour faire face à ce phénomène de manière plus efficace (Zekouda, Meddi et al. 2020).

Selon Madi, Hafnaoui et al. 2020, la période entre 2010 et 2022 en Algérie a été caractérisée par une augmentation de la fréquence des inondations, mais s'est accompagnée d'une diminution du nombre de victimes par rapport aux périodes précédentes. Cette diminution ne signifie pas nécessairement que l'Algérie a pris toutes les mesures pour faire face au risque d'inondation, mais plutôt que ces phénomènes climatiques augmentent en intensité, ce qui en fait une menace croissante pour le pays dans un avenir proche.

Cette menace a été soulignée par les récentes inondations dans la ville de Bechar, qui sont survenues de manière inattendue, apparemment de nulle part, et qui auraient pu entraîner de lourdes pertes humaines. Ces phénomènes météorologiques extrêmes reflètent l'aggravation des effets du changement climatique, car ils augmentent en intensité et en fréquence à un rythme imprévisible, ce qui rend difficile la prévision ou le contrôle de leurs répercussions. La plupart des recherches scientifiques indiquent que ces phénomènes hydrométéorologiques deviendront plus complexes dans les années à venir en raison du changement climatique mondial, ce qui appelle à renforcer les politiques d'adaptation et d'atténuation, ainsi qu'à améliorer les systèmes d'alerte précoce et à planifier les villes selon des critères plus durables pour faire face à ces risques croissants.

Au cours des dernières décennies, les chercheurs ont déployé des efforts considérables pour minimiser les phénomènes naturels destructeurs, en particulier l'érosion hydrique et les inondations, qui constituent une menace croissante pour les environnements naturels et les sociétés humaines. Les premiers chercheurs se sont concentrés sur l'étude des facteurs qui exacerbent ces phénomènes et sur le développement de modèles physiques scientifiquement fondés pour les simuler et les prévoir. Au fil du temps, ces modèles ont considérablement évolué, contribuant à la création de nouveaux mécanismes de recherche et au développement d'outils plus efficaces pour minimiser l'impact de ces phénomènes.

Dans le domaine de l'érosion hydrique, plusieurs modèles ont été développés qui ont permis d'analyser les taux de perte de sol et d'identifier les zones les plus vulnérables. Parmi ces modèles, le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) est largement utilisé dans le monde entier pour estimer les taux d'érosion des sols. Avec le développement continu du domaine de la modélisation, certains de ses paramètres physiques ont été modifiés pour devenir RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), un modèle plus précis et plus efficace pour évaluer les risques d'érosion hydrique. Cette évolution a permis à de nombreux chercheurs en Algérie,

comme (Mokhtari 2017, Benselama, Mazour et al. 2018, Fredj, Redhouane et al. 2024, Mokhtari, Djeddou et al. 2024, Zeghmar, Mokhtari et al. 2024) , de mener des études avancées sur les taux de perte de sol et l'impact de différents facteurs sur l'érosion des sols.

En ce qui concerne les inondations, de nombreux chercheurs ont cherché à développer des modèles et des logiciels spécialisés pour analyser les risques d'inondation et atténuer leurs effets. L'un des outils les plus connus est HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre's River Analysis System), qui est largement utilisé pour simuler l'écoulement de l'eau dans les rivières et identifier les zones les plus vulnérables aux inondations. Les études de (Brunner 1994, Derdous, Djemili et al. 2015, Abdessamed et Abderrazak 2019, Issam, Khadzhidi et al. 2019, Abdelghani 2023) ont montré l'importance de ce logiciel dans l'évaluation des risques hydrologiques et la planification des projets de protection contre les inondations.

Malgré d'importants efforts scientifiques, les résultats obtenus n'ont pas encore atteint le niveau requis pour réduire efficacement les risques d'érosion hydrique et d'inondation. Cette situation s'explique par plusieurs facteurs, notamment le manque de données de terrain précises, qui constitue l'un des principaux obstacles à l'obtention de résultats fidèles à la réalité.

Face à ces défis, certains chercheurs ont adopté de nouvelles approches pour le traitement et l'analyse des données, notamment la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), devenus des outils indispensables dans l'étude des phénomènes hydrométéorologiques. L'intégration de modèles d'analyse décisionnelle multicritères (MCDA) a également permis d'améliorer la précision des prévisions des risques en prenant en compte simultanément plusieurs facteurs d'influence.

Avec l'accélération du changement climatique et l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, le développement de modèles plus sophistiqués et l'intégration de l'intelligence artificielle ainsi que de l'apprentissage automatique dans l'analyse des données climatiques et hydrologiques deviennent de plus en plus indispensables. L'avenir des études sur l'érosion et les inondations repose sur des approches multidisciplinaires combinant données géographiques, modélisation numérique et intelligence artificielle afin d'approfondir la compréhension de ces phénomènes et d'élaborer des stratégies d'adaptation plus efficaces pour réduire les risques qu'ils représentent pour les sociétés et l'environnement.

À la lumière du changement climatique rapide et de la fréquence croissante des phénomènes hydrologiques extrêmes, de nombreux chercheurs au niveau local ont adopté des modèles multicritères pour la cartographie spatiale, afin d'identifier les zones les plus

vulnérables aux inondations et à l'érosion hydrique. Parmi eux, (Mihi, Benarfa et al. 2020, Bouamrane, Bouamrane et al. 2021) ont cartographié l'érosion hydrique, tandis que (Goumrassa, Guendouz et al. 2021, Bouamrane, Derdous et al. 2022) se sont intéressés à la cartographie des zones sujettes aux inondations. Leurs travaux ont contribué à une meilleure compréhension de ces phénomènes et ont fourni des outils plus précis pour l'évaluation des risques.

Avec l'aggravation des effets du changement climatique et l'évolution des modèles scientifiques d'analyse des risques naturels, une étude approfondie de l'érosion hydrique et des inondations, tenant compte des principaux facteurs d'influence, est indispensable. Parmi ces facteurs, l'intensité et la quantité des fortes précipitations jouent un rôle déterminant en tant que moteurs principaux de ces phénomènes.

Pour répondre à cet enjeu, une méthodologie intégrée a été élaborée. Elle repose notamment sur la création de cartes permettant d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion et aux inondations. Ces cartes constituent un outil stratégique pour orienter efficacement les efforts d'atténuation et d'adaptation vers les zones les plus exposées, contribuant ainsi à une gestion plus proactive et ciblée des risques.

Cette étude est structurée en cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'érosion hydrique et les inondations. Il examine les divers facteurs, naturels et anthropiques, qui amplifient ces phénomènes, ainsi que les techniques d'évaluation et les méthodes de mesure employées à l'échelle mondiale. En outre, il passe en revue les principaux modèles mathématiques et approches empiriques utilisés pour leur étude dans divers contextes géographiques.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, en offrant une description détaillée de ses caractéristiques topographiques, géologiques, géographiques et climatiques. Il analyse également les facteurs influençant son comportement hydrologique, tels que la nature des roches, le type de sol, l'occupation des terres et les gradients topographiques. Cette analyse permet de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement des eaux de surface et des dépôts sédimentaires, facilitant ainsi une évaluation plus précise des risques d'érosion et d'inondation.

- Le troisième chapitre est dédié à l'analyse des précipitations à l'échelle des sous-bassins versants étudiés, afin de mieux comprendre leur variabilité spatiale et temporelle ainsi que leur impact sur l'hydrologie de la région.
- Le quatrième chapitre traite de l'application des modèles d'érosion hydrique, en combinant le modèle RUSLE avec des approches multicritères empiriques, telles que l'AHP et le FAHP, dans l'environnement Arc GIS. Cette méthodologie permet de générer des cartes de sensibilité à l'érosion hydrique pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 50, 100 et 1000 ans), offrant ainsi une évaluation plus précise des zones à risque.
- Le cinquième chapitre est dédié à l'application des mêmes modèles que ceux du chapitre 4, cette fois pour la cartographie des inondations. Les techniques de télédétection et de SIG sont employées afin d'identifier les zones les plus exposées aux inondations dans les bassins versants étudiés. La sensibilité de ces zones est évaluée en fonction de divers facteurs topographiques, géologiques et climatiques, permettant ainsi une classification précise des zones vulnérables. Cette analyse facilite la prise de décisions stratégiques pour atténuer les effets des inondations et protéger les espaces urbains et agricoles.

Enfin, la conclusion générale synthétise les principaux résultats de l'étude et propose des perspectives de recherche, soulignant que l'ampleur de cette thématique ouvre la voie à de nombreux développements futurs.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique sur l'érosion et l'inondation

Chapitre 1. Synthèse bibliographique sur l'érosion et l'inondation

1.1 Introduction

L'érosion des sols due aux précipitations et au ruissellement est un phénomène fréquent dans les régions méditerranéennes, particulièrement sur les pentes vulnérables en raison des précipitations intenses, des sols fragiles, des terrains raides et de l'impact des activités agricoles. En Tunisie, 45 % de la superficie totale est menacée (Chevalier, 1995 ; Boussama, 1996), au Maroc, 40 % (Celik, 1996) et en Algérie, 45 % des zones telliennes, soit 12 millions d'hectares (Chebbani, 1999). Face à l'aggravation de ces dégâts, de nombreuses recherches ont été menées pour comprendre les processus d'érosion et leurs interactions avec d'autres phénomènes comme les inondations.

Les inondations, déclenchées par des pluies intenses et parfois aggravées par l'érosion des sols, comptent parmi les catastrophes naturelles les plus répandues à l'échelle mondiale. Cette section explore les notions clés liées au risque d'inondation, tout en mettant en évidence les stratégies de prévention et de protection pour réduire leurs impacts sur les communautés et garantir la sécurité des populations exposées.

1.2. Définition de l'érosion hydrique

Parmi les phénomènes naturels qui menacent les particules de sol, il y a le phénomène de l'érosion du sol. Le verbe "ERODERE", qui signifie manger ou roder, creuser, est la source du mot latin érosion. En géologie, le terme "érosif" a été utilisé à l'origine pour décrire le processus par lequel l'eau forme des creux et use la matière solide en raison de la force des rivières. . (Zachar 2011) Le phénomène d'érosion se produit également lorsque des précipitations intenses surviennent sur un sol très sec, provoquant le déplacement des particules du sol jusqu'à ce que le sol devienne saturé en eau en raison de l'intensité des précipitations. Une fois que les particules de sol se détachent et que le sol est entièrement saturé d'eau, un ruissellement de surface se forme. Cela entraîne le déplacement des particules depuis les zones élevées vers les zones de concentration et d'accumulation des eaux. Pendant ce transport, le phénomène d'érosion du sol se produit, créant des tranchées entre les particules de sol.

1.3. Les processus et origine de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est principalement due aux fortes précipitations qui provoquent un ruissellement de surface. Il s'agit d'un ensemble de processus interdépendants qui se présentent sous la forme de trois étapes : le détachement, le transport et le dépôt (Figure 1.1).

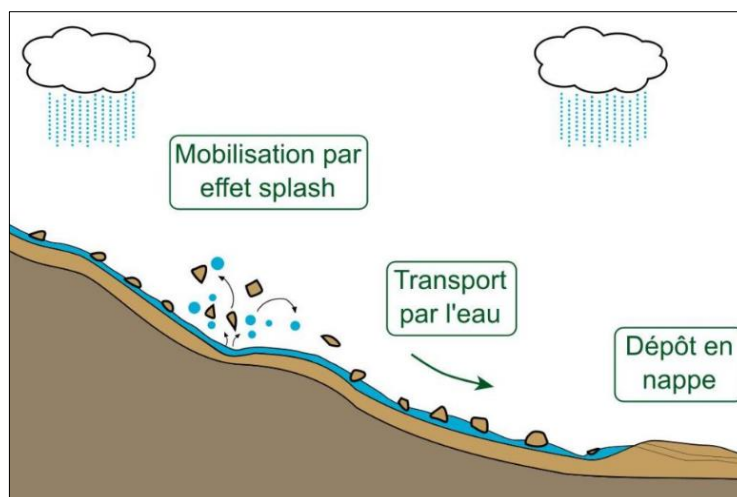


Figure 1.1. Processus de l'érosion hydrique

Source : (<https://www.grandcalais.fr/semaine-eau-erosion-ruissellement/>)

I.3.1 Détachement des particules de sol

Les gouttes de pluie ont l'énergie nécessaire pour décomposer les particules de la surface du sol. Il est possible de déplacer de très grandes quantités de terre à la surface du sol, ce qui entraîne une réorganisation structurale sans nécessairement entraîner d'érosion à ce stade. (Le Bissonais 2000). L'exposition prolongée aux fortes précipitations affaiblit grandement le sol. Le sol est également altéré par différents processus, tels que des altérations mécaniques, des mouillages et des séchages alternatifs, le gel et le dégel, ainsi que l'action du gel, ainsi que des altérations biochimiques. Le travail du sol et le piétinement des humains et du bétail perturbent le sol. L'eau en mouvement et le vent contribuent également à la séparation des particules du sol. Toutes ces étapes améliorent la surface du sol pour qu'elle puisse être facilement éliminée par les agents de transport. (Morgan 2009).



Figure 1.2. L'effet des gouttes de pluie sur les particules du sol (effet splash)

1.3.2. Transport des particules de sol

Lorsque le sol est en pente, la formation d'un excès d'eau en surface et le ruissellement entraînent l'émergence de nouveaux processus et le transfert de particules en suspension. Une érosion diffuse du versant est causée par ce transfert de particules qui décape progressivement la surface des sols.(Le Bissonais 2000). Après le phénomène de ruissellement de surface, le transport des particules de sol séparées jusqu'au lieu de dépôt se produit, ce qui se traduit par la disponibilité de deux facteurs, l'eau et la pente, et par une diminution de l'influence de l'un des facteurs, les particules transportées étant éliminées. Une action cisailant sur les grains de surface est exercée par l'écoulement de l'eau sur le sol, d'autant plus forte que la vitesse du courant est augmentée. La résistance au détachement de ses grains superficiels est offerte par le sol, ce qui peut être considéré comme une forme de résistance au cisaillement.(El Hadj Mokhtari 2017)

Il est donc important de souligner que le ruissellement de surface a deux fonctions dans l'érosion de l'eau. Dans un premier temps, il a pour fonction de former des poches à la surface du sol remplies d'eau lors du frottement, et de séparer les particules du sol les unes des autres. Les particules qui avaient été séparées par d'autres facteurs sont balayées et déplacées d'un endroit à un autre.

Selon un document préparé par par Mme Kabour Chebbah (Université de Mila), on peut dire que les particules peuvent être déplacées dans un fluide en mouvement de trois façons : par traction, par saltation et en suspension. Le déplacement des particules dans un fluide dépend de leur taille, de la turbulence du fluide et de sa viscosité. Trois types ont été identifiés.

- ✓ **En suspension** : l'écoulement ou l'impact des gouttes de pluie sur la lame d'eau provoque une turbulence qui maintient les particules fines en suspension. Ces particules fines sont alors transportées sur de grandes distances.
- ✓ **Par roulement** : Quand l'écoulement augmente, il est capable d'arracher des particules plus grosses, mais ne peut pas les suspendre. Ils sont roulés sur le fond par la force de l'écoulement.
- ✓ **Par saltation** : Quand les particules ont une grosseur moyenne, elles ont la capacité de se déplacer par sauts successifs (saltation). Ce phénomène revêt une importance particulière avec le vent.

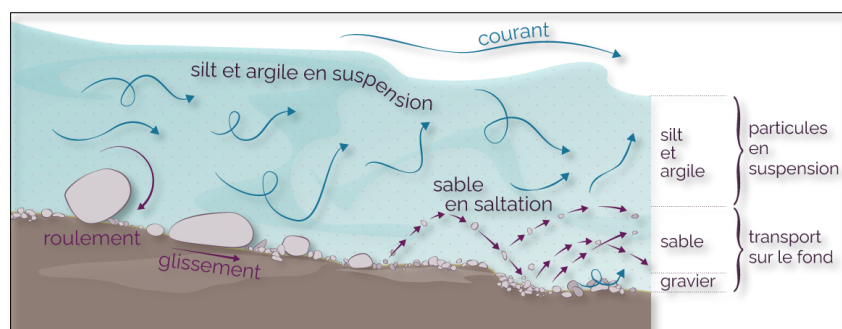


Figure 1.3: mode de transport des particules dans les cours d'eau

Source de l'image : (<https://www.maxicours.com/se/cours/transport-et-sedimentation-des-produits-de-l-alteration/>)

1.3.3. La sédimentation

Lorsque l'écoulement atteint le lieu de sédimentation et que le ruissellement de surface commence à diminuer, l'eau n'a plus la capacité de pousser ou de transporter les particules et devient de l'eau stagnante. À ce moment-là, les particules se déplacent. Les particules de grande taille commencent à se sédimenter et à fusionner et à se stabiliser elles-mêmes.

1.4. Les différentes formes d'érosion hydrique

L'érosion hydrique a des formes qui peuvent être identifiées et décrites comme indiqué ci-dessous.

➤ Érosion en nappe

Ce genre de détérioration du sol par l'eau survient lorsque les précipitations sont plus intenses que la capacité d'infiltration du sol et provoque la perte des particules de sol les plus fines qui renferment des nutriments et de la matière organique. Cela se produit habituellement après la formation de croûtes causée par l'étape précédente de dégradation du sol par l'eau. En cas d'absence de mesures appropriées, l'un des effets les plus préjudiciables de l'érosion en nappe sera la création de rigoles.

Le processus d'érosion en nappe se produit lorsque l'on enlève une fine couche de terre végétale sur tout un enclos à flanc de colline et peut être difficilement observé. Les gouttes de pluie vont s'écouler dans toutes les directions grâce à leur battance. Toutefois, en raison de la gravité, les gouttelettes se déplacent plus rapidement vers l'aval que vers l'amont. La moyenne de toutes les gouttelettes sera calculée, ce qui aura pour effet de diriger la vitesse de l'amont vers l'aval. Il en résulte la formation d'étangs, et l'eau non infiltrée se déplace d'un étang à l'autre, créant un écoulement en nappe.

L'érosion en nappe est influencée par l'intensité et la durée des précipitations, en raison de l'énergie des gouttes de pluie (effet de pulvérisation), qui entraîne la séparation des particules du sol, ce qui entraîne le ruissellement de surface lorsque l'intensité est plus élevée que le taux d'infiltration.



Photographie : Christophe Maître (INRA)

Figure 1.4. Érosion en nappe (Source - 1988 Christophe Maitre ([INRA](#)))

➤ Érosion linéaire, en griffes ou en rigoles

Lorsqu'elles descendent, les eaux de ruissellement tendent à se concentrer en ruisseaux. Cette eau présente une turbulence plus élevée ainsi qu'un effet de récurage supérieur à celui de l'écoulement en nappe. Elle creuse alors de petits canaux en érodant les berges et le lit des cours d'eau. On trouve souvent ces petits canaux entre les rangées de cultures et le long des marques de labour, mais certains canaux s'écoulent à travers les rangées de plantes et traversent les crêtes de labour à leur descente. On nomme ravins éphémères les canaux qui suivent la pente, car ils se forment souvent aux mêmes endroits dans les champs. (Troeh, Hobbs et al. 1980). Dans les ruisseaux sur les pentes incultes, le ruissellement de surface se produit aussi, bien que des rigoles sculptées bien définies ne se forment pas. L'écoulement de surface est souvent caractérisé par des tiges et des racines de plantes, des débris, des roches et des dépôts locaux qui forment une surface non lisse, ce qui conduit le ruissellement à se concentrer dans de petits canaux parmi les obstacles. (Evelpidou and Figueiredo 2009).



Figure 1.5. Érosion linéaire (Badlands dans les monts de Beni Chougrane, près de Mascara (Algérie). [Cliché : B. MORSLI])

Une érosion linéaire survient après les opérations de cisaillement et de ruissellement de surface, générant une morphologie croissante, formant de petits canaux qui peuvent être séparés en fonction de leur épaisseur, comme le montre le tableau (1.1).

Tableau I.01 : Types d'érosion hydrique (Roose 1994).

Profondeur	Appellation	Appellation
Quelques centimètres		Griffes
>10 cm		Rigoles
10 à 20 cm	quelques mètres de large	Nappe Ravinant
>50 cm		Ravines

➤ L'érosion en masse

L'érosion en masse se produit lorsque l'eau de surface pénètre et traverse le sous-sol dispersé. Le sol dispersé présente une structure si défectueuse qu'il s'effondre dès qu'il est mouillé. La masse d'érosion commence lorsque la surface de l'eau pénètre dans le sol à proximité de fissures, de canaux ou de cavités d'arbres anciens. Lorsque l'espace s'étend, plus d'eau peut s'écouler, ce qui entraîne l'érosion du sol et entraîne alors une chute spontanée dans une rotation (landslide). L'érosion de masse est fréquente à travers les cours d'eau, les cours d'eau et les systèmes de drainage, où les rives sont érodées, érodées ou sous-jacentes, créant des gouffres et des gouffres. En règle générale, l'érosion massive devient importante lorsque l'aménagement est inadéquat pour la nature ondulante des cours d'eau, lorsque les cours d'eau sont dirigés ou lorsque des structures riveraines sont situées.

1.5. Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un problème environnemental important avec toute une série de conséquences qui affectent la santé des sols, la productivité agricole, la qualité de l'eau et la stabilité des écosystèmes. Voici quelques-unes des principales conséquences :

- ✓ Dégradation des sols : L'érosion hydrique enlève la couche arable, qui constitue la couche la plus fertile. Cela entraîne une réduction de la fertilité et de la structure du sol, le rendant moins adapté à l'agriculture et à la croissance de la végétation.
- ✓ Perte de productivité agricole : à mesure que la couche arable est emportée par les eaux, la capacité des terres à supporter les cultures diminue. Cela peut entraîner une baisse des rendements et une augmentation des coûts pour les agriculteurs qui devront peut-être investir dans la restauration et la fertilisation des sols.
- ✓ Sédimentation dans les plans d'eau : Les sols érodés finissent souvent dans les rivières, les lacs et les réservoirs. Ces sédiments peuvent réduire la qualité des eaux, perturber les habitats aquatiques et diminuer la capacité des plans d'eau à stocker l'eau, ce qui peut contribuer aux inondations.
- ✓ Ruissellement de nutriments : Parallèlement au sol, l'érosion hydrique peut emporter les nutriments et la matière organique. Cela peut entraîner une pollution par les nutriments des plans d'eau, provoquant des problèmes tels que la prolifération d'algues et l'eutrophisation, qui affectent négativement la vie aquatique et la qualité de l'eau.
- ✓ Dommages aux infrastructures : L'érosion hydrique peut endommager les routes, les ponts et les bâtiments, entraînant des réparations coûteuses et des besoins d'entretien accrus.
- ✓ Modifications du paysage : L'érosion peut modifier le paysage physique, créant des ravins et modifiant les schémas de drainage. Cela peut modifier la façon dont l'eau s'écoule sur les terres, entraînant potentiellement une érosion plus grave et d'autres impacts environnementaux.
- ✓ Perte de biodiversité : à mesure que les habitats sont dégradés par l'érosion, les espèces végétales et animales peuvent être déplacées ou perdues, entraînant une réduction de la biodiversité.

L'érosion hydrique des sols a de nombreuses conséquences, que ce soit dans les zones érodées ou dans les zones de dépôt. Nous en avons évoqué quelques-unes en fonction de ([Lal 2001](#), [Boardman and Poesen 2007](#), [Montgomery 2007](#), [Pimentel and Burgess 2013](#)).

1.6. Causes d'érosion et facteurs de résistance du milieu

Les activités humaines accélèrent l'érosion, un processus naturel qui est influencé par différents facteurs. Les deux ([Nearing, Pruski et al. 2004](#), [Boardman and Poesen 2007](#), [Morgan 2009](#), [Pimentel and Burgess 2013](#)) décrivent les principales raisons de la corrosion de la manière suivante :

➤ **Eau:**

- ✓ Précipitations : Les pluies abondantes peuvent entraîner un ruissellement de surface, ce qui peut entraîner une érosion des sols. Ce processus est accentué par des tempêtes intenses et fréquentes.
- ✓ Rivières et ruisseaux : Les rivières peuvent être érodées par l'eau qui coule, ce qui entraîne le transport des sédiments en aval..

- **Vent** : Le vent peut soulever et emporter de fines particules de sol, en particulier dans les régions arides et semi-arides où la couverture végétale est clairsemée
- **Activités humaines**:
 - ✓ Déforestation : La suppression des arbres et de la végétation expose les sols à l'érosion.
 - ✓ Agriculture : Le labour, le surpâturage et l'élimination des résidus de récolte augmentent la vulnérabilité des sols.
 - ✓ Construction : L'aménagement du territoire et la construction perturbent le sol, le rendant plus sensible à l'érosion.
- **Changement climatique** : Les changements dans les régimes de précipitations et la fréquence accrue des événements météorologiques extrêmes peuvent accroître les taux d'érosion.
- **Température** : Les variations de température peuvent affecter l'humidité du sol et la végétation, influençant indirectement l'érosion. Par exemple, les cycles de gel et de dégel peuvent affaiblir la structure du sol.
- **Gravité** : Les processus de perte de masse, tels que les glissements de terrain, peuvent rapidement déplacer de grandes quantités de terre et de roches vers le bas des pentes.
- **Facteurs de résistance environnementale**

La résistance environnementale fait référence aux facteurs qui réduisent la susceptibilité du sol à l'érosion. Ces facteurs comprennent :

- ✓ **Couverture végétale** : Les plantes et leur système racinaire stabilisent le sol, réduisant ainsi son exposition aux forces érosives. La végétation ralentit également le débit de l'eau, permettant à davantage d'eau de s'infiltrer plutôt que de s'écouler.
- ✓ **Propriétés du sol** : (Texture du sol : Les particules d'argile et de limon se lient plus étroitement que les particules de sable, ce qui les rend moins sensibles à l'érosion.) - (Matière organique : Une teneur élevée en matières organiques améliore la structure du sol et l'infiltration de l'eau, réduisant ainsi le ruissellement et l'érosion).
- ✓ **Topographie** : Les pentes douces subissent moins d'érosion que les pentes raides. Les terrassements et le labour en courbes de niveau peuvent contribuer à réduire l'érosion sur les pentes.
- ✓ **Gestion de l'utilisation des terres** : Des pratiques comme le travail de conservation du sol, la rotation des cultures et l'entretien des bandes tampons le long des cours d'eau peuvent réduire considérablement l'érosion.

- ✓ **Humidité du sol** : Les sols humides sont généralement plus résistants à l'érosion éolienne, mais peuvent être plus sujets à l'érosion hydrique s'ils deviennent saturés et que le ruissellement se produit.
- ✓ **Climat** : Les régions aux climats stables et modérés ont tendance à avoir des taux d'érosion plus faibles que les régions aux conditions météorologiques extrêmes.

1.7. L'impact de l'érosion à l'échelle Mondiale

L'érosion de l'eau est un phénomène naturel qui affecte directement la surface de la Terre et comporte des dangers variés d'un endroit à un autre. La dégradation continue des sols représente un danger majeur pour la sécurité alimentaire dans de nombreux pays en développement, entraînant des dégâts aux terres arables, en augmentant le transport de sédiments dans les rivières et en contribuant à des problèmes tels que l'envasement des réservoirs des barrages. (Ganasri et Ramesh 2016), D'après ce qui a été mentionné par (Saha 2003, Ganasri et Ramesh 2016) on estime qu'environ 2 milliards d'hectares de la superficie totale des terres qui sont soumises à la dégradation des sols d'origine humaine. Par conséquent, on estime que la surface des terres touchées par la détérioration des sols causée par l'érosion est de 1100 hectares par érosion hydrique et 550 hectares par érosion éolienne.

Selon les auteurs (Benselama, Mazour et al. 2018, Fredj, Redhouane et al. 2024) Plusieurs niveaux de dégradation du sol ont été constatés à travers le monde. Elle est généralement comprise entre 10 et 20 tonnes ha^{-1} année $^{-1}$ en Europe. En revanche, sur les continents Asiatiques, Africain et sud-Américain, elle atteint généralement des valeurs situées entre 20 et 40 tonnes ha^{-1} an $^{-1}$. En particulier, en Afrique, les variations peuvent être très importantes, allant de 0 à 750 tonnes ha^{-1} année $^{-1}$, principalement en fonction de la pente, de la couverture terrestre et de l'intensité des précipitations.

Après avoir examiné diverses études, nous avons constaté que l'érosion est l'un des phénomènes naturels qui sont devenus récemment une menace à l'échelle mondiale et qui suscite des inquiétudes dans certaines régions du monde, en particulier dans le Maghreb arabe, où l'Algérie est l'un des pays les plus sensibles à l'érosion. Le bassin de l'isser présente une érosion modérée à très intense (>20 tonnes/hectare/an), ce qui représente 61,5% de la superficie du bassin de l'isser (Fredj, Redhouane et al. 2024). L'érosion caractéristique des sols dans le bassin versant de Wadi El Maleh est estimée à environ 294,29 tonnes/ km^2 /an. (Benselama, Mazour et al. 2019). L'érosion moyenne annuelle des sols dans le bassin versant du barrage de

Bani Haroun est estimée à 17,5 tonnes/hectare/an, selon les estimations (Zeghmar, Mokhtari et al. 2024) la perte annuelle estimée de sol dans l'oued Sahel-Soummam était d'environ 4,00 tonnes/hectare/an (Mokhtari, Djeddou et al. 2024).

1.8. Approches d'évaluation de l'érosion hydrique

Afin d'évaluer l'érosion hydrique de manière globale, différentes méthodes sont employées, chacune présentant ses propres bénéfices et ses applications adaptées. Les différentes techniques employées pour évaluer et cartographier l'érosion diffèrent selon les objectifs, les ressources et la portée du travail, ainsi que selon les échelles spatiales et temporelles. Étudié. On mesure directement l'érosion sur le terrain ou on l'estime en utilisant des analyses de sol, des modèles expérimentaux ou des analyses physiques. Les méthodes utilisées pour évaluer l'érosion hydrique sont présentées ci-dessous.

1.8.1 Mesures sur le terrain

- ✓ **Goupilles d'érosion** : Des tiges métalliques sont insérées dans le sol pour mesurer les changements de la surface du sol au fil du temps. La différence d'exposition des tiges indique l'ampleur de l'érosion ou des dépôts du sol.(Morgan 2009).
- ✓ **Pièges à sédiments** : Appareils ou conteneurs placés sur le terrain pour recueillir les sédiments transportés par l'eau. Les sédiments collectés sont ensuite mesurés pour déterminer les taux d'érosion.(Hudson 1993).
- ✓ **Parcelles de ruissellement** : petites zones contrôlées où le ruissellement de l'eau et la perte de sol sont mesurés lors d'événements pluvieux. Cette méthode aide à comprendre la relation entre l'intensité des précipitations, le type de sol et l'érosion.(Lal 1994).

1.8.2 Mesures physiques

Différentes formules et méthodes sont employées pour évaluer la corrosion de l'eau, en prenant en compte tous les paramètres physiques. Nous citerons les plus couramment employées.

- Formule de Henin "1950"
- Formule de Grailovic (1960)
- Formule de L'A.N.R.H (1970)
- Formule de Tixeront (1960)
- Formule de Fournier (1960)

1.8.3. Utilisation de systèmes de télédétection et d'information géographique pour évaluer l'érosion hydrique

Aujourd'hui, la télédétection et les SIG jouent un rôle essentiel dans l'évaluation de l'érosion hydrique en offrant des moyens sophistiqués pour la collecte, l'analyse et la représentation des données à grande échelle. Les images satellites et les photographies aériennes permettent de surveiller les changements de la surface terrestre au fil du temps, détectant ainsi les zones affectées par l'érosion hydrique (Campbell and Wynne 2011). Les SIG intègrent diverses sources de données (télédétection, mesures de terrain, données climatiques) pour analyser les facteurs et les impacts de l'érosion hydrique (Burrough, McDonnell et al. 2015). La télédétection est utilisée pour cartographier l'utilisation des terres et la couverture végétale, ce qui aide à identifier les zones sensibles à l'érosion en raison de la déforestation ou de pratiques agricoles inappropriées (Lillesand, Kiefer et al. 2015). Les indices tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) permettent d'évaluer la densité et la santé de la végétation, qui joue un rôle crucial dans la protection des sols contre l'érosion (Tucker 1979). Dans cette optique, « on utilise la méthode de télédétection et des SIG pour évaluer l'érosion de manière spatiale, ainsi que pour intégrer les différentes informations et cartographier les résultats ». (El Garouani, Merzouk et al. 2003).

Finalement, l'emploi des systèmes d'information géographique et des outils de télédétection est perçu comme l'un des moyens contemporains de gérer les risques naturels et de produire des cartes détaillées d'un phénomène donné, car ils ont démontré leur efficacité, car les efforts, l'argent et le temps ont été consacrés. Grâce à eux, les cartes créées avec ces deux outils ont acquis une puissance considérable pour prendre des décisions en réponse et en surveillance de certains phénomènes naturels qui représentent une menace à long terme, tels que l'érosion hydrique.

1.8.4 La modélisation

Il est crucial de réaliser une modélisation de l'érosion hydrique afin de saisir, anticiper et gérer les mécanismes d'érosion des sols causés par l'eau. Les estimations quantitatives de l'érosion sont fournies, elles permettent de repérer les zones à risque et soutiennent la planification et la mise en place de mesures de préservation des sols. En l'absence des informations requises, de nombreux modèles sont employés pour représenter l'érosion de l'eau. Grâce à ces divers modèles, il est possible d'évaluer les niveaux de corrosion, de repérer les zones à risque et de développer des stratégies de préservation. Les principaux modèles utilisés pour modéliser l'érosion hydrique sont présentés ci-dessous :

USLE (Universal Soil Loss Equation)

La modélisation est récemment devenue un outil clé pour la prise de décision et l'élaboration des stratégies de conservation des sols en vue de réduire l'érosion hydrique, considérée comme un résultat inévitable parmi un ensemble de variables liées dans l'espace et le temps. Après des tests d'érosion sur le terrain en Amérique du Nord dans divers États, la modélisation a été utilisée pour comprendre les modèles d'érosion des sols et les éléments qui influencent les taux d'érosion. Ces évaluations apportent des informations précieuses pour la gestion des ressources en terres et en eau, la prévention de la détérioration des sols et l'amélioration des techniques de culture. Dans les années 1958, plus de 10 000 mesures d'érosion annuelles étaient prises sur des parcelles et de petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine (Elhadj Mokhtari 2017).

Les planificateurs de la conservation ont été aidés à élaborer des équations de perte de sol afin de prévoir des données restreintes sur l'érosion dans de nombreuses localités et conditions qui n'ont pas été directement représentées dans la recherche.

Un modèle d'érosion appelé USLE est développé dans le but de prédire les pertes moyennes de sol à long terme causées par le ruissellement de zones de champ spécifiques dans des systèmes de culture et de gestion déterminés. Elle a été largement utilisée sur le terrain et a prouvé son utilité et sa validité à cet effet. Il est également valable pour des situations non agricoles comme les chantiers de construction.

L'équation de perte de sol est représentée par la formule mathématique suivante.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \dots\dots\dots(1.1)$$

Plusieurs facteurs sont pris en compte dans l'estimation de la perte annuelle moyenne de sol causée par l'érosion par l'eau : l'érosivité de la pluie (R), l'érodibilité du sol (K), la longueur et la pente du terrain (LS), la couverture végétale (C) et les pratiques de gestion des sols (P).

✓ L'érosivité de la pluie (R) :

Ce paramètre est calculé en utilisant l'énergie cinétique des gouttes de pluie E pendant une période courte, soit 30 minutes, qui reflète l'impact du ruissellement.

$$R = \sum EI_{30}/100 \dots\dots\dots(1.2)$$

$$E = 200 + 89 \log I \dots\dots\dots(1.3)$$

E : Énergie cinétique de la pluie mesurée en tonnes métriques x (m/ha/ centimètre) de pluie.

$$E = 11.9 + 8.73 \log(I) \dots\dots\dots(1.4)$$

E : en $J/m^2/mm$ de pluie.

I : l'intensité moyenne de la pluie (mm/h).

R : peut-être déterminé pour des périodes variables (1 averse à 1 année).

✓ **l'érodibilité du sol (K) :**

Le facteur sol est connu sous le nom de K et représente l'érodibilité du sol. On peut le définir comme la résistance du sol à l'érosion et il est calculé en fonction d'une parcelle standard. On le juge en prenant en considération la texture, la quantité de matière organique, la structure et la perméabilité du sol.

En utilisant la formule de Wischmeier et Smith (1978) pour calculer K.

$$100K = 2.1 \times 10^{-4} \times M^{1.14} (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \dots\dots (1.5)$$

M : Le pourcentage de limon compris entre 0,1 et 0,002 mm est obtenu en multipliant le pourcentage de tout ce qui n'est pas de l'argile.

a : taux de contenu organique.

b : classification du code de structure du sol

c : classe de perméabilité du profil

La cartographie d'une zone en fonction des classes de texture du sol est devenue récente grâce à l'utilisation de la base de données harmonisée pour les sols du monde, DSMW (Digital Soil Map of the World). Le rapport contient des informations telles que le taux de (sable, limon, argile, matière organique) et d'autres données concernant les paramètres des différentes unités cartographiques.

$$K = E_{sable} \cdot E_s \cdot E_{Oc} \cdot E_{sable\ fin} \dots\dots\dots(1.6)$$

$$E_{sable} = \left(0.2 + 0.3 \times e^{\left[-0.256 \times ps \times \left(1 - \frac{P_{silt}}{100} \right) \right]} \right) \dots\dots\dots(1.7)$$

$$E_s = \frac{P_{silt}}{P_c + P_{silt}} \dots\dots\dots(1.8)$$

$$E_{Oc} = 1 - \frac{0.25 \times Oc}{Oc + e^{(3.72 - 2.95 \times Oc)}} \dots\dots\dots(1.9)$$

$$E_{sable\ fin} = 1 - \frac{0.7 \left(1 - \frac{P_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{P_s}{100} \right) + e^{\left[-5.51 + 22.9 \left(1 - \frac{P_s}{100} \right) \right]}} \dots\dots\dots(1.10)$$

Où : E_{sable} est un paramètre qui abaisse l'indicateur K dans les sols contenant du sable grossier.

E_s : Indique un paramètre d'érodibilité du sol faible pour les terres à forte teneur en argile.

E_{Oc} : valeurs Curb K dans les sols contenant du carbone organique

$E_{sable\ fin}$: réduit les valeurs K pour les sols à très forte teneur en sable

P_s : Le pourcentage de sable

P_{silt} : Le pourcentage de limon

P_c : Le pourcentage d'argile

Oc : le pourcentage de carbone organique

✓ **la longueur et la pente du terrain (LS) :**

Le facteur LS est une structure topographique qui tient compte de la longueur et de l'angle de la pente lors du calcul de la perte de sol. Il y a une combinaison des effets des paramètres d'inclinaison de la pente (S) et de longueur de la pente (L). Leur impact sur l'érosion des sols est démontré par les pentes élevées (Belkendil, Habi et al. 2018). L'équation utilisée par différents auteurs (Benselama, Mazour et al. 2018, Aslam, Maqsoom et al. 2021) est utilisée pour calculer le facteur de longueur de pente dans des études récentes qui utilisent l'outil d'analyse spatiale ArcGIS et un modèle numérique d'élévation (DEM) (résolution de 30 m) obtenu à partir de la plateforme Earth Explorer de l'United States Geological Survey (USGS).

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \times \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \text{if } \theta < 9 \% \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & \text{if } \theta \geq 9 \% \end{cases} \dots\dots\dots(1.11)$$

$$m = \frac{\beta}{(1+\beta)} \dots\dots\dots(1.12)$$

$$\beta = \frac{(\sin \theta)}{[3 \times (\sin \theta)^{0.8} + 0.56]} \dots\dots\dots(1.13)$$

Où λ est la longueur de la pente, θ est l'angle de la pente, m est un exposant de pente de longueur variable et β est un facteur variant avec le gradient de la pente.

Comme mentionné ci-dessus, le calcul et l'attribution spatiale des paramètres L et S sont basés sur les données SRTM et l'outil d'analyse spatiale ArcGIS, qui requièrent plusieurs opérations de prétraitement, mentionnées ci-dessous :

- Le remplissage du « bassin » SRTM est réalisé afin de supprimer les petites imperfections des données.
- Assurez-vous de tracer des lignes raster pour orienter le flux de chaque cellule vers son voisin d'altitude plus basse.

- Analyser l'orientation du réseau hydrographique théorique pour estimer la longueur de la pente.
- Estimer les variations en degrés pour chaque cellule.
- En utilisant les équations précédentes, découpez les calculs L et S afin d'obtenir le résultat final.

✓ **La couverture végétale (C)**

L'effet du facteur C sur l'érosion des sols est déterminé par plusieurs facteurs associés à la couverture terrestre et aux stratégies de gestion. Ces effets peuvent être observés à travers la couverture végétale, les résidus de cultures, l'exploitation des terres et les pratiques de préservation des sols. Le facteur C considère l'impact de la végétation sur la protection des sols et les actions de préservation. Ce facteur est indéterminé sur une échelle de 0 à 1, avec des valeurs plus élevées suggérant un potentiel d'érosion réduit et une meilleure préservation des sols. On utilise des images satellite Landsat 8 OLI_TIRS (avec une résolution spatiale de 30 m), à partir desquelles on calcule l'indice de végétation par différence naturelle (NDVI). Les bandes visible, proche infrarouge (NIR) et rouge (Eq.04) sont utilisées pour calculer le NDVI. Afin d'évaluer l'impact de la végétation sur l'érosion des sols, on calcule le facteur C en se basant sur l'obtention du NDVI et l'analyse des études réalisées à ce sujet ([Benselama, Mazour et al. 2018](#), [Bouamrane, Derdous et al. 2020](#)).

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \dots\dots\dots (1.14)$$

Où NIR est la bande proche infrarouge, R est la bande rouge

Les conditions seuils suivantes ont été utilisées pour classer la végétation :

- NDVI < -0.1: Eau
- 0.1 < NDVI < 0.15: Sol nu
- 0.15 < NDVI < 0.25: Végétation séparée
- 0.25 < NDVI < 0.4: Végétation modérée
- NDVI > 0.4: Végétation dense.

Après avoir obtenu les résultats NDVI et sur la base de Mokhtari et al. Le facteur C a été extrait selon l'équation suivante:

$$C = 0.9167 - 1.667 \times NDVI \dots\dots\dots (1.15)$$

✓ les pratiques de gestion des sols (P) :

Le facteur (P) représente une approche de préservation qui peut influencer l'érosion du sol dans une utilisation spécifique du sol. Les techniques de soutien et de conservation comme les terrasses, les courbes de niveau, les clôtures anti-érosion et les cultures en bandes permettent de diminuer la vitesse de ruissellement et de diminuer le risque d'érosion des sols. Le facteur (P) peut avoir des valeurs allant de 0 à 1. Une valeur nulle correspond à des efforts de conservation optimaux qui évitent l'érosion totale des sols, tandis qu'une valeur nulle correspond à un manque, ou plus précisément, à l'absence de pratiques de conservation (Benselama, Mazour et al. 2018).

Le facteur P est calculé à l'aide de l'outil d'analyse spatiale ArcGIS après avoir obtenu un modèle numérique d'élévation (DEM) de toute zone qui peut être extraite de la plateforme Earth Explorer de l'United States Geological Survey (USGS).

RUSLE, une modification largement utilisée de l'équation universelle originale de perte de sol (USLE), a été créée par le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) afin de proposer une méthode simple et pratique pour prédire la perte de sol causée par l'érosion hydrique (Farhan and Nawaiseh 2015, Benselama, Mazour et al. 2018). RUSLE est fréquemment employé par d'autres scientifiques. RUSLE est employé en collaboration avec le SIG et le RS afin d'évaluer l'érosion des sols. Lors de la réalisation de la modélisation, RUSLE tient compte des éléments mentionnés précédemment en attribuant des couches de données et en regroupant des couches basées sur des règles mathématiques et des facteurs logiques, afin de générer une couche composite qui représente la valeur de chaque pixel de la valeur d'érosion du sol (A).

Méthode D'érosion Estimée (EPM)

Face aux pertes importantes causées par l'érosion hydrique, de nombreux spécialistes et chercheurs se sont tournés vers des solutions techniques visant à atténuer ce phénomène. Ainsi, plusieurs modèles ont été développés pour évaluer l'érosion des sols, dont certains ont été largement appliqués à travers le monde. La majorité des chercheurs s'accordent à dire que l'équation universelle de perte de sol (USLE) et ses variantes représentent les outils les plus couramment utilisés. L'Algérie figure parmi les pays ayant adopté ce modèle. Cependant, avec la disponibilité croissante des données via les technologies de télédétection et l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG), l'attention s'est récemment portée sur la méthode d'érosion potentielle (EPM), développée par Gavrilovic au sein de l'Association

du bassin de la rivière Morava (Serbie) en 1962 (Zeghmar, Marouf et al. 2022). La méthode d'érosion possible (EPM) est l'un des modèles expérimentaux à travers lesquels les zones les plus vulnérables peuvent être identifiées et sa distribution spatiale peut également être approximativement une estimation approximative de la moyenne annuelle de la taille du sol séparé en raison de l'eau (Dragičević, Karleuša et al. 2017).

1.9. Rappel bibliographique des travaux sur l'érosion en Algérie

Le sol est une ressource essentielle qui contribue significativement à l'amélioration de l'économie du pays et à la production agricole durable (Das, Bordoloi et al. 2020). L'urbanisation irrégulière et le changement climatique au XXI^e siècle ont contribué à l'augmentation de l'occurrence de phénomènes extrêmes tels que les inondations, les sécheresses et l'érosion des sols (Abdelkebir, Maoui et al. 2021), et cette dernière est le sujet de notre étude. L'érosion des sols, avec le changement climatique, est l'un des défis environnementaux les plus importants au monde, avec des effets environnementaux et économiques massifs dans de nombreuses régions du monde (Mihi, Benarfa et al. 2020). L'érosion des sols est un phénomène naturel qui se produit lorsque des particules de sol de surface se détachent d'un endroit et se déposent dans un autre. Elle se produit lorsque les forces motrices de l'eau et du vent sont plus nombreuses que les forces de résistance des sols (Mokhtari, Merzouk et al. 2018). Chaque année, environ 75 milliards de tonnes de sol sont érodées dans le monde, selon les données disponibles. En conséquence, les pertes économiques se sont aggravées, avec une perte financière de 400 milliards de dollars (Mokhtari, Merzouk et al. 2018). En raison d'une combinaison de conditions de température difficiles et de causes physiques et anthropiques, la région méditerranéenne semi-aride est particulièrement sensible à l'érosion hydrique. Malgré les mesures de gestion de l'érosion, l'Algérie, par exemple, présente certains des taux d'érosion les plus élevés au monde (Borrelli, Robinson et al. 2017). De nombreuses méthodologies basées sur l'expertise ont été utilisées pour estimer la vulnérabilité environnementale. L'intégration d'une technique de hiérarchisation analytique (AHP) (Saaty 1987) et d'une plateforme de système d'information géographique (SIG) est l'un des instruments les plus significatifs (Mokhtari, Merzouk et al. 2018). Cette méthode a suscité l'intérêt des décideurs multidisciplinaires et s'est avérée bénéfique dans une série d'études d'évaluation des risques naturels, y compris la cartographie des risques d'érosion des sols (Saha 2018, Tairi, Elmouden et al. 2019, Ebhuoma, Gebreslasie et al. 2022, Sodnomdarjaa, Lehmkuhl et al. 2022, Hagraas 2023). De nombreux universitaires ont utilisé des méthodes basées sur des modèles pour calculer les pertes dues à l'érosion des sols (des modèles empiriques aux modèles basés sur la

physique). L'équation universelle de perte de sol (USLE) est un modèle empirique qui évalue les moyennes à long terme de l'érosion en nappe et en rigole à l'aide de données parcellaires provenant de l'est des États-Unis (Zeghmar, Marouf et al. 2022). L'USLE et ses dérivés améliorés, RUSLE et MUSLE, ont été largement utilisés dans de nombreux écosystèmes à travers le monde à différentes échelles géographiques (Achite et al., 2006; Mallick et al., 2014; Kavian et al., 2017; Atoma et al., 2020; Gayen et al., 2020; Tessema et al., 2020).

1.10. Inondation

Les inondations sont devenues connues et largement répandues parmi les chercheurs, et elles sont dérivées du terme débordement, c'est-à-dire que la quantité de liquide a dépassé ce qu'elle contient. Les inondations se produisent après des pluies abondantes, ce qui accroît l'accumulation d'eau qui submerge la terre, et on peut également parler d'une augmentation du niveau d'eau d'un cours d'eau qui dépasse ses limites naturelles.

Yahiaoui 2012 a également fourni une définition différente des inondations, en soulignant que le concept d'inondation est davantage lié à la topographie ou à la géomorphologie. Il désigne le débordement d'un ruisseau de son petit lit, ainsi que le remplissage d'un bassin topographique par des eaux de ruissellement locales. La crue pluviale de ce genre se distingue par la rapidité de l'eau, le volume d'eau qui s'écoule et la hauteur d'eau.

1.10.1. Cause des inondations

Généralement, les inondations sont considérées comme une calamité naturelle ayant des répercussions défavorables sur l'existence humaine. Bien que la plupart des pays du monde aient connu un développement technologique, il est devenu extrêmement difficile de prédire l'émergence d'une catastrophe. Cela s'explique par les évolutions climatiques qui sont devenues impossibles à observer en ce qui concerne la quantité de pluie ou le temps spécifique pour les précipitations violentes.

Un autre facteur qui contribue à l'apparition d'inondations est le facteur humain, qui perturbe le système naturel en créant des centres de population dans des zones inconstructibles, ce qui signifie qu'il ne tient pas compte des zones à risque, ainsi que des infrastructures (routes, canaux de drainage). En règle générale, l'assainissement et la marginalisation du contrôle permanent des barrières d'eau ont un impact sur le degré de perméabilité du sol et le déroulement des crues, ce qui entraîne une accentuation de la catastrophe. De cette manière, il devient de plus en plus difficile de maîtriser les inondations et d'y faire face de manière adéquate pour minimiser les

dommages humains et matériels. On peut classer les causes et les facteurs d'inondation en trois catégories :

- ✓ **La nature et l'occupation de sol** : L'évaporation et la consommation d'eau par les plantes sont influencées par la nature et l'occupation du sol. La concentration des eaux est fortement influencée par l'absorption d'eau par le sol, l'infiltration dans le sous-sol ou le ruissellement. Le même rôle est joué par la topographie du lit, la pente et la forme du bassin versant. Donc, pour une même quantité de pluie, il sera possible d'observer une crue ou non.
- ✓ **Facteurs anthropiques (humaines)** : Les facteurs humains sont (La diminution des champs d'expansion des crues , La diminution des champs d'expansion des crues , L'aménagement parfois hasardeux des cours d'eau , L'utilisation ou l'occupation des sols sur les pentes des bassins versants)
- ✓ **Facteurs naturels** : La pluie et la neige sont des facteurs naturels qui influencent l'émergence des inondations, car le sol retient l'eau de pluie ou de neige, dont une partie est absorbée par les plantes ou s'évapore. Les crues surviennent habituellement à l'automne ou à l'hiver, lorsque les précipitations et la fonte des neiges provoquent une forte hausse. La quantité de ruissellement de surface augmente lorsque le sol et les plantes ne peuvent pas absorber l'intégralité du ruissellement et faire monter le lit du cours d'eau.

1.10.2. Effets des inondations

Les inondations ont entraîné de nombreux dégâts aux infrastructures, à l'environnement naturel et à la vie humaine à travers le monde.(Schanze 2006) On peut définir les dangers d'inondation comme la menace que les inondations représentent pour les personnes, les biens et le paysage naturel en fonction de dangers et de vulnérabilités spécifiques. Les risques d'inondation peuvent influencer les différentes stratégies d'atténuation nécessaires et mises en place.(Schumann 2011). D'après (Molinari and Handmer 2011, MAREF 2019), les impacts des inondations ou les dommages causés par les inondations peuvent être caractérisés de différentes manières : les dommages « directs et indirects », « matériels et immatériels » et les dommages « potentiels et réels ». Leur définition est la suivante :

- ✓ Les pertes directes correspondent aux dommages résultant d'un contact immédiat avec le danger, comme les inondations qui affectent les bâtiments, les biens, les infrastructures, les réseaux (électricité, eau, assainissement, etc.) ainsi que les cultures agricoles.

- ✓ Les pertes indirectes désignent les pertes causées par les inondations, mais non directement liées à leur impact (par exemple, les pertes commerciales causées par la perturbation des activités).
- ✓ Les pertes indirectes correspondent aux conséquences des inondations qui ne résultent pas directement de leur impact, telles que les pertes économiques liées à l'interruption des activités commerciales.
- ✓ Les pertes intangibles concernent des éléments non monétisables, tels que la perte de vies humaines et d'autres impacts immatériels.
- ✓ Les pertes potentielles représentent les dommages susceptibles de survenir en l'absence de mesures d'atténuation, correspondant ainsi à la perte maximale envisageable.
- ✓ Les pertes véritables : qui impliquent la présence de différentes mesures de réduction et une diminution des pertes évitables.

1.10.3. Type des inondations

Les inondations ont été classées en fonction de leur niveau de danger. Les inondations de plaine, c'est-à-dire les inondations de plaine, sont des inondations à mouvement légèrement lent et progressives. Les crues qui se produisent lors de l'écoulement de surface dans les zones urbaines ou rurales. Les inondations causées par la rupture de barrages et les inondations marines sont le dernier type. Deux causes principales d'inondations sont donc observées (les inondations causées par des inondations à cinétique lente et les inondations causées par des inondations à cinétique rapide), et leur définition est la suivante, comme (MAREF 2019) l'a souligné :

1.10.3.1 Les inondations littorales ou submersions marines

Les inondations côtières sont le premier type d'inondations, qui se produisent après le passage de tempêtes, avec la formation de vagues dans la mer, et ce, après que le niveau de la mer s'élève au-dessus de la normale. L'inondation marine désigne également l'inondation de la zone côtière par la mer en raison de conditions météorologiques extrêmes et de conditions marégraphiques (tempêtes).

- ✓ Le débordement se produit lorsque le niveau de la mer dépasse celui des ouvrages ou du trait de côte naturel.
- ✓ Le débordement se produit lorsque le paquet de mer franchit le trait de côte en raison du déferlement des vagues.

- ✓ Les cordons dunaires peuvent être fragilisés ou détruits sous l'effet de la marée et des vagues. Ainsi, les zones qu'ils protègent risquent d'être submergées si leur altitude est inférieure au niveau de la mer.

1.10.3.2 Les inondations de plaine et torrentielles

Les inondations intérieures surviennent généralement après des précipitations abondantes ou prolongées, et ce genre d'inondation peut être divisé en deux catégories :

- ✓ (a) L'inondation de surface, également connue sous le nom de ruissellement de surface, survient lorsque la quantité de pluie augmente et que le sol est saturé, ce qui rend impossible l'absorption de l'excès d'eau. Elles concernent les vastes bassins versants, tels que ceux de la Seine, de la Loire, de la Meuse et de la Saône.
- ✓ (b) L'inondation de la rivière se produit lorsque le cours d'eau ne peut pas transporter l'excès d'eau, ce qui entraîne un écoulement de l'eau du petit lit vers son voisinage. De plus, les cours d'eau peuvent être remplis de matériaux, parfois abondants, arrachés des berges. Lorsque le cours d'eau traverse des zones urbanisées comportant de nombreux ouvrages de franchissement, tels que des ponts, il existe un risque accru d'embâcles, résultant de l'accumulation d'arbres, de débris et de matériaux divers.

1.11. Aléa

Le risque naturel est généralement défini comme étant la combinaison et le résultat de deux éléments : d'abord l'aléa, la probabilité qu'un phénomène naturel se produise et provoque des perturbations, et ensuite la vulnérabilité : la mesure du degré et des conditions d'exposition des installations humaines à ce même événement. Les sociétés humaines sont confrontées à un niveau de menace (pertes humaines et/ou dommages matériels) appelé risque naturel. Si l'aléa se produirait dans une zone particulièrement vulnérable, le risque peut provoquer des perturbations assez importantes pour être qualifié de catastrophe. ([Andy Combey et al 2020](#))

En général, on évalue le degré d'exposition à l'aléa inondation en utilisant une carte de zone inondable établie pour une crue de référence, telle que la plus forte crue historique connue ou la plus forte crue centennale pour les PPR inondations. La simulation du champ d'inondation de toute une famille d'événements hydrologiques, de la crue faible (période de retour $T = 1$ an) aux crues moyennes et fortes ($T = 10$ à 100 ans), jusqu'à la crue exceptionnelle (par exemple $T = 1000$ ans), est l'objet de l'intérêt de la méthode inondabilité. ([Lang, Chastan et al. 2009](#)).



Figure I.6 – L'aléa (Source : <https://ppri-sudest-vendee.fr/les-ppri/qu-est-ce-qu-un-risque/alea/>)

1.12. Vulnérabilité

La notion de vulnérabilité englobe diverses dimensions, notamment les aspects écologiques, économiques, sociaux et institutionnels. Il désigne la mesure dans laquelle un système est susceptible d'être affecté par une perturbation ou un facteur de stress, ainsi que sa capacité à se remettre en marche ou à s'adapter aux répercussions qui en découlent. (Kasperson, Kasperson et al. 2022). Selon (Fuchs, Kuhlicke et al. 2011) dans les domaines du changement climatique et des risques naturels, le concept de "vulnérabilité" a gagné en popularité. Cependant, la vulnérabilité est un concept quelque peu nébuleux, ce qui pourrait être une partie de la raison de sa popularité croissante. De nombreuses définitions de la vulnérabilité ont été élaborées et sont utilisées dans différentes disciplines. Selon (Léone, Asté et al. 1996), La vulnérabilité correspond au degré de dommage potentiel (variant de 0 à 1) qu'un élément exposé peut subir sous l'effet d'un phénomène prévu ou en cours, avec une intensité donnée.

Étant donné que de nombreuses disciplines utilisent aujourd'hui la notion de vulnérabilité, celle-ci s'est intégrée dans divers cadres disciplinaires, reflétant soit des fondements techniques, soit des fondements sociaux, et donnant lieu à de multiples paradigmes d'évaluation de la vulnérabilité, qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs (Fuchs, Birkmann et al. 2012). Dans l'évaluation scientifique, l'expression "vulnérabilité" peut se référer à une variété de concepts, qui sont principalement distingués par (a) l'entité sous enquête qui est vulnérable, et (b) les parties prenantes de l'étude (Ciurean, Schröter et al. 2013).

Une catastrophe naturelle à grande échelle qui perturbe la vie quotidienne et augmente la vulnérabilité sociale, économique et écologique est l'inondation. (Rehman, Sahana et al. 2019) le manque de capacité socioéconomique à gérer les risques d'inondation ou la prédisposition aux dommages en fonction des aspects institutionnels, culturels, démographiques, économiques, sociaux et de gouvernance (vulnérabilité) (Tanoue, Hirabayashi et al. 2016).



Figure I.7 – Vulnérabilité (Source : <https://ppri-sudest-vendee.fr/les-ppri/qu-est-ce-qu-un-risque/alea/>)

1.13. Risque

Le risque d'inondation demeure actuellement le plus répandu, causant le plus grand nombre de victimes et de dégâts. (Pottier 1998) Les risques désignent des événements physiques, naturels ou résultant d'activités humaines, pouvant engendrer des pertes humaines, des blessures, des dégâts matériels, des perturbations socio-économiques ou une détérioration de l'environnement (Makoka et Kaplan 2005). Elle est à l'origine de 58 % des victimes des catastrophes naturelles et de 31 % des pertes économiques. (Berz 2000).

(Wail 2018) a également défini le risque hydrologique est défini comme une menace potentielle plus ou moins probable à laquelle on est confronté, ce risque est causé par l'eau. Cette formulation met en évidence les deux éléments du risque, l'incertitude et la vulnérabilité.

En effet, d'après (Torterotot 1993): « Il ne peut y avoir de risque sans la présence d'un aléa naturel, ni sans un élément vulnérable exposé ».

- ✓ L'aléa se réfère au phénomène naturel, caractérisé par sa fréquence et ses descripteurs physiques.
- ✓ La vulnérabilité indique l'ampleur des effets anticipés d'un phénomène naturel sur les éléments exposés.

- ✓ Les enjeux désignent les personnes, biens, activités, ressources, patrimoines, etc., susceptibles d'être impactés par un phénomène naturel.

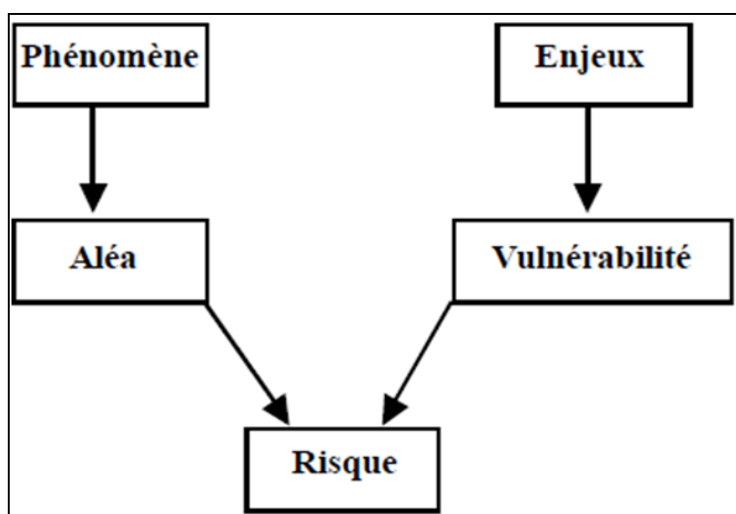


Figure 1.8 Définition du risque d'inondation

Et selon (DAUPHINÉ et Provitolo 2005). En utilisant deux axes pour représenter l'aléa et la vulnérabilité dans un espace plan, on peut obtenir des courbes d'isorisque, avec une formule qui varie en fonction du problème analysé. $\text{Risque} = F(\text{aléa} * \text{vulnérabilité})$

Plutôt que de considérer le risque comme un simple produit, on peut envisager l'aléa et la vulnérabilité comme des variables interdépendantes dont l'impact combiné varie selon le contexte spatio-temporel. Par exemple, un aléa fort dans une région bien préparée (faible vulnérabilité) peut avoir des effets modérés, tandis qu'un aléa faible dans une région non préparée (forte vulnérabilité) peut entraîner des conséquences graves.

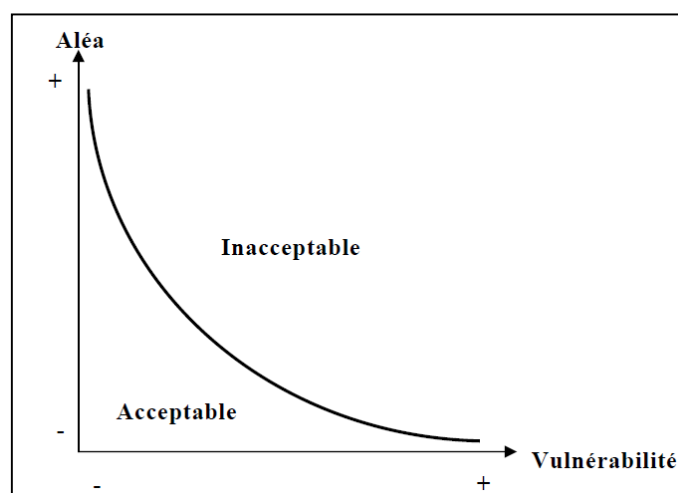


Figure 1.9 Courbe d'iso risque. (DAUPHINÉ et Provitolo 2005).

Les inondations sont le plus souvent un phénomène naturel qui, par exemple, ne peut être considéré comme une menace dans les plaines inondables naturelles. Néanmoins, les inondations dans les bassins versants à utilisation intensive sont souvent influencées par l'homme via l'utilisation des sols, la formation fluviale, etc (Schanze 2006).

Les inondations sont perçues comme l'une des catastrophes les plus graves causées par les conditions météorologiques. Ils ont la capacité de causer des dommages aux sociétés, à l'économie, à l'environnement et à provoquer des pertes humaines tragiques. Les inondations sont responsables de 47 % de toutes les catastrophes liées aux conditions météorologiques, entraînant des pertes économiques estimées à 662 milliards de dollars (US \$) et touchant 2,3 milliards de personnes (Sumi, Kantoush et al. 2022). Le risque d'inondation est considérablement accru par les fortes précipitations, et ce risque pourrait augmenter à mesure que le climat continue de se réchauffer. La variation spatiale et temporelle des intensités des pluies torrentielles et des crues éclair est importante : la plage de précipitations est limitée, l'intensité est élevée, le processus d'inondation est court, le pic d'inondation est élevé et la force destructrice est importante (Borga, Boscolo et al. 2007).

Il est indéniable que l'analyse des risques d'inondation nécessite une compréhension approfondie et une évaluation précise du processus complexe des crues. Il est crucial de procéder à cette évaluation afin de prévoir et de gérer les conséquences éventuelles des inondations sur les populations, les infrastructures et l'environnement. Voici une synthèse des éléments essentiels de cette évaluation et de l'objectif principal de l'étude des risques d'inondation :

- ✓ Cartographie des zones inondables : La première étape de l'évaluation consiste à identifier les zones susceptibles d'être inondées en fonction de divers scénarios de précipitations et de débits fluviaux. Cela implique l'utilisation de modèles hydrologiques et hydrauliques pour simuler les écoulements d'eau et déterminer les zones à risque.
- ✓ Analyse des précipitations et des débits : La compréhension des caractéristiques des précipitations (intensité, durée, fréquence) et des débits des cours d'eau est cruciale pour évaluer le risque d'inondation. Cela inclut la collecte de données historiques et la modélisation pour prévoir les conditions futures.
- ✓ Étude des sols et des infrastructures : L'évaluation prend également en compte la capacité des sols à absorber l'eau, ainsi que l'efficacité des infrastructures de drainage et de protection contre les inondations (digues, barrages, etc.). Cela permet de comprendre comment l'eau pourrait se comporter dans différentes situations.

L'objectif principal de l'analyse des risques d'inondation est de réduire la vulnérabilité des personnes, des biens, et des écosystèmes aux inondations. Cela se fait en identifiant les zones les plus à risque, en évaluant la probabilité d'occurrence des inondations, et en estimant les conséquences potentielles. L'évaluation des risques d'inondation est donc un processus complexe qui vise à comprendre le phénomène des inondations dans sa globalité pour mieux le gérer. L'objectif principal est de protéger les communautés et les ressources en réduisant au maximum les risques et les impacts liés aux inondations.

1.14. Historique des inondations dans le monde et en Algérie

Selon (Olvera 2024) les crues soudaines sont un problème mondial qui a un impact significatif sur les sociétés, les précipitations extrêmes affectant les établissements humains. Entre 2000 et 2019, les phénomènes hydrométéorologiques ont été les catastrophes naturelles les plus courantes. Selon le Bureau des Nations unies pour la réduction des risques de catastrophes, 3254 inondations majeures se sont produites au cours de cette période, représentant 44 % de toutes les catastrophes et affectant 1,65 milliard de personnes. En moyenne, il y a 163 inondations par an, qui causent des dommages considérables aux habitations, aux entreprises et aux infrastructures.

Selon la base de données internationale sur les catastrophes EM-DAT. En 2023, plusieurs pays ont connu de graves inondations et glissements de terrain aux effets dévastateurs. En République démocratique du Congo, les pluies torrentielles du mois de mai ont provoqué des inondations et des glissements de terrain dans le Sud-Kivu, faisant environ 2 970 morts ou disparus. Le nord-est du Nigeria a connu 275 décès dus aux inondations d'octobre. La Somalie a été frappée par des pluies torrentielles en décembre, affectant 2,5 millions de personnes, tandis que les inondations en Tanzanie ont touché 2,9 millions de personnes. En janvier, les Philippines ont été confrontées à des inondations et des glissements de terrain à l'échelle nationale, qui ont fait 52 morts et touché 2,1 millions de personnes. Les inondations résultant de la mousson au Pakistan et en Inde d'avril à juillet ont causé 1 529 décès en Inde et touché 10,2 millions de personnes. Au Yémen, la saison des pluies prolongée de mars à septembre a fait 248 morts. Les fortes pluies qui se sont abattues sur le Guatemala à partir du mois de mai ont provoqué des inondations et des glissements de terrain qui ont touché 4,4 millions de personnes et causé 78 décès. En Europe, les inondations de la mi-mai dans la région italienne d'Émilie-Romagne ont fait 15 morts et causé des dégâts économiques estimés à 9,8 milliards de dollars, ce qui en fait l'une des inondations les plus coûteuses de l'année.

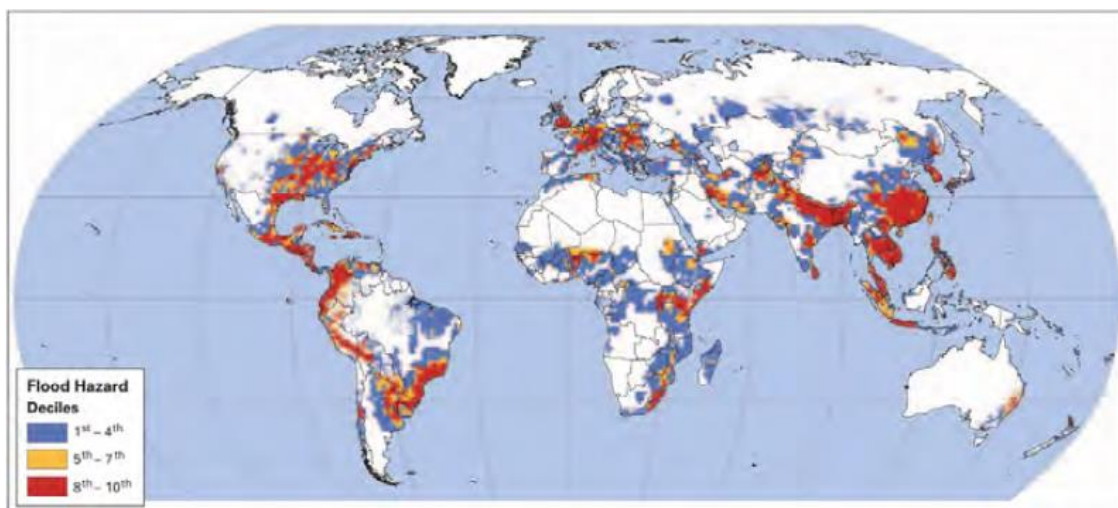


Figure 1.10 Répartition des zones inondables dans le monde. Source :[\(Olvera 2024\)](#)

Les inondations en Algérie sont principalement provoquées par des précipitations abondantes, qui peuvent être causées par des perturbations météorologiques généralisées qui peuvent affecter plusieurs régions du pays, ou par des tempêtes locales accompagnées de fortes précipitations qui affectent de nombreuses régions du pays. Depuis près d'un demi-siècle, elles se répètent et sont devenues de plus en plus violentes et destructrices. Surtout dans les régions du Nord où le climat méditerranéen provoque des précipitations importantes sur des sols souvent arides. La géographie montagneuse de certaines régions accentue également le ruissellement rapide des eaux de pluie, contribuant au risque d'inondation. On peut mentionner, sans se restreindre [\(ONM Octobre 2023\)](#):

- ✓ L'automne 1969 a été marqué par 50 décès et 62 000 personnes sans abri, la destruction de 23 000 maisons, la noyade de 10.000 moutons et 500 dromadaires, la destruction de 300 puits et de 4 000 hectares de cultures.
- ✓ Entre le 25 et le 31 mars 1974, les inondations ont été parmi les plus sévères du siècle dernier. Ces crues ont causé 45 décès, 11 disparus, 11 blessés et 22.000 personnes sans abri. De plus, 2000 animaux ont été tués par noyade, 7 000 maisons ont été détruites, 154 villages ont été évacués ou isolés, 16 ponts ont été détruits, 14 routes nationales et 34 routes secondaires ont été endommagées. Les champs cultivés ont été submergés en même temps que des mouvements de terrain. Finalement, 23 établissements scolaires ainsi que des infrastructures inondées ont été endommagées (électricité, télécommunications, infrastructures hydrauliques et sanitaires).

- ✓ Le quartier de Bab-El-Oued à Alger a été touché par de graves inondations les 9 et 10 novembre 2001, causant environ 700 morts et 100 disparus, ainsi que des dégâts matériels (biens et infrastructures) estimés à 2,7 milliards de dinars algériens.
- ✓ Les inondations de Sidi Bel Abbes (18-19 avril 2007) ont causé 7 morts et 109 familles sinistrées.
- ✓ Les inondations de Ghardaïa : les 1 et 2 octobre 2008 l'oued M'Zab a drainé 900 m³ /s provoquant 50 morts et des milliers de sans-abris ;
- ✓ Les inondations à El-Bayadh le 1^{er} octobre 2011 ont causé 10 morts et 6 Mds DZD de dégâts.
- ✓ Les inondations de Tamanrasset, de Tindouf, de Msila et de Batna en 2018 ;
- ✓ Les inondations de Constantine et d'Illizi en 2019.

1.15. Gestion du risque d'inondation

La gestion des inondations désigne la planification, l'élaboration et l'application de stratégies et d'actions visant à réduire les risques et les conséquences des inondations sur les communautés, les infrastructures et l'environnement. Il s'agit d'une combinaison de mesures structurelles et non structurelles visant à contrôler le débit de l'eau, prévenir les assauts et réduire les dommages causés par les épisodes de l'eau.

La prévision des inondations est un élément essentiel de la gestion des inondations, impliquant la prédiction des événements d'inondations en se basant sur l'analyse de diverses données hydrologiques, météorologiques et géographiques. L'objectif principal de l'évaluation des risques de sable est de fournir des avertissements précis et précis aux communautés et aux autorités, permettant ainsi de prendre des mesures proactives. Selon [Madsen et Jakobsen 2004](#), les systèmes de prévision des inondations doivent être sensibles aux vitesses du vent et aux champs de pression et être capables de représenter les incertitudes relatives à la profondeur et à la localisation des ondes de tempête associées aux écarts dans les trajectoires des tempêtes.

La prévision des inondations peut contribuer à la réduction des risques en fournissant des alertes précoces essentielles, ce qui permet aux autorités de procéder aux évacuations en temps voulu et d'affecter efficacement les ressources pendant les surcharges. Il est possible d'améliorer les services d'urgence et la prévision peut garantir la protection des infrastructures essentielles comme les ponts, les routes et les services publics en créant des barrières temporaires ou en permettant la libération de l'eau des réservoirs. La prévision des inondations joue également un rôle dans la diminution des pertes économiques directes et indirectes causées par les inondations, comme les dommages aux habitations, aux entreprises et à l'agriculture, et dans la

fourniture d'informations fiables qui aident les personnes et les communautés à appréhender les risques, à prendre des mesures préventives et à élaborer des politiques visant à gérer durablement les risques hydrologiques.

1.15.1 . Les méthodes de prévision des crues

Les méthodes de prévision des crues sont diverses et utilisent des approches à la fois empiriques et numériques. Voici un aperçu des principales méthodes.

1. Méthodes statistiques et empiriques

Les méthodes statistiques s'appuient sur l'analyse des données historiques de crues pour établir des relations entre les précipitations et les débits des cours d'eau. Ces méthodes, comme l'analyse de fréquence des crues ou les courbes de récurrence, permettent de prévoir la probabilité d'occurrence de crues à partir de séries temporelles de données.

2. Modèles hydrologiques déterministes

Les modèles hydrologiques déterministes sont des outils mathématiques qui simulent le comportement d'un bassin versant en réponse à des précipitations. Ils prennent en compte les processus physiques tels que l'évaporation, l'infiltration, et le ruissellement. Des exemples de ces modèles incluent le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et le modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) ([Arnold, Srinivasan et al. 1998](#)).

3. Modèles hydrauliques

Les modèles hydrauliques, comme HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), simulent le déplacement de l'eau à travers le réseau fluvial, permettant de prédire les niveaux d'eau et l'étendue des inondations. Ces modèles sont particulièrement utiles pour évaluer l'impact des crues sur des zones spécifiques, en tenant compte des infrastructures telles que les digues et les barrages ([Brunner 1994](#)).

4. Modèles de prévision couplés

Les modèles couplés combinent des modèles hydrologiques et hydrauliques pour offrir une prévision plus intégrée. Ces modèles utilisent des données en temps réel, comme les mesures de précipitations et de débits, pour ajuster les prévisions en cours de crue. Les prévisions issues de modèles couplés sont particulièrement précises, car elles intègrent à la fois les processus d'écoulement et les dynamiques de bassin versant ([Brunner 1994](#)).

5. Utilisation des systèmes d'information géographique (SIG)

Les SIG jouent un rôle crucial dans la prévision des crues en fournissant des outils pour l'analyse spatiale des données hydrologiques et hydrauliques. Ils permettent de visualiser les zones à risque, de modéliser les impacts potentiels des crues et d'optimiser la gestion des interventions d'urgence (Ding, Ma et al. 2021).

6. Prévision par assimilation de données

L'assimilation de données consiste à intégrer des observations en temps réel, comme les données radar ou satellitaires, dans les modèles de prévision pour améliorer leur précision. Cette méthode est particulièrement efficace pour ajuster les prévisions à court terme en fonction des conditions météorologiques évolutives (Liu, Weerts et al. 2012).

Ces méthodes de prévision des crues couvrent un large spectre de techniques, chacune adaptée à des contextes spécifiques et offrant des niveaux de précision variés en fonction des données disponibles et des objectifs de la prévision.

Tableau 1.7: Approches d'estimation des crues (types de données et objectifs) (Chachoua 2010).

Paramètre de dimensionnement	Données essentielles enregistrées dans le bassin versant		Pas de données
	Type de données	Méthodes	
Débit de pointe	<ul style="list-style-type: none"> • Séries longues des débits maximaux et des précipitations maximales (Pmax). • Séries courtes des débits maximaux (Qmax) et courbes IDF 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse fréquentielle • GRADEX et méthodes dérivées • Méthodes rationnelles et méthodes dérivées 	<ul style="list-style-type: none"> • Formules empiriques • Méthodes régionales • Méthodes analogiques
Hydrogramme de crue	<ul style="list-style-type: none"> • Courbes des séries concomitantes de précipitations et de débits, ainsi que courbes IDF. • Série longue des débits 	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode hydrologique simplifiée (hydrogramme unitaire, méthode SCS-CN). • Approche déterministe. • Courbes QDF et hydrogramme synthétique monofréquence • Catalogue de crue et analyse fréquentielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogramme unitaire synthétique • Coefficient de ruissellement • Pluie de projet
Scénarios de crues historique et / ou probables	<ul style="list-style-type: none"> • Courtes séries concomitantes de précipitations et de débit 	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de simulation continue. Calage sur la courte série de pluie 	

	et longues séries de précipitations	<ul style="list-style-type: none">• Estimation des débits suivie d'une validation sur une longue série de débits basée sur une série prolongée de précipitations.• Modèle stochastique de précipitation pour la génération de chroniques synthétiques de pluie	
--	-------------------------------------	---	--

1.16. Les crues

La crue se manifeste par une augmentation du débit d'eau dans la rivière, pouvant affecter l'ensemble de son lit majeur. L'ampleur de l'inondation est déterminée par trois paramètres : la hauteur de l'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue. Ces facteurs dépendent des précipitations, de l'état du bassin versant (la zone géographique qui alimente la rivière en eau), ainsi que des caractéristiques du cours d'eau telles que la profondeur et la largeur de la vallée. Ces conditions naturelles peuvent être exacerbées par les activités humaines.

1.16.1 Le processus de formation des crues

L'étude des processus de formation des rivières et des crues requiert une compréhension approfondie des facteurs qui influencent la dynamique de l'eau au sein d'un bassin versant. Parmi ces facteurs, plusieurs jouent un rôle clé dans l'accumulation et le déplacement des eaux, influençant ainsi la capacité des rivières à se former et à gérer les excès d'eau, notamment lors des épisodes pluvieux intenses.

- ✓ **L'eau mobilisable** constitue le premier de ces facteurs, représentant l'ensemble des eaux précipitées sur un bassin versant. La quantité d'eau mobilisable détermine le volume total d'eau qui peut potentiellement contribuer au débit d'une rivière.
- ✓ **Le ruissellement** est un autre facteur crucial. Il correspond à la fraction de l'eau de précipitation qui, au lieu de s'infiltrer dans le sol, s'écoule à la surface. Ce phénomène est conditionné par la nature du sol, sa pente, l'occupation du sol (comme l'urbanisation ou la végétation), ainsi que l'intensité des précipitations. Le ruissellement contribue directement à l'augmentation rapide des débits d'eau dans les cours d'eau.
- ✓ **Le temps de concentration** est une mesure temporelle essentielle, définie comme la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau, partant du point le plus éloigné d'un bassin versant, atteigne l'exutoire de ce bassin. Ce temps de concentration influe sur la vitesse à laquelle l'eau se rassemble dans une rivière, jouant ainsi un rôle dans la rapidité et l'intensité des crues.

- ✓ **Enfin, la propagation de l'onde de crue** dépend des caractéristiques du lit de la rivière et de la vallée alluviale. La structure de ces éléments, notamment la pente et la configuration du champ d'inondation, détermine la manière dont l'onde de crue se propage le long de la rivière, affectant ainsi la distribution des eaux lors d'une crue.

1.16.2 La période de retour de crues

La notion de crue est intimement liée au concept de période de retour, qui est une estimation statistique de la fréquence à laquelle un certain débit ou une certaine intensité de crue est susceptible de se produire. Plus la période de retour est longue, plus la crue associée est rare et intense. Voici une explication détaillée de chaque type de crue en fonction de sa période de retour :

- ✓ **Les crues fréquentes (période de retour entre 1 et 2 ans)**

Les crues fréquentes correspondent à des événements survenant de manière récurrente, souvent chaque année ou tous les deux ans. Ces crues sont généralement d'intensité modérée et n'occupent que le lit mineur de la rivière, c'est-à-dire la zone où l'eau s'écoule en dehors des périodes de crue.(Chow 1988) En raison de leur fréquence, les systèmes naturels et anthropiques (comme les infrastructures) sont souvent adaptés pour gérer ces événements sans causer de dommages significatifs. Ces crues jouent un rôle important dans le maintien des écosystèmes aquatiques en renouvelant les nutriments et en redistribuant les sédiments dans le lit de la rivière.

- ✓ **Les crues moyennes (période de retour entre 10 et 20 ans)**

Les crues moyennes se produisent plus rarement que les crues fréquentes, avec une période de retour comprise entre dix et vingt ans. Elles sont plus intenses et leurs débits sont significativement plus élevés. Ces crues peuvent provoquer l'inondation du lit majeur de la rivière,(Ward, Jongman et al. 2013) affectant les zones plus étendues qui ne sont normalement pas touchées par les crues fréquentes. Les infrastructures humaines telles que les ponts, les digues, et les zones résidentielles situées près des rivières doivent être conçues pour résister à ces événements, bien qu'elles puissent causer des dommages considérables si elles ne sont pas correctement gérées.

- ✓ **Les crues exceptionnelles (période de retour d'environ 100 ans)**

Les crues exceptionnelles sont rares, avec une période de retour d'environ cent ans. Ce type de crue est caractérisé par des débits extrêmement élevés, dépassant largement ceux des crues moyennes. Lors d'une crue exceptionnelle, l'ensemble du lit majeur de la rivière peut être inondé, affectant de vastes zones, y compris les terres agricoles, les zones résidentielles, et

parfois même les centres urbains. Ces crues peuvent causer des destructions massives, car elles dépassent souvent les capacités des systèmes de protection construits pour gérer les crues moyennes.

✓ **La crue maximale vraisemblable (aucune période de retour définie)**

La crue maximale vraisemblable (CMV) est un concept utilisé pour décrire le pire scénario possible, c'est-à-dire la plus grande crue que l'on peut raisonnablement prévoir pour un cours d'eau donné, en tenant compte des conditions météorologiques et hydrologiques les plus extrêmes possibles. Ce type de crue est si rare et extrême qu'il n'est pas associé à une période de retour spécifique. Lors d'une CMV, l'intégralité du lit majeur de la rivière est occupée (Nathan, Weinmann et al. 1999), avec des niveaux d'eau et des débits dépassant largement ceux observés lors des crues exceptionnelles. La CMV est utilisée principalement dans le dimensionnement des ouvrages critiques, comme les barrages, pour s'assurer qu'ils peuvent résister aux événements les plus extrêmes possibles.

1.16.3 Mesures techniques de protection contre les inondations

1. Évaluer la situation de risque : Pour déterminer les besoins en protection, il est essentiel de bien comprendre les conditions hydrologiques, les aménagements des cours d'eau, et les principaux risques impliqués. Les dangers peuvent être identifiés à partir de la documentation relative aux crues, comme les cadastres des événements et les cartes des risques. Il est également important de vérifier régulièrement la situation et d'intégrer ces informations dans les plans directeurs et les plans d'affectation.

2. Identifier les déficits écologiques et y remédier : Pour garantir une protection efficace contre les crues, il est crucial de favoriser la croissance de la végétation riveraine et de maintenir un espace suffisant pour préserver la diversité structurelle des milieux naturels (Naiman et Rogers 1997). Cela permet de créer des connexions écologiques entre les habitats, renforçant ainsi la résilience du paysage face aux événements de crue.

3. Différencier les objectifs de protection : Il est crucial d'ajuster les niveaux de protection en fonction de la valeur des biens concernés. Ainsi, une protection renforcée doit être accordée aux biens de grande importance, tels que les agglomérations, les infrastructures et les installations industrielles, tandis que les terres agricoles et les bâtiments isolés peuvent nécessiter des mesures de protection moins strictes.

4. Retenir si possible, évacuer si nécessaire : Pour réduire les débits de crue, il est important de retarder l'écoulement des eaux en utilisant des espaces de rétention, afin de diminuer les crues de pointe. Il est donc crucial de préserver ou de restaurer ces espaces naturels de rétention.

Là où cela n'est pas faisable, il est nécessaire d'aménager des couloirs d'écoulement, en particulier dans les zones étroites des agglomérations.

5. Limiter les interventions : Pour garantir une protection efficace contre les crues, il est essentiel de maintenir des sections d'écoulement adéquates, ce qui permet de gérer les débits, de maintenir l'équilibre du transport des sédiments et de garantir un drainage efficace. Toutefois, les interventions dans l'espace naturel doivent être minimisées pour préserver l'intégrité écologique de l'environnement.

6. Examiner les points faibles : Il est crucial de vérifier le fonctionnement et la résistance des ouvrages de protection lors des événements catastrophiques pour identifier les éventuels points faibles. Cela permet de les détecter et de les corriger avant qu'ils ne compromettent la protection en cas de crue.

7. Garantir l'entretien : Un entretien régulier et approprié des cours d'eau est essentiel pour préserver l'intégrité des ouvrages de protection et maintenir une capacité d'écoulement optimale. Cette tâche continue assure le bon fonctionnement des infrastructures et contribue à la gestion efficace des risques de crue.

8. Assurer l'espace nécessaire : Il est primordial d'identifier et de préserver l'espace nécessaire aux cours d'eau dans les plans directeurs et d'affectation. Cet espace doit être intégré dans toutes les initiatives d'aménagement du territoire afin d'assurer une gestion optimale des ressources hydriques et de prévenir les risques d'inondation.

9. Respecter les besoins : Il est important de prendre en compte les besoins des personnes qui utilisent les bords des ruisseaux et rivières pour des activités récréatives, tout en assurant une gestion durable des ressources en eau. L'exploitation de l'énergie hydraulique doit également être compatible avec la préservation des espaces naturels et les usages récréatifs.

1.17. Rappel bibliographique des travaux sur les inondations

Les inondations sont des catastrophes naturelles qui peuvent causer des dommages importants aux populations et aux infrastructures. La situation est bien pire dans les régions désertiques, où les réserves d'eau sont rares (Abdelkebir, Maoui et al. 2021). De nombreuses régions du monde ont un climat aride, caractérisé par de faibles précipitations. Cependant, lorsque ces régions arides reçoivent des précipitations, celles-ci peuvent être très puissantes et provoquer des crues soudaines qui peuvent causer des dégâts considérables (Mokhtari, Abdelkebir et al. 2024).

Les précipitations dans les zones arides présentent une plus grande variabilité géographique et temporelle en termes d'intensité et de durée. Étant donné que les tempêtes de forte intensité ne frappent souvent qu'une petite partie du bassin versant lorsqu'elles provoquent des

inondations dans les régions sèches, ces endroits connaissent des variations d'inondations beaucoup plus importantes d'une année à l'autre et d'un endroit à l'autre que d'autres régions (Meigh, Farquharson et al. 1997). L'urbanisation irrégulière et le changement climatique mondial sont deux causes majeures du caractère changeant des inondations (Costache, Pham et al. 2019)

Les inondations deviennent plus importantes, plus fréquentes et plus répandues dans le monde. Les inondations ont touché plus de 232 896 personnes au Maroc entre 1995 et 2005, entraînant des pertes de plus de 295 millions USD (Baalousha, Younes et al. 2023) Les inondations ont causé d'importants dégâts dans les pays méditerranéens au cours des deux dernières décennies.

Les inondations dans les pays méditerranéens ont augmenté de façon spectaculaire au cours des deux dernières décennies en raison de l'urbanisation croissante et de la gravité du danger causé par le changement climatique (Salimi and Al-Ghamdi 2020). Compte tenu de toutes ces tendances inquiétantes, il est essentiel de réagir à ces dangers et d'améliorer la résilience de la région, ainsi que de mettre en place des réglementations appropriées. Pour atténuer les menaces d'inondation futures, il est nécessaire de mettre en place un plan de gestion intégrée des risques d'inondation, en mettant l'accent sur la réduction de la vulnérabilité globale de la société (Blöschl, Gaál et al. 2015). L'évaluation du risque d'exposition aux inondations dans ces lieux est essentielle pour une gestion réussie des inondations et une réduction des risques de catastrophe. Plusieurs méthodologies et procédures ont été utilisées pour estimer les risques d'inondation. La plupart des études sur les risques d'inondation sont basées sur des éléments climatiques et hydrologiques qui influencent la probabilité d'occurrence des inondations (Pham, Avand et al. 2020, Msabi and Makonyo 2021, Munpa, Kittipongvises et al. 2022).

Les modèles hydrologiques sont fréquemment utilisés pour prévoir l'ampleur des inondations et leurs effets possibles sur les personnes et les infrastructures. Ces modèles reproduisent le comportement des inondations en analysant les précipitations, l'utilisation des terres, les propriétés du sol et d'autres éléments. Ces modèles reproduisent le comportement de l'eau pendant une inondation en utilisant des données telles que les précipitations, l'utilisation des terres, les propriétés du sol et d'autres facteurs. Les résultats de ces modèles peuvent être utilisés pour identifier les zones inondables et estimer les effets possibles des inondations sur les bâtiments et les infrastructures. Bien que la modélisation soit en général un outil précieux, elle est basée sur des données statistiques et ne prend pas en compte d'autres éléments cruciaux tels que l'impact de l'exposition et l'utilisation du sol.

L'analyse décisionnelle multicritère (MCDA) est une méthode d'analyse des risques d'inondation qui prend en compte de nombreux critères et objectifs. Cette approche consiste à évaluer plusieurs caractéristiques du risque d'inondation, telles que la fréquence, l'intensité et la durée des inondations, et à les classer en fonction de leur pertinence relative. La technique MCDA peut aider les décideurs à identifier les menaces d'inondation les plus importantes et à hiérarchiser les mesures de réduction des risques d'inondation. Le système d'information géographique (SIG) est une autre technique largement utilisée pour évaluer les risques d'inondation. Cette technique permet de visualiser et d'analyser les zones inondables à l'aide de la topographie, de l'utilisation des sols et des données hydrologiques.

La technique du processus analytique hiérarchique (AHP) mesure précisément le poids des critères de décision et constitue une approche systématique de l'analyse multiparamétrique pour structurer, organiser et évaluer des jugements complexes (Mokhtari, Mezali et al. 2023). L'AHP a été largement appliquée aux ressources en eau et à l'hydrologie, notamment à l'identification des zones de recharge et à l'évaluation des risques d'inondation (Mohammed, Edwards et al. 2018, Oldham et Astbury 2018, Seejata, Yodying et al. 2018, Vojtek et Vojteková 2019). Bien que l'AHP soit un excellent outil, sa dépendance à l'égard des avis d'experts peut conduire à des résultats subjectifs et à une incertitude dans le processus. Le processus de hiérarchie analytique floue (F-AHP) est une technique de prise de décision populaire pour évaluer et hiérarchiser les éléments qui contribuent au risque d'inondation (Li, Shi et al. 2009, Moslem, Farooq et al. 2022, Ali, Ullah et al. 2023). Le F-AHP combine la logique floue avec le processus de hiérarchie analytique (AHP). La logique floue est un instrument mathématique permettant de traiter l'imprécision et l'incertitude, tandis que l'AHP est une technique de prise de décision multicritère permettant d'évaluer et de hiérarchiser les options (Vojtek et Vojteková 2019). Le F-AHP combine les avantages des deux approches pour donner une évaluation plus complète et plus précise du risque d'exposition aux inondations. Le F-AHP est un outil décisionnel précieux pour l'évaluation et la hiérarchisation des éléments de risque d'inondation dans les zones arides.

La variante floue de l'AHP permet de prendre des décisions dans des conditions incertaines en utilisant des nombres entiers flous pour représenter des éléments et des critères imprécis. La technique F-AHP utilise une matrice de jugement floue avec des nombres flous pour générer des poids nets à partir de matrices de comparaison cohérentes et incohérentes, éliminant ainsi le besoin d'opérations supplémentaires d'agrégation et de classement (Saaty 1978). Des recherches antérieures ont utilisé la logique floue pour estimer le risque d'inondation dans des endroits secs, en tenant compte de caractéristiques telles que la topographie, l'utilisation des

terres et le type de sol. (Sutadian, Muttill et al. 2017) Le poids de chaque ensemble de données a été établi à l'aide de la méthode du processus hiérarchique analytique (AHP), et les valeurs de poids pertinentes ont ensuite été multipliées pour générer des valeurs floues. L'approche quantitative utilise des approches analytiques qualitatives telles que le processus de hiérarchie analytique, ainsi que des techniques informatiques douces telles que la logique floue.

1.18. Conclusion

À travers cette recherche bibliographique sur l'érosion et l'inondation, il a été démontré que l'érosion des sols constitue un phénomène naturel préoccupant, intensifié par des précipitations agressives, une mauvaise gestion des zones agricoles et un couvert végétal insuffisant. Ce processus entraîne le transport des particules de sol vers les bassins de stockage d'eau, réduisant leur capacité et aggravant les risques hydriques. Une gestion efficace des bassins versants exige une compréhension approfondie des facteurs locaux et des outils modernes comme l'AHP, la modélisation logique floue, la (RUSLE, EPM) et le SIG, qui ont permis dans notre région d'étude de cartographier les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique.

Par ailleurs, les inondations, souvent déclenchées par des précipitations torrentielles, constituent une autre menace majeure, particulièrement en Algérie, où elles provoquent des pertes humaines et matérielles importantes. Le risque d'inondation repose sur deux facteurs clés : l'aléa, étudié à travers le régime de crue des bassins versants, et la vulnérabilité, évaluée à partir d'études socio-économiques. Ces travaux soulignent l'urgence de mettre en place des plans de gestion et des mesures de protection pour réduire les impacts de ces catastrophes naturelles. Intégrer les données sur l'érosion et les inondations permettrait de développer des stratégies globales de gestion des bassins versants, tout en renforçant la sécurité des populations face à ces phénomènes.

Chapitre 2

Description de la zone d'étude

Chapitre 2. Description de la zone d'étude

2.1. Introduction

L'analyse des bassins versants de l'oued K'sob et de l'oued Boussellam constitue une approche pertinente pour appréhender les dynamiques hydrologiques et sédimentaires au sein d'environnements géographiques contrastés. Ces deux bassins sont particulièrement significatifs en raison de leur potentiel à générer des apports solides et liquides qui influencent directement la qualité et la quantité des ressources en eau, tout en contribuant l'envasement des réservoirs associés. Pour réaliser une comparaison adéquate entre ces deux bassins, il est crucial de déterminer les facteurs et les raisons qui influencent la variabilité hydrologique. Cette approche permet de mettre en lumière les différences fondamentales entre les bassins, notamment en termes de climat et de caractéristiques physiques. Effectivement, les paramètres morphométriques comme la configuration du bassin, l'élévation et l'inclinaison du terrain, sans oublier les conditions météorologiques, ont une influence déterminante sur la réaction hydrologique et le système d'écoulements. Une compréhension approfondie de ces éléments est indispensable pour évaluer l'importance des apports en sédiments et en eau, et pour comparer efficacement la dynamique hydrologique des bassins versants de l'oued K'sob et de l'oued Boussellam.

2.2. Un aperçu historique de la zone d'étude

Les montagnes s'étendant du Nord-Est au Nord-Ouest de l'Algérie forment un relief distinctif qui longe la mer Méditerranée, de Guerbès jusqu'aux frontières tunisiennes. Ce paysage résulte des phases tectoniques successives ayant marqué la région, avec des formations montagneuses profondément érodées en raison de la présence de matériaux sédimentaires tendres, tels que les argiles, les marnes et les marno-calcaires. Les pentes abruptes, issues de la tectonique récente survenue notamment au Pléistocène et à l'Holocène, ont également joué un rôle déterminant dans la structuration de ce relief.

Bien que les altitudes restent généralement modestes, avec des lignes de crêtes dépassant 1800 mètres dans les hautes montagnes et des altitudes inférieures à 500 mètres dans les basses montagnes, le Nord-Est algérien présente un caractère montagnard prononcé. Ce relief se caractérise par la présence de nombreuses vallées qui drainent la région. Parmi les principaux affluents, l'Oued Boussellam contribue au bassin de la Soummam, tandis que l'Oued K'sob alimente le barrage de K'sob dans le bassin Hodna. (Figure 2.1)

Les régions montagneuses et semi-arides de l'Algérie, en particulier celles du Nord-Est, sont particulièrement vulnérables à l'érosion hydrique et aux inondations. Les fortes pentes, combinées à la nature tendre des sols, favorisent l'érosion lorsqu'il y a des pluies intenses. Dans les zones semi-arides, la faible végétation et les sols peu cohérents augmentent également la susceptibilité à l'érosion. Les inondations, quant à elles, sont accentuées par les systèmes fluviaux qui drainent rapidement les eaux de pluie vers les bassins versants, entraînant des risques accrus de crues dans les vallées et les zones habitées. La gestion des crues et de l'érosion dans ces régions nécessite donc des stratégies adaptées aux caractéristiques géologiques et hydrologiques locales.

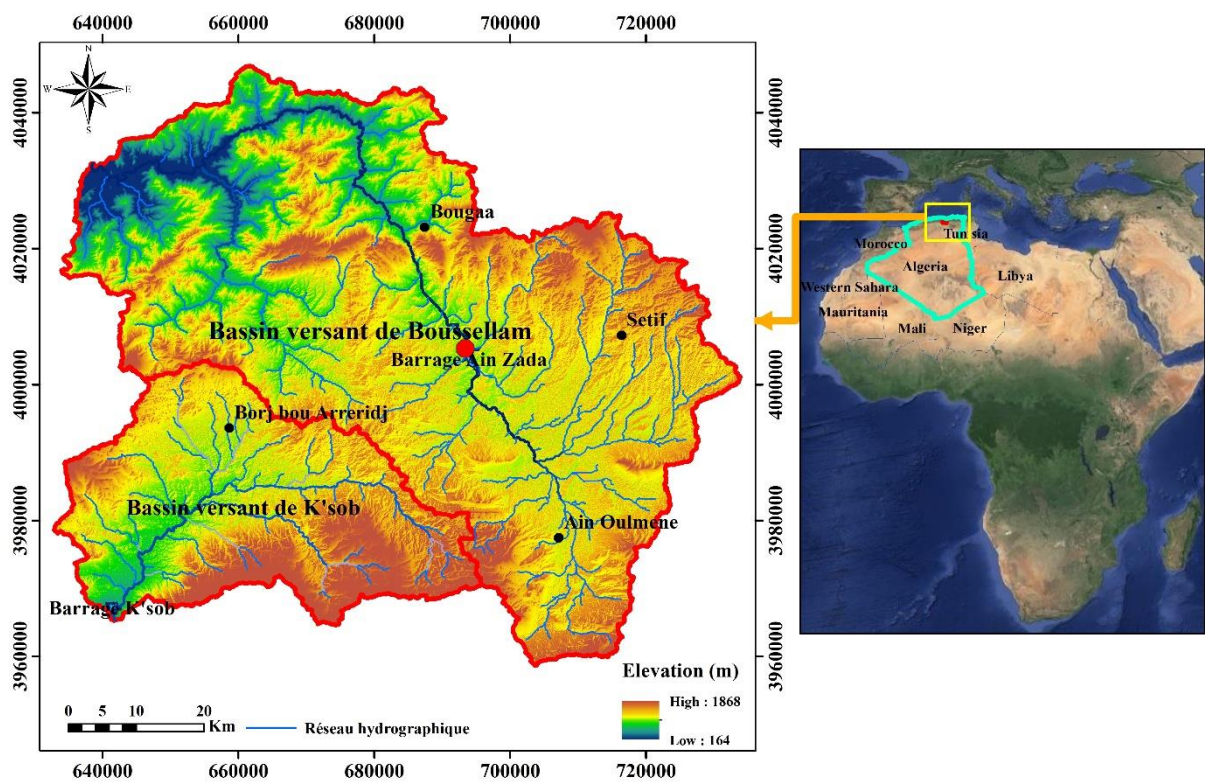


Figure 2.1. Localisation de la zone d'étude

2.2.1 Bassin versant de l'oued Boussellam

Le sous-bassin de Boussellam, identifié sous le numéro 15 par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), constitue une partie du grand bassin versant de la Soummam, l'un des 17 grands bassins hydrologiques de l'Algérie. Ce sous-bassin est divisé en quatre sous-bassins distincts (1506, 1507, 1508, 1509) et se situe dans la région centrale du Nord de l'Algérie, englobant administrativement les wilayas de Béjaia et de Sétif. Il prend sa source principale dans les massifs montagneux du Djebel Meghris, au Nord de Sétif, et du

Djebel Bouteleb, au Nord de la commune de Magra, qui drainent leurs eaux vers l'Oued Soummam (Figure 2.2).

L'Oued Boussellam, avec ses 148 km de longueur, est le principal affluent du Soummam et constitue le principal axe hydrographique de la Wilaya de Sétif. Il draine un bassin versant de 4301 km², ce qui représente 54,9 % de la superficie totale du bassin de la Soummam, avec un périmètre de 420 km, conférant ainsi au bassin une forme allongée ($Kc = 1,79$). La station hydrométrique de Ain Zeda surveille le débit de cette rivière. À l'exutoire, l'altitude est de 160 m, tandis que le point culminant se trouve au sommet du Djebel Meghris, à 1775 m, offrant une dénivelée totale de 1065 m. L'Oued Boussellam traverse plusieurs agglomérations au Nord de Sétif, telles que Bougaâ, Hammam Gergour, Oued Sebt, Charchar, et Béni Ourtillene, ainsi que des localités au Sud, comme Farmatou, Sidi el Khier, Mezloug, et Hammam Ouled Yelles.

Géographiquement, le sous-bassin de Boussellam est délimité à l'est par le sous-bassin de Hodna, au sud par le sous-bassin de Boussellam moyen, et à l'ouest par les massifs du Djebel Medjounes, Dj Aissel, Dj Megris et Dj Matrona. Au nord, il est bordé par Kef Boudjemline, Dj. Merouane, Dj. Youssef et Dj. Sekrine, tandis qu'au sud, il est limité par Dj. Hassane, Dj. Sattor et Kef Della. Le sous-bassin de Boussellam amont s'étend principalement sur les hauts plateaux sétifiens.

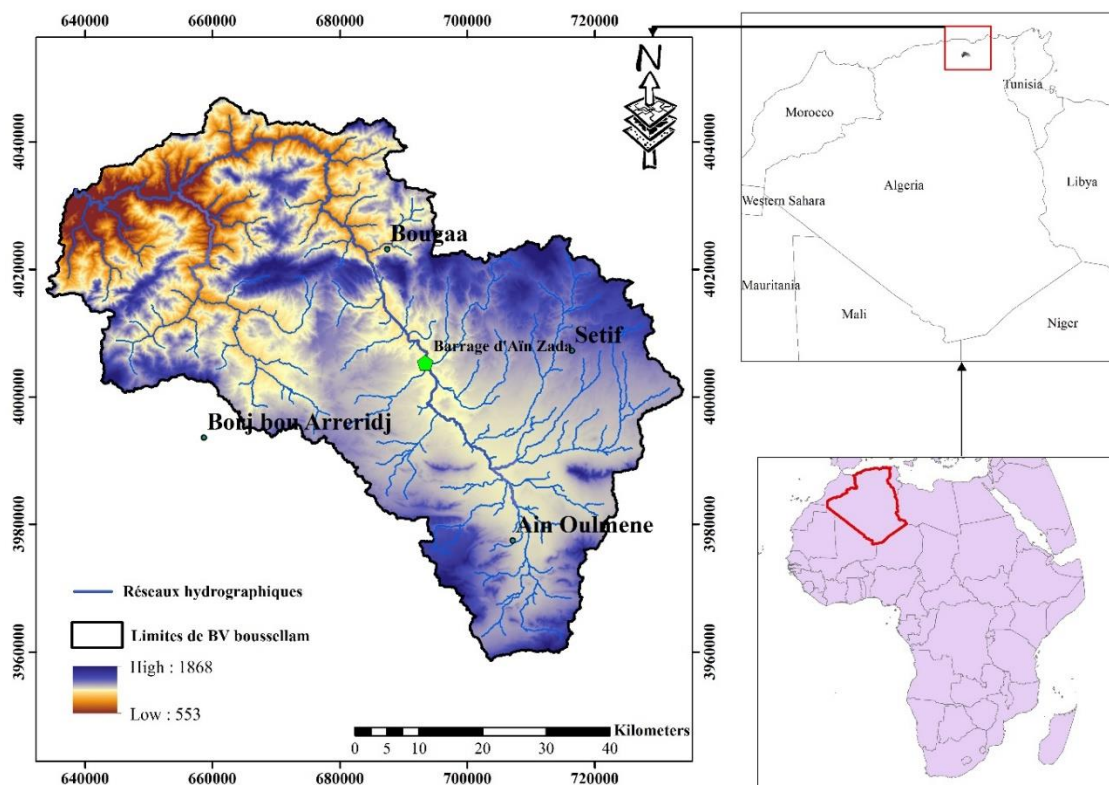


Figure 2.2. Localisation géographique de bassin versant de L'Oued Boussellam

2.2.2 Bassin versant de l'oued K'sob

Le bassin versant de l'Oued K'sob se situe dans la région centre-nord de l'Algérie et est considéré comme l'un des sous-bassins du grand bassin versant, le bassin de la K'sob, qui porte le numéro 05 selon la carte classée par l'ANRH. Sa superficie est de 1479 km² et sa circonférence est de 221 km. Il est caractérisé par un axe hydrographique qui descend des plateaux de l'Etat de Bordj Bou Arreridj, et s'étend sur environ 80 km jusqu'à l'embouchure du bassin, qui est le barrage de la K'sob.

Le bassin versant de oued K'sob présente une morphologie allongée ($K_c = 1,61$) et une topographie fortement variée. Le cours d'eau principal prend sa source dans les hauteurs de Bordj Bou Arreridj au nord, se formant par la convergence de plusieurs petites vallées qui s'étendent vers le sud. Ce cours d'eau est également alimenté par des vallées adjacentes provenant du nord-est, notamment des hauteurs d'Ain Oulman, avant de converger vers le lit principal de oued K'sob. L'ensemble des eaux collectées dans ces vallées est acheminé vers la vallée principale de oued K'sob, qui les transporte ensuite vers le site de confluence au niveau du barrage de K'sob.

L'oued K'sob, principal affluent du bassin du Hodna, s'étend sur une longueur de 74 km et constitue l'axe hydrographique majeur de la Wilaya de M'sila. Ce bassin est surveillé par la station hydrométrique de Medjaz, située à 10 kilomètres au nord du barrage de K'sob. L'altitude à l'exutoire est de 553 m, tandis que le point culminant, situé au sommet du Djebel Meghris, atteint 1868 m, soit une dénivellée totale de 1055 m. Le bassin versant du oued K'sob est délimité à l'est par les dj Kennder et chlenndj, tandis qu'au sud, il est bordé par le dj Al-Maadid, qui s'étend jusqu'aux dj Mansoura et Morissane à l'ouest. Au nord, le bassin versant est délimité par les hauteurs des plateaux supérieurs.

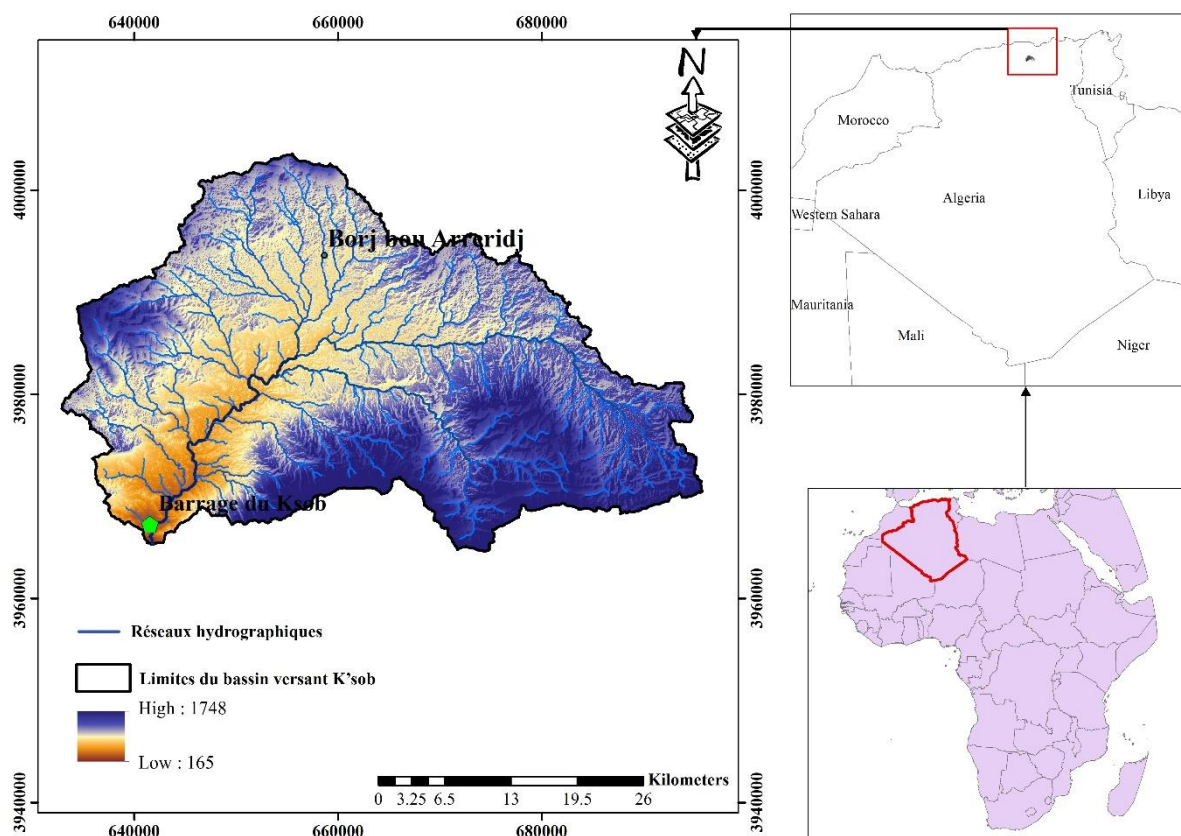


Figure 2.3. Localisation géographique de bassin versant de l'Oued K'sob

2.3 Géologie de la zone d'étude

2.3.1 Géologie du bassin versant de K'sob

L'hydrographie d'une région est fortement influencée par sa géologie, en particulier la lithologie, qui impacte à la fois le régime des cours d'eau est déterminé par deux processus hydrologiques principaux (ruissellement, infiltration) et les processus d'érosion et de transport des sédiments. Les formations géologiques présentes dans un bassin versant modifient la répartition des écoulements de surface et déterminent la nature des dépôts alluvionnaires. Par exemple, un bassin composé de matériaux très perméables et recouvert d'une végétation dense aura généralement une faible densité de drainage, favorisant une infiltration accrue des eaux de surface. Par contre, un bassin formé de roches friables mais étanches, telles que les marnes et les argiles, et possédant une végétation modérée, aura généralement une forte densité de drainage, ce qui favorise le ruissellement plutôt que l'infiltration. Le bassin versant de K'sob présente une géologie diversifiée dominée par des formations datant principalement du Crétacé et du Miocène. Les terrains crétacés sont largement répandus, formant la structure géologique majeure de la région. Ils sont constitués de roches sédimentaires, notamment des calcaires, des marnes et des grès, souvent affectés par des failles et des dislocations tectoniques. Les

formations miocènes, quant à elles, apparaissent dans certaines zones et sont principalement composées de dépôts marins et continentaux.

Le bassin se distingue par la présence de plusieurs failles, certaines orientées Nord-Ouest/Sud-Est et d'autres Est-Ouest, témoignant d'une histoire tectonique complexe. Ces failles ont joué un rôle important dans la morphologie actuelle du bassin, influençant l'écoulement des eaux et la formation des reliefs. Les structures géologiques, telles que les plis et les failles, confèrent à la région une topographie accidentée, en particulier autour du Djebel Meghris, le point culminant du bassin versant.

En somme, la géologie du bassin de K'sob reflète une longue histoire géologique, marquée par des phases tectoniques successives et une diversité lithologique influençant directement l'hydrologie et la morphologie du bassin.

2.3.2 Géologie du bassin versant de Boussellam

Le bassin versant de Boussellam se trouve dans le nord-est de l'Algérie, au cœur des régions montagneuses des chaînes des Babors et des Bibans. Il se caractérise par une grande diversité géologique, résultant de la convergence de multiples formations et structures.

2.3.2 .1. Contexte géologique régional

Le bassin de l'oued Boussellam est principalement situé dans l'Atlas tellien, une région montagneuse d'Algérie qui fait partie des chaînes plissées alpines. Ces chaînes sont le résultat de la collision entre la plaque africaine et la plaque eurasienne durant le Tertiaire (à partir du Crétacé supérieur). Ce processus a engendré une succession de plis et de failles qui caractérisent le relief de cette zone.

2.3.2 .2. Types de roches

Le bassin est composé de plusieurs types de roches correspondant à différentes périodes géologiques :

- **Roches sédimentaires** : Les calcaires, dolomies, et marnes sont des formations importantes dans cette région, datant principalement du Jurassique et du Crétacé. Les calcaires jurassiques, très fracturés, sont particulièrement visibles dans les montagnes environnantes. Ces roches sont souvent karstiques, favorisant l'infiltration de l'eau et jouant un rôle crucial dans l'hydrologie de la région.
- **Roches magmatiques et métamorphiques** : Bien que les roches sédimentaires dominent, il existe des affleurements de roches magmatiques (essentiellement des

basaltes et des gabbros) et de roches métamorphiques (schistes et quartzites). Ces roches plus anciennes appartiennent souvent à des terrains plus profonds qui ont été soulevés lors des processus tectoniques.

2.3.2 .3. Structures tectoniques

Le bassin versant de l'oued Boussellam est situé dans une région géologiquement active, dominée par des structures tectoniques complexes résultant de l'orogénèse alpine, qui a façonné le relief actuel de l'Atlas tellien. Cette région est caractérisée par des plis et des failles qui influencent à la fois la morphologie et l'hydrologie du bassin.

- **Plis :** Les plis serrés et déversés, typiques des chaînes alpines, sont fréquents dans le bassin. Ces plis sont souvent orientés selon des axes nord-est/sud-ouest, parallèlement aux grandes structures tectoniques de la région. Ils résultent de la compression due à la collision entre les plaques africaine et eurasiatique.
- **Failles :** Le bassin est traversé par plusieurs failles normales et inverses, créant des décrochements qui influencent le tracé de l'oued Boussellam et de ses affluents. Les failles majeures de la région, dont certaines sont actives, jouent un rôle clé dans le contrôle des écoulements d'eau, tant en surface que dans les aquifères souterrains. Ces failles créent également des dénivelés abrupts qui accentuent les phénomènes d'érosion hydrique.
- **Karstification :** Les formations calcaires du bassin sont fortement karstifiées, créant des réseaux de cavités souterraines et de grottes. Ce phénomène de karstification est dû à la dissolution des calcaires par les eaux de pluie légèrement acides. Cela favorise une infiltration rapide de l'eau dans les roches calcaires, formant des réservoirs souterrains et réduisant parfois le débit de surface de l'oued Boussellam.

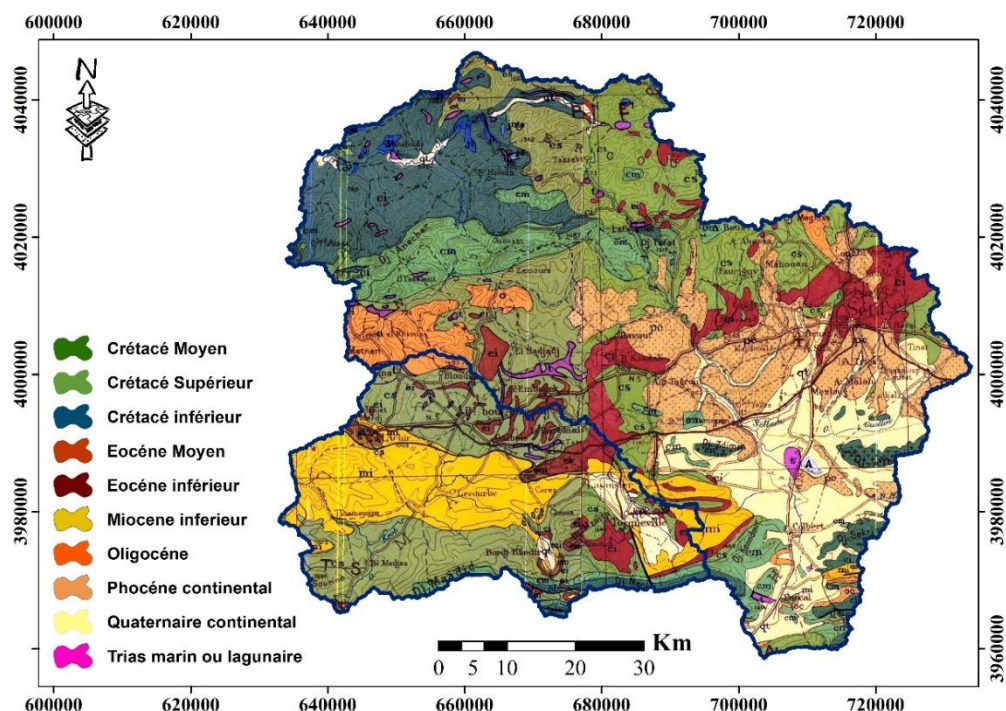


Figure 2.4. Carte géologique de la zone d'étude

2.4 Sols et végétation de la zone d'étude

2.4.1.1 Type de sols du BV de l'Oued K'sob

Le bassin versant de l'Oued K'sob se distingue par une grande variété de types de sols, ce qui affecte directement les phénomènes hydrologiques et d'érosion dans la région. La variation du comportement hydrologique est due aux différentes propriétés des sols, notamment en termes de capacité d'infiltration et de ruissellement et de réaction aux précipitations, ce qui fait de la gestion des ressources en eau et du contrôle de l'érosion un défi complexe. Dans les parties basses du bassin, ce sont les sols argileux qui prédominent, avec une forte capacité de stockage de l'eau, mais ils sont érodés par le ruissellement lors des fortes pluies et contribuent à la formation de croûtes superficielles qui augmentent le ruissellement et limitent l'infiltration. Dans les zones plus sèches et semi-désertiques, les sols sablonneux, qui ont une faible capacité de rétention d'eau et sont plus sensibles à l'érosion éolienne qu'à l'érosion hydrique, sont courants, mais ils peuvent provoquer une érosion hydrique lors de fortes pluies. Près de l'oued K'sob, on trouve des sols alluviaux dans les zones alluviales, qui sont très sensibles à l'érosion hydrique en raison de leur texture molle et de leur faible cohésion, et ces zones sont fréquemment touchées par des crues soudaines. Dans les zones montagneuses environnantes, telles que le Djebel Moghres, les sols calcaires résultant de la désintégration des roches calcaires prédominent. Ils sont peu profonds et rocheux, ce qui limite leur couverture végétale et

augmente le risque de ruissellement et d'érosion. Cette diversité de sols nécessite une approche prudente de la gestion de l'eau et de la réduction des risques d'érosion.

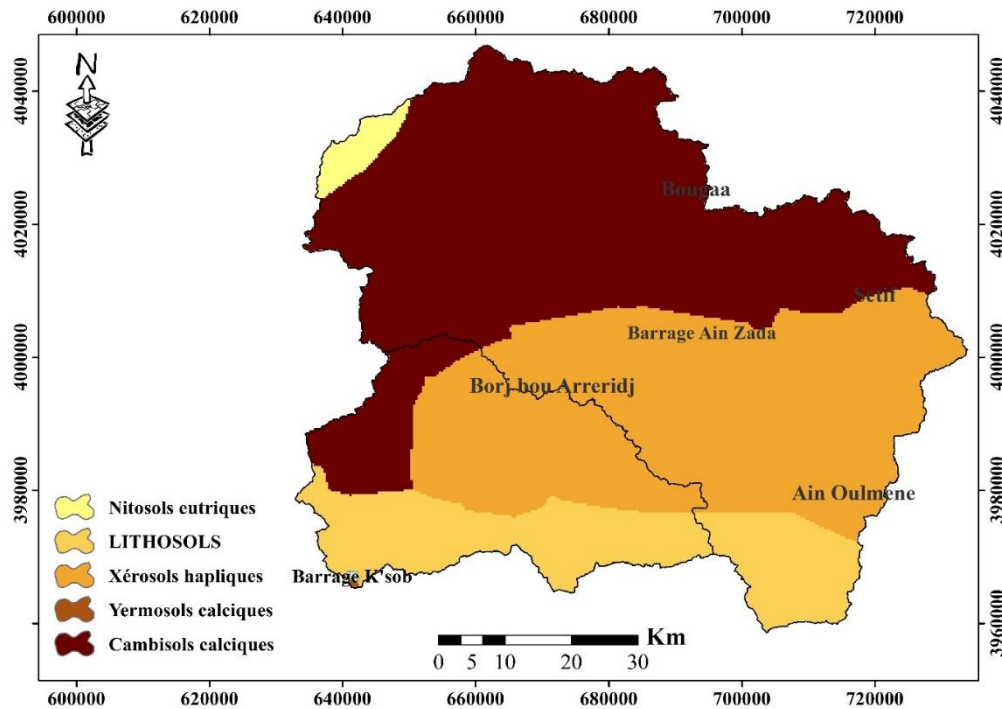


Figure 2.6. Carte des types de sols de la zone d'étude

2.4.1.2 Types de sols du bassin versant de l'oued Boussellam

Le bassin versant de l'oued Boussellam se caractérise par une grande diversité de types de sols, ce qui affecte directement la dynamique hydrologique et les processus d'érosion, faisant de la gestion des ressources en eau et de la protection contre les inondations et l'érosion dans cette zone un défi complexe. Le bassin versant est situé dans la région montagneuse du nord-est de l'Algérie, en particulier dans la wilaya de Sétif, et contient plusieurs types principaux de sols. Les sols calcaires sont prédominants dans les zones montagneuses, formés par la désintégration de roches calcaires, souvent peu profonds et à faible capacité de rétention d'eau, ce qui entraîne un ruissellement de surface rapide et un risque accru d'érosion dans les zones escarpées. Dans les zones à topographie douce, les sols argileux prédominent. Ils ont une grande capacité de stockage de l'eau, mais sont sujets au ruissellement lors de fortes pluies, ce qui favorise l'érosion de la nappe phréatique et l'apparition de ravines. Le long de l'oued Boussellam et dans les plaines environnantes, les sols alluviaux résultant des dépôts fluviaux, qui sont riches en nutriments et offrent des possibilités agricoles, mais sont sujets à l'érosion lors des inondations. Dans les zones intermédiaires entre les montagnes et les plaines, on trouve des sols sablo-limoneux qui se caractérisent par une infiltration modérée de l'eau, mais qui peuvent être

érodés par le ruissellement. Sur les terrains escarpés et accidentés, les sols rocheux, souvent minces ou absents, exposent les roches sous-jacentes et réduisent la capacité d'infiltration du sol, ce qui entraîne une augmentation du ruissellement.

2.4.2.1 Couvert végétal du bassin versant de l'oued K'sob

Le couvert végétal du bassin versant du l'oued K'sob est affecté par de multiples facteurs, principalement le climat sec, la pauvreté des sols et les activités humaines telles que l'agriculture et le surpâturage. Bien que relativement clairsemée, cette couverture joue un rôle essentiel dans la protection contre l'érosion des sols et la régulation de l'écoulement de l'eau. Dans les zones semi-arides, La végétation steppique est majoritairement dominée par l'alpha (*Stipa tenacissima*), qui stabilise le sol et limite l'érosion éolienne et hydrique, et par des arbustes d'armoise blanche (*Artemisia herba-alba*) résistants à la sécheresse, qui contribuent à maintenir l'humidité du sol. Le long des cours d'eau, notamment dans les zones sujettes aux inondations, la végétation est plus dense, avec des arbustes de tamaris adaptés aux sols salins et qui stabilisent les berges, ainsi que des roseaux (*Phragmites australis*) et des joncs, qui jouent un rôle dans le filtrage de l'eau et la régulation du ruissellement. Des arbres et arbustes épars, tels que l'acacia et le peuplier, se trouvent dans les zones à forte rétention d'eau, tout comme l'olivier sauvage (*Olea europaea* var. *sylvestris*) et le figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*), qui sont tolérants à la sécheresse et que l'on trouve souvent dans les zones d'agriculture traditionnelle.

Cependant, la dégradation de la végétation est un problème croissant en raison du surpâturage, de l'exploitation forestière et de l'agriculture intensive, ce qui entraîne des zones dénudées sujettes à l'érosion par l'eau. Dans ces zones, des plantes pionnières, telles que des graminées annuelles résistantes à la sécheresse, commencent à recoloniser, mais elles sont souvent insuffisantes pour contrôler l'érosion. Pour tenter de résoudre ce problème, des efforts de reboisement sont entrepris en utilisant des espèces locales résistantes à la sécheresse, comme le *Pinus halepensis*, afin de stabiliser le sol et d'améliorer la couverture végétale de la zone.

2.4.2.2 Couvert végétal du BV de l'oued Boussellam

La végétation du Bv de l'oued Boussellam varie en fonction de la topographie et des conditions climatiques. Les zones de haute altitude sont caractérisées par des forêts de montagne comprenant le chêne vert (*Quercus ilex*), arbre essentiel des forêts méditerranéennes sèches, qui couvre les pentes abruptes et limite l'érosion des sols, le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) qui résiste à la sécheresse et contribue à stabiliser les sols à moyenne altitude, et le cèdre de l'Atlantique (*Cedrus atlantica*) qui pousse dans les zones plus humides. Dans les plaines et les

bas-fonds au climat semi-aride, une végétation clairsemée de type steppique domine, avec des plantes alpha (*Stipa tenacississima*) qui jouent un rôle important dans la lutte contre l'érosion éolienne et hydrique, et des arbustes d'armoise blanche (*Artemisia herba-alba*), connus pour leur résistance à la sécheresse. Le long des principaux cours d'eau et de leurs affluents, la végétation devient plus dense et plus diversifiée, dominée par les peupliers et les saules qui stabilisent les berges et filtrent les sédiments, ainsi que par le tamaris, adapté aux sols salins et aux inondations temporaires. Cependant, certaines parties du bassin souffrent d'une dégradation environnementale causée par des activités humaines telles que la déforestation, le surpâturage et l'agriculture intensive, ce qui entraîne une perte importante de la couverture végétale et une érosion accrue des sols, en particulier dans les zones en pente où les sols sont fragiles.

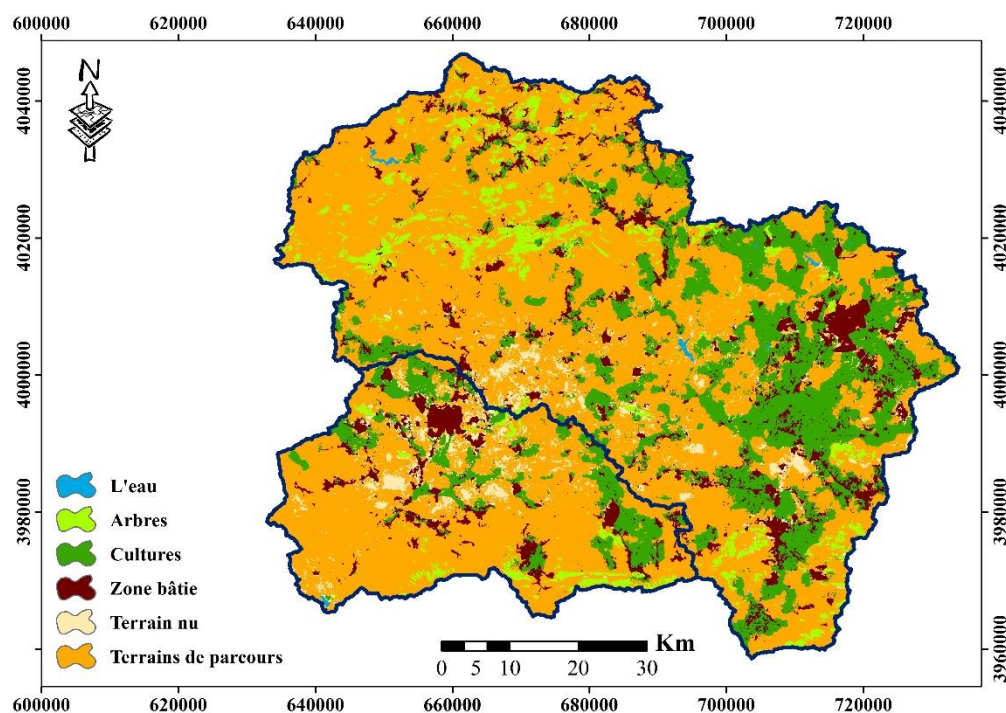


Figure 2.7. Carte de l'occupation du sol dans la zone d'étude

2.5 Analyse des pentes

Les pentes exercent une influence essentielle sur le potentiel morphogénique des bassins versants, influençant fortement l'érosion hydrique et le transport de matière. La moindre variation de la pente peut entraîner des répercussions importantes sur la dynamique érosive. Le ruissellement affecte le relief uniquement lorsque la pente est suffisamment longue pour permettre la concentration des eaux. L'analyse des pentes dans cette étude a été réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), et à l'aide de logiciels spécialisés Arc GIS. Le MNT permet de reconstituer la topographie en 3D et de manipuler quantitativement les données du terrain. L'utilisation de SIG (systèmes d'informations géographiques) pour produire des cartes

des pentes et des reliefs en 3D fournit des informations précieuses pour l'analyse morphologique et l'étude des processus tectoniques, climatiques ou lithologiques. Ces cartes, bien qu'informatives, nécessitent des analyses quantitatives pour mieux comprendre leur rôle dans l'érosion. Le calcul des pentes et leur répartition en classes a été réalisé, avec cinq classes spécifiques identifiées pour la zone d'étude. Voir le tableau suivant :

Tableau 2.1 : Typologie et classification des pentes

N° de classe	Classe de pente	Classes des Pente [%]	
		Bassin versant de l'oued k'sob	Bassin versant de l'oued Boussellam
1	Très faible	0 à 5	0 à 5
2	Faible	5 à 10	5 à 15
3	Modérée	10 à 20	15 à 30
4	Forte	20 à 35	30 à 40
5	Très forte	> 35	> 40

2.5.1 Pentés du bassin versant de l'oued k'sob

Le bassin versant de l'oued k'sob se caractérise par un terrain varié et irrégulier, où les pentes faibles et très faible à modérées dominent dans la partie nord-est, avec des inclinaisons inférieures à 10 %, couvrant environ 53 % de la superficie de la zone d'étude. (Figure 2.8)

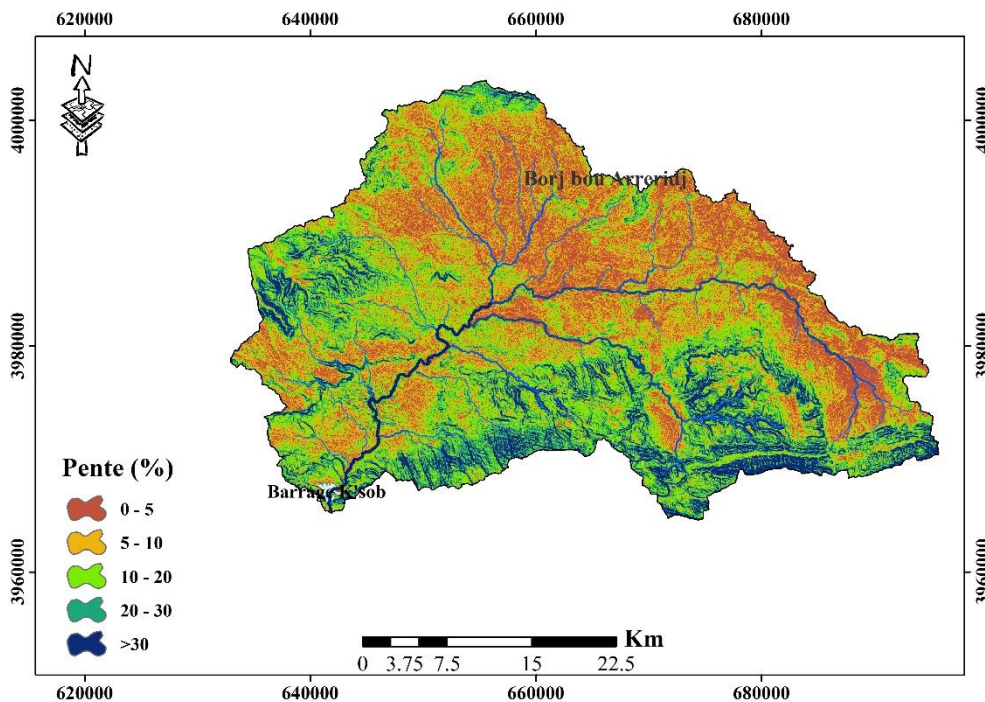


Figure 2.8. Carte des pentes du bv de l'oued k'sob.

Les pentes les plus fortes, dépassant 30 %, se trouvent principalement à l'extrême sud et à l'ouest, représentant 9,20 % de la surface totale. Les pentes intermédiaires, variant entre 10 % et 20 %, sont principalement situées au centre de la zone d'étude et représentent 25 % de la superficie du bassin versant (Figure 2.9).

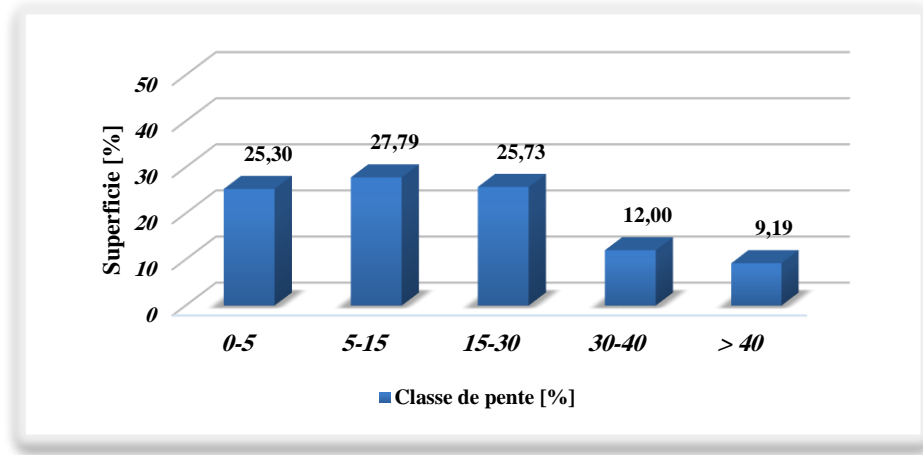


Figure 2.9. Distribution des classes de pentes dans le bassin versant de l'Oued K'sob.

2.5.2 Pentas du bassin versant de l'oued Bousellam

Le bassin versant de l'Oued Bousellam se caractérise globalement par une pente moyenne modérée. Dans sa partie nord-ouest, les pentes sont fortement marquées, en lien avec la présence de la chaîne montagneuse, allant de fortes à très fortes. En revanche, la partie sud-est du bassin présente un relief plus atténué, avec des pentes douces comprises entre 0 et 10 % (Figure I.10).

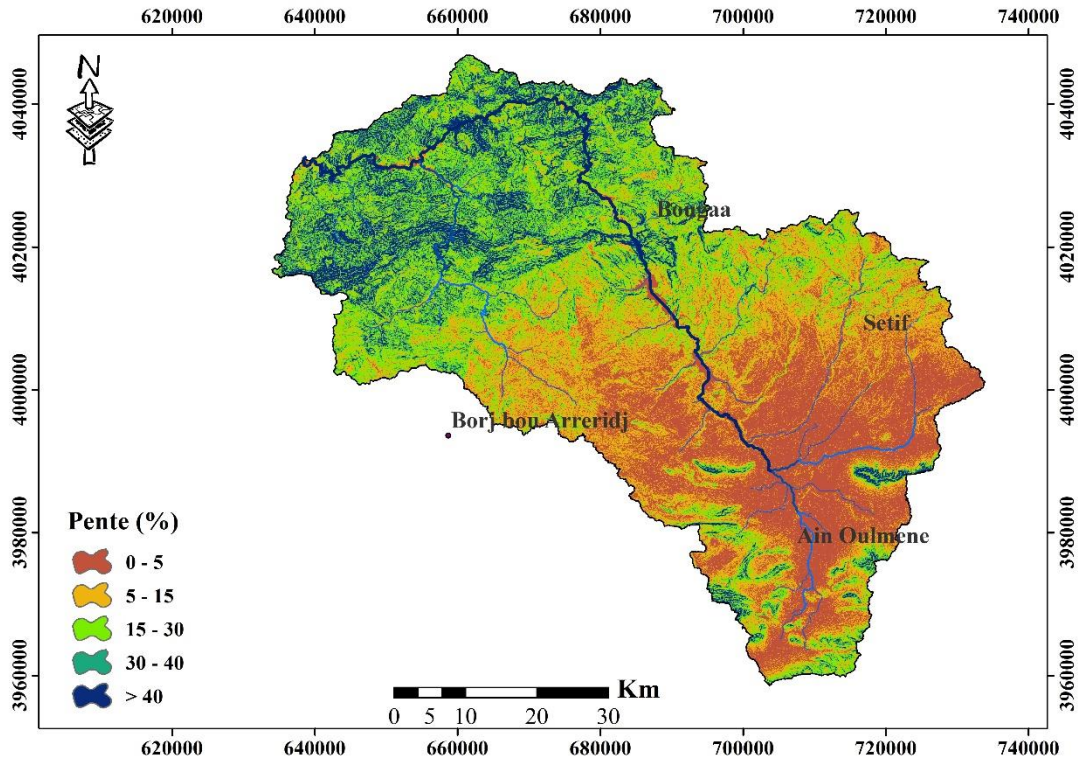


Figure 2.10. Carte des pentes du bassin versant de l'oued Bousellam.

Les classes de pente comprises entre 0 et 5 % ainsi que 5 et 15 % occupent environ 2405 hectares, ce qui correspond à 56 % de la superficie totale du bassin versant. La classe de pente allant de 15 à 30 % occupe près d'un quart de la superficie du bassin. Quant aux pentes supérieures à 30 %, touchent une partie plus importante du bassin, représentant plus de 19 % de sa superficie totale (Fig.II.11).

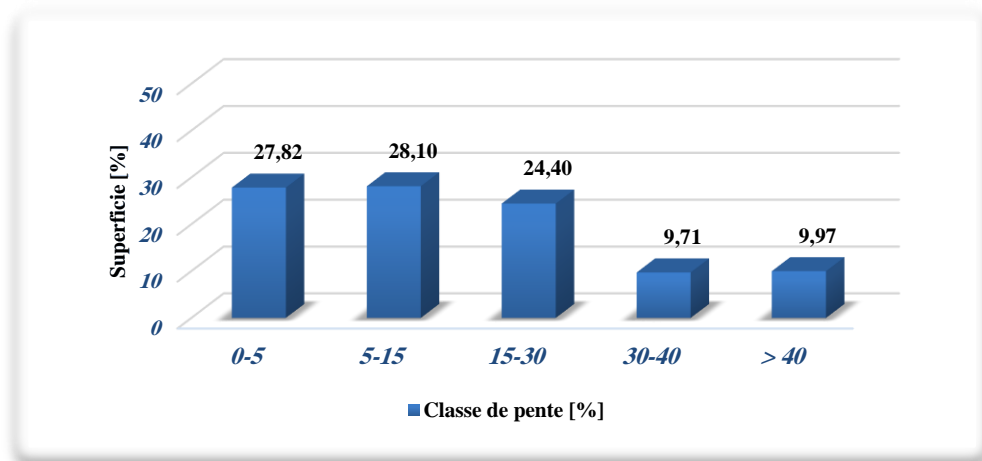


Figure 2.11. Distribution des classes de pentes sur le bassin versant de l'oued Bousellam.

2.6 Les caractères physiques et morphologiques

Le bassin versant représente une unité géographique essentielle pour l'étude des processus hydrologiques et environnementaux. Ses caractéristiques physiques et morphologiques jouent un rôle déterminant dans la gestion des eaux, la formation des sols, ainsi que dans la dynamique des écosystèmes qui y sont présents.

Cette étude analyse l'impact des caractéristiques morphologiques et physiques des bassins versants sur la dynamique de l'écoulement des eaux, en se concentrant sur des paramètres tels que la forme, le relief, l'altitude, la pente et le réseau hydrographique. Elle s'appuie sur des formules qui lient statistiquement ces caractéristiques au comportement hydrologique des bassins. L'étude vise à mieux comprendre comment ces paramètres, souvent interconnectés, influencent la transformation des précipitations en écoulement. Trois types d'indices morphométriques sont utilisés pour expliquer et classer ce comportement : les indices de relief, de forme et de taille, et ceux liés à l'organisation du réseau hydrographique. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un logiciel spécialisé (ArcGIS) et de modèles numériques de terrain (MNT), permettant une analyse détaillée et quantifiée.

2.6.1 La forme K_c

L'indice de Gravelius, également appelé indice de compacité ou coefficient de compacité de Gravelius, est l'un des indices morphométriques les plus utilisés pour décrire la forme d'un bassin versant. Il a été proposé par le géographe allemand Karl Gravelius en 1914 et permet de comparer la forme d'un bassin versant à celle d'un cercle idéal, qui est la forme géométrique la plus efficace pour concentrer l'écoulement d'eau (BOUGUERRA 2018). (BOUZERIA, H. 2018).

$$K_c = \frac{P}{P_{\text{cercle}}} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots (2.2)$$

$K_c \leq 1$ => Bassin versant de forme circulaire.

$K_c = 1,12$ => Bassin versant de forme carrée.

$K_c > 1,12$ => Bassin versant allonger.

De cette manière, l'indice de Gravelius est un outil essentiel pour étudier la géomorphologie et l'hydrologie des bassins versants, en offrant une analyse facile et comparative de leur forme. Il s'agit de la comparaison du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même superficie. Lorsque K_c se rapproche de 1, le bassin versant présente une forme quasi circulaire.

Lorsque K_C est supérieur à 1, le bassin versant adopte une forme allongée.

- K_C du bassin versant de l'Oued k'sob = **1.61**.
- K_C du bassin versant de l'Oued Boussellam = **1.79**.

Alors que les deux bassins versant présentent une forme allongée, cette forme induire de faibles débits de pointe de crue.

2.6.2 Le rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche en 1963, permet de comparer les bassins versants en évaluant l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement hydrologique. Cette approche consiste en une transformation géométrique du bassin versant, le réduisant à une forme rectangulaire tout en conservant des propriétés essentielles telles que la surface, le périmètre, l'indice de compacité et la répartition hypsométrique. Ainsi, les courbes de niveau du bassin se réorganisent pour devenir parallèles aux côtés du rectangle équivalent, sans affecter des paramètres comme la climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale ou la densité du réseau de drainage.

Un rectangle équivalent plus allongé indique généralement un drainage moins efficace, ce qui reflète des temps de concentration plus longs. Les dimensions de ce rectangle sont calculées à partir de formules géométriques qui maintiennent la cohérence avec les caractéristiques hydrologiques du bassin réel, comme suit :

Soit L et l la longueur et la largeur du rectangle, et P et S le périmètre et l'aire du bassin versant.

$$L = \frac{K_C \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (2.3)$$

$$l = \frac{K_C \cdot \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (2.4)$$

Avec :

K : Indice de compacité de Gravelius;

S : Surface du bassin versant [km^2];

P : Périmètre du bassin versant [km].

Après l'application numérique on trouve les résultats suivants (tableau 2.2) :

Tableau 2.2 : Résultats des Indices de Forme des Deux Bassins Versants Étudiés

Bassin versant	S [km^2]	P [km]	K_C [km]	L [km]	l [km]
Oued k'sob	1479	221	1,61	95	15.57
Oued Boussellam	4301	420	1,79	186.58	23.05

2.6.3 Caractéristiques des hypsométries

La courbe hypsométrique est un outil graphique utilisé pour représenter la répartition altimétrique des surfaces dans un bassin versant. Elle montre la relation entre l'altitude et la proportion de la superficie totale située au-dessus d'une certaine altitude. Cette courbe permet d'analyser la morphologie et l'évolution géomorphologique d'un bassin versant, offrant des informations sur les processus d'érosion et de sédimentation. Interprétation de la courbe hypsométrique :

- **Forme convexe** : Indique un bassin relativement jeune, avec peu d'érosion. La majeure partie de la surface se trouve à des altitudes élevées.
- **Forme concave** : Caractérise un bassin mature où l'érosion a progressé, et une grande proportion de la surface se situe à des altitudes basses.
- **Forme en S** : Représente un bassin en équilibre entre l'érosion et la sédimentation.

La courbe hypsométrique est utile pour comprendre le cycle de développement d'un bassin versant et prévoir sa capacité à retenir ou à évacuer les eaux de ruissellement. Elle peut également être utilisée pour comparer différents bassins versants ou pour évaluer l'impact de l'érosion à long terme.

Tableau 2.3 : Altitudes et surfaces cumulées des bassins versants

BV	Altitudes	Bornes supérieures	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
			km ²	%	km ²	%
Bassin versant de l'Oued k'sob	600 - 700	700	38,09	2,58	38,09	2,58
	700 - 800	800	90,19	6,11	128,28	8,69
	800 - 900	900	242,87	16,45	371,15	25,13
	900 - 1000	1000	332,99	22,55	704,14	47,68
	1000 - 1150	1150	372,60	25,23	1076,74	72,91
	1150 - 1300	1300	160,79	10,89	1237,54	83,80
	1300 - 1450	1450	149,95	10,15	1387,49	93,95
	1450 - 1600	1600	63,38	4,29	1450,87	98,24
	1600 - 1700	1700	17,81	1,21	1468,68	99,45
	1700 - 1850	1850	8,11	0,55	1476,79	100,00
Bassin versant de l'oued Boussellam	200 - 350	350	38,09	2,58	38,09	2,58
	350 - 500	500	90,19	6,11	128,28	8,69
	500 - 650	650	242,87	16,45	371,15	25,13
	650 - 800	800	332,99	22,55	704,14	47,68
	800 - 950	950	372,60	25,23	1076,74	72,91
	950 - 1100	1100	160,79	10,89	1237,54	83,80
	1100 - 1250	1250	149,95	10,15	1387,49	93,95
	1250 - 1400	1400	63,38	4,29	1450,87	98,24
	1400 - 1550	1550	17,81	1,21	1468,68	99,45
	1550 - 1700	1700	8,11	0,55	1476,79	100,00

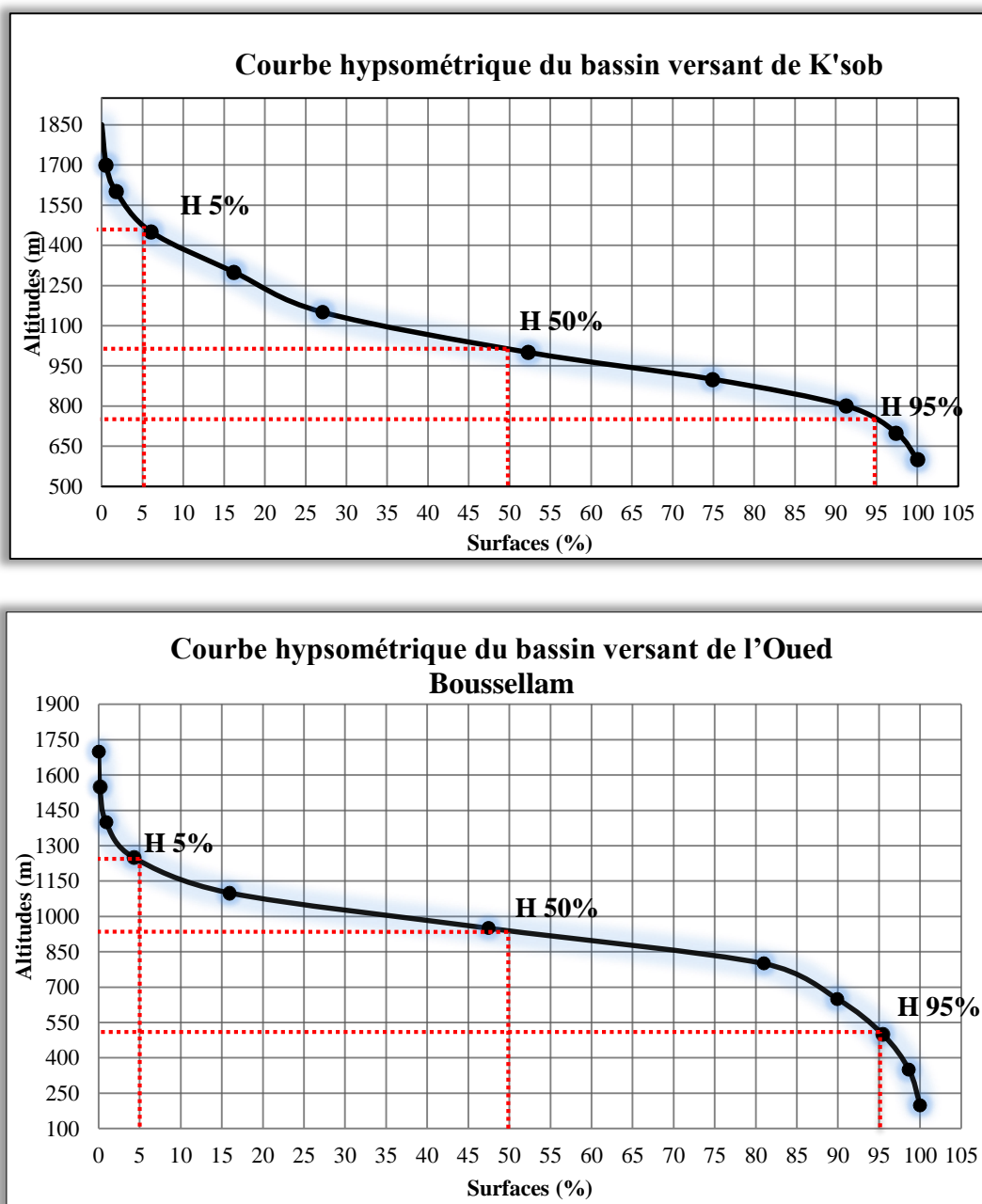


Figure 2.12. Courbes hypsométriques des deux bassins versants

Les résultats présentés dans le tableau 2.3, ainsi que les courbes hypsométriques de la figure 2.8, montrent que pour le bassin de l'Oued K'sob, les pentes sont relativement faibles aux altitudes élevées. Cela suggère une surface restreinte par rapport au changement d'altitude initial, ce qui est caractéristique des bassins versants jeunes à relief abrupt. En revanche, le bassin de l'Oued Boussellam semble plus proche d'un état « mature » ou équilibré, selon une classification reliant le degré d'érosion à l'âge du bassin. Globalement, la forme des courbes indique que ces bassins sont en transition entre un état de jeunesse et d'équilibre, ce qui suggère un potentiel érosif significatif.

2.6.4 Caractéristiques des altitudes :

Les altitudes les plus couramment utilisées dans les études hydrologiques des bassins versants, et qui sont extraites des courbes hypsométriques, sont:

Tableau 2.4 : Répartition des altitudes des deux bassins versants étudiés

Bassin versant	H _{min} [m]	H _{95%} [m]	H _{5%} [m]	H _{max} [m]
Oued k'sob	600	760	1480	1850
Oued Bousellam	200	500	1240	1750

➤ L'altitude moyenne

L'altitude moyenne, qui se déduit directement de la courbe hypsométrique, peut être définie comme la moyenne pondérée des altitudes des différentes zones du bassin versant, en tenant compte de la surface correspondante à chaque tranche d'altitude. Elle reflète la hauteur moyenne du terrain sur l'ensemble du bassin:

$$H_{moy} = \frac{\sum S_i \times H_i}{A} \dots\dots\dots (2.5)$$

Avec :

H moy : Altitude moyenne du bassin [m] ;

S_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : Superficie totale du bassin versant [km²].

Les altitudes moyennes des deux bassins étudiés sont égales à :

- **H_{moy}** du bassin versant de l'Oued k'sob = **1056**.
- **H_{moy}** du bassin versant de l'Oued Bousellam = **925.64**.

➤ L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude mesurée au point d'abscisse représentant 50 % de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. Cette valeur est généralement proche de l'altitude moyenne lorsque la courbe hypsométrique présente une pente régulière. Pour le bassin versant de l'Oued K'sob, l'altitude médiane est de 1 020 m, tandis que pour le bassin de l'Oued Bousellam, elle est de 940 m.

2.6.5 Dénivelée simple

Bien souvent, on définit la "dénivelée D" comme étant la différence de cote entre H_{5%} et H_{95%}

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \dots\dots\dots (2.6)$$

Les résultats de la dénivelée entre les altitudes correspondant à 5 % et 95 % de la surface sont représentés au tableau 2.5.

Tableau 2.5 : La dénivelée (D) entre les altitudes H95% et H5% des deux bassins versants étudiés.

Bassin versant	Altitudes H _{95%} [m]	Altitudes H _{5%} [m]	Dénivelée (D) [m]
Oued k'sob	760	1480	720
Oued Boussellam	500	1240	740

2.7 Caractéristiques des indices des pentes

Ces indices ont pour but de donner une description des pentes d'un bassin et de faciliter les comparaisons et les classifications.

2.7.1 Indice de pente globale **I_g**

L'O.R.S.T.O.M. a proposé une classification des bassins versants en fonction de leur indice de pente global, ce qui permet de regrouper les bassins selon leur susceptibilité à l'érosion, au ruissellement et aux crues.

L'indice global de pente est établi à partir de la courbe hypsométrique en identifiant les points où la surface supérieure ou inférieure est équivalente à 5 % de la superficie totale A. On détermine alors les altitudes H5% et H 95%, qui délimitent la zone dans laquelle se trouve 90 % de l'aire du bassin. La dénivelée est calculée comme suit : $D = H_{5\%} - H_{95\%}$. L'indice global de pente est ensuite obtenu selon la formule suivante:

$$I_g = \frac{D}{L} \dots\dots\dots (2.7)$$

Cet indice, très simple à calculer, est l'un des plus couramment utilisés. Il constitue la base d'une classification développée par l'O.R.S.T.O.M.

Tableau 2.6. Classification du relief selon **I_g** de l'O.R.S.T.O.M.

R1	Relief très faible	I_g < 0.002
R2	Relief faible	0.002 < I_g < 0.005
R3	Relief assez faible	0.005 < I_g < 0.01
R4	Relief modéré	0.01 < I_g < 0.02
R5	Relief assez fort	0.02 < I_g < 0.05
R6	Relief fort	0.05 < I_g < 0.1
R7	Relief très fort	0.1 < I_g

Selon la classification du relief établie par l'ORSTOM, un indice global de pente (I_g) compris entre 2 et 5 m/km indique un relief faible pour le sous-bassin de l'Oued Boussellam. En revanche, pour le sous-bassin versant de l'Oued K'sob, un I_g compris entre 5 et 10 m/km témoigne d'un relief assez faible..

L'indice de pente de Roche (IP) est calculé à partir du rectangle équivalent. Il correspond à la somme des racines carrées des pentes moyennes de chaque élément, pondérées par la surface concernée, selon la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^n \left[X_i \cdot \sqrt{\frac{d}{X_i}} \right] \dots\dots\dots (2.8)$$

- I_p : Indice de pente de Roche [%];
- L : Longueur de rectangle équivalent [m];
- X_i : Distance qui sépare deux courbes sur le rectangle (facteur de pondération), en [m];
- d : Distance entre deux courbes de niveau successives (peut être variable) en [m];
- d/X_i : Pente moyenne d'un élément [%].

L'indice de pente de Roche du rectangle équivalent de deux bassins étudiés. Elle est de **2.35 %** pour le bassin versant de l'oued k'sob et de **3.23 %** pour le bassin de l'oued Boussellam.

2.7.2 Dénivelée spécifique D_s

Lorsque la surface augmente, l'indice I_g diminue pour un même bassin, ce qui rendait difficile la comparaison entre des bassins de tailles différentes. Cet inconvénient n'est pas présent dans la dénivelée spécifique D_s , qui découle de la pente globale I_g en la corrigeant en fonction de l'effet de surface admis qui est inversement proportionnel à \sqrt{A} .

$$D_s = I_g \times \sqrt{A} \dots\dots\dots (2.9)$$

La dénivelée spécifique dépend uniquement de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L). Cela conduit à une deuxième classification selon l'O.R.S.T.O.M., qui est indépendante des superficies des bassins. Le bassin versant de l'Oued présente ainsi un relief modéré.

Tableau 2.7 : Classification du relief selon Ds

R1	Relief très faible	$Ds < 10 \text{ m}$
R2	Relief faible	$10 \text{ m} < Ds < 25 \text{ m}$
R3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < Ds < 50 \text{ m}$
R4	Relief modéré	$50 \text{ m} < Ds < 100 \text{ m}$
R5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < Ds < 250 \text{ m}$
R6	Relief fort	$250 \text{ m} < s < 500 \text{ m}$
R7	Relief très fort	$500 \text{ m} < Ds$

Les bassins versants étudiés de l'Oued Boussellam et de l'Oued K'sob présentent respectivement une dénivelée spécifique de 260,11 m et 291,48 m. Ces valeurs, comprises entre 250 m et 500 m, indiquent un relief fort.

2.8 Caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique désigne l'ensemble des chenaux qui recueillent et transportent les eaux de surface vers l'exutoire d'un bassin versant. La définition précise d'un cours d'eau peut poser des défis, notamment en ce qui concerne les cours d'eau temporaires ou intermittents. Selon le type de support cartographique utilisé, l'analyse du réseau peut varier en termes de niveau de détail : les photographies aériennes permettent de repérer des thalwegs, même de faible amplitude, tandis qu'une carte à l'échelle 1/500 000 ne mettra en évidence que les cours d'eau permanents et significatifs. Pour mieux caractériser le réseau hydrographique, il est souvent nécessaire de représenter son tracé sur une carte à une échelle appropriée. L'imagerie spatiale s'avère également précieuse pour cette identification. Divers paramètres descriptifs sont alors employés pour définir les caractéristiques du réseau hydrographique, permettant ainsi une compréhension approfondie de sa structure et de son fonctionnement.

2.8.1 Organisation et classification du réseau hydrographique

Pour établir le nombre de ramifications du réseau, on attribue un numéro à chaque cours d'eau selon son importance. L'ordre du cours d'eau, aussi appelé numérotation, peut varier selon les auteurs. Nous opterons pour la catégorie de STRAHLER parmi ces différentes options:

- tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1,
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n + 1$,
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par:
 $n + n = n + 1$ et $n + m = \max (n,m)$

A l'aide du logiciel ArcGis, le réseau hydrographique du bassin versant de l'est d'ordre 7.

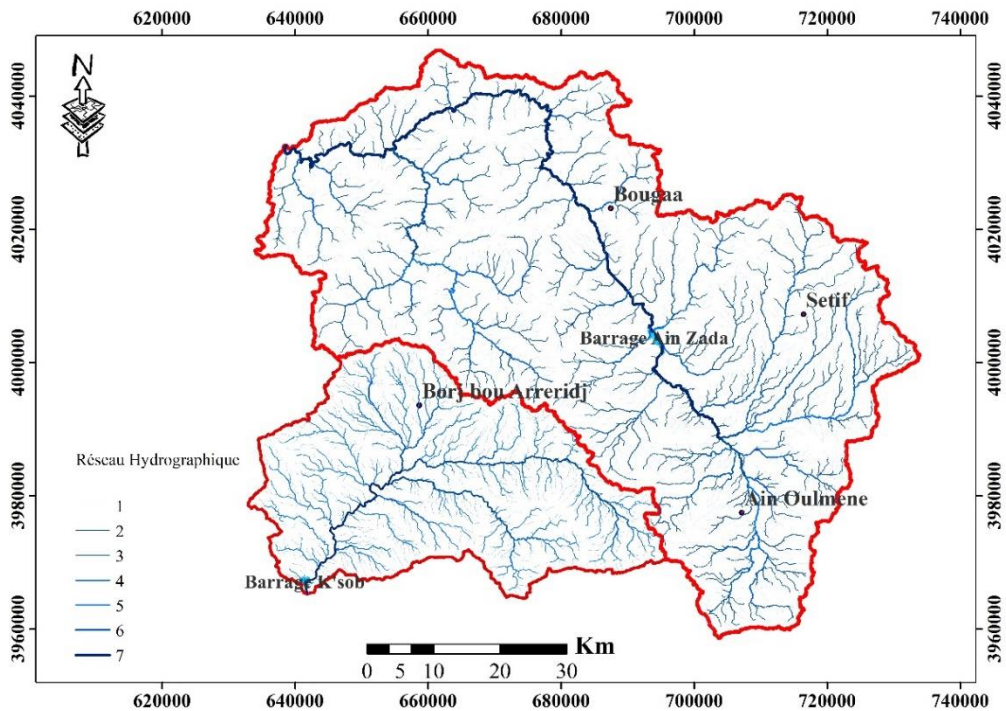


Figure 2.13 : Réseau hydrographique des bassins versants

2.8.2 Pente moyenne brute du cours d'eau principal

La pente moyenne d'un cours d'eau est déterminante pour la vitesse à laquelle l'eau parvient à l'exutoire du bassin, influençant ainsi le temps de concentration. Cette variable est essentielle, car elle affecte le débit maximal qui peut être observé. Une pente abrupte favorise un écoulement superficiel rapide, tandis qu'une pente douce ou nulle permet à l'eau de s'infiltrer plus longtemps dans le sol, soit partiellement, soit complètement. Pour évaluer les pentes moyennes et partielles des cours d'eau, on se base sur le profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus répandue pour calculer la pente longitudinale consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{\text{moy}} = \Delta H_{\text{max}}/L \dots\dots\dots (2.10)$$

P_{moy} : Pente moyenne du cours d'eau [m/km];

ΔH_{max} : Dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire);

L : Longueur du cours d'eau principal [km].

2.8.3 La longueur du cours d'eau principal

La distance curviligne de l'exutoire à la ligne de partage des eaux correspond à la longueur du cours d'eau principal (L), en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lors d'un

embranchement, et par extension jusqu'à la limite topographique du bassin versant. En cas de segments de même ordre à l'embranchement, on privilégie celui qui draine la plus grande surface. Pour les deux bassins analysés, la longueur du cours d'eau principal du bassin versant de l'Oued K'sob est de 73,70 km, tandis que celle du bassin de l'Oued Boussellam mesure 148 km.

2.8.4 La densité de drainage

La densité de drainage est une mesure utilisée en hydrologie et en géomorphologie pour déterminer la densité du réseau hydrographique (rivières, ruisseaux, canaux) dans un bassin versant donné. Elle est calculée en divisant la longueur totale des cours d'eau dans une zone par la superficie de cette même zone.

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} \dots\dots\dots (2.11)$$

Avec :

Dd : Densité de drainage [km/km²] ;

Li : Longueur des cours d'eau [km] ;

A : Surface du bassin versant [km²].

La densité de drainage est influencée par la géologie (structure et lithologie) ainsi que par les caractéristiques topographiques du bassin versant. Elle est également affectée, dans une certaine mesure, par les conditions climatologiques et anthropiques.

La densité de drainage (Dd) reflète le degré de dissection topographique et le potentiel d'écoulement dans un bassin versant. Une densité de drainage élevée suggère un ruissellement important et une réponse hydrologique rapide, ce qui se traduit généralement par une infiltration réduite. À l'inverse, une faible densité de drainage est souvent associée à un ruissellement plus limité et à une infiltration plus élevée.

Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued K'sob s'étend sur une longueur totale de 1882 km, ce qui correspond à une densité de drainage de 2,27 km/km². En revanche, le bassin versant de l'Oued Boussellam présente une densité de drainage de 1,19 km/km², pour un réseau hydrographique totalisant 5101 km.

2.8.5 La densité hydrographique

La densité hydrographique correspond à la quantité de cours d'eau présents par unité de surface.

$$F = \frac{\sum Ni}{A} \dots\dots\dots (2.12)$$

Où :

F : Densité hydrographique [km²] ;

Ni : Nombre des cours d'eau;

A : Superficie du bassin [km²].

Dans le cadre de cette étude, nous appliquons le schéma de Strahler pour attribuer une valeur de 1 à un cours d'eau dépourvu d'affluents. La valeur de chaque cours d'eau est ensuite déterminée en considérant qu'un cours d'eau d'ordre n+1 résulte de la confluence de deux cours d'eau d'ordre n, et ce, de manière itérative. Par conséquent, l'ordre de Strahler d'un bassin versant est défini par l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire (BOUGUERRA 2018).

Cette classification conduit à la notion de fréquence des talwegs, définie comme le rapport entre le nombre total de talwegs d'ordre 1 et la superficie du bassin versant, exprimée en kilomètres carrés. Ce paramètre offre un indicateur de densité en nombre, qui peut être comparé à l'effet de densité en longueur représenté par la densité de drainage (Dd). De plus, ce paramètre morphométrique permet d'expliquer de manière plus précise l'intensité de l'érosion linéaire.

2.8.6 Le coefficient de torrentialité

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage

$$C_t = Dd \times F \dots\dots\dots (2.13)$$

Les deux bassins étudiés présentent généralement un coefficient de torrentialité relativement élevé, s'élevant à 8,54 pour le bassin versant de l'Oued K'sob. En revanche, le bassin versant de l'Oued Boussellam affiche un coefficient de torrentialité plus faible, avec une valeur de 2,76.

2.8.7 Temps de concentration

Le temps de concentration constitue un paramètre fondamental en hydrologie, représentant le laps de temps nécessaire à une goutte d'eau, partant du point le plus éloigné d'un bassin versant, pour atteindre son exutoire. Ce concept est crucial pour comprendre les dynamiques d'écoulement des eaux pluviales et pour évaluer la réactivité d'un bassin versant aux précipitations. Il est exprimé à l'aide de la formule suivante:

Formule de Giandotti pour calcul du temps de concentration

$$T_c = \frac{4 \sqrt{A} + 1,5 L}{0,8 \sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \dots\dots\dots (2.14)$$

A : Superficie du bassin [km²];

L : Longueur du thalweg principal [km];

H_{moy} : Altitude moyenne [m];

H_{min} : Altitude minimale [m];

A : Superficie du bassin versant [km²].

La détermination du temps de concentration est cruciale pour une meilleure compréhension de la réponse hydrologique d'un bassin. Ce paramètre ne dépend pas uniquement de la superficie, mais est également influencé par divers facteurs, tels que la lithologie, les précipitations et le relief. Les résultats obtenus indiquent que le temps de concentration pour le bassin versant de l'Oued K'sob est estimé à 15,48 heures, tandis que pour le bassin versant de l'Oued Boussellam, il s'élève à 17,44 heures.

2.8.8 Vitesse d'écoulement de l'eau

Elle est donnée par l'expression suivante

$$V_e = \frac{L}{T_c} \dots\dots\dots (2.15)$$

V_e : Vitesse d'écoulement de l'eau [m /s];

L : longueur de talwegs principal [m];

T_c : temps de concentration en [s].

Le cours d'eau principal du bassin versant de l'Oued Boussellam présente une vitesse moyenne d'écoulement de 8,49 km/h, tandis que la vitesse d'écoulement des eaux superficielles du bassin versant de l'Oued K'sob est estimée à 4,76 km/h.

Tableau 2.8 : Synthèse des caractéristiques géométriques et hydromorphométriques des deux bassins versants

Caractéristiques morphométriques et hydrographiques	Symboles	Unités	Bassin versant	
			Oued k'sob	Oued Boussellam
La surface	S	km ²	1479	4301
Le périmètre	P	km	221	420
L'indice de compacité de Gravelius	Kc	-	1.61	1.79
L'altitude maximale	H _{max}	m	1850	1750
L'altitude minimale	H _{min}	m	600	200
l'altitude à 95%	H _{95%}	m	760	500
l'altitude à 50%	H _{50%}	m	1020	940
l'altitude à 5%	H _{5%}	m	1480	1240
L'altitude moyenne	H _{moy}	m	1055.89	925.64
La dénivelée simple	D	m	720	740
La dénivelée spécifique	Ds	m	291.48	260.11
La longueur du rectangle équivalent	L _{rec}	km	95	186.58
La largeur du rectangle équivalent	l _{rec}	km	15.57	23.05
La pente moyenne du bassin versant	I _{bv}	%	32.05	23.63
La longueur du cours d'eau principal	L	km	73.50	148
La pente moyenne du cours d'eau principal	I _{cp}	%	16.96	10.47
Le temps de concentration	Tc	heures	15.48	17.44
L'indice de pente global	Ig	%	7.58	3.97
L'indice de pente de Roche	I _p	%	3.23	2.35
La densité de drainage	Dd	km/km ²	1.27	1.19
La densité hydrographique	F	km/km ²	6.71	2.33
Le coefficient de torrentialité	C _t	km/km ⁴	8.54	2.76
La vitesse de l'écoulement de l'eau	Ve	km/min	4.76	8.49

2.9 Conclusion

L'analyse morphométrique et hydrographique des bassins versants de l'Oued K'sob et de l'Oued Boussellam constitue une étape cruciale pour appréhender la dynamique du ruissellement et évaluer le risque d'inondation. Les résultats obtenus révèlent des différences significatives entre les deux bassins, notamment en ce qui concerne la superficie, la topographie et les pentes, ce qui se traduit par des variations dans leur réponse hydrologique.

Le bassin de l'oued Boussellam présente une superficie plus grande (4301 km²) par rapport à celui de l'oued K'sob (1479 km²), avec un périmètre plus long et des pentes plus modérées, ce qui indique une plus grande capacité d'absorption des eaux de pluie. Cependant, l'indice de

pression topographique (K_c) montre que le bassin de l'oued K'sob est plus régulier (1,61) par rapport à l'oued Boussellam (1,79), ce qui peut influencer la vitesse d'évacuation des eaux.

L'analyse topographique révèle que l'oued K'sob est caractérisé par des altitudes plus élevées, atteignant une altitude maximale de 1850 m contre 1750 m dans l'oued Boussellam, avec une altitude moyenne plus élevée (1055,89 m contre 925,64 m). La pente moyenne du bassin (I_{bv}) de l'oued K'sob (32,05%) est significativement plus élevée que celle de l'oued Boussellam (23,63%), ce qui indique une réponse plus rapide du ruissellement et un risque accru de crues soudaines.

L'oued Boussellam présente une plus grande longueur de son chenal principal (148 km contre 73,5 km pour l'oued K'sob), avec une pente plus faible (10,47% contre 16,96%), ce qui indique un écoulement plus lent des eaux. La densité de drainage (D_d) est similaire entre les deux bassins, soit 1,27 km/km² pour l'oued K'sob et 1,19 km/km² pour l'oued Boussellam, ce qui traduit une faible variation de la capacité du réseau d'oueds à drainer les eaux.

La densité du réseau hydrographique (F) et le coefficient de tortuosité (C_t) montrent que l'oued K'sob est plus susceptible d'induire un ruissellement rapide et un écoulement des eaux plus violent, avec un C_t de 8,54 km/km² contre 2,76 km/km² pour l'oued Boussellam, renforçant l'hypothèse que l'oued K'sob est plus enclin aux crues soudaines en raison de la vitesse d'écoulement. De plus, la vitesse de ruissellement (V_e) indique un écoulement plus rapide de l'eau dans l'oued Boussellam (8,49 km/min) par rapport à l'oued K'sob (4,76 km/min), ce qui traduit une différence dans la réponse des écoulements d'eau entre les deux bassins.

Les résultats de l'analyse révèlent que le bassin de l'oued K'sob présente des pentes plus accentuées, associées à un drainage rapide, ce qui le rend particulièrement vulnérable aux fortes pluies et aux crues soudaines. À l'inverse, l'oued Boussellam bénéficie d'un réseau de drainage plus développé et d'une superficie plus étendue, ce qui permet une distribution plus homogène des eaux de ruissellement. Toutefois, cette configuration pourrait entraîner des inondations moins fréquentes, mais potentiellement plus dévastatrices. Ces différences morphologiques et hydrologiques sont cruciales pour l'élaboration de stratégies de gestion des ressources en eau et de réduction des risques d'inondation dans la région.

Chapitre 3

Analyse des précipitations dans les bassins versants de K'sob et Boussellam

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de K'sob et de Boussellam

3.1 Introduction

Cette étude se concentre sur l'analyse des précipitations dans les bassins versants de l'Oued K'sob et de l'Oued Boussellam, deux zones particulièrement sensibles aux variations climatiques en Algérie. Les caractéristiques des précipitations dans ces bassins influencent directement la dynamique du ruissellement et les risques d'inondation. Les données pluviométriques disponibles, couvrant la période de 1973 à 2013, ont permis d'examiner les tendances et les variations des précipitations annuelles ainsi que des précipitations quotidiennes maximales dans ces deux régions. L'analyse des séries temporelles a révélé que le bassin de l'Oued K'sob subit des pluies plus intenses, concentrées sur des périodes plus courtes, ce qui accroît le risque de crues soudaines. En revanche, le bassin de l'Oued Boussellam présente une répartition plus régulière des précipitations, bien que des événements pluvieux extrêmes demeurent fréquents et exercent un impact significatif sur l'écoulement des eaux. En tenant compte des facteurs géographiques et climatiques propres à chaque bassin, cette étude vise à approfondir la compréhension du rôle des précipitations dans les processus hydrologiques locaux, afin de développer des stratégies adaptées à la gestion des ressources en eau et à la prévention des risques d'inondation.

3.2 Données des stations pluviométriques

Dans cette étude, les relevés de précipitations moyennes annuelles et les précipitations journalières maximales provenant de 23 stations météorologiques dispersées dans les bassins versants de l’oued k’sob et de l’oued Boussellam ont été utilisés. Ces stations assurent une couverture complète des différentes zones d’étude, ce qui permet une analyse spatiale et temporelle précise de la distribution des précipitations. Les noms des stations et leurs paramètres statistiques de base sont présentés dans le tableau 3.1, qui met en évidence la distribution spatiale et les caractéristiques statistiques des précipitations enregistrées. La localisation de ces stations dans le bassin est présentée dans la Figure 3.1, ce qui facilite la compréhension de leur distribution géographique et de leur relation avec les caractéristiques hydrologiques du bassin. Les données utilisées dans l'étude couvrent une longue période de temps, de 1972 à 2013, assurant une série de données suffisante pour analyser les changements temporels et les variations spatiales des précipitations.

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de l’Ksob et Boussellam

Tableau 3.1 : Stations pluviométriques des bassins versants de l’oued K’sob et de l’oued boussellam

Code	Nom De Station	Cordonnées		Code	Nom De Station	Cordonnées	
		X	Y			X	Y
150707	Bir kesdeli	682048.2	4001386	150724	/	693258.2	4006181
150802	Zemoura	665961.5	4014933	150801	Sidi Mbarek	672091.5	3997000
150703	Bou Birek	662469	4037700	150807	Djbel Mourissane	643918.6	4010674
150706	Ain Abessa	705741.3	4019547	150904	Sidi Yahia	644123.8	4031150
51111	Sidi Ouadah	693998.7	3952274	151001	Sidi Aich	650667	4052797
50901	Medjez	646507.4	3973360	151004	/	665007.4	4056667
150602	/	707374.2	3978396	151006	Sedouk	650369.3	4045190
150611	/	710516.2	4016212	150402	Ben Daoud	608730.4	3992068
150613	Zeiri	717951	4020974	50905	Bordj Bou Arreridj	658816.2	3992631
150627	Ain Zada	696072.6	3997015	30101	/	688576.6	4053506
150702	Magraoua	686506	4016541	50904	Bordj Ghdir	671872	3975786
150708	Bni Ouerthilane	665312.8	4034281				

3.3 Variabilité des précipitations

Les précipitations constituent le facteur le plus déterminant dans les études hydrométéorologiques, car elles exercent une influence majeure sur l'estimation des différentes composantes du bilan hydrologique, telles que le ruissellement, l'infiltration, l'évaporation et d'autres processus hydrologiques. Ces éléments interagissent de manière complexe et affectent directement le débit des cours d'eau (BOUANANI 2004). Les précipitations ont des effets significatifs sur le système hydrologique, les pluies abondantes et exceptionnelles lors d'événements extrêmes provoquant des dégâts catastrophiques, en particulier dans les zones où les sols sont nus et les pentes abruptes, car ces conditions stimulent considérablement les processus d'érosion. Cet effet est particulièrement prononcé dans les zones où les systèmes hydrologiques sont sensibles, ce qui fait de l'étude de la variabilité des précipitations une nécessité à la fois scientifique et administrative. Il s'agit notamment d'analyser les schémas temporels des précipitations à différentes échelles (quotidienne, mensuelle, annuelle), afin de comprendre la relation entre l'intensité et la fréquence des précipitations et les changements environnementaux qui en résultent.

Ces études contribuent à améliorer la gestion des ressources en eau et à minimiser les risques d'inondation et d'érosion, en fournissant des estimations précises et complètes des précipitations et de leurs effets sur les systèmes naturels et humains.

3.3.1 Précipitations moyennes annuelles

Les précipitations annuelles dans les stations couvrant la zone d'étude varient de 239,73 mm à 572,12 mm. La précipitation annuelle la plus faible est enregistrée à la station 50901, qui est située dans la zone la moins irriguée du bassin des deux versants étudiés. Ces données reflètent le faible impact hydrologique des précipitations dans cette zone, ce qui en fait l'une des zones les plus exposées au risque de sécheresse. En revanche, la station 150706 enregistre les précipitations annuelles moyennes les plus élevées, ce qui en fait la plus humide de la région. Cela indique son rôle vital dans la fourniture de ressources en eau et la recharge des eaux de ruissellement, ce qui peut contribuer à renforcer l'activité agricole et à maintenir l'écosystème local. Ces différences dans les moyennes annuelles reflètent la grande variation des régimes pluviométriques dans les deux bassins, ce qui nécessite des approches de gestion de l'eau personnalisées, conformes à la nature de chaque région.

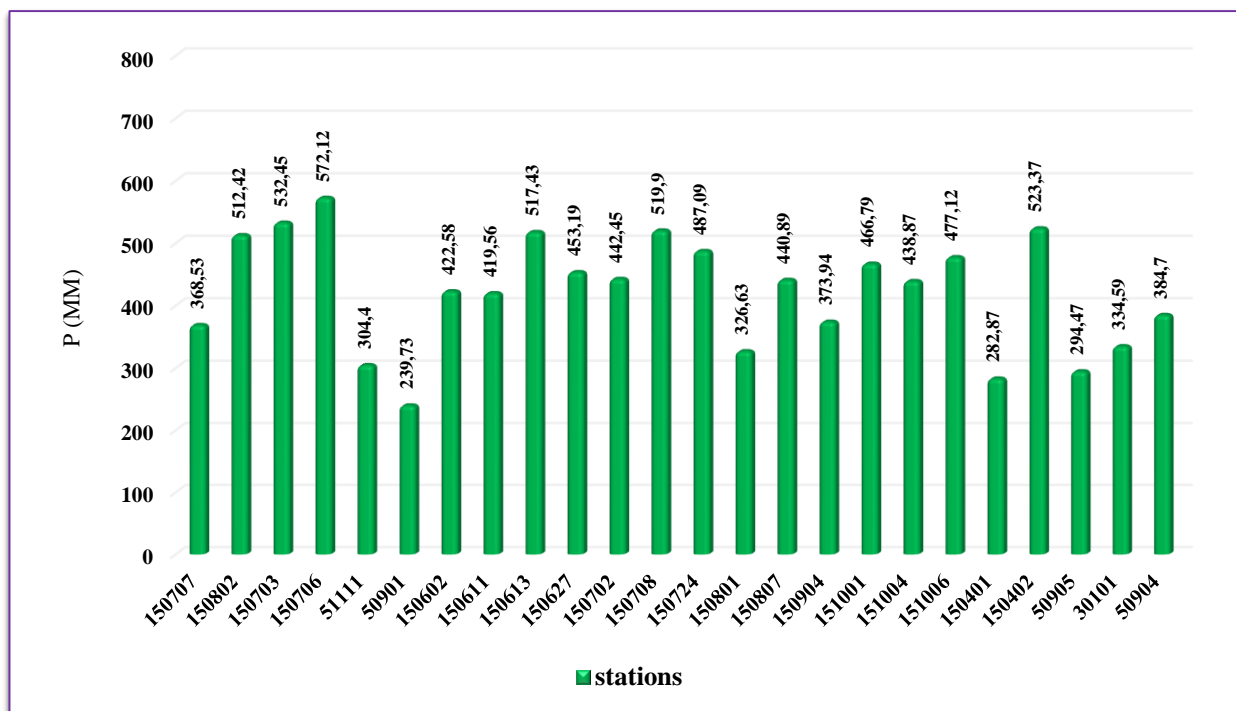


Figure 3.1. Précipitations moyennes annuelles.

3.3.2 Précipitations maximales journalières moyennes

Les précipitations maximales journalières aux stations couvrant la zone d'étude varient de 24,1 mm à 49,7 mm. La valeur minimale des précipitations journalières maximales a été enregistrée à la station 150402, qui est située dans la zone la moins affectée par les précipitations extrêmes dans la zone d'étude. Ces résultats reflètent le faible impact hydrologique des précipitations dans cette zone, ce qui en fait l'une des zones les plus vulnérables au risque de sécheresse. En revanche, les stations 150706 et 150703 ont enregistré les valeurs les plus élevées de précipitations maximales journalières, ce qui indique qu'il s'agit des zones les plus humides de la zone d'étude. Ces données soulignent l'importance de ces zones pour la fourniture de ressources en eau et l'écoulement des eaux, ce qui contribue directement à l'amélioration des activités agricoles et à la durabilité des écosystèmes.

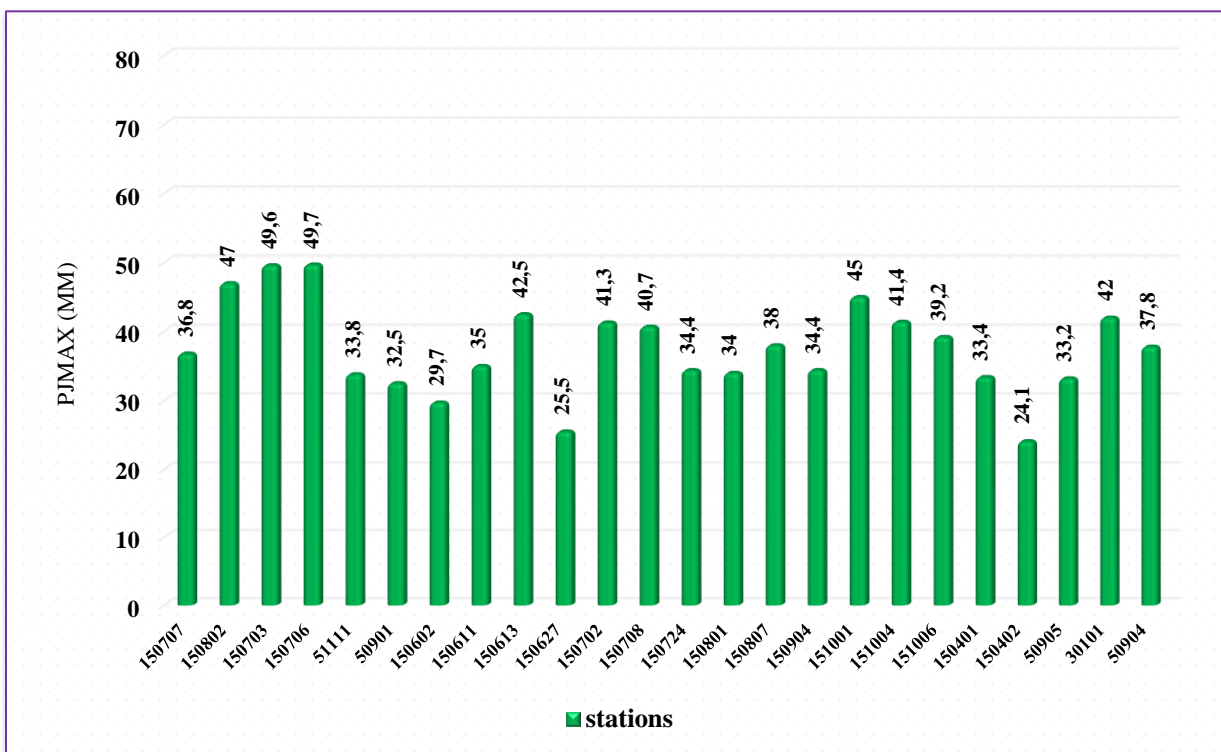


Figure 3.2. Précipitations maximales journalières

3.4 Choix de la loi d'ajustement

Dans les études climatiques et hydrologiques, les lois d'ajustement statistique sont des outils essentiels pour l'analyse des phénomènes naturels, tels que les précipitations maximales journalières. Cependant, l'application de ces lois nécessite le respect d'un ensemble de conditions, dont les plus importantes sont l'homogénéité et la stabilité des données. Le processus de sélection de la loi la plus appropriée est basé sur deux critères principaux : L'adéquation graphique et le test de dispersion. Le critère d'adéquation graphique consiste à

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de l’Ksob et Boussellam

analyser la forme des points sur la feuille de probabilité, cette analyse visuelle permettant d'accepter ou de rejeter la loi en fonction de la mesure dans laquelle les données correspondent à la distribution théorique de la loi.

Dans cette étude, la loi de Gumbel (également connue sous le nom de distribution exponentielle double) a été appliquée pour analyser les données relatives aux précipitations journalières maximales, en raison de sa bonne adéquation avec ce type de données dans des zones similaires. La loi de Gumbel est basée sur la représentation d'événements extrêmes, tels que les précipitations extrêmes, et se caractérise par sa capacité à prédire et à estimer la probabilité d'événements rares. Le logiciel HYFRAN a été utilisé pour effectuer l'analyse statistique, car il fournit un ensemble intégré d'outils permettant de calculer les caractéristiques de l'échantillon, telles que la moyenne et l'écart-type, et d'effectuer des tests d'adéquation et d'homogénéité statistiques. Le processus analytique a été réalisé sur toutes les données des stations climatiques mentionnées précédemment dans l'étude, ce qui a permis de vérifier l'exactitude des résultats pour chaque station séparément.

Les résultats de l'analyse ont révélé que la distribution de Gumbel présente les niveaux les plus élevés d'adéquation lorsqu'elle est appliquée aux données de précipitations maximales journalières, avec une forte concordance entre les valeurs observées et les valeurs théoriques extraites de la loi. Cette concordance peut être attribuée à la nature statistique des données étudiées, qui est conforme aux hypothèses de base de cette loi. Dans ce qui suit, les résultats de quelques stations seront présentés comme un exemple illustratif du processus d'analyse et de l'interprétation des résultats obtenus.

3.4.1 Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel (Méthode des moments)

Les tests de dispersion, tels que les tests de Kolmogorov-Smirnov ou du chi carré, sont effectués pour évaluer la qualité de l'ajustement et vérifier dans quelle mesure les données correspondent à la distribution théorique de la loi choisie. Dans cette étude, la loi de Gumbel (double exponentielle), traditionnellement utilisée pour décrire les valeurs aberrantes, a été choisie. Cette loi se caractérise par le fait qu'elle n'a que deux paramètres, P_0 (emplacement de la distribution) et Gd (degré), ce qui la rend simple et efficace dans le processus d'ajustement. En outre, la loi de Gumbel jouit d'une solide réputation pour l'analyse des phénomènes hydrologiques tels que les précipitations extrêmes, en raison de sa capacité à fournir des résultats fiables avec des échantillons de petite taille, ainsi que de son accord graphique clair vérifié au cours de l'étude. La loi de Gumbel s'écrit :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\frac{x-P_0}{Gd}\right) \dots\dots\dots(3.1)$$

Avec,

P0 = Paramètre de position (en mm)

Gd = Gradex (pente de la droite d'ajustement) Nous pouvons l'écrire autrement :

$$Xp(T) = -Gd \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) + P0 \dots\dots\dots(3.2)$$

(Xp(T) est le quantile de période de retour T)

En posant $U = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) \dots\dots\dots(3.3)$

Donc :

$$Xp(T) = Gd \times U + P0 \dots\dots\dots(3.4)$$

Où:

(Xp (T) est le quantile de la période de retour T)

P0 = Paramètre de position (in mm)

Gd = Gradex (pente de la ligne d'ajustement)

- **Les résultats d’ajustement des pluies maximales journalières de la station de Bordj Ghdj à la loi de GUMBEL sont représentés dans le tableau 3.2 Suivant :**

Tableau 3.2 : Résultats de l’ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Bordj Ghdj (050904)

Caractéristiques	Valeurs
<i>Statistiques de base</i>	<i>41</i>
<i>Minimum</i>	<i>12</i>
<i>Maximum</i>	<i>65</i>
<i>Moyenne</i>	<i>37.8</i>
<i>Ecart-type</i>	<i>12.6</i>
<i>Médiane</i>	<i>39</i>
<i>Coefficient de variation (Cv)</i>	<i>0.332</i>
<i>Coefficient d'asymétrie (Cs)</i>	<i>-0.15</i>
<i>Coefficient d'aplatissement (Ck)</i>	<i>2.24</i>

On constate que la ligne d'ajustement résultant de l'application de la loi de Gumbel s'aligne bien sur le nuage de points empirique, reflétant l'adéquation de la loi aux données des extrêmes

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de l’Ksob et Boussellam

pluviométriques quotidiens. Pour vérifier la qualité de cet ajustement, des tests statistiques sont utilisés, tels que le test du Khi carré (χ^2).

Le test du χ^2 apporte une confirmation statistique supplémentaire de l’adéquation de la loi de Gumbel aux données empiriques, garantissant que les conclusions tirées ne reposent pas uniquement sur une analyse graphique, mais qu’elles sont étayées par des preuves mathématiques. L’utilisation de ce test renforce la crédibilité de l’analyse et démontre que le modèle choisi reflète fidèlement la réalité des données observées.

➤ Les résultats du test d’adéquation à l’aide du test du χ^2 , appliqué aux données de la station de Bordj Ghdir, sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 3.3 : Résultats du test χ^2

Résultat de la statistique :	$X^2 = 10,32$
p-value	$p = 0,0667$
Degrés de liberté :	5
Nombre de classes :	8

Nous pouvons accepter l’hypothèse nulle H_0 au niveau de signification de 10 % ce qui signifie que la loi de Gumbel fournit un bon ajustement pour les séries de précipitations maximales journalières utilisées dans l’étude. Ce résultat indique que la distribution des valeurs observées est cohérente avec la distribution théorique de la loi de Gumbel, ce qui confère une certaine fiabilité à l’analyse statistique.

La figure (3.5) montre l’adéquation de la série de précipitations à la loi de Gumbel. On peut voir que la ligne d’ajustement correspond étroitement aux points empiriques (nuage de points), ce qui indique que le modèle explique bien le comportement des valeurs extrêmes. Les résultats du test χ^2 renforcent cette observation, puisque le test prouve que les écarts entre les valeurs observées et prédites sont faibles et non significatifs au niveau de signification de 6,67 %.

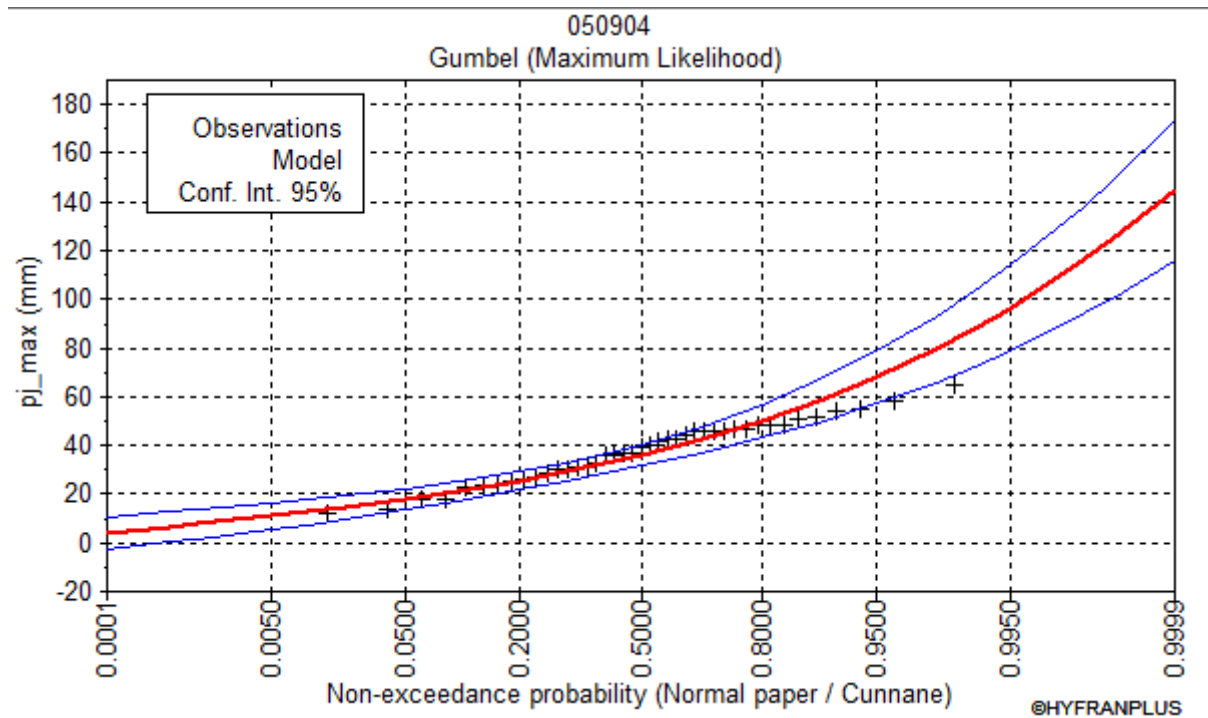


Figure 3.3. Ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Bordj Ghdir (050904)

- Les résultats d’ajustement des pluies maximales journalières de la station de Sidi Yahia à la loi de Gumbel sont représentés dans le tableau 3.4 Suivant :

Tableau 3.4 : Résultats de l’ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Sidi Yahia (150904).

Caractéristiques	Valeurs
<i>Statistiques de base</i>	<i>34</i>
<i>Minimum</i>	<i>17.5</i>
<i>Maximum</i>	<i>70.1</i>
<i>Moyenne</i>	<i>34.4</i>
<i>Ecart-type</i>	<i>12.2</i>
<i>Médiane</i>	<i>31.4</i>
<i>Coefficient de variation (Cv)</i>	<i>0.356</i>
<i>Coefficient d’asymétrie (Cs)</i>	<i>0.972</i>
<i>Coefficient d’aplatissement (Ck)</i>	<i>3.47</i>

- Les résultats du test d’adéquation à l’aide du test du Khi carré pour les données relatives à la station Sidi Yahia sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 : Résultats du test Khi –deux

Résultat de la statistique :	$\chi^2 = 3,65$
p-value	$p = 0,6013$
Degrés de liberté :	5
Nombre de classes :	8

La figure 3.5 montre l'ajustement de la série de précipitations à la distribution de Gumbel. On peut voir sur la figure que la ligne de meilleur ajustement correspond étroitement aux points expérimentaux (nuage de points), ce qui indique la capacité du modèle à expliquer avec précision le comportement des valeurs extrêmes. Les résultats du test du Khi-deux (χ^2) corroborent également cette observation, en indiquant que les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédites sont faibles et statistiquement non significatives au seuil de signification de 60,13 %.

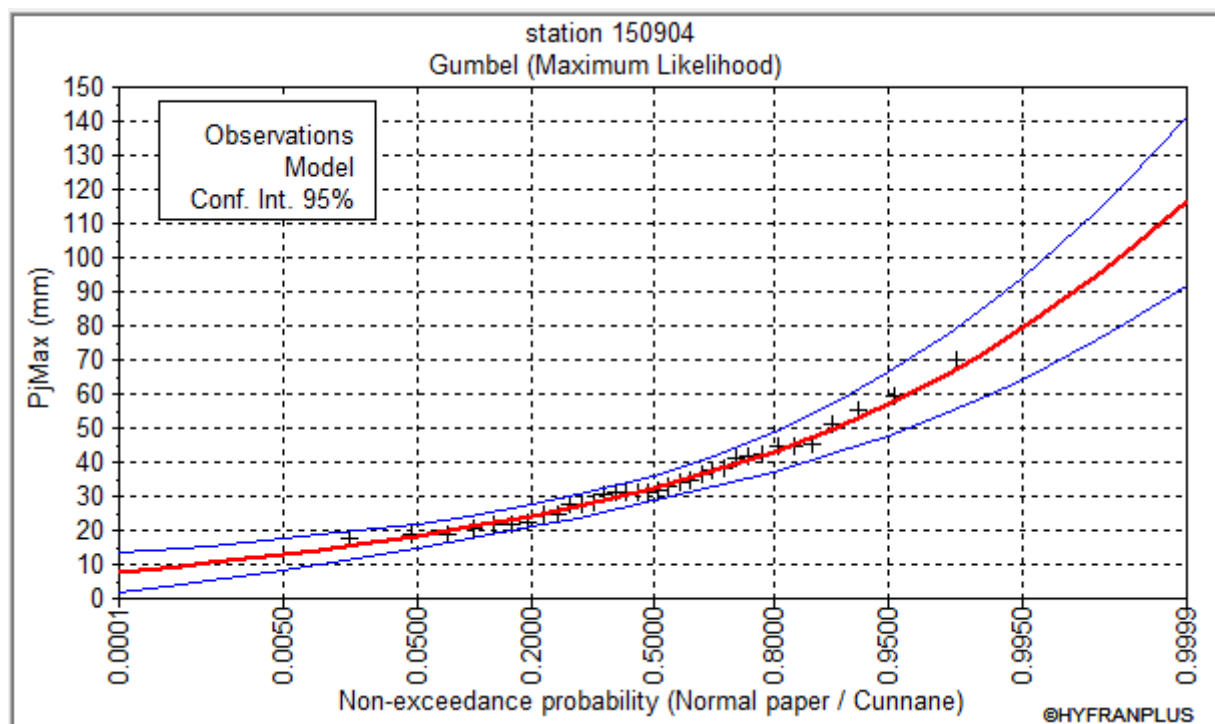


Figure 3.4. Ajustement à la loi de Gumbel pour la station de Sidi Yahia (150904).

Après avoir terminé le processus d'ajustement des données pour toutes les stations de surveillance liées à la zone d'étude en utilisant la loi de Gumbel, les données résultantes ont été combinées pour fournir une vue d'ensemble des valeurs statistiques extraites pour chaque station. Les résultats comprennent des valeurs moyennes qui reflètent le comportement des séries de précipitations maximales journalières pour chaque station individuelle. Comme le montre le tableau 3.6 :

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de l’Ksob et Boussellam

Tableau 3.6 : Valeurs moyennes pour les données de chaque station

Code de station	Pj max moy	Code de station	Pj max moy	Code de station	Pj max moy
150707	36.8	150627	25.5	151001	45
150802	47	150702	41.3	151004	41.4
150703	49.6	150708	40.7	151006	39.2
150706	49.7	150724	34.4	150402	24.1
51111	33.8	150801	34	50905	33.2
50901	32.5	150807	38	30101	42
150602	29.7	150904	34.4	50904	37.8
150611	35	150613	42.5		

La précipitation journalière maximale est un paramètre hydrologique très variable dans le temps. Pour estimer sa valeur pour une période de retour donnée, une analyse probabiliste a été réalisée. Parmi les lois les plus courantes dans ce contexte, la loi de Gumbel a été appliquée afin d’ajuster les valeurs extrêmes. Comme mentionné précédemment, la série des précipitations journalières maximales a été ajustée à cette loi à l’aide d’un traitement statistique manuel effectué sous Excel 2003. Dans ce cadre, les principaux paramètres statistiques P_0 (emplacement ou valeur centrale de la distribution) et Gd (le gradient, également connu sous le nom de gradex, est un indicateur de la gravité des changements) Comme le montrent les figures (3.5 et 3.6).

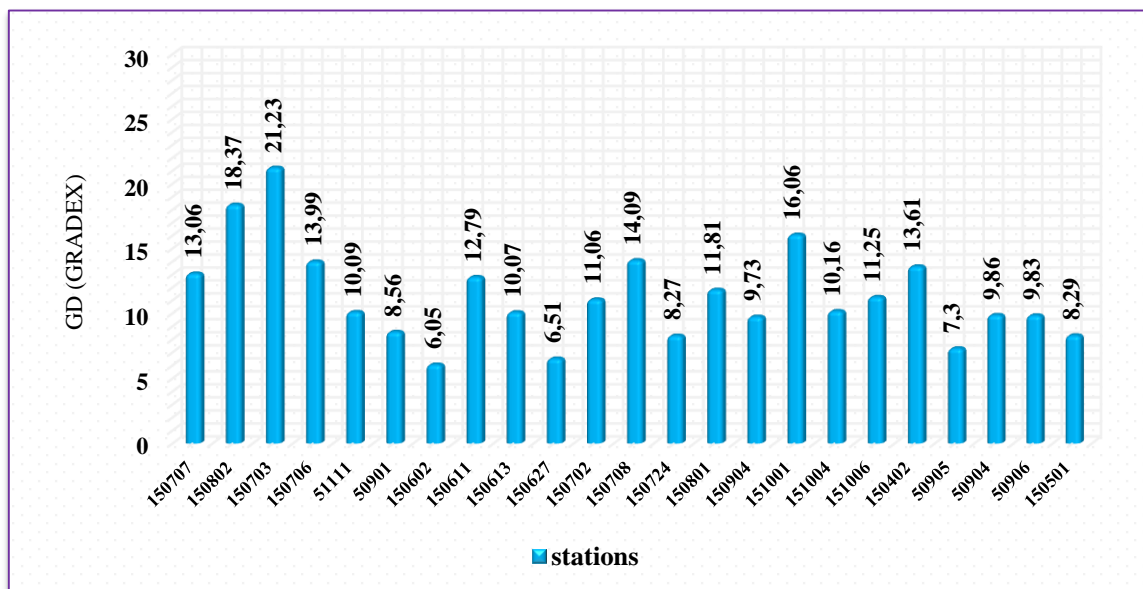


Figure 3.5. Pente de la ligne d’ajustement (Gd)

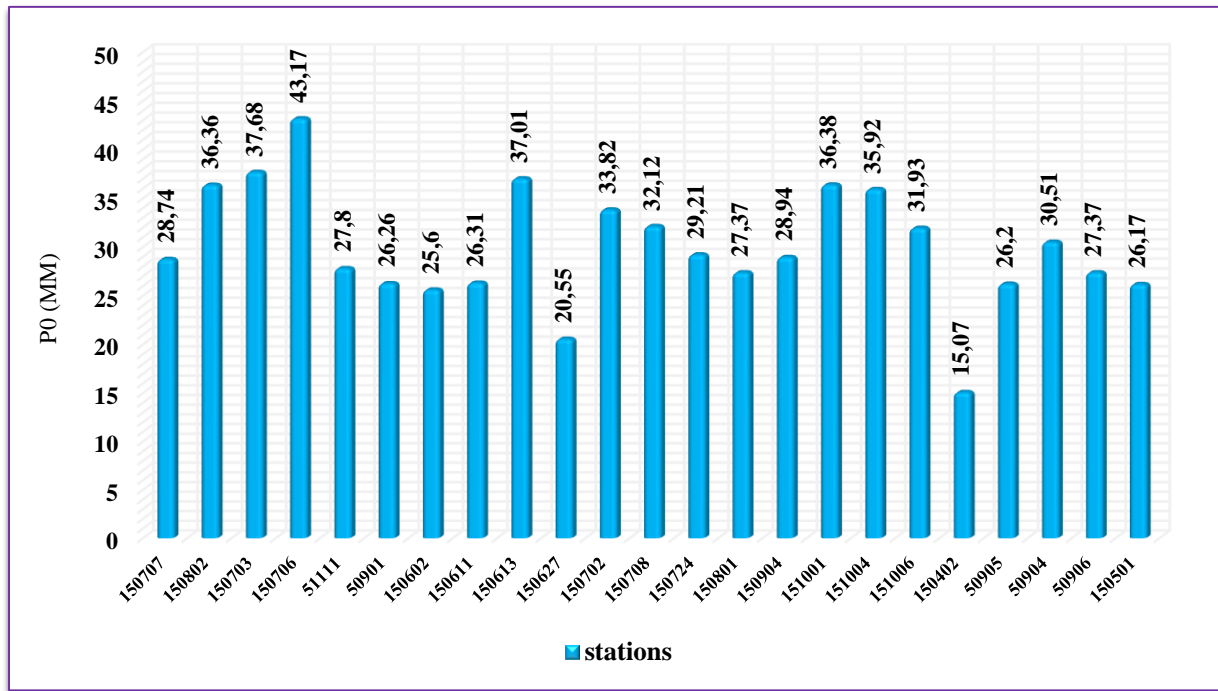


Figure 3.6. Valeurs P_0 (Position paramètre in mm) pour chaque station

Une fois ces paramètres déterminés, les valeurs obtenues ont été converties en cartes géographiques précises à l'aide de la méthode d'interpolation géologique de Krigeage d'ArcGIS. Cette méthode est très efficace car elle prend en compte les résidus spatiaux pour garantir la précision des résultats dans la distribution des valeurs sur les zones étudiées. En s'appuyant sur les équations (3.3) et (3.4), les valeurs finales ont été calculées et des cartes ont été produites pour chaque période de retour. Les périodes de retour étudiées comprennent les valeurs suivantes : 2 ans, 5 ans, 10 ans, 100 ans et 1000 ans (Figure 3.7). Ces périodes reflètent un large éventail de fréquences temporelles, ce qui permet une compréhension globale de la probabilité de précipitations maximales à différents moments.

L'approche adoptée dans cette étude montre comment des modèles statistiques avancés peuvent être combinés avec des outils géographiques modernes pour produire des cartes fiables qui peuvent être utilisées pour la gestion des risques naturels et la planification durable.

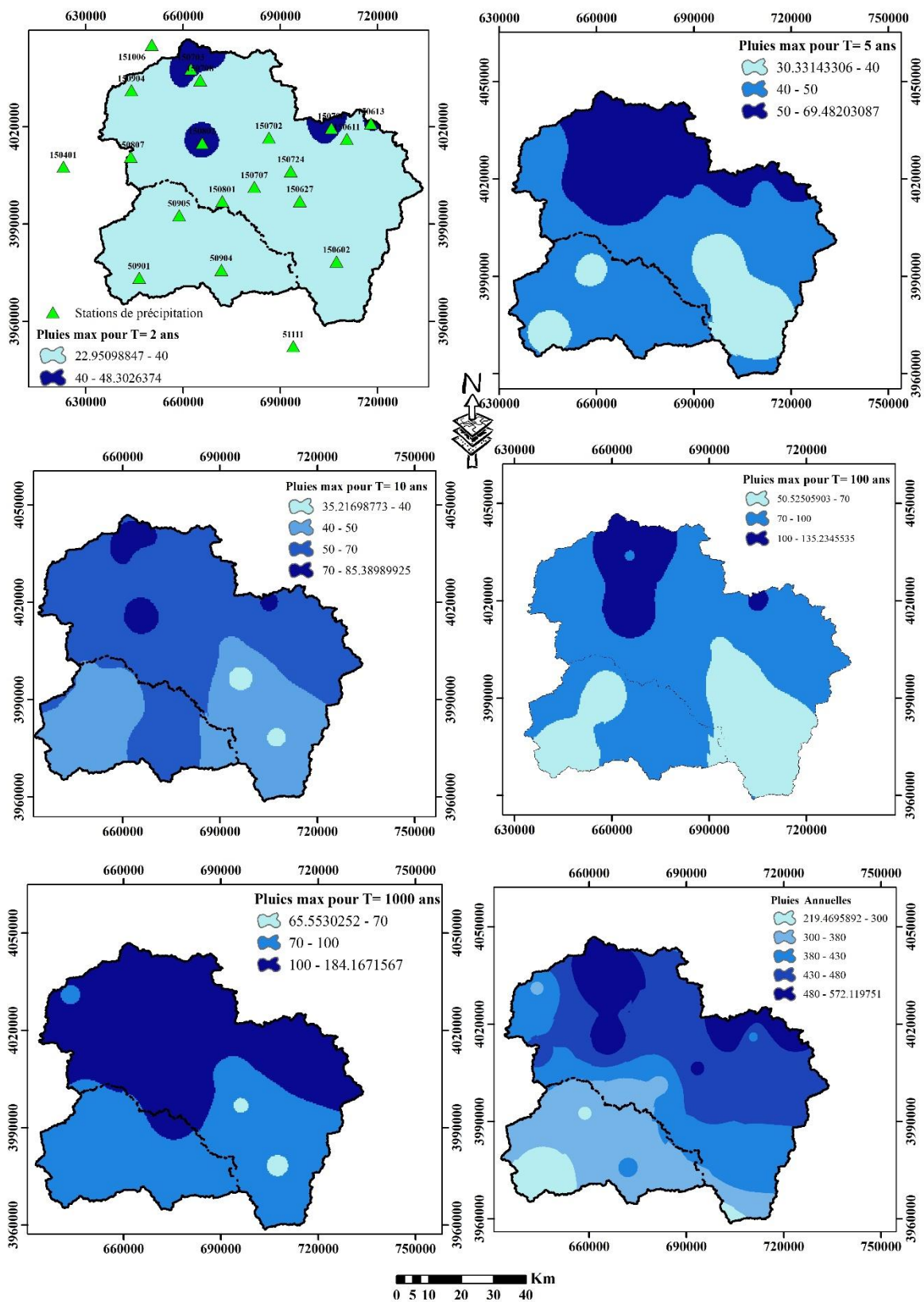


Figure 3.7. Cartes des précipitations pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000 ans, moyenne annuelle).

3.4.2 Ajustement des pluies annuelles à la loi de Gauss :

Dans cette étude, les données pluviométriques annuelles enregistrées dans les stations de la zone d'étude ont été analysées à l'aide de Hyfran, un outil spécialisé dans l'analyse des séries temporelles hydrologiques et climatiques. Un ensemble de distributions de probabilités statistiques a été utilisé pour déterminer le modèle le plus approprié pour représenter les données pluviométriques annuelles. Après analyse et comparaison des résultats, la distribution gaussienne s'est avérée être le modèle le plus approprié pour les données pluviométriques annuelles dans la zone d'étude, car elle a fourni la meilleure adaptation statistique par rapport aux autres distributions. Ce choix reflète la précision de la loi gaussienne dans la représentation des caractéristiques des séries chronologiques de précipitations dans la région, garantissant des résultats fiables pour l'analyse et l'interprétation du comportement hydrologique des précipitations.

À l'issue de l'analyse des données pluviométriques collectées dans les stations situées dans la zone d'étude, les valeurs obtenues ont été soigneusement compilées et structurées, comme illustré dans le tableau ci-dessous. Ce tableau présente les moyennes annuelles et maximales des précipitations, ainsi que les principaux paramètres statistiques dérivés de l'analyse. Cela permet de fournir une vue d'ensemble exhaustif et précis de la distribution et du comportement des précipitations dans la zone d'étude.

Tableau 3.7 : Valeurs moyennes pour les données de chaque station

Code de station	P _{annuelles moyennes}	Code de station	P _{annuelles moyennes}	Code de station	P _{annuelles moyennes}
150707	368.53	150627	453.19	151001	466.79
150802	512.42	150702	442.45	151004	438.87
150703	532.45	150708	519.9	151006	477.12
150706	572.12	150724	487.09	150402	523.37
51111	304.4	150801	326.63	50905	294.47
50901	239.73	150807	440.89	30101	334.59
150602	422.58	150904	373.94	50904	384.7
150611	419.56	150613	517.43		

Après avoir compilé et organisé les valeurs extraites de manière systématique, comme l'illustre le tableau précédent, celles-ci ont été transformées en cartes géographiques précises en utilisant la méthode d'interpolation par krigeage dans ArcGIS. Cette méthode s'avère particulièrement efficace, car elle intègre les résidus spatiaux, assurant ainsi une précision

optimale dans la distribution des valeurs au sein des zones étudiées. La carte résultante est présentée comme suit.

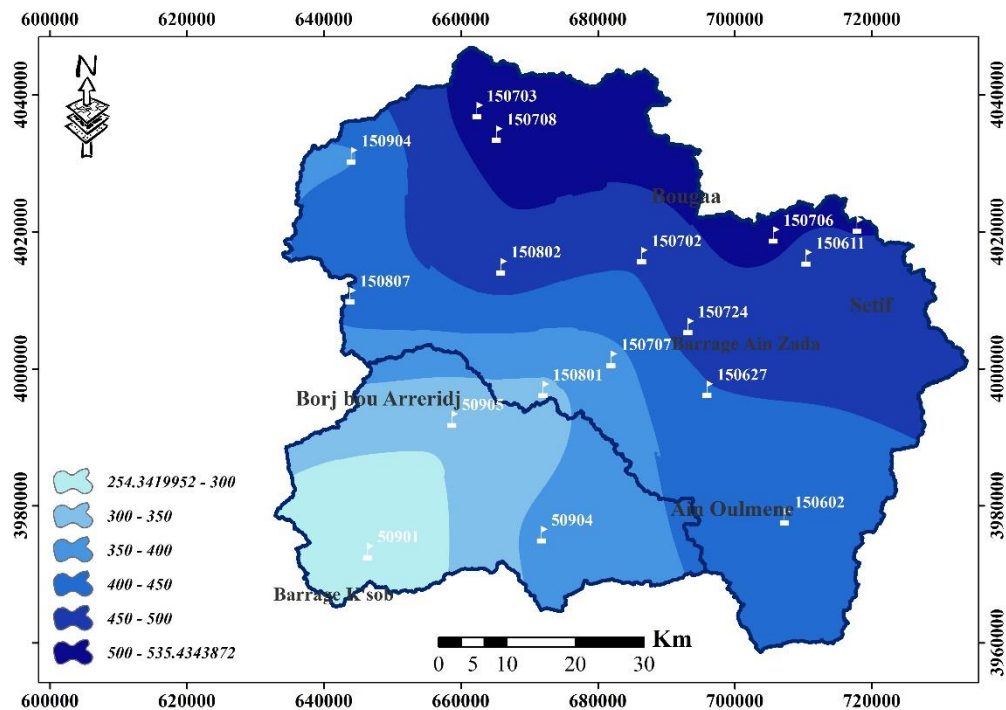


Figure 3.8. Distribution des précipitations annuelles moyennes dans la zone d'étude.

3.5 Situation climatique

3.5.1 Température

3.5.1.1 La température dans le bassin de l'oued k'sob

La température est un facteur clé dans le changement des phénomènes climatiques et la définition des critères du bilan hydrique, notamment au niveau des bassins versants. Il est donc crucial d'analyser les températures moyennes mensuelles et annuelles pour déterminer les manques d'écoulement et saisir l'influence des éléments climatiques sur le cours des eaux dans ces régions. Dans le cadre de notre étude de cas, nous avons basé nos travaux sur les données provenant d'une seule station, à savoir la station B.B.A., qui se trouve au cœur du bassin. Cette station offre un ensemble de données cohérent s'étendant sur deux décennies (1990-2010), ce qui en fait une source de référence solide pour analyser les variations thermiques dans la zone. La figure (3-11) illustre la variation des températures moyennes mensuelles, comprenant les valeurs maximales, moyennes et minimales, sur une période annuelle. Cette fluctuation met en évidence les tendances saisonnières ainsi que les variations interannuelles au sein de la région. Il est important de souligner que les données de température actuelles concordent avec celles rapportées dans les études de (Zeroual Sara 2022 , (GUESRI 2021)).

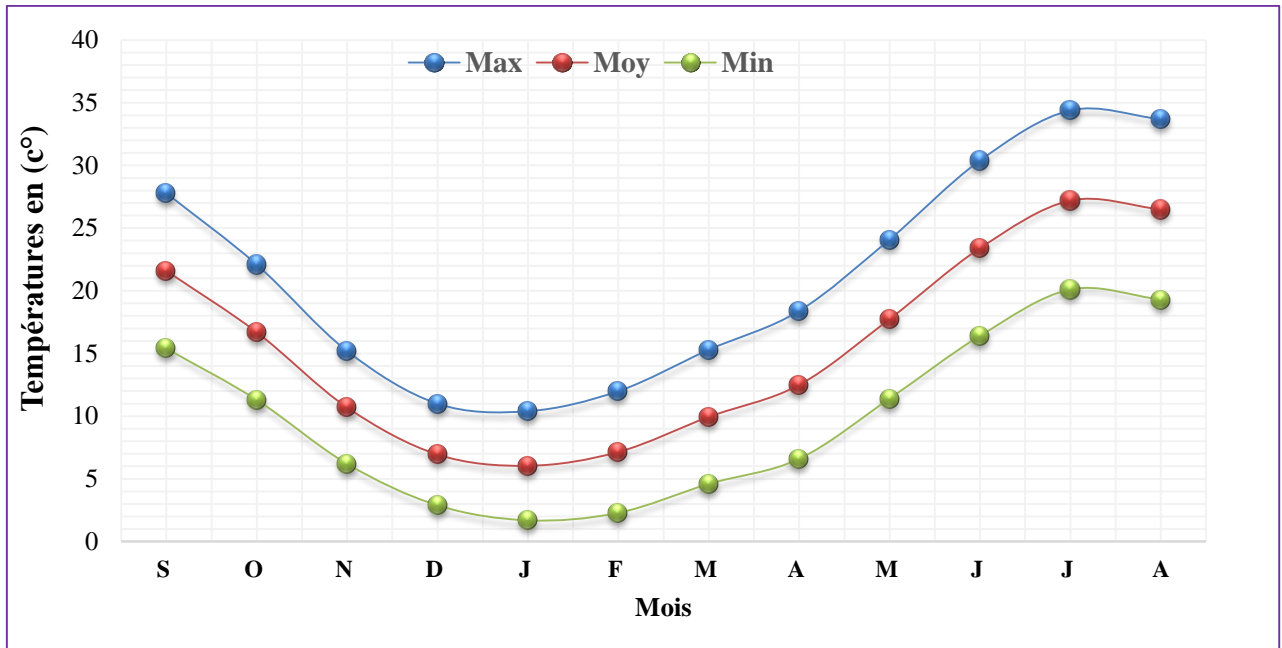


Figure 3.9. Évolution mensuelle des températures horaires à la station de Bordj Bou Arreridj (1990-2010).

Les données horaires indiquent que les températures maximales atteignent une moyenne de 34,7°C en juillet, tandis que les températures minimales en janvier chutent à environ -7,5°C. De février à août, on observe une tendance à la hausse des températures mensuelles moyennes, allant de 7,5°C à 27,4°C. En revanche, L'intervalle de septembre à janvier voit une diminution des moyennes mensuelles de température, passant de 26,9°C à 6,4°C.

3.5.1.2 La température dans le bassin de l’oued Boussellam

Le bassin de Boussellam présente une fusion des climats du Haut Atlas et des Hautes Plaines. Dans les zones des plateaux de Sétif et de Bouira, on retrouve un climat continental sec, marqué par des hivers rigoureux et des étés torrides. Le sud du plateau de Sétif est plus aride et plus sévère. Le climat de la région peut être divisé en deux saisons principales : Une saison chaude qui dure de juin à septembre, et une saison froide plus longue qui dure d'octobre à mai. En l'absence de données précises sur les températures, (Mahdi, M. & Kheta, K. (2020)), fournissent des données détaillées et illustrées dans le tableau 3.11. Ce tableau montre les températures mensuelles moyennes enregistrées au cours de la période allant de 1978 à 2017.

Tableau 3.8 : Les moyennes mensuelles de températures en degrés Celsius ajustées pour la zone d'étude

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
------	------	------	------	------	-----	------	-------	------	------	------	------	------

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de l’Ksob et Boussellam

T max (C°)	11.75	11.62	13.28	15.01	17.53	21.03	24.13	24.88	22.79	20.07	15.42	12.27
T min (C°)	4.14	4.33	5.69	7.49	10.63	14.33	17.33	17.91	15.8	15.8	8.44	5.33
T moy (C°)	7.64	7.97	9.48	11.25	14.08	17.68	20.73	21.39	19.29	16.31	11.93	8.8

Les données du tableau révèlent que janvier est le mois ayant la température la plus basse de l'année, avec une moyenne de 4,14 degrés Celsius. Par ailleurs, les mois de juillet et août sont les plus chauds, affichant une température moyenne de 24,13°C et 24,88°C respectivement.

3.5.2 Les vents

3.5.2.1 Les vents dans le bassin de l’oued k’sob :

Le vent est l'un des phénomènes météorologiques qui découle de la variation de la pression atmosphérique entre les zones, sa rapidité s'accroissant proportionnellement à cette disparité. La variation de la vitesse du vent dépend de son intensité, produisant ainsi divers schémas de vent. On peut déterminer la direction et la vitesse du vent en utilisant des instruments spécialisés comme l'anémomètre. Par exemple, on définit les vents d'est par leur orientation de souffler.

Dans le bassin versant de l’oued K’sob, les régimes climatiques sont principalement influencés par deux types de moussons. Selon (Bouteldja N (2005)), pendant la saison hivernale, les vents d'ouest et de nord-ouest prédominent, influencés par des masses d'air froid venant de l'ouest, ce qui contribue à augmenter les taux de précipitations. En été, les vents du sud connus sous le nom de Sirocco, caractérisés par une forte chaleur et une sécheresse extrême, sont actifs pendant 25 à 34 jours par an. Ces vents jouent un rôle essentiel dans les changements climatiques saisonniers de la région, les vents d'hiver augmentant les ressources en eau grâce aux précipitations, tandis que les vents d'été augmentent les taux d'évaporation, exacerbant la sécheresse et augmentant la pression sur les ressources environnementales.

Le tableau ci-dessous présente les vitesses mensuelles du vent pour la période allant de 1981 à 2009, sur la base des données analysées par (GUESRI 2021), ce qui donne un aperçu complet des variations mensuelles et annuelles du vent

Tableau 3.9 : Vitesses des vents moyennes mensuelles interannuelles [1980-2009] (station de BBA)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
V _{moy} (m/s)	2,8	2,6	2,7	2,7	2,7	2,7	3,2	3,3	3,2	3,3	3,2	3
V _{moy} (km/h)	10,08	9,36	9,72	9,72	9,72	9,72	11,52	11,88	11,52	11,88	11,52	10,8

3.5.2.2 Les vents dans le bassin de l’oued Boussellam :

Le vent contribue fortement à l'évaporation, en éliminant les couches d'air saturées d'humidité près de la surface de l'eau ou du sol et en les remplaçant par des couches d'air plus

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de l’Ksob et Boussellam

sèches. Le bassin versant de l'oued Boussellam étant situé relativement près de la mer, les vents dominants dans la région pendant l'hiver viennent généralement du nord-ouest et sont souvent accompagnés de nuages, ce qui contribue à l'augmentation de l'humidité et des précipitations.

En revanche, les vents du sud-ouest prédominent en été et sont connus pour leur sécheresse et leur intensité variable. Ces vents affectent directement la végétation, en augmentant les taux d'évaporation et en exacerbant le stress hydrique, ce qui affaiblit la capacité des plantes à faire face aux conditions de sécheresse. Cependant, on manque de données précises et complètes sur les régimes de vent dans la région. Sur la base d'études antérieures, les vitesses moyennes mensuelles des vents ont été déterminées sur une période de dix ans et sont présentées dans le tableau ci-dessous pour illustrer leur impact climatique sur le bassin versant.

Tableau 3.10 : Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
V (m/s)	4,7	4,28	3,92	3,52	3,58	3,47	3,63	3,38	3,54	4,13	4,4	4,91

3.5.3 L'humidité relative

Le taux d'humidité est un indicateur, exprimé en pourcentage, qui représente la proportion de vapeur d'eau réellement présente dans l'air à une température spécifique par rapport à la quantité que l'air pourrait contenir s'il était totalement saturé à cette même température. (Frydrych, Gozé et al. 1993). Autrement dit, l'humidité relative indique le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau présente dans l'air (Pa) et la pression de la vapeur saturée à cette même température et pression. Ce rapport constitue une mesure significative du niveau de charge de l'air en humidité et de son influence sur les processus environnementaux et climatiques tels que l'évaporation et la condensation.

Les données du tableau ci-dessous ont été obtenues en examinant des études antérieures, ces recherches étant basées sur des sources fiables telles que l'Organisation météorologique nationale (O.N.M.).

Tableau 3.11 : Humidité relative (%) enregistrée en 2003.

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Béjaia	78	77	79	82	82	72	73	70	79	81	77	76

Chapitre 3. Analyse des précipitations dans les bassins versants de l’Ksob et Boussellam

B.B.A	78	78	70	68	59	43	32	40	56	73	72	79
Sétif	83	82	73	71	65	49	38	43	64	73	78	86

Comme le montre le tableau ci-dessus, l'humidité relative moyenne mensuelle est supérieure pendant l'hiver comparativement à l'été, essentiellement à cause des températures qui sont plus froides en hiver. Des taux d'humidité relative plus importants indiquent un potentiel accru de condensation de la vapeur d'eau, favorisant ainsi un meilleur équilibre hydrique durant l'hiver. Pour ce qui est de la station de Bejaia, ses enregistrements indiquent un taux d'humidité relative toujours élevé, une situation qui pourrait être due à sa localisation proche de la mer Méditerranée.

Conclusion

Une analyse complète des précipitations dans la zone d'étude a été réalisée en utilisant les données disponibles provenant des stations de mesure, couvrant la période de 1973 à 2013. Les lacunes observées dans les séries de données pluviométriques entre les stations ont été comblées par régression linéaire, les coefficients de corrélation entre les stations étant statistiquement significatifs. La méthodologie d'ajustement des données pluviométriques a été sélectionnée en fonction des caractéristiques de la distribution de probabilité, de la taille de l'échantillon et d'attributs spécifiques aux données.

Dans le cadre de cette étude, les précipitations annuelles ont été modélisées à l'aide d'une distribution gaussienne, tandis que les précipitations maximales quotidiennes ont été décrites par une distribution de Gumbel. Les précipitations et leur impact sur l'écoulement des eaux ont été analysés de manière approfondie, contribuant ainsi à l'élaboration d'une série de données longue et homogène. Les précipitations annuelles moyennes dans le bassin sont estimées à 333,5 mm, tandis que les précipitations maximales quotidiennes annuelles sont d'environ 49,7 mm.

La zone d'étude se distingue par des précipitations faibles et irrégulières, avec des températures variant de 4,14°C à 34,7°C. En ce qui concerne l'humidité, la région septentrionale présente un taux d'humidité élevé et constant tout au long de l'année, tandis que dans les régions méridionales, l'humidité est faible pendant l'été et plus élevée en hiver. Cette variation témoigne des caractéristiques climatiques contrastées qui caractérisent l'ensemble de la zone d'étude.

Chapitre 4

Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique

Chapitre 4. Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, la méthodologie utilisée pour évaluer la sensibilité aux risques d'érosion et d'inondation dans les bassins versants du K'sob (Hodna) et de Boussellam (Soummam) aux événements de précipitations extrêmes est discutée. Cette méthodologie comprend l'identification des facteurs influençant chaque phénomène avec une explication simple de chaque facteur et puisque le coefficient pluviométrique est d'une grande importance pour influencer les deux phénomènes par sa force et son intensité, les cartes de période de retour utilisées (02, 05, 10, 100 et 1000) ont été dérivées. Dans cette situation, les modèles de décision multicritères avec des outils de simulation spatiale combinent l'analyse quantitative et qualitative, fournissant un cadre complet pour prendre des décisions éclairées dans de multiples domaines. Ces outils contribuent à une meilleure compréhension et à une analyse approfondie des phénomènes, ce qui renforce l'efficacité des décisions prises. Dans ce chapitre sur l'évaluation de l'érosion des sols, trois modèles principaux ont été utilisés : L'analyse des processus hiérarchiques (AHP), Analyse Floue des Processus Hiérarchiques (FAHP) et les équations de perte en terre (RUSLE, EPM). Ces trois modèles sont des outils efficaces pour identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion et pour comprendre les facteurs qui l'influencent. En combinant ces modèles avec des techniques SIG, des analyses approfondies peuvent être réalisées pour améliorer les stratégies de gestion des ressources naturelles et réduire le risque d'érosion des sols et d'inondation.

4.2. Présentation des modèles :

4.2.1 Processus Hiérarchique Analytique (AHP):

L'évaluation des risques liés à l'érosion des sols et aux inondations grâce à l'analyse hiérarchique (AHP) de la dégradation hydrologique est un instrument efficace. La méthode a été développée par Thomas L. Elle permet aux utilisateurs d'organiser et d'analyser des questions complexes impliquant des critères multiples. Dans le cadre de l'analyse des risques environnementaux, la technique AHP sert à déterminer les éléments essentiels qui favorisent l'érosion des sols, comme l'inclinaison, l'exploitation des terres, la force des précipitations, la magnitude du drainage et les propriétés géologiques. Par la suite, des comparaisons binaires sont réalisées entre les critères pour établir l'importance relative de chaque critère. Par exemple, dans certaines zones, l'inclinaison peut être jugée plus cruciale que l'usage du sol, alors que dans d'autres contextes, l'importance des précipitations pourrait être prépondérante. Ces évaluations sont effectuées afin de déterminer l'importance relative de chaque critère, ce qui

facilite la définition des priorités. L'association de la méthode AHP avec les systèmes d'information géographique (SIG) permet une analyse plus précise des données spatiales, ce qui simplifie l'élaboration de cartes indiquant les régions les plus exposées à l'érosion. Cette analyse approfondie permet non seulement de comprendre les facteurs influençant l'érosion des sols, mais aussi de fournir une base de données solide aux décideurs afin qu'ils puissent développer des stratégies efficaces pour minimiser les risques environnementaux et gérer les ressources naturelles. L'AHP est donc un outil essentiel dans le domaine de la planification environnementale durable, car il contribue à la prise de décisions basées sur une approche scientifique et systématique.

L'une des hypothèses de l'étude de l'analyse des processus hiérarchiques (AHP) consiste à résoudre les problèmes par un simple « sablage » qui permettra de réduire les bruits. Il s'agit d'une opération multiple, qui relève de l'ordre des priorités pour l'exécution des décisions de justice de nature multiple. En ce qui concerne la solution partielle à cette erreur, veuillez consulter la section « Comment procéder » pour savoir comment la résoudre lors de la modification de l'activité.

L'un des principes de base de l'analyse des processus hiérarchiques (AHP) est que le problème doit être analysé selon une hiérarchie composée de plusieurs niveaux, ce qui est essentiel pour structurer des décisions complexes impliquant des critères multiples. Voici une explication détaillée de cette étape incluse dans l'analyse du processus

4.2.1.1. Étapes du Modèle AHP

a. Identification de l'Objectif Principal : La première étape consiste à définir clairement l'objectif principal de la décision afin d'élaborer un modèle hiérarchique pour une question particulière nécessitant des décisions. L'objectif se trouve au sommet de la structure, les critères et les sous-catégories sont placés aux niveaux inférieurs et les alternatives se trouvent au bas du modèle ([Atanasova-Pacemska, Lapevski et al. 2014](#)).

b. Comparaisons par paires: Une fois l'objectif principal établi, les décideurs (qui sont généralement des spécialistes dans leur domaine) sont sollicités pour réaliser des comparaisons binaires entre différents éléments afin de déterminer l'importance relative de chaque critère, en présumant que ces éléments sont indépendants les uns des autres. Cela signifie que deux critères sont comparés l'un à l'autre sur la base de leur contribution à l'objectif global, la question est décomposée en sous-questions ou critères connexes qui affectent le processus de prise de décision. ([Saaty 1984, Darko, Chan et al. 2019](#)). Cette

hiérarchie est généralement organisée en plusieurs niveaux. En utilisant l'échelle de Saaty qui va de 1 à 9, etc. L'élaboration des décisions nécessite un classement des variables selon leur importance relative pour assigner des valeurs numériques représentant le degré de préférence ou d'importance. Tableau numéro 1.

Tableau 4.1. Échelle d'importance relative de la construction de la matrice par paire de l'AHP (Saaty 1977, Saaty 1984).

Intensité de l'importance AHP	Définition
1	Tout aussi important
3	Faible importance
5	Forte importance
7	Importance démontrée
9	Importance absolue
2, 4, 6, et 8	Valeurs intermédiaires

c. Calcul des Poids : Une fois que toutes les comparaisons par paire ont été effectuées, des pondérations peuvent être extraites pour chaque critère. Ces poids sont calculés en résolvant les matrices de comparaison par paire à l'aide de la méthode des valeurs propres. Le critère ayant le poids le plus élevé est celui qui contribue le plus à l'objectif global. Les critères sont ensuite classés par ordre d'importance pour créer une hiérarchie de priorités. La cohérence des jugements est vérifiée en calculant le **ratio de cohérence (CR)**, qui doit être inférieur à 10 % pour garantir l'exactitude et la crédibilité des évaluations (Ho 2008, Saaty 2008). **Ratio de cohérence (CR)** est déterminé en utilisant l'équation suivante.

$$CR = \frac{CI}{RI} \dots\dots\dots (4.1)$$

Où : CR est le rapport de cohérence, CI est un indice de cohérence et RI représente l'indice d'incohérence aléatoire, qui est corrélé avec le nombre total de composants de la matrice de comparaison. Où RI est l'indice de rapport. Si $CR < 0,1$, l'incohérence est acceptable. Si $CR > 10 \%$, le jugement subjectif doit être révisé.

d. Calcul de l'indice de cohérence (CI) : Pour garantir la cohérence des jugements résultant des comparaisons par paire, AHP s'appuie sur un **indice de cohérence (IC)**. Si cet indice dépasse 0,10 (10 %), il indique que les jugements ne sont pas suffisamment cohérents et que les comparaisons doivent être réexaminées. La formule ci-après est utilisée pour calculer l'indice de cohérence.

$$CI = \frac{(\lambda_{max}-n)}{(n-1)} \dots\dots\dots (4.2)$$

Où : λ max est la plus grande valeur propre et n est le nombre de critères.

Enfin, après avoir calculé le poids de chaque facteur affectant le phénomène, les poids calculés pour chaque critère sont multipliés par les valeurs attribuées à chaque alternative (ou à chaque zone dans le cas de l'érosion hydrique) afin d'obtenir le score final pour chaque alternative. Ces notes sont utilisées pour classer les alternatives et déterminer la décision finale.

Tableau 4.2. Matrice des comparaisons par paire et pondération des paramètres géophysiques et de vulnérabilité dans AHP : (EL) élévation, (S) pente, (As) aspect, (Cu) courbure, (S) sol, (LULC) LULC, (DD) densité de drainage, (R) érosivité des précipitations, (Li) lithologie, (NDWI) indice de différence normalisé de l'eau, (NDVI) indice de différence normalisé de la végétation.

Paramètres	EL	S	As	Cu	So	LuLc	DD	R	Li	NDWI	NDVI
EL	1	1	3	3	7	5	5	7	7	9	5
S	1.00	1	3	2	3	3	3	5	4	3	3
As	0.33	1.00	1	3	2	4	4	2	3	4	3
Cu	0.33	0.33	1.00	1	5	2	3	4	5	3	4
So	0.14	0.33	0.33	1.00	1	3	2	3	4	5	3
LuLc	0.20	0.14	0.33	0.33	1.00	1	4	5	3	4	5
DD	0.20	0.20	0.14	0.33	0.33	1.00	1	3	2	3	4
Rainfall	0.14	0.20	0.20	0.14	0.33	0.33	1.00	1	5	2	3
Li	0.14	0.14	0.20	0.20	0.14	0.33	0.33	1.00	1	3	2
NDWI	0.11	0.14	0.14	0.20	0.20	0.14	0.33	0.33	1.00	1	7
NDVI	0.20	0.11	0.14	0.14	0.20	0.20	0.14	0.33	0.33	1.00	1
SUM	3.81	4.61	9.50	11.35	20.21	20.01	23.81	31.67	35.33	38.00	40.00
CR	0.089										
Poids AHP	0.25	0.17	0.13	0.12	0.08	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02

4.2.2 Analyse Floue des Processus Hiérarchiques (FAHP):

L'analyse floue des processus hiérarchiques (Fuzzy Analysis of Hierarchical Processes – (FAHP)) est une technique avancée de prise de décision multicritères qui intègre la logique floue pour tenir compte de l'incertitude et de l'objectivité des jugements humains dans les

comparaisons. La méthode FAHP est dérivée de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), mais elle surmonte les limites de la méthode AHP classique en permettant des évaluations plus réalistes et plus précises lorsque les décideurs sont confrontés à des données imprécises ou à des jugements peu clairs. Le modèle FAHP est particulièrement utile dans les situations où les critères d'évaluation sont ambigus ou subjectifs, ce qui permet une analyse plus précise des décisions complexes. Par conséquent, afin de résoudre ce problème d'imprécision et d'incertitude et de transformer avec précision les jugements humains en échelles de ratio, la théorie des ensembles flous introduite par **Zadeh 1965** a été largement incorporée dans la méthode AHP originale, dans laquelle l'échelle de pondération est composée de nombres flous. Dans la FAHP, les poids sont calculés à partir de matrices de comparaison floues, qui sont ensuite utilisées pour classer les alternatives disponibles avec les scores atteints par les alternatives pour chaque critère. Par conséquent, la détermination des poids à partir des matrices de comparaison est l'une des étapes clés du processus. Dans la méthode AHP conventionnelle, ces poids sont les vecteurs propres de la matrice de comparaison pour un décideur totalement cohérent (Saaty 2003, Ahmed et Kilic 2019).

4.2.2.1. Les composantes de base du FAHP :

a. Nombres Floue triangulaires (TFN) :

Un nombre Floue triangulaire (TFN) est un type de nombre Floue caractérisé par trois paramètres, notés $A = (a_1, a_2, a_3)$. Ici, a_1 est la limite inférieure, a_2 est le pic (valeur la plus probable) et a_3 est la limite supérieure. La fonction d'appartenance d'un TFN est de forme triangulaire, indiquant comment le degré d'appartenance varie en fonction des différentes valeurs (Gani et Assarudeen 2012). Les nombres Floue triples permettent aux utilisateurs d'exprimer leurs préférences d'une manière flexible qui inclut un degré d'incertitude ou d'ambiguïté.

b. Fonction d'appartenance en logique floue:

Une fonction d'appartenance est un concept fondamental de la logique floue, représentant le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou. Elle quantifie l'imprécision inhérente à la classification des éléments, en permettant une appartenance partielle plutôt qu'une classification binaire stricte d'appartenance ou de non-appartenance. Pour tous ensemble X , une fonction d'appartenance $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$ fait correspondre à chaque élément $x \in X$ une valeur dans l'intervalle $[0, 1]$. La valeur $\mu_A(x)$ indique le degré d'appartenance de x à l'ensemble Floue \tilde{A} :

0 : indique que x n'est pas membre de l'ensemble.

1 : indique une appartenance totale.

Les valeurs comprises entre 0 et 1 indiquent une appartenance partielle. (Gani et Assarudeen 2012)

4.2.2.2. Étapes du Modèle FAHP :

a. Construction de la structure hiérarchique : Le processus FAHP commence, comme dans AHP, par la définition de l'objectif de la décision et sa décomposition en plusieurs niveaux hiérarchiques. Le niveau supérieur représente l'objectif principal et les niveaux inférieurs contiennent les critères et les facteurs qui affectent la réalisation de l'objectif. La structure hiérarchique permet de simplifier la question en éléments plus clairs, ce qui permet au décideur de se concentrer plus facilement sur les comparaisons de facteurs.

b. Comparaisons Floue par paires : Dans la méthode AHP traditionnelle, les comparaisons par paire sont effectuées sur une échelle allant de 1 à 9. Dans la méthode FAHP, cette échelle est remplacée par trois nombres flous pour chaque comparaison, exprimant l'ambiguïté des évaluations. Matrice floue de comparaison par paire: La matrice de comparaison par paire est construite à l'aide de valeurs floues, où chaque élément de la matrice représente une comparaison floue par paire entre deux facteurs.

Tableau 4.3. Échelle d'importance relative de la construction de la matrice par paire de FAHP.

Intensité d'importance FAHP	Définition
1.1.1	Tout aussi important
2.3.4	Fable importance
4.5.6	Forte importance
6.7.8	Importance démontrée
8.9.9	Importance absolue

c. Calcul des poids : Le calcul des poids dans l'analyse hiérarchique floue (FAHP) est basé sur la détermination de l'importance relative de chaque critère ou alternative par le biais de comparaisons par paire en utilisant des nombres flous triples. Des méthodes mathématiques sont ensuite appliquées pour calculer les poids finaux. Dans l'analyse hiérarchique floue, les pondérations ne sont pas simplement des nombres spécifiques, mais sont représentées par des nombres triangulaires flous (Triangular Fuzzy Numbers - TFN) pour représenter les incertitudes et l'incertitude dans les jugements. Le processus de calcul des pondérations commence par la comparaison des critères par paires, c'est-à-dire la comparaison de chaque critère entre eux à l'aide de nombres flous triples. Les valeurs typiques des comparaisons dans FAHP sont

représentées par des nombres flous triples. Avant d'appliquer la méthode FAHP, on utilise la méthode AHP pour vérifier la cohérence des décisions prises par les décideurs en calculant le ratio de consistance (CR) comme $CR = CI/RI$, où CI est l'indice de consistance et RI l'indice de randomisé.

La Modèle FAHP est un outil puissant et flexible permettant de prendre des décisions basées sur des facteurs multiples, en particulier dans des circonstances où les jugements peuvent être incertains ou aléatoires. En incorporant la logique floue à la logique AHP, la méthode FAHP permet aux décideurs d'obtenir des résultats plus spécifiques et plus précis, ce qui en fait un choix privilégié pour les questions complexes et incertaines. Que ce soit pour la gestion des risques, l'urbanisme ou d'autres domaines environnementaux, la technique FAHP représente une approche plus robuste pour analyser et traiter les problématiques de décisions à multiples facteurs.

La combinaison linéaire pondérée (WLC) a été adoptée pour obtenir la carte WEH. L'intégration des différents facteurs et classes de facteurs de causalité et de classes dans un seul WEH est donnée par une procédure basée sur la somme linéaire pondérée (4.3).

$$REH = \sum_{i=1}^n (Pi \times Xi) \dots \dots \dots (4.3)$$

REH est la valeur synthétique du risque d'érosion hydrique de la grille, Pi est la valeur du poids et Xi est l'évaluation potentielle du facteur i. Une fois les cartes factorielles créées et les poids relatifs calculés, chaque carte factorielle est multipliée par son poids, tel qu'il est calculé à partir du vecteur propre principal.

4.2.3 Équation universelle révisée de perte en terre (RUSLE)

Le ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA) a développé RUSLE, une modification largement utilisée de l'équation originale de perte de sol universelle (USLE), afin de fournir une méthode simple et pratique pour prédire la perte de sol due à l'érosion hydrique (Farhan et Nawaiseh 2015, Benselama, Mazour et al. 2018). La méthode RUSLE est également souvent utilisée par d'autres chercheurs. RUSLE a été utilisé en conjonction avec GIS et RS pour estimer l'érosion du sol dans cette enquête. RUSLE prend en compte un certain nombre de facteurs, y compris la susceptibilité érosive K, le facteur topographique LS, la composante de gestion des cultures C et le facteur de techniques antiérosives P. L'équation RUSLE est représentée par la formule suivante :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \dots \dots \dots (4.4)$$

Où :

- A est la perte annuelle moyenne de sol en (Tonnes ha⁻¹ an⁻¹).
- R est le facteur d'érosion pluviométrique (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹).
- K est le facteur d'érodabilité du sol (T h ha MJ⁻¹ mm⁻¹ ha⁻¹).
- LS est le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente.
- C est le facteur de gestion des cultures.
- P est le facteur de la pratique du contrôle de l'érosion.

4.2.4 Méthode D'érosion Estimée (EPM)

Gavrilovich a développé la « méthode d'érosion estimée » pour le modèle EPM dans le bassin de la rivière Morava en Serbie dans les années 1950 (Dragičević, Karleuša et al. 2016). Par la suite, des méthodes ont été développées pour prédire les taux annuels d'érosion des sols pour différents types d'érosion, y compris l'érosion des canyons, des parcelles et des vallées, afin de guider les mesures de contrôle de l'érosion (Blinkov et Kostadinov 2010). Cette méthode vise à évaluer l'érosion hydrique du sol en combinant les coefficients d'érosion hydrique basés sur les précipitations, la température, la susceptibilité à l'érosion du sol, la protection du sol, le type d'érosion et la pente.

Récemment, de nombreux chercheurs ont décidé d'évaluer l'érosion des sols en appliquant plusieurs modèles. Dans cette étude, nous voulions tester la capacité du modèle Gavrilovich à évaluer l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Boussellam et de l'oued K'sob, en identifiant les zones les plus sensibles à l'érosion, et de fournir toutes les données liées aux paramètres du modèle et à leur similarité. Les caractéristiques physiques du bassin versant, pour appliquer le modèle, tous les paramètres requis pour appliquer le modèle expérimental doivent être définis et intégrés au SIG. Étant donné que les SIG peuvent traiter les données rapidement et efficacement, les paramètres utilisés dans la recherche par télédétection et les données collectées à partir de nombreuses sources sont devenus des outils utiles pour gérer les ressources naturelles et mener des recherches sur les catastrophes (Pham, Degener et al. 2018). Le travail a été réalisé conformément aux procédures indiquées dans l'organigramme ci-dessous.

Paramétrage des facteurs du modèle EPM

Les six paramètres pentes, précipitations, températures, érodabilité du sol, types d'érosion et protection du sol sont combinés pour représenter l'érosion dans l'équation :

$$W = T * H * \pi * \sqrt{Z^3} \dots \dots \dots (4.5)$$

Avec :

W : Estimation des pertes moyennes annuelles des sols ($m^3 / km^2 / an$). Les valeurs seront converties par la suite en $t/h/an$.

T: coefficient de température, exprimé comme suit :

$$T = (0.1 * t_0) + 0.1 \dots\dots\dots(4.6)$$

Où : t_0 : température moyenne annuelle en °C

H: précipitation moyenne annuelle en (mm).

Z: coefficient d'érosion.

4.2.4 Source de données et préparation des couches géo spatiales

La compréhension et la prévision des processus et des éléments qui contribuent à l'érosion des sols nécessitent une approche méthodique, ce qu'implique la modélisation de l'érosion des sols. Pour prédire la susceptibilité à l'érosion des sols, il est donc nécessaire de planifier et de rechercher l'effet de plusieurs facteurs qui affectent l'érosion. Un corpus substantiel de littérature a été examiné pour cette enquête (Mihi, Benarfa et al. 2020, Neji, Ayed et al. 2021, Saha, Sarkar et al. 2022, Mushtaq, Farooq et al. 2023). Les facteurs utilisés étaient nombreux (altitude, pente, aspect, courbure, sol, utilisation/couverture des terres, densité de drainage, érosivité des précipitations (R), érodabilité du sol (K), longueur de la pente (LS), facteur de gestion des cultures (C), pratique de conservation (P), température moyenne annuelle (T), coefficient d'érosion (Z), lithologie, MNDWI ,NDVI. Et en utilisant le logiciel Arc GIS10.3 et un grand nombre de données géospatiales multi-sources ont été utilisés pour construire les couches thématiques pertinentes (tableau 1). Tous les ensembles de données ont été transformés dans le système de projection WGS 84 UTM zone 31 N pour l'analyse, et la technique du plus proche voisin a été utilisée pour rééchantillonner les données.

Tableau 4.4. Sources d'information et méthodes utilisées pour créer des couches de données thématiques.

Type de données	Source des données	Résolution	Description
Élévation, Aspect, Curvature, Pente, Facteur P, Facteur LS	Explorateur de la Terre de l'USGS	30 m	Modèle Numérique d'Élévation Global ASTER
Land Use/Land Cover (LU LC)	Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Timeseries Downloader (Mature Support) https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2	10 m	Dérivé des images Sentinel-2 en utilisant la classification supervisée d'ArcGIS.
Indice Différentiel Normalisé de l'Eau (NDWI), Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), Facteur C	Explorateur de la Terre de l'USGS	30 m	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$ $NDWI = \frac{Grren - NIR}{Grren + NIR}$
Lithologie	Cartes géologiques mondiales https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-maps/	30 m	
Erosivité des pluies	Agence nationale des ressources en eau (ANRH) Pour la période 1973-2013	/	Utilisation des outils d'interpolation d'ArcGIS, extraits des données pluviométriques
Densité de drainage	Réseau hydrographique extrait du MNT	30 m	Calculé à l'aide d'ArcGIS à partir de la superficie du bassin versant et de la longueur du cours d'eau.
Sol, facteur K	Portail de données SoilGrids https://soilgrids.org/	/	Extrait des données du sol

Érosivité des précipitations (R): Dans le modèle de RUSLE, le facteur d'érosion par les précipitations (R) a été estimé à l'aide de la relation découverte en utilisant les précipitations quotidiennes maximales et les données de précipitations annuelles recueillies sur 23 sites dans ou autour des bassins versants de l'oued Boussellam et de l'oued K'sob entre 1972 et 2013 (Meddi, Toumi et al. 2016). Les valeurs du facteur R ont été calculées indépendamment pour chaque station et réparties sur toute la surface du bassin à l'aide de la méthode de Krigeage, qui s'est avérée être la méthode la plus représentative pour interpoler diverses variables climatiques et qui a été utilisée dans plusieurs publications (Hassouni et Bouhlassa 2006, Bouderbala, Souidi et al. 2018, Hasbaia, Zeroual et al. 2018).

$$R = 0.32P^{0.51}Pjmax^{0.96} \dots\dots\dots(4.7)$$

Où:

P : pluviométrie moyen annuelle (mm),

P jmax : pluie journalière maximale (mm)

Dans le modèle AHP et FAHP, À l'aide du logiciel HYDROLAB, une analyse de fréquence journalière des données pluviométriques est effectuée sur la base de la distribution des valeurs de la loi de Gamble pour chacune des 24 stations. Ensuite, un travail a été effectué pour extraire les valeurs maximales des précipitations pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000 ans). Les valeurs de l'analyse de fréquence permettent d'identifier la zone la plus exposée aux inondations et aux fortes pluies à un moment donné. Une carte des précipitations a été générée à l'aide des équations suivantes. (Figure 4.1).

$$Xp(T) = Gd . U + P0 \dots\dots\dots(4.8)$$

Où:

(Xp (T) est le quantile de la période de retour T)

P0 = Position parameter (in mm)

Gd = Gradex (pente de la ligne d'ajustement)

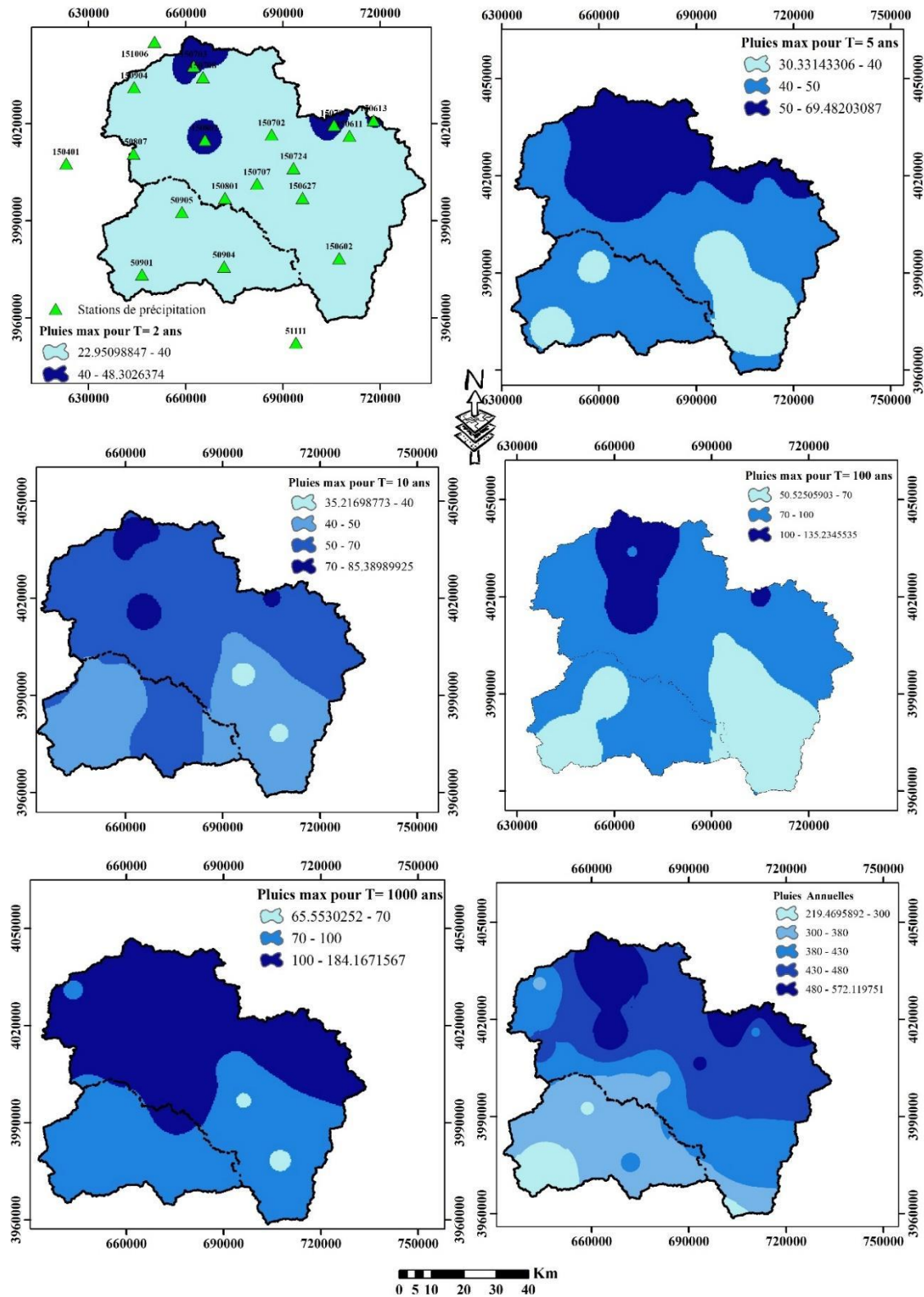


Figure 4.1. Cartes des précipitations pour différentes périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000 ans).

- ✓ **Facteur Topographique (LS) :** Le facteur LS, aussi appelé composition topographique, évalue la perte de sol en intégrant les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison (S) de la pente lors du calcul. Les pentes élevées montrent comment elles affectent l'érosion du sol (Belkendil, Habi et al. 2018). En utilisant l'outil d'analyse spatiale ArcGIS et un modèle numérique d'élévation (MNT) (résolution de 30 m) acquis à partir de la plateforme Earth Explorer de l'US Geological Survey (USGS), nous avons calculé le facteur de longueur de pente en utilisant l'équation employée par différents auteurs (Benselama, Mazour et al. 2018, Djoukbala, Mazour et al. 2018, Aslam, Maqsoom et al. 2021).

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \times \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \text{if } \theta < 9 \% \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & \text{if } \theta \geq 9 \% \end{cases} \dots\dots\dots(4.9)$$

$$m = \frac{\beta}{(1+\beta)} \dots\dots\dots(4.10)$$

$$\beta = \frac{(\sin \theta)}{[3 \times \theta]^{0.8} + 0.56} \dots\dots\dots(4.11)$$

Où λ est la longueur de la pente, θ est l'angle de la pente, m est un exposant de longueur variable de la pente, et β est un facteur variant avec le gradient de la pente.

- ✓ **Le Facteur C :** Évalue l'effet de plusieurs éléments associés à la végétation et aux approches de gestion sur l'érosion des sols. Ces influences incluent des éléments tels que la végétation, les résidus agricoles, l'exploitation des sols et les techniques de préservation du sol. Le facteur C tient compte de l'effet protecteur de la végétation et des activités de conservation sur l'érosion du sol. Il s'agit d'un facteur sans dimension sur une échelle de 0 à 1, les valeurs les plus élevées indiquant un potentiel d'érosion moindre et une meilleure protection du sol. Le satellite Landsat 8 OLI_TIRS (résolution de 30 m) a capturé des images pour l'année 2022, à partir desquelles l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a été calculé. Le NDVI est calculé en combinant les bandes visibles, proche infrarouge (NIR) et rouge (Eq.4.12). Pour évaluer l'impact de la végétation sur l'érosion du sol, le facteur C a été calculé après avoir obtenu le NDVI et examiné les recherches effectuées à cet égard (Benselama, Mazour et al. 2018, Bouderbala, Souidi et al. 2018, Bouamrane, Bouamrane et al. 2021) (Figure 4.2e).

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \dots\dots\dots(4.12)$$

Où NIR est la bande du proche infrarouge, R est la bande du rouge.

Les seuils suivants ont été utilisés pour classer la végétation:

$$NDVI < -0.1: \text{L'eau}$$

-0.1 < NDVI < 0.15: Bare soil

0.15 < NDVI < 0.25: Séparer la végétation

0.25 < NDVI < 0.4: Végétation modérée

NDVI > 0.4: Végétation dense.

Après avoir obtenu les résultats du NDVI et sur la base de Mokhtari et al. Le facteur C a été extrait selon l'équation suivante:

$$C = 0,9167 - 1,667 \times NDVI \dots\dots\dots(4.13)$$

✓ **Le Facteur (P) :** est une stratégie de conservation qui peut avoir un impact sur l'érosion du sol dans une pratique pédologique particulière. En réduisant la vitesse de ruissellement, les techniques de soutien et de conservation telles que les terrasses, les courbes de niveau, les clôtures anti-érosion et les cultures en bandes réduisent le risque d'érosion du sol. Le facteur (P) a une plage de valeurs entre 0 et 1. Une valeur de 0 dénote des efforts de conservation optimaux qui évitent entièrement l'érosion du sol, tandis qu'une valeur de 1 représente un manque de pratiques de conservation, ou plus précisément, leur inexistence (Xu, Xu et al. 2013, Farhan et Nawaiseh 2015, Benselama, Mazour et al. 2018). Le modèle numérique d'élévation (MNE) pour cette étude a été obtenu à partir de la plateforme Earth Explorer de l'US Geological Survey (USGS), et le facteur P a été calculé à l'aide de l'outil d'analyse spatiale ArcGIS (**voir figure 4.2b.**).

✓ **Le Facteur K / Sol :** Le type de sol d'une zone influe sur sa vulnérabilité à l'érosion. Les différents types de sol ont des qualités distinctives qui peuvent affecter la vitesse d'érosion des sols. Voici quelques facteurs importants à garder à l'esprit lorsque l'on réfléchit au type de sol et à son influence sur l'érosion (texture, teneur en matière organique et perméabilité, longueur et raideur de la structure de la pente, etc.) Les formules suivantes, développées et utilisées par (Neitsch, Arnold et al. 2011, Chadli 2016, Benselama, Mazour et al. 2018, Djoukbala, Mazour et al. 2018) ont été utilisées pour estimer ce facteur (**Figure 4.2d**).

$$K = E_{sand} \cdot E_s \cdot E_{Oc} \cdot E_{topsand} \dots\dots\dots(4.14)$$

$$E_{sand} = \left(0.2 + 0.3 \times e \left[-0.256 \times ps \times \left(1 - \frac{psilt}{100} \right) \right] \right) \dots\dots\dots(4.15)$$

$$E_s = \frac{P_{silt}}{P_c + P_{silt}} \dots\dots\dots(4.16)$$

$$E_{Oc} = 1 - \frac{0.25 \times Oc}{Oc + e^{(3.72 - 2.95 \times Oc)}} \dots\dots\dots(4.17)$$

$$E_{topsand} = 1 - \frac{0.7 \left(1 - \frac{Ps}{100} \right)}{\left(1 - \frac{Ps}{100} \right) + e \left[-5.51 + 22.9 \left(1 - \frac{Ps}{100} \right) \right]} \dots\dots\dots (4.18)$$

Où : E sable est un paramètre qui diminue l'indicateur K dans les sols qui contiennent du sable grossier.

E s: Indique un paramètre d'érodabilité du sol faible pour les terres à forte teneur en argile.

E Oc: Limite les valeurs K dans les sols contenant du carbone organique.

E top sand: Réduit les valeurs K pour les sols à très forte teneur en sable

Ps: Le pourcentage de sable

Psilt : Le pourcentage de limon

Pc : pourcentage d'argile

Oc: Le pourcentage de carbone organique.

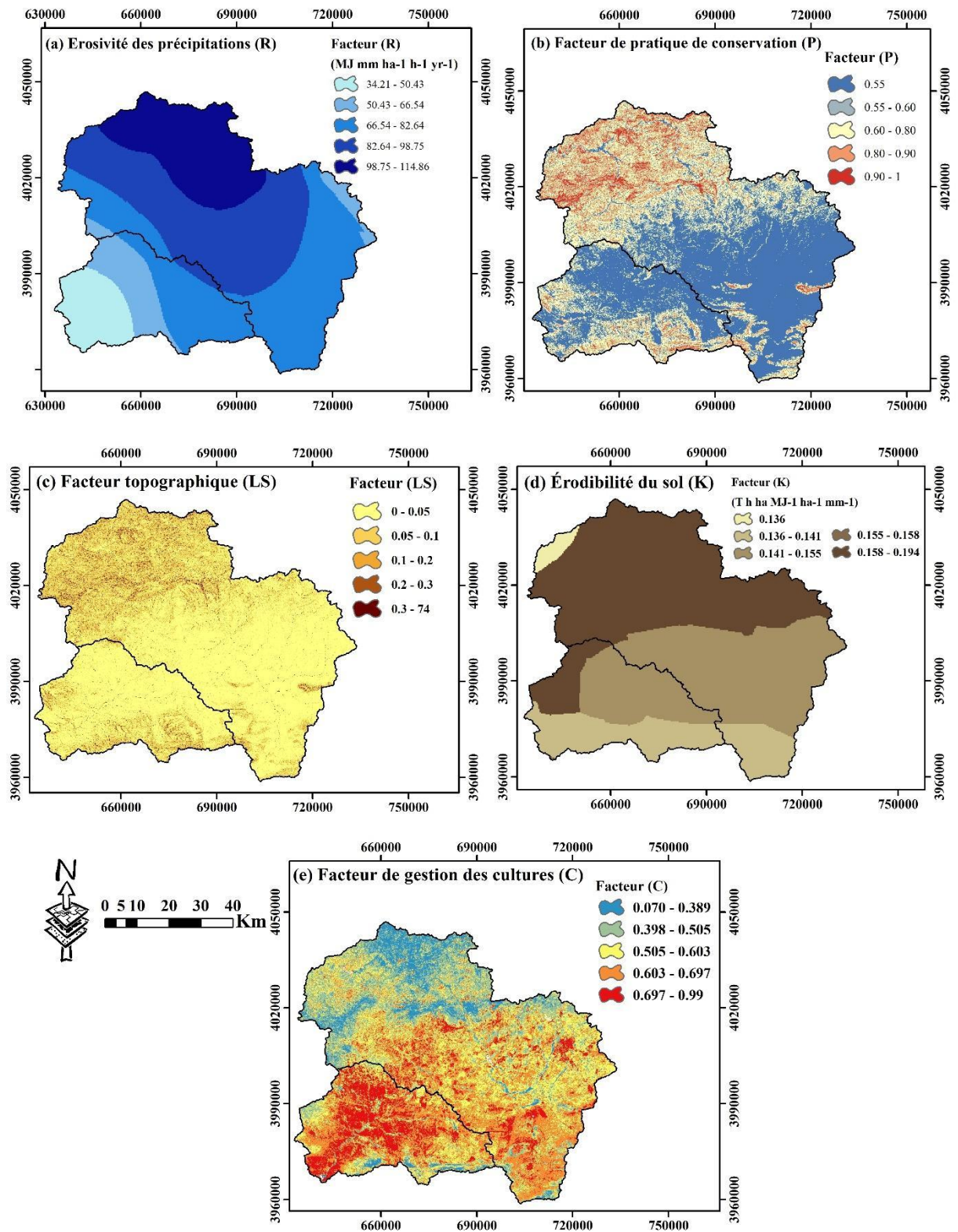


Figure 4.2. Distribution spatiale des paramètres RUSLE : (a) facteur R, (b) facteur P, (c) facteur LS, (d) facteur K, et (e) facteur C.

✓ Coefficient de température (T) :

Le changement climatique est l'un des facteurs naturels qui affectent négativement les régions sèches et semi-arides, et cela est dû à l'augmentation de la température, qui est l'un des facteurs qui contribuent à la fragilité des particules de roche et de sol. Ce qui a été utilisé comme facteur de corrosion dans le modèle EPM. En raison du manque de données sur le site d'étude, le coefficient de température a été extrait à partir de données d'images satellite téléchargées à partir du site Web de USGS, où les données mensuelles pour l'année 2022 ont été utilisées. En appliquant l'intégration des informations géographiques et le programme Arc GIS, nous avons pu créer une carte des températures annuelles moyennes (**figure 4.3a**), qui représente la température annuelle moyenne pour l'année 2022.

✓ **Le coefficient des Précipitations annuelles moyennes (H) :**

Les précipitations sont considérées comme l'un des principaux facteurs d'érosion hydrique. Le facteur d'érosion des précipitations (H) a été estimé à partir des données pluviométriques obtenues de l'Agence (ANRH), qui sont représentées par des données journalières maximales et annuelles pour environ 18 stations de 1972 à 2013. Les stations couvrent environ la zone d'étude et sur la base de la relation mathématique proposée ([Meddi, Toumi et al. 2016](#)), les valeurs du facteur H ont été extraites indépendamment pour chaque station et réparties sur toute la surface du bassin par krigeage. Et grâce à ArcGIS, nous avons pu créer une carte du facteur H (**figure 4.2a**), grâce à laquelle nous avons enregistré qu'il existe un gradient de précipitations entre les stations réparties presque sur toute la zone d'étude. Influence des hauteurs et des pentes qui forment des barrières aux effets de la moyenne de la mer Blanche.

✓ **Le coefficient D'érosion (Z) :**

Pour obtenir le coefficient de corrosion (Z), il faut extraire les quatre facteurs qui contrôlent son développement, à savoir (roches et sols exposés, topographie et végétation utilisation des terres), puis le coefficient de corrosion (Z) peut être calculé sur la base de l'équation N°(4.19).

$$Z = Y * Xa * (\delta * \sqrt{Ja}) \dots\dots\dots(4.19)$$

Où ;

Y : Coefficient d'érodabilité du sol. Cela dépend de la roche, du type de sol et du climat.

Xa : Coefficient de protection des sols contre les influences liées aux phénomènes atmosphériques.

δ : Coefficient qui exprime le type et le degré d'évolution des processus d'érosion visibles dans le bassin versant.

Ja : angle de pente (%).

Convertissez les résultats de ce modèle de $m^3/km^2/an$ en $t/ha/an$ en appliquant l'équation de densité.

$$(\rho) : \rho = m/V \dots\dots\dots(4.20)$$

Où ;

m : la masse de la substance homogène occupant un volume V

✓ **Coefficient de protection des sols (Xa) :**

Il est connu et diffusé parmi les chercheurs dans ce domaine que le coefficient de protection des sols (Xa) sont directement lié au couvert végétal, qui est considéré comme l'un des éléments de base pour protéger les sols des pluies agressives. Les valeurs de (Xa) varient en fonction de l'occupation du sol par la végétation (Tab.4.5). (0.1) pour les forêts denses à 1 (pour terrain accidenté).

Tableau 4.5. : (Xa) en fonction de l'occupation du sol par la végétation (Zorn et Komac 2009, Dragičević, Karleuša et al. 2016).

Le type de sol	Coefficient de protection des sols (Xa)
Forêts denses et moyennes	0.05 – 0.20
Forêts de pins et herbes le long des ruisseaux	0.20 – 0.40
Pâturages et fermes	0.60 – 0.8
Terrain nu sans couverture	0.8 – 1.00

Sur la base de la méthodologie utilisée par (Chaaouan, Faleh et al. 2013, Marouane, Lahcen et al. 2021, Zeghmar, Marouf et al. 2022) et en fonction de l'application du facteur de végétation (NDVI) à partir des données mensuelles de l'année 2022 du satellite Landsat obtenues sur le site de l'USGS, les valeurs du sol l'indice du facteur de protection (Xa) a été extrait selon l'équation suivante :

$$Xa = (NDVI - 0.61) * (-1.25) \dots\dots\dots(4.21)$$

Xa : Coefficient de protection du sol

NDVI : Facteur de couverture végétale ajusté,

À partir de la **figure 4.3c**, nous constatons que les critères de l'indice de protection des sols évoluent progressivement au cours de la zone d'étude, où les valeurs de Xa comprises entre 0,4 et 0,6 couvraient la région centrale de la zone d'étude, qui représente les pâturages et les fermes, tandis que les valeurs de $Xa < 0,4$ reflètent la présence de forêts denses et moyennes, de pinèdes et de forêts.

✓ **Coefficient d'érosion des sols (Y) :**

L'influence des processus d'érosion est significativement affectée par le facteur d'érosion du sol K, tel que quantifié par sa contribution (Kumar et Gupta 2016). La susceptibilité à l'érosion du sol varie en fonction des caractéristiques du sol telles que la texture, la structure, la rugosité, la teneur en matières organiques et les niveaux d'humidité. Ce paramètre démontre la vulnérabilité du sol à l'érosion induite par l'eau, déterminée en évaluant les types de sol par rapport à leurs attributs de résistance à l'érosion, englobant la texture, la structure, la composition organique, la perméabilité et la teneur en humidité. Pour cette enquête, les données sur les sols proviennent de la base de données mondiale harmonisée sur les sols (HWSD), en utilisant la carte mondiale des sols, pour établir le facteur K (FAO et ISRIC 2012, Nachtergaele, van Velthuisen et al. 2023). Cette base de données complète offre des informations détaillées sur les paramètres mondiaux des sols et sert de plate-forme raster pour la cartographie mondiale des sols. Le calcul du facteur K impliquait également l'utilisation d'équations établies à partir de travaux antérieurs (Chadli 2016, Benselama, Mazour et al. 2018).

✓ **Coefficient de type et étendue de l'érosion (ϕ) :**

Le paramètre ϕ sert d'indicateur de l'étendue de l'érosion dans le bassin versant, dénotant des valeurs comprises entre 0,1 et 1,0 (Tableau 4.6, **figure 4.3e**, délimitant ainsi les régions affectées par l'érosion englobant les cours d'eau, les vallées, les canyons, les accumulations alluviales et le l'intégralité du bassin versant (AbdulWahab 2019, Zeghmar, Marouf et al. 2022). L'évaluation de l'indice d'érosion actuel (ϕ) a été réalisée grâce à la méthodologie introduite par (Zorn and Komac 2009, Zeghmar, Marouf et al. 2022), avec un calcul basé sur l'imagerie satellite de Landsat 8. Le calcul du paramètre ϕ est effectué en utilisant l'équation suivante (4.22) :

$$\delta = \frac{TM4}{\sqrt{Q_{max}}} \dots \dots \dots (4.22)$$

Où TM4 bande 4 de l'image Landsat 8, Qmax est le maximum de radiance de la bande 4, coefficient d'érosion dans le bassin versant de l'oued Boussellam et de l'oued K'sob allant de 0,31 à 0,60.

Tableau 4.6. : Valeurs du coefficient EPM du coefficient d'érosion

Coefficient de type et étendue de l'érosion	Facteur (ϕ)
Peu d'érosion sur le bassin versant	< 0.2

Érosion des cours d'eau sur 20 à 50 % du bassin versant	0.2 – 0.4
Érosion des rivières, ravines et alluvions, érosion karstique	0.4 – 0.6
50 à 80 % du bassin versant est affecté par l'érosion de surface et les glissements de terrain	0.6 – 0.8
Bassin versant entier touché par l'érosion	0.8 – 1.0

✓ **Les Pentes de la Zone D'étude en Pourcentage (Ja) :**

Le coefficient de pente constitue un paramètre essentiel au sein du modèle EPM, signifiant un déterminant important contribuant à une sensibilité accrue du sol. Cette amplification de la sensibilité est particulièrement prononcée sous l'influence de précipitations intenses, favorisant des vitesses d'écoulement accrues grâce à l'interaction synergique avec le coefficient de pente. Le résultat qui en résulte se manifeste par des processus d'érosion intensifiés. La dérivation du coefficient de pente impliquait l'utilisation du modèle numérique d'élévation (DEM) spécifique à la région du bassin versant de l'oued Boussellam et de l'Oued K'sob. Un DEM avec une résolution de 30 mètres a été exploité pour calculer le paramètre de pente, réalisé grâce à le logiciel Arc GIS. Les valeurs de gradient ont été classées en cinq classes allant de 0 % à 40 % d'inclinaison (Zahnoun, Makhchane et al. 2019, Zeghmar, Marouf et al. 2022), comme le montre visuellement la figure 8. L'examen de la répartition des classes révèle la concentration de pentes abruptes principalement dans le sud du pays. Et ouest, un trait topographique attribué aux caractéristiques complexes du réseau de drainage et aux irrégularités du terrain sous-jacentes.

Les catégories de pente (**figure 4.3f**) ont été réparties en cinq catégories. Les catégories basses et très basses, qui représentent moins de 30%, sont concentrées dans la partie nord, tandis qu'à l'inverse, les catégories élevées et très élevées, sont concentrées dans la moitié sud de la zone d'étude.

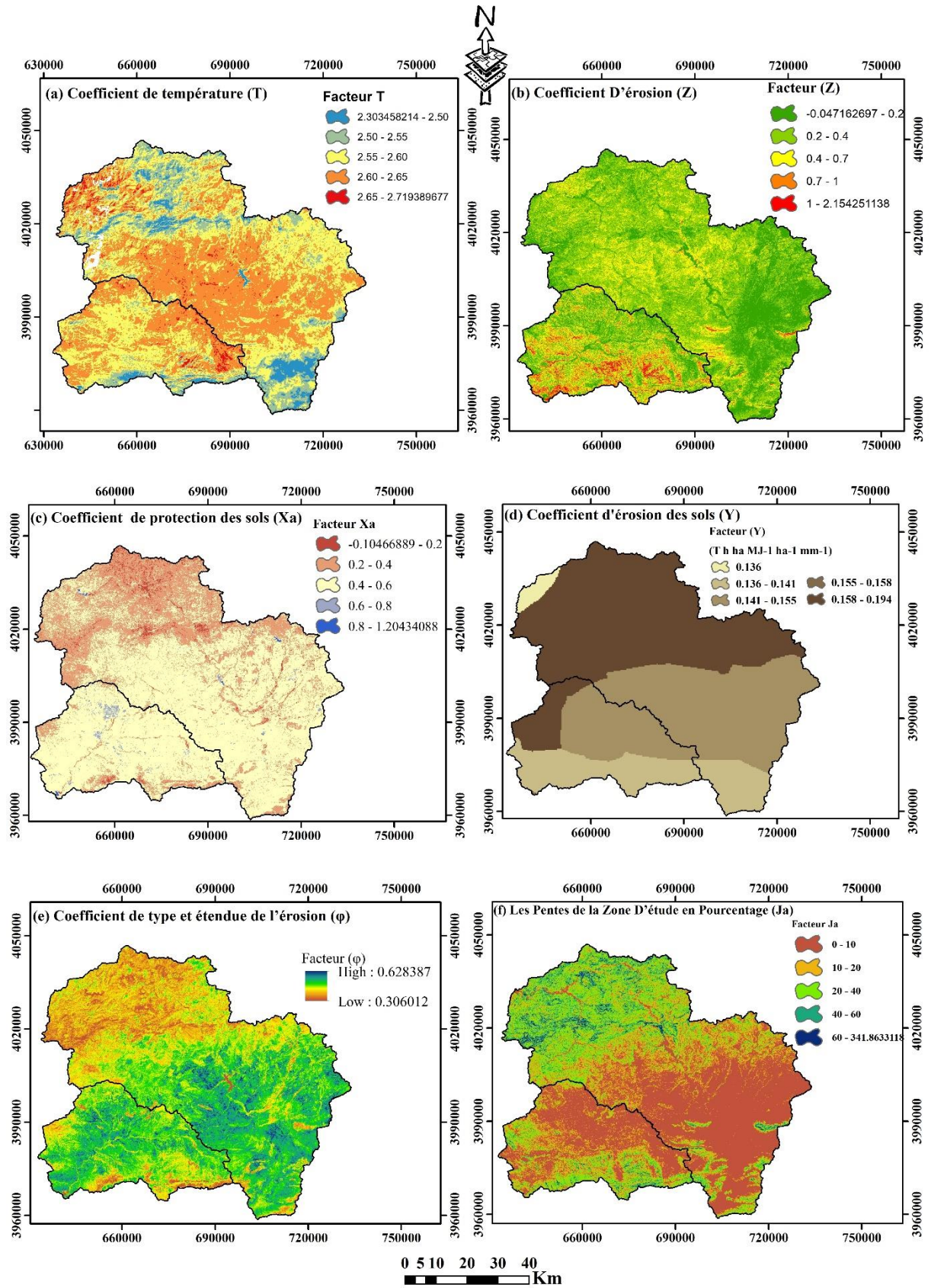


Figure 4.3. Distribution spatiale des paramètres EPM : (a) facteur T, (b) facteur Z, (c) facteur Xa, (d) facteur Y, (e) facteur φ, et facteur Ja.

- ✓ **Élévation (EL):** L'altitude est l'un des principaux facteurs qui affectent de manière significative les taux d'érosion et l'équilibre environnemental dans différentes régions, car elle provoque des changements clairs dans les processus hydrologiques et géomorphologiques qui, à leur tour, affectent les propriétés du sol et de l'écosystème. L'altitude influence l'humidité du sol et le bilan hydrique en agissant directement sur la température et la pression atmosphérique. Les zones de plus haute altitude sont généralement plus froides, ce qui diminue les taux d'évaporation et préserve des niveaux d'humidité du sol plus importants. En revanche, dans les régions de basse altitude, la hausse des températures entraîne une évaporation accrue de l'eau et un assèchement du sol. Cela rend le sol plus susceptible à l'érosion.

En outre, les processus hydrologiques associés à l'érosion et à la sédimentation sont clairement affectés par l'altitude. Dans les zones à forte pente, le ruissellement augmente en raison de l'énergie élevée de l'eau qui s'écoule, ce qui enlève la couche superficielle du sol et la déplace vers des zones de plus faible altitude. Dans les zones de faible altitude ou à pente douce, le mouvement de l'eau ralentit, ce qui permet aux matériaux érodés de se déposer et au sol de se stabiliser. L'altitude influe également sur les propriétés du sol lui-même : les sols des zones d'altitude contiennent souvent davantage de matières organiques en raison du taux de décomposition plus faible dans ces zones plus fraîches, ce qui renforce leur fertilité et leur résistance à l'érosion par rapport aux sols des zones plus basses qui peuvent facilement perdre leurs éléments nutritifs sous l'effet du ruissellement ou du vent.

L'altitude joue également un rôle important dans la détermination de la qualité de la végétation naturelle et cultivée, car les zones de haute altitude favorisent la croissance de certains types de végétation, tels que les forêts ou les arbustes denses, qui contribuent à stabiliser le sol et à réduire l'érosion. En revanche, les sols des zones de basse altitude peuvent être plus exposés, ce qui accroît le potentiel d'érosion (Halefom et Teshome 2019, Mushtaq, Farooq et al. 2023). Dans cette étude, une couche d'élévation a été produite à l'aide de données du modèle numérique d'élévation (MNE) (SRTM DEM) qui fournit des informations précises sur le terrain. Cette couche a été classée en différentes catégories en fonction des plages d'élévation dans la zone d'étude, car ces classifications montrent la relation entre l'élévation et le risque d'érosion. Cette couche a été utilisée comme donnée clé dans l'analyse de superposition pour évaluer la sensibilité du sol à l'érosion. **La figure 4.4a** présente une carte montrant la distribution de l'altitude dans la zone d'étude, qui est utilisée pour comprendre l'impact de l'altitude sur les processus écologiques et hydrologiques. En combinant cette couche avec

d'autres couches telles que la pente, la densité de l'eau et la couverture végétale, les zones les plus sensibles à l'érosion peuvent être identifiées avec précision.

- ✓ **Pente** : L'inclinaison de la pente est un élément crucial qui influence directement les processus géomorphologiques et hydrologiques, ce qui lui donne une importance significative dans l'analyse des taux d'érosion. L'inclinaison de la pente a une importance primordiale dans la définition de la rapidité du ruissellement et du niveau d'infiltration de l'eau dans le sol. Dans les zones à faible pente ou à angle faible, les taux d'infiltration du sol sont relativement élevés, ce qui réduit le ruissellement et minimise le risque d'érosion. En revanche, dans les zones à forte pente, la vitesse de ruissellement est beaucoup plus élevée, ce qui accroît la capacité de l'eau à transporter les matériaux de surface et à enlever le sol, augmentant ainsi les taux d'érosion. Dans cette étude, les données du modèle numérique d'élévation (SRTM DEM) ont été utilisées pour créer une carte précise des pentes de la zone de recherche à l'aide du logiciel ArcGIS. Les pentes ont été représentées en degrés pour permettre une compréhension claire de la distribution des angles dans la zone (**figure 4.4b**). Cette illustration indique l'impact spatial de l'inclinaison sur les taux d'érosion, les régions en pente abrupte étant plus susceptibles de subir une érosion accrue à cause du débit d'écoulement supérieur et de la capacité réduite du sol à absorber l'eau. Cette couche est employée comme un élément crucial dans l'étude spatiale des risques pour déterminer les zones qui requièrent des actions spécifiques pour minimiser l'érosion, comme la mise en place de végétation ou l'édification de zones de protection pour l'eau.
- ✓ **Aspect** : L'aspect est un facteur important qui influence indirectement la dynamique de l'érosion en influençant une série de facteurs environnementaux tels que l'exposition au soleil, le régime des vents, l'écoulement de l'eau et la répartition de la végétation. Par exemple, les pentes orientées vers le sud dans les régions septentrionales ont tendance à recevoir plus de lumière du soleil, ce qui accélère la fonte des neiges et augmente la disponibilité de l'eau pour le ruissellement, augmentant ainsi les taux d'érosion. À l'inverse, les pentes orientées vers le nord peuvent être plus fraîches et plus humides, ce qui réduit la gravité de l'érosion. L'orientation de la pente influe également sur la croissance de la végétation, les différents versants accueillant différents types de végétation qui contribuent à la stabilisation du sol et à la réduction de l'érosion. Dans cette étude, une carte de la direction des pentes a été préparée à l'aide des données SRTM DEM dans ArcGIS (**figure 4.4c**), qui illustre la répartition des diverses orientations dans la zone d'investigation. Lorsque couplée à d'autres éléments comme l'inclinaison du terrain et la végétation, cette carte devient un instrument crucial pour déterminer la sensibilité des régions à l'érosion.

- ✓ **Courbure:** La courbure est une mesure qui décrit à quel point une surface s'écarte d'une ligne droite, et c'est un facteur important qui affecte l'écoulement de l'eau vers les bas de pente en contrôlant les processus de convergence (Convergence) et de divergence (Divergence) (Yilmaz, Topal et al. 2012, Mushtaq, Farooq et al. 2023). Les zones à courbure concave ont tendance à recueillir l'eau, ce qui favorise les processus de sédimentation, tandis que les zones à courbure convexe contribuent à la divergence de l'eau, ce qui entraîne une augmentation des taux de ruissellement et d'érosion.

Dans cette étude, le modèle numérique d'élévation (SRTM DEM) a été utilisé pour produire une couche de courbure à l'aide de l'analyse de proximité dans ArcGIS (**figure 4.4d**). Cette couche illustre la répartition des divers types de courbure dans la région étudiée, facilitant ainsi la compréhension de leur impact sur le mouvement de l'eau et l'identification des secteurs les plus exposés à l'érosion. Ces informations sont considérées comme cruciales dans l'analyse spatiale pour mesurer la sensibilité du sol et les modifications de l'écoulement hydrique à l'échelle de la zone d'étude.

- ✓ **Utilisation des terres et couverture terrestre :** L'utilisation et l'occupation des sols (LULC) ont un impact direct sur les taux d'érosion hydrique, car la gravité de l'érosion dépend en grande partie de la manière dont les terres sont utilisées et des types de végétation ou de surfaces qui les recouvrent. Une végétation dense agit comme un bouclier qui protège le sol de l'impact des gouttes de pluie et réduit la vitesse du ruissellement, réduisant ainsi le risque d'érosion. À l'inverse, les zones peu couvertes ou les sols nus augmentent l'exposition du sol au ruissellement et à l'érosion.

Dans cette étude, les données du satellite **Sentinel-2** avec une résolution de **10** mètres ont été utilisées pour créer une carte LULC. La numérisation manuelle à l'écran a été réalisée à partir d'images satellite, en se référant à des informations de terrain pour vérifier l'exactitude des classifications. La **figure (4.4e)** illustre la répartition des divers types d'usage et de couverture du sol dans la zone d'étude, facilitant ainsi l'établissement du lien entre l'occupation du sol et le danger d'érosion par l'eau. Pour obtenir des informations plus précises sur les données employées, merci de vous référer au lien ci-dessous: [ArcGIS Sentinel-2 Data](#).

- ✓ **Densité de Drainage :** Le taux d'érosion dans les régions montagneuses est largement influencé par la densité de drainage, qui est associée à la quantité et à l'interconnexion des cours d'eau comme les rivières et les ruisseaux. Dans les régions où le réseau de drainage est dense, le nombre accru de canaux favorise l'écoulement de l'eau, ce qui amplifie la capacité de transport des sédiments et d'érosion du sol. Cela signifie que les zones à drainage dense sont plus

sensibles à l'érosion en raison des multiples voies que l'eau peut emprunter pour emporter le sol et les matériaux de surface.

Dans cette étude, un modèle numérique d'élévation (DEM) a été utilisé pour identifier le réseau de drainage et créer une carte de densité de drainage. Une méthodologie standard utilisée en géomorphologie et en hydrologie a été adoptée pour cartographier les voies d'écoulement de l'eau dans le paysage (**figure 4.4f**). Cette carte offre un aperçu de la répartition et de la concentration du réseau de drainage, facilitant ainsi la compréhension du lien entre la densité du drainage et l'érosion potentielle. Elle est utilisée comme une des données primordiales dans l'étude spatiale pour mesurer le danger d'érosion hydrique dans la région étudiée.

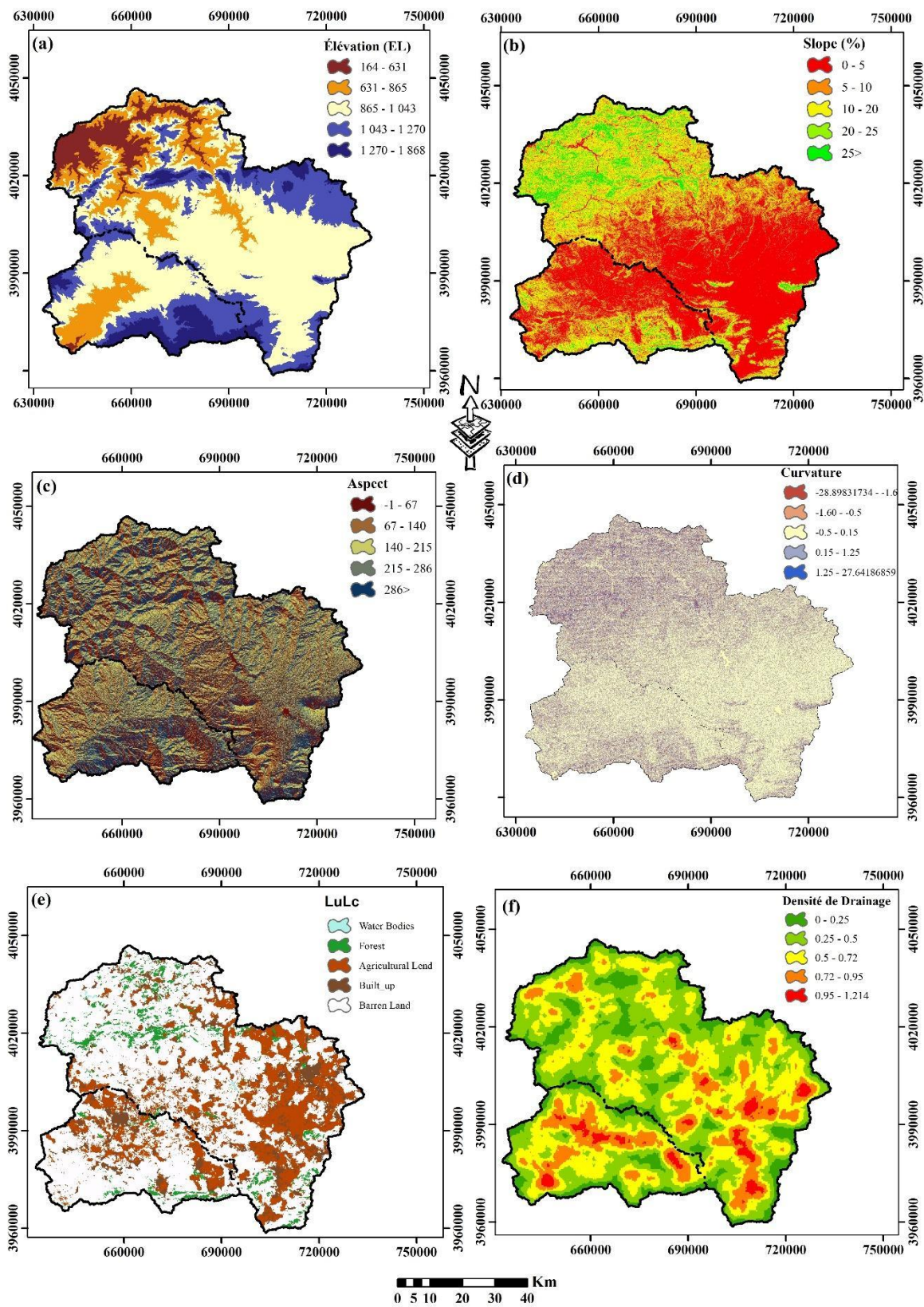


Figure 4.4. Distribution régionale des paramètres sélectionnés pour l'effet de la zone d'érosion du sol : (a) Élévation, (b) Pente, (c) Aspect, (d) Courbure, (e) LULC, (f) Densité de drainage

- ✓ **L'indice de différence normalisé de l'eau (NDWI)** est un indice basé sur la télédétection utilisé pour détecter la présence de masses d'eau ou mesurer la teneur en eau de la végétation à partir d'images satellitaires ou aériennes. L'indice NDWI est un outil puissant pour l'analyse des données spectrales, car il permet de localiser avec précision l'eau et de la différencier d'autres éléments terrestres. L'indice NDWI est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$NDWI = \frac{Grren - NIR}{Grren + NIR} \dots\dots\dots (3.23)$$

« Green » représente la valeur de réflectance dans la bande verte, et « NIR » représente la valeur de réflectance dans la bande proche infrarouge. L'indice met en valeur les signatures spectrales de l'eau tout en minimisant les effets de la végétation et du sol.

Dans cette étude, les valeurs de l'indice NDWI ont été déterminées à l'aide des données du satellite Landsat 8, où la bande verte et la bande proche infrarouge (NIR) ont été utilisées pour les calculs à l'aide de l'outil Raster Calculator dans ArcMap. On obtient ainsi la carte NDWI (**figure 4.5h**), offrant une représentation spatiale précise de la répartition et des propriétés des volumes d'eau dans la zone d'étude. Cette carte est un instrument pratique pour évaluer les ressources hydriques et saisir leur influence sur des phénomènes hydrologiques comme le ruissellement et l'érosion.

- ✓ **L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)** est un indicateur spectral courant dans les techniques de télédétection, utilisé pour déterminer la taille et l'état de la végétation. Bien que le NDVI n'affecte pas directement l'érosion, il fournit des données précieuses pour comprendre et évaluer les processus associés. La végétation joue un rôle essentiel dans le contrôle de l'érosion en interceptant l'eau de pluie, en réduisant le ruissellement et en stabilisant le sol grâce à ses racines. Des valeurs élevées de NDVI indiquent une couverture végétale dense et saine, ce qui signifie un mécanisme de contrôle de l'érosion plus efficace. En revanche, des valeurs faibles indiquent une végétation dégradée ou stressée, comme la déforestation ou la dégradation des terres, ce qui rend le sol plus sensible à l'érosion. Les valeurs positives de l'indice indiquent la présence de végétation telle que des arbustes, des prairies et des forêts tempérées et tropicales, tandis que les valeurs négatives indiquent la présence d'eau, et les valeurs proches de zéro représentent des zones arides ou enneigées.

Dans cette étude, le NDVI a été calculé en utilisant les bandes rouge et proche infrarouge (NIR) des données du satellite Landsat 8 OLI, à l'aide de l'équation suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \dots\dots\dots (3.24)$$

Une carte du NDVI (**figure 4.5i**) a été créée pour déterminer la distribution et la densité de la couverture végétale dans la zone d'étude. Cette carte constitue un instrument précieux pour mesurer l'impact de la végétation sur les phénomènes d'érosion hydrique, en fournissant une représentation précise des régions où des actions de gestion du sol sont requises afin de préserver la solidité du sol et minimiser les dangers d'érosion.

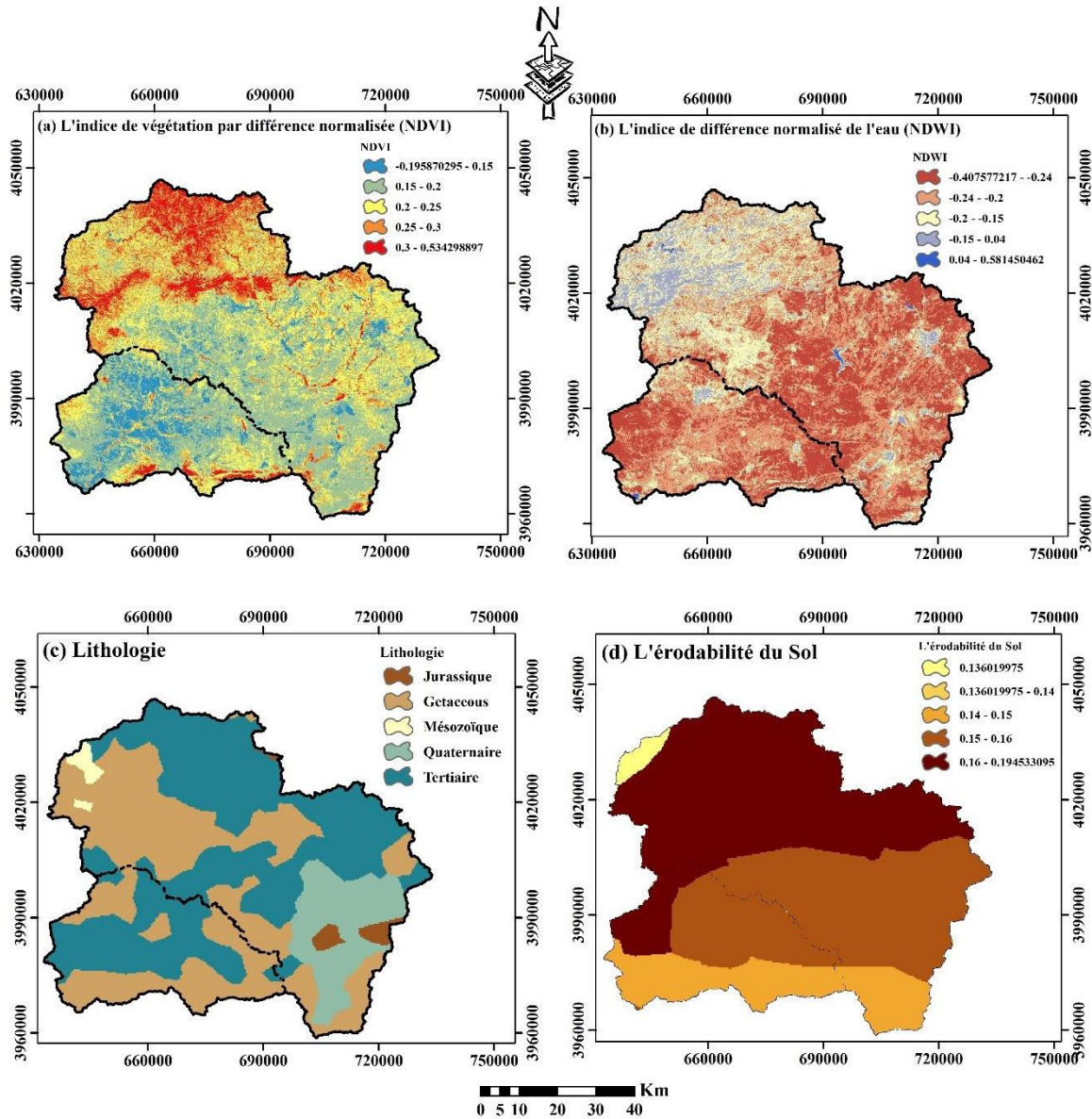


Figure 4.5. Distribution spatiale des paramètres sélectionnés pour l'effet de la zone d'érosion du sol : (a) (NDWI), (b) (NDVI), (c) Lithologie, (d) Erosivité des précipitations (k) Sol.

4.2.5 Modélisation spatiale de la vulnérabilité à l'érosion des sols

Les techniques des systèmes d'information géographique (SIG) et les données de télédétection, ainsi que le modèle RUSLE et EPM, l'AHP et FAHP ont été utilisées pour élaborer des cartes de sensibilité à l'érosion hydrique pour différentes périodes de retour (2 ans, 5 ans, 10 ans, 100

ans et 1 000 ans). Ces cartes sont basées sur un ensemble de facteurs clés qui contribuent à l'érosion, notamment : La courbure, l'angle de la pente, l'aspect, l'élévation, la susceptibilité aux précipitations, LULC, la densité de drainage, le facteur K du sol, la lithologie, l'indice NDWI, le facteur LS, l'indice NDVI, le facteur P et le facteur C.

Les cartes obtenues représentent la distribution de la sensibilité à l'érosion en fonction de la fréquence des événements pluvieux, ce qui permet de comprendre comment les différentes conditions climatiques affectent l'érosion et d'identifier les zones les plus vulnérables. Les différentes étapes des méthodes utilisées pour cartographier de manière exhaustive la sensibilité à l'érosion hydrique sont illustrées dans la figure (4.6), reflétant la complexité du processus et l'importance de l'intégration de données multiples pour obtenir des résultats précis et fiables.

Cette approche est un outil efficace pour les planificateurs de la gestion des terres et des ressources en eau, leur permettant de relever les défis de l'érosion hydrique et d'améliorer la durabilité de l'environnement en appliquant des stratégies appropriées basées sur les résultats.

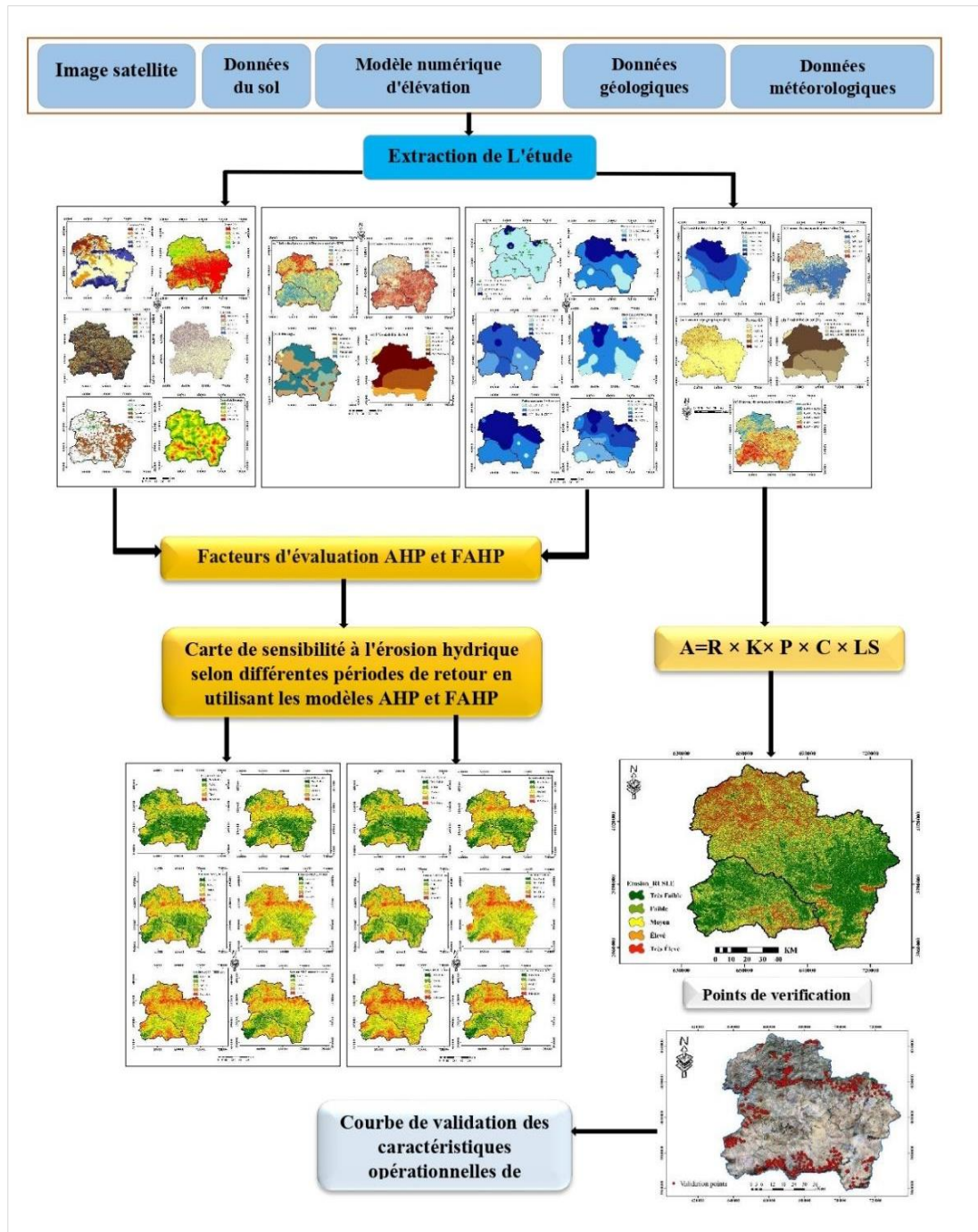


Figure 4.6. Méthodologie utilisée dans l'étude

4.2.7 Validation et Évaluation de la Performance de la Carte d'Érosion des Sols.

Afin d'évaluer l'efficacité des cartes d'érosion hydrique générées pour distinguer les zones sujettes à l'érosion de celles qui ne le sont pas, nous avons effectué des tests sur environ 250 sites d'érosion du sol. Dans la cartographie de l'érosion hydrique, les courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) et l'aire sous la courbe (AUC) sont largement utilisées pour évaluer la précision et la performance des modèles ou des prédictions d'érosion. Ce processus comprend

plusieurs étapes clés : génération d'une carte d'érosion hydrique, compilation d'un ensemble de données comprenant des zones d'érosion identifiables (échantillons positifs) et des zones de non-érosion (échantillons négatifs), et calcul de la sensibilité et de la spécificité. La sensibilité mesure la capacité du modèle à identifier correctement les zones sujettes à l'érosion, tandis que la spécificité reflète sa précision dans l'identification des zones non érodées.

La courbe ROC est tracée avec les valeurs de sensibilité sur l'axe des y et le taux de faux positifs (FPR) sur l'axe des x, où le FPR est calculé comme 1-spécificité. L'AUC, qui représente l'aire sous la courbe ROC, quantifie la performance globale du modèle, avec des valeurs allant de 0 à 1. Une AUC de 1 indique un modèle parfait, tandis que des valeurs plus proches de 0 signifient un modèle moins fiable. L'utilisation des courbes ROC et des valeurs AUC fournit un cadre solide pour la validation et l'évaluation des cartes d'érosion hydrique, offrant des informations essentielles pour la conception de stratégies efficaces de contrôle de l'érosion et de gestion des terres. Le tableau 4.7 classe les niveaux de précision associés aux valeurs AUC en cinq catégories, d'excellent à médiocre, fournissant ainsi un point de référence clair pour l'évaluation des modèles.

Tableau 4.7. Précision de la valeur AUC (Rashid, Agrafiotis et al. 2016)

Niveau de précision	excellent	bon	satisfaisant	pauvres	à défaut
AUC value	(0.90–1.00)	(0.80–0.90)	(0.70–0.80)	(0.60–0.70)	(0.50–0.60)

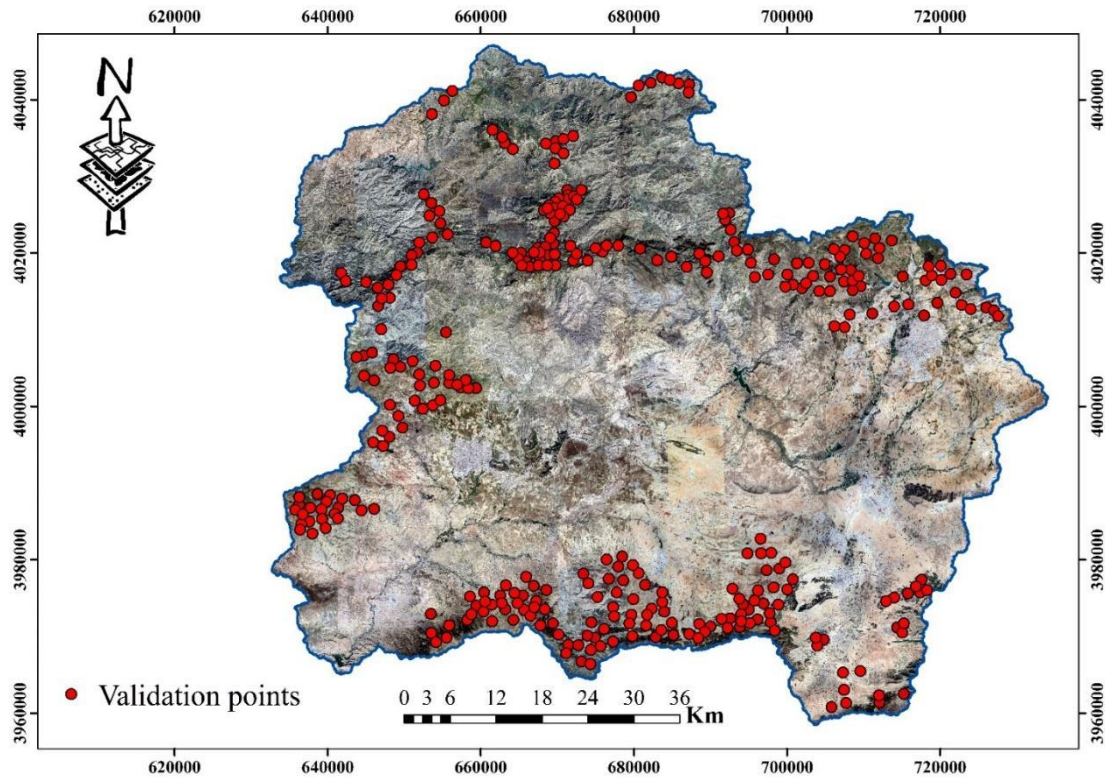


Figure 4.7. Points de validation sur l'image de Google Earth

4.3. Carte de sensibilité à l'érosion

3.3.1 Processus Analytique Hiérarchique (AHP):

Afin d'organiser les facteurs contribuant à l'érosion dans une structure hiérarchique et de déterminer l'importance relative des facteurs conditionnant l'érosion, un modèle AHP qualitatif a été utilisé sur la base d'avis d'experts. Cette approche a permis de créer des cartes montrant la sensibilité des zones à l'érosion due aux fortes pluies, en tenant compte de différentes périodes de retour (2 ans, 5 ans, 10 ans, 100 ans et 1000 ans) ainsi que de la moyenne annuelle des précipitations (figure 4.9). L'analyse de cohérence a montré que le ratio de cohérence (CR) de la matrice de comparaison par paire était de 0,089, ce qui indique que les pondérations dérivées pour les facteurs de conditionnement sont cohérentes. La matrice de comparaison par paire (tableau 4.8) a également été illustrée pour déterminer l'importance relative des différentes variables.

Les résultats indiquent que l'altitude (Élévation - EL), avec un poids de 0,27, est le facteur le plus important pour déterminer la sensibilité à l'érosion de ces bassins versants. En revanche, l'indice de différence température-eau (TWDI) et l'indice de différence de végétation non aquatique (NAVDI) ont été identifiés comme les facteurs les moins significatifs, avec des pondérations respectives de 0,023 et 0,017.

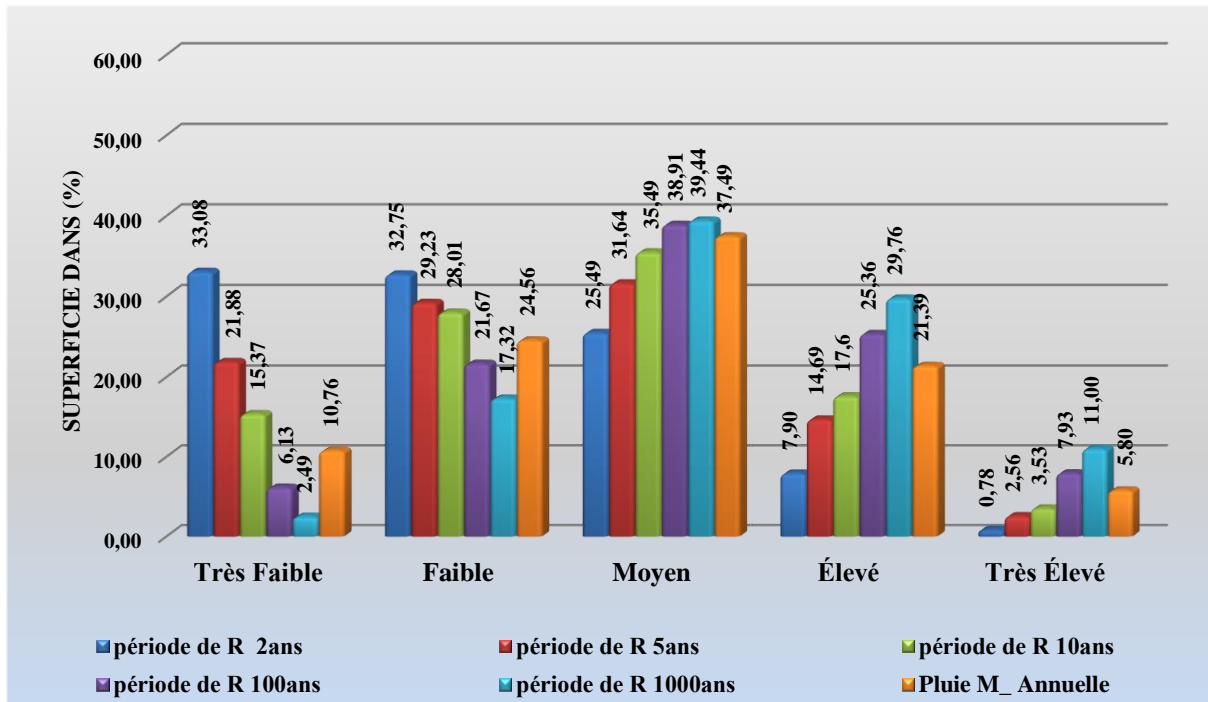


Figure 4.8: Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour diverses cartes de spatiale des zones à risque d'érosion du sol à l'aide du modèle AHP

L'approche de la fonction intégrée des hydrocarbures a été appliquée pour cartographier de sensibilité du l'érosion dans les bassins versants de Boussellam et de K'sob. En utilisant les statistiques de fractures naturelles, les valeurs de sensibilité du l'érosion ont été classées en cinq catégories principales, allant de très faible à très élevée (Hyman, Saeed et al. 2014). Ces catégories sont représentées graphiquement dans la figure 4.8.

Le modèle AHP utilisé pour extraire la carte de vulnérabilité à l'érosion a révélé une disparité marquée en matière de risque d'érosion dans toute la zone étudiée. La répartition des zones en fonction des niveaux de risque (très faible, faible, moyen, élevé et très élevé) a été définie comme le montre le tableau 4.8 et la figure 4.8. Les résultats ont mis en évidence une différence notable entre les cartes de sensibilité à l'érosion produites pour diverses périodes de retour, offrant une meilleure connaissance de la répartition de la sensibilité à l'érosion dans les bassins versants de Boussellam et K'sob. Ces conclusions mettent en évidence la nécessité de recourir à des mesures de lutte contre l'érosion ciblées et efficaces, fondées sur les cartes élaborées.

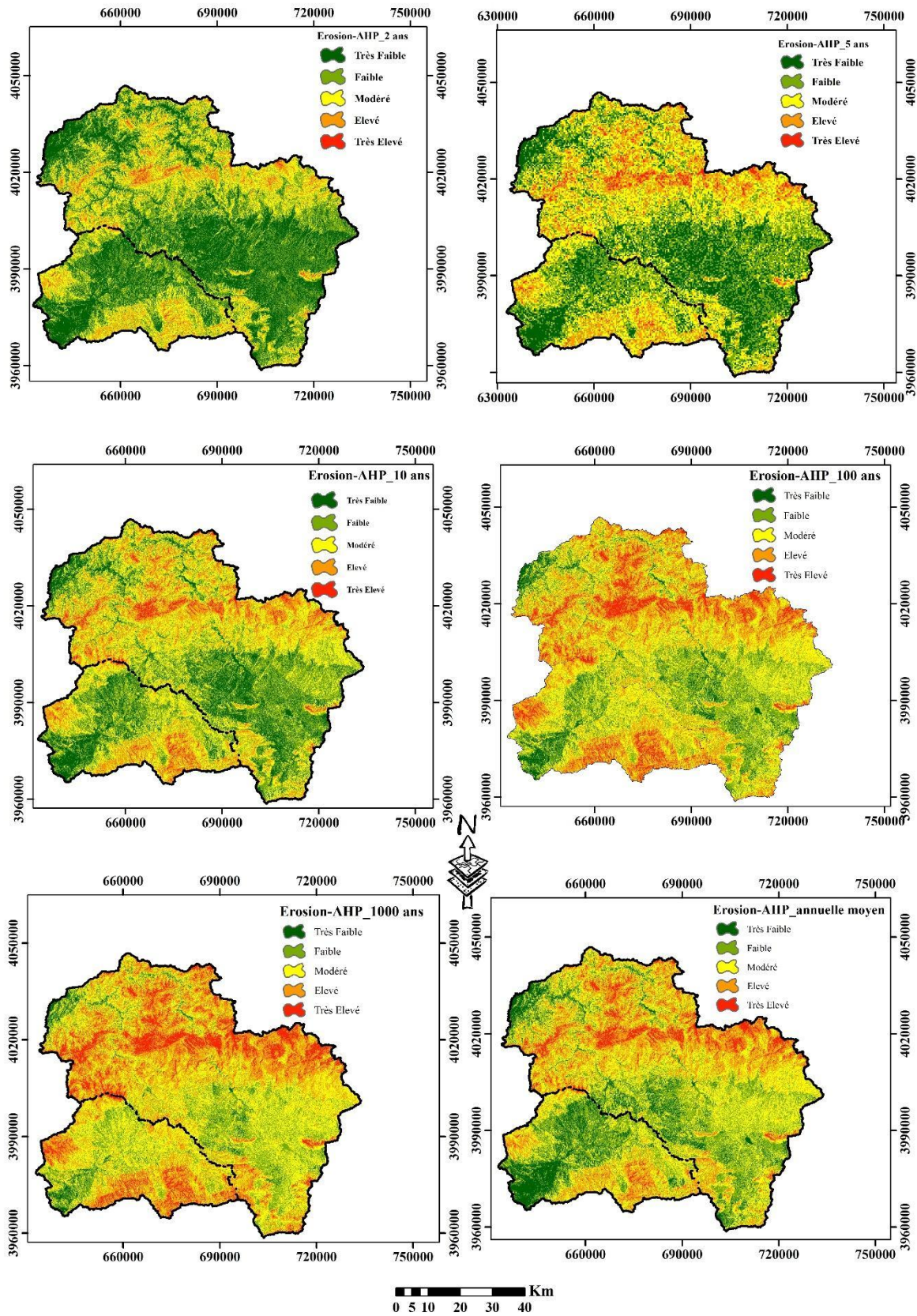


Figure 4.8. Cartes de la distribution spatiale des zones à risque d'érosion du sol aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide du modèle AHP.

D'après les données du tableau 4.8, on observe que les zones moyennement sensibles à l'érosion diminuent progressivement, tandis que les zones très sensibles augmentent au fur et à mesure que la durée de la période de retour s'allonge. En revanche, la superficie des zones peu sensibles et très peu sensibles a diminué, tandis que la superficie des zones moyennement sensibles, très sensibles et très sensibles a augmenté.

Tableau 4.8. Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude en utilisant le modèle AHP pour différentes périodes de retour.

Risque	Très Faible	Faible	Moyen	Élevé	Très Élevé
ans	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)
2	33.08	32.75	25.49	7.90	0.78
5	21.88	29.23	31.64	14.69	2.56
10	15.37	28.01	35.49	17.60	3.53
100	6.13	21.67	38.91	25.36	7.93
1000	2.49	17.32	39.44	29.76	11.00
Pluie Moyenne Annuelle	10.76	24.56	37.49	21.39	5.80

Cette évolution est principalement due à des modifications dans le régime de précipitations, au manque de couverture végétale en certaines régions, à la densité moyenne du système d'évacuation des eaux de pluie et à l'existence de pentes raides. Tous ces éléments participent à augmenter la vulnérabilité des zones considérées comme sensibles et fortement sensibles à l'érosion, même si leur superficie est inférieure à celle des autres catégories de risque.

3.3.2 Analyse Floue des Processus Hiérarchiques (FAHP):

Dans toutes les cartes produites en variant les temps de retour, les simulations basées sur la logique floue montrent un alignement remarquable avec les zones de haute sensibilité à l'érosion, principalement concentrées dans les zones de basse altitude des bassins étudiés, Boussellam et K'sob. Compare au processus hiérarchique analytique (AHP), l'approche de la logique floue fournit des résultats plus précis et plus détaillés. Notamment, des divergences significatives apparaissent, car certaines zones classées comme ayant une sensibilité limitée par l'AHP sont identifiées comme modérément sensibles lorsqu'elles sont évaluées à l'aide de la méthodologie de la logique floue. Cela met en évidence la précision et la granularité accrues du modèle de logique floue, qui permet de saisir les variations subtiles de la sensibilité dans l'ensemble de la région étudiée. Pour les bassins de Boussellam et de K'sob, une carte de sensibilité à l'érosion a été développée en utilisant la technique du modèle de logique floue. Différents seuils de sensibilité à l'érosion ont été identifiés dans l'ensemble du bassin, et il a été

observé que le pourcentage de zones extrêmement sensibles augmente avec des périodes de retour plus longues (2, 5, 10, 100 et 1000 ans), comme le montre le tableau 4.9.

Tableau 4.9. Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude en utilisant le modèle FAHP pour différentes périodes de retour.

Risque ans	Très Faible Pourcentage (%)	Faible Pourcentage (%)	Moyen Pourcentage (%)	Élevé Pourcentage (%)	Très Élevé Pourcentage (%)
2	28.93	31.56	27.31	10.66	1.55
5	18.86	27.76	31.57	17.51	4.31
10	12.99	25.84	35.27	20.17	5.73
100	4.83	19.43	37.43	27.06	11.26
1000	1.91	15.11	37.08	30.98	14.92
Pluie Moyenne Annuelle	8.72	19.57	28.28	31.18	12.25

Pour une période de retour de deux ans, la superficie des zones extrêmement sensibles représentait 1,55% du bassin, tandis qu'elle s'élevait progressivement jusqu'à 14,92% pour une période de retour de 1000 ans, ce qui équivaut à environ un quart de la superficie totale du bassin. En revanche, les zones d'une sensibilité très faible ont subi une diminution significative en termes de périodes de retour, diminuant de 28,93 % pour une période de retour de deux ans à 1,91 % pour une période de retour de 1000 ans. Par ailleurs, les zones modérément sensibles représentaient respectivement 27,31 % et 37,08 % de la superficie totale du bassin au cours des différentes périodes. Ces résultats fournissent des indications précieuses sur la distribution spatiale et l'étendue des zones sensibles à l'érosion (figures 4.10).

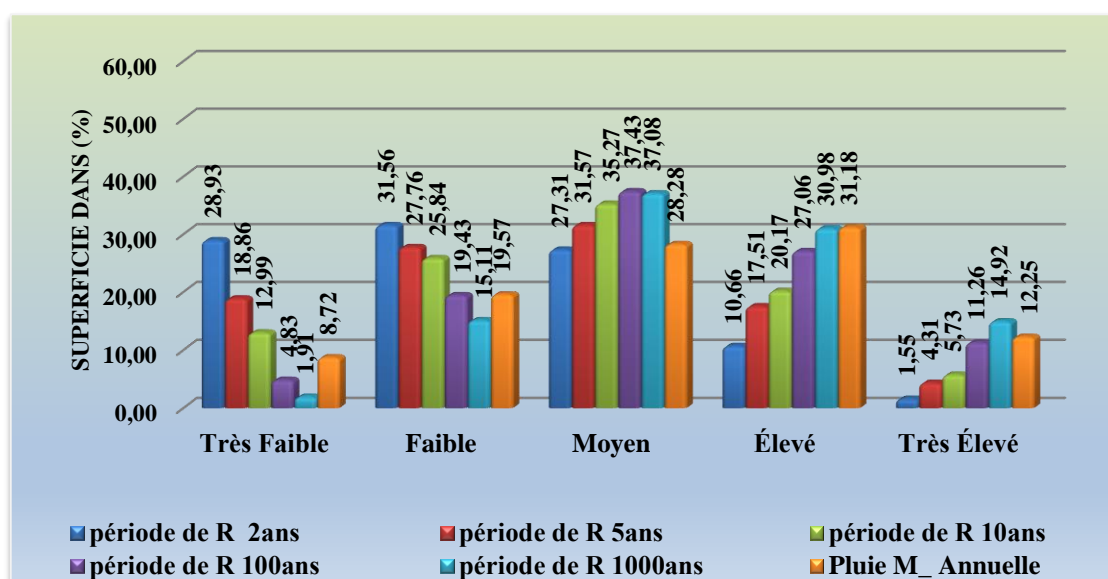


Figure 4.10: Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour diverses cartes de spatiale des zones à risque d'érosion du sol à l'aide du modèle FAHP.

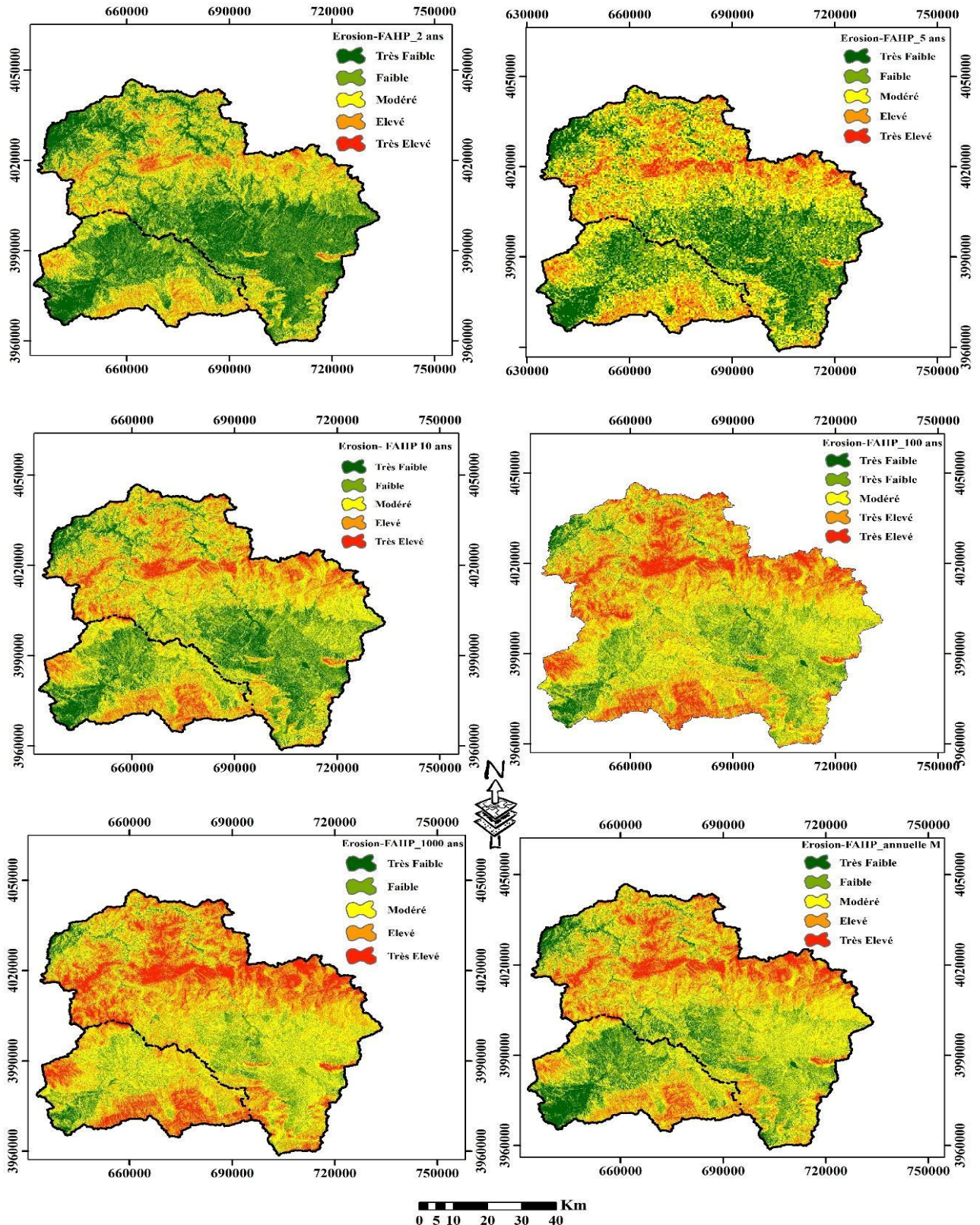


Figure 4.11. Cartes de la distribution spatiale des zones à risque d'érosion du sol aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide du modèle FAHP.

Dans cette étude, les cartes des périodes de retour ont été modifiées pour évaluer l'impact des changements sur la sensibilité à l'érosion dans la zone d'étude. L'analyse de sensibilité a révélé une distinction claire entre les zones d'altitude variable, les zones d'altitude plus élevée présentant une plus grande concentration de zones sujettes à l'érosion. Au fur et à mesure que les intervalles de retour augmentent, la sensibilité de ces zones élevées s'accroît, tandis que les zones de plus faible altitude présentent une diminution de l'érodabilité, indépendamment des ajustements de l'intervalle de retour. Cela suggère que les fortes précipitations jouent un rôle essentiel dans l'augmentation des effets de l'érosion dans les zones de montagne.

Les résultats de l'étude confirment que les zones de hautes terres sont les plus touchées par les modifications des intervalles de retour, ce qui souligne l'influence de la distance par rapport aux rivières et aux cours d'eau dans la réduction du risque d'érosion. Le contraste entre les zones de basse et de haute altitude souligne l'importance d'incorporer des cartes de périodes de retour dans les analyses d'érosion afin de mieux comprendre la distribution spatiale du risque. L'analyse de sensibilité utilisant ces cartes montre l'impact des changements de précipitations sur les zones sujettes à l'érosion, démontrant que les zones de haute altitude sont directement affectées et s'étendent avec l'augmentation des précipitations, alors que les zones de basse altitude montrent une plus grande résistance à l'érosion. Ces informations permettent de mieux comprendre la répartition des risques et d'élaborer des stratégies efficaces de gestion de l'érosion dans les bassins étudiés.

3.3.3 Équation Universelle Révisée des Pertes en terre (RUSLE et EPM):

Les modèles RUSLE et EPM ont été utilisés pour analyser et cartographier la distribution spatiale de l'érosion des sols dans les bassins de Boussellam et de K'sob. Ceci a été réalisé en combinant différentes couches de paramètres pour chaque modèle. La carte résultante, présentée dans la (figure 12a et 12b), illustre la distribution de l'érodabilité du sol dans la zone d'étude. L'analyse a montré que les résultats des deux modèles étaient similaires. L'analyse a montré que les résultats des deux modèles étaient similaires en termes de forme générale, mais qu'ils différaient en termes de pourcentage de zones classées, mais qu'en général, les résultats montraient que les zones à forte sensibilité se trouvaient dans des zones à haute altitude et, inversement, que les zones à faible sensibilité se trouvaient dans des zones à faible pente..

Par ailleurs, les modèles RUSLE et EPM ont estimé un taux moyen d'érosion des sols de 7,05 t/ha/an et 13,75 t/ha/an, respectivement, dans les sous-bassins de Boussellam et de K'sob. Ces résultats sont en étroite concordance avec les valeurs précédemment rapportées, telles qu'un taux d'érosion de 5,38 t/ha/an pour les sédiments en suspension dans l'estuaire du bassin de la

Soummam (Alili et al., 2015) et de 5,7 t/ha/an dans le bassin de l'oued El Ham (Hadna) (Djokpala et al., 2018). Les résultats de cette étude fournissent une base critique pour prioriser les zones nécessitant une intervention, facilitant ainsi des études plus ciblées pour développer des mesures efficaces de contrôle de l'érosion et soutenir la gestion durable de l'environnement naturel.

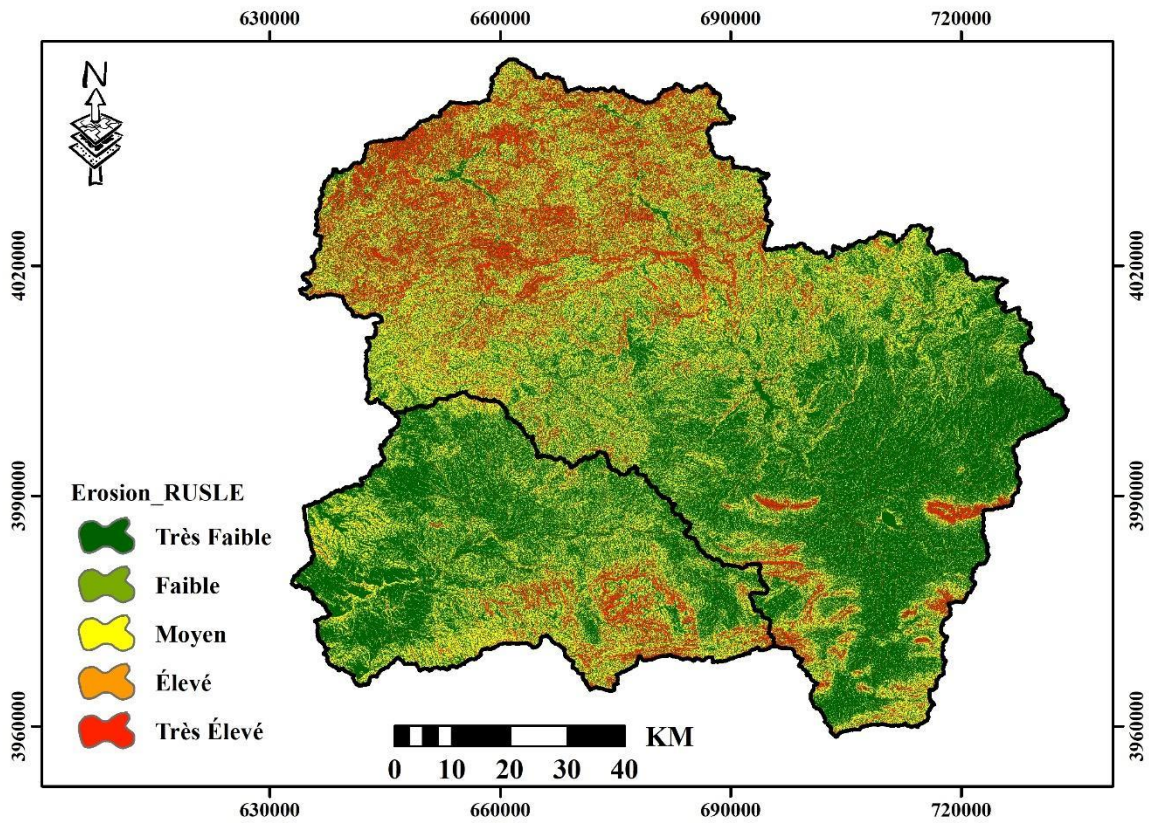


Figure 4.12.a. Cartographie spatiale des zones à risque d'érosion des sols dans les sous-bassins versants à l'aide du modèle RUSLE

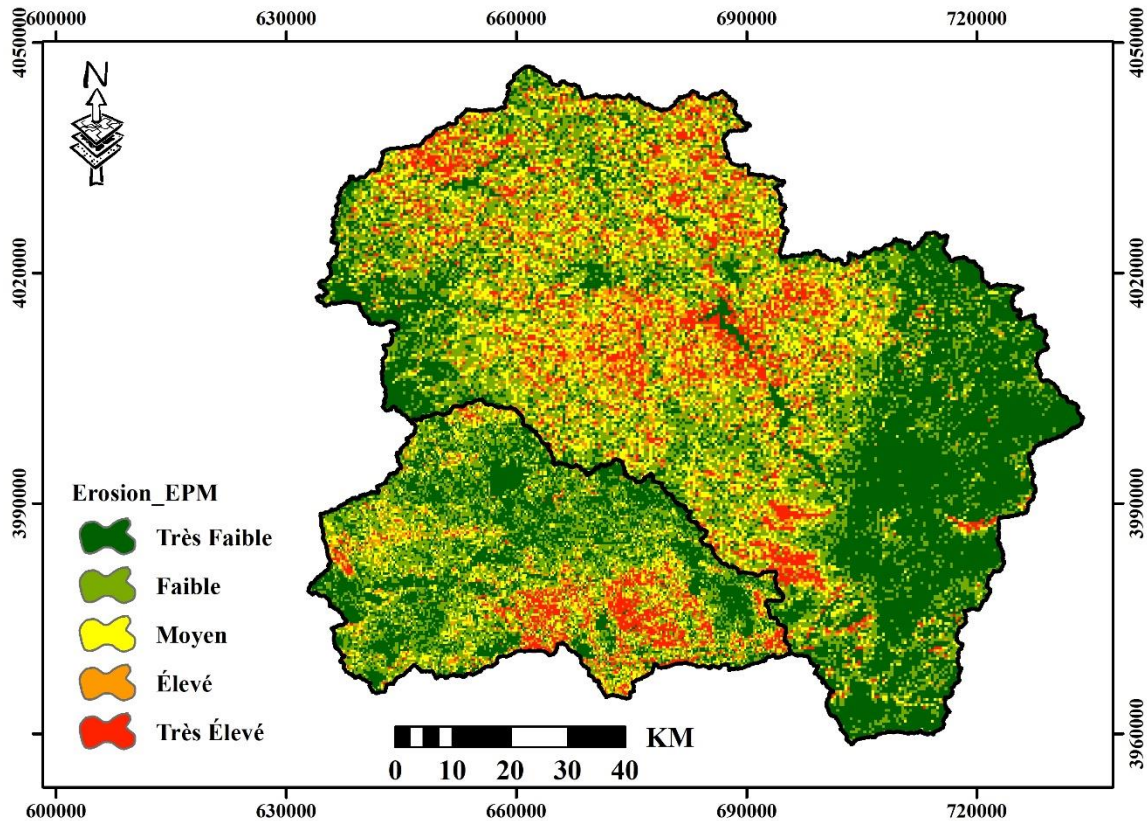


Figure 4.12.b. Cartographie spatiale des zones à risque d'érosion des sols dans les sous-bassins versants à l'aide du modèle EPM

4.4. Validation des résultats

Sur la base des valeurs AUC fournies (0,618 pour le modèle RUSLE, 0,805 pour le modèle AHP et 0,813 pour le modèle FAHP), Ces résultats représentent des cartes de la période de retour de 100 ans), la performance des trois modèles dans la prédiction du risque d'érosion du sol sous l'influence de différentes périodes de retour et de la pluviométrie annuelle moyenne peut être évaluée, comme le montre la Figure 4.13. Les résultats ont montré que le modèle FAHP a atteint la valeur AUC la plus élevée de 0,813, reflétant sa capacité supérieure à distinguer les zones présentant un risque d'érosion élevé et faible. Cela indique que le modèle FAHP offre une plus grande précision prédictive dans la catégorisation des niveaux de risque d'érosion, ce qui en fait un outil efficace pour soutenir les décisions liées à la gestion des terres et à la planification de l'utilisation des ressources naturelles. Bien que le modèle AHP traditionnel ait montré de bonnes performances avec une valeur AUC de 0,805, sa précision était légèrement inférieure à celle du modèle FAHP. Ceci est dû à la nature moins flexible du modèle AHP pour traiter les changements subtils entre les différents facteurs qui affectent l'érosion. Toutefois, la différence entre les performances des deux modèles n'est peut-être pas assez importante pour exclure complètement le modèle AHP traditionnel, car il reste utile en

tant qu'outil d'analyse, en particulier si l'évaluation est étayée par des mesures supplémentaires telles que la précision globale de la prédiction ou d'autres indicateurs de performance.

D'autre part, les modèles RUSLE et EPM ont enregistré la valeur AUC la plus faible de 0,618 et 0,638, respectivement, ce qui indique que leur précision relative dans la prédiction du risque d'érosion du sol était inférieure à celle des deux autres modèles. Cela montre que les modèles RUSLE et EPM, bien que populaires et largement utilisés pour estimer les taux d'érosion moyens à long terme et évaluer les scénarios de gestion des terres, sont confrontés à des défis dans la prédiction détaillée des niveaux de risque d'érosion lorsqu'ils sont appliqués à des variables complexes telles que les fortes précipitations.

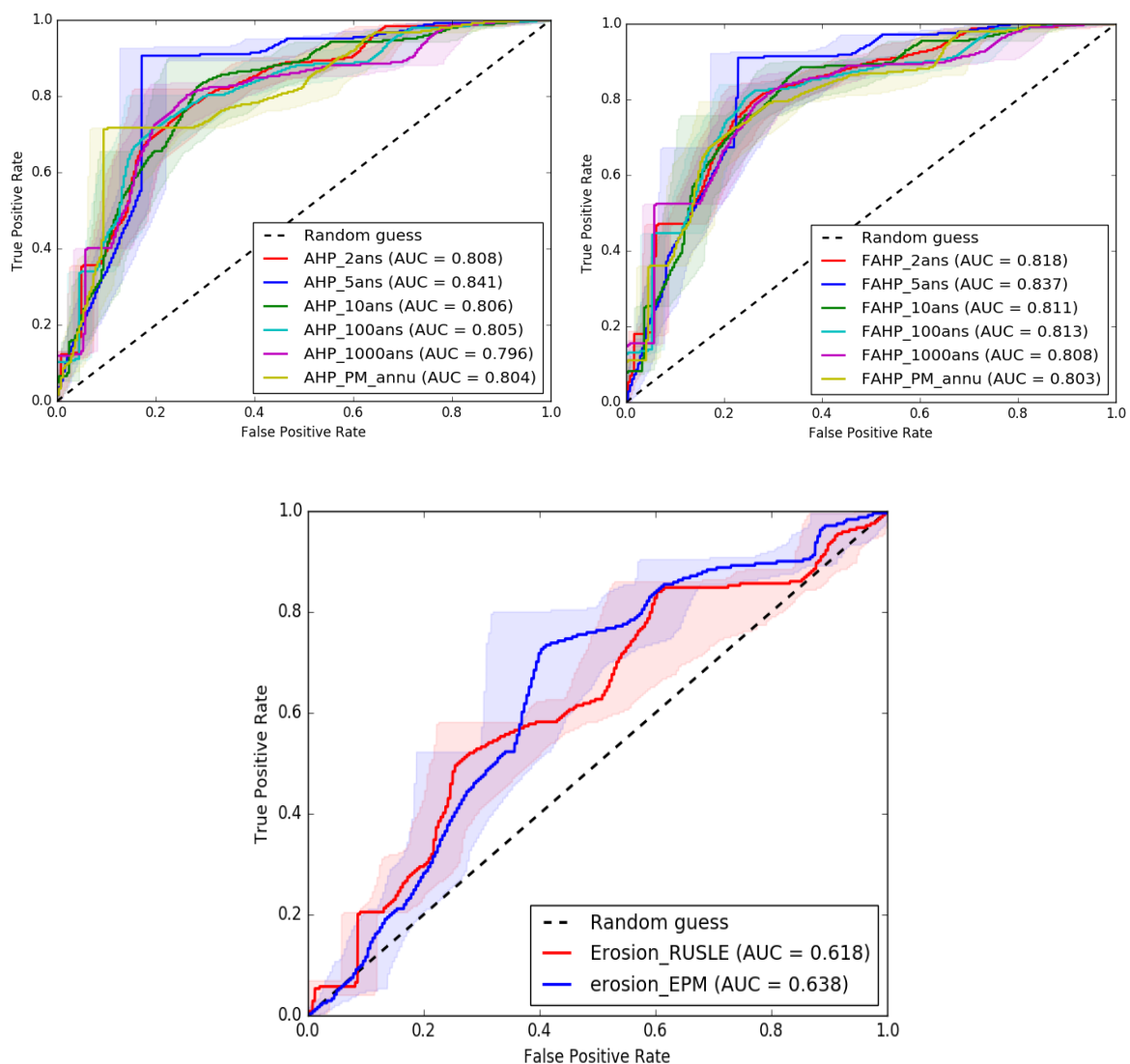


Figure 4.13. Courbe ROC pour chacun des trois modèles de susceptibilité (RUSLE, EPM, AHP et FAHP).

4.5. Conclusion

L'érosion des sols constitue un défi environnemental majeur dans la région d'étude, aggravé par les fortes précipitations, ce qui entraîne la perte de sols fertiles, la dégradation des terres et une hausse des risques d'inondation. Cette étude vise à évaluer la sensibilité des bassins de Boussellam et de K'sob à l'érosion hydrique en utilisant des méthodes avancées, telles que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG). Trois modèles d'évaluation du risque d'érosion ont été appliqués : FAHP, AHP, RUSLE et EPM. Des cartes détaillées de sensibilité à l'érosion ont été élaborées en prenant en compte des facteurs environnementaux et climatiques, tels que la pente, les précipitations, les caractéristiques du sol, l'utilisation des terres et la densité de la végétation. Les zones ont été classées en cinq catégories de vulnérabilité à l'érosion : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée.

Les résultats ont révélé une forte hétérogénéité spatiale de la sensibilité à l'érosion, avec une concentration des zones les plus vulnérables au nord, à l'ouest et au sud de la zone d'étude, notamment dans les secteurs à relief accidenté et à fortes pentes. Les cartes ont également montré l'impact des différentes périodes de retour des précipitations, les zones plus élevées avec des sols fragiles étant plus sensibles à l'érosion lorsque les taux de précipitations sont élevés. La performance des modèles utilisés a été évaluée à l'aide de courbes caractéristiques d'exploitation du récepteur (ROC).

Le modèle basé sur la logique floue (FAHP) s'est révélé le plus performant avec une valeur AUC de 0,806, indiquant une aptitude élevée à distinguer les zones à forte vulnérabilité face à l'érosion hydrique. Le modèle AHP arrive en deuxième position avec une AUC de 0,783. À l'opposé, les méthodes empiriques telles que RUSLE et EPM ont obtenu des scores nettement inférieurs (AUC de 0,618 et 0,638 respectivement). Cette disparité dans les résultats met en lumière l'influence déterminante du choix du modèle sur la qualité de l'évaluation. Grâce à sa capacité à combiner plusieurs facteurs avec une pondération souple, le FAHP apparaît comme un outil d'analyse plus pertinent et mieux adapté pour une modélisation fiable de l'érosion.

L'étude souligne l'importance d'intégrer les techniques de télédétection et de SIG aux modèles analytiques pour comprendre les mécanismes d'érosion et l'impact des facteurs environnementaux. Elle démontre également le rôle des fortes pluies dans l'augmentation du ruissellement et de l'enlèvement du sol, en particulier dans les zones à fortes pentes. Ces résultats contribuent au développement de stratégies efficaces pour gérer les ressources naturelles et minimiser les risques d'érosion, améliorant ainsi la durabilité environnementale et agricole.

Chapitre 5

Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, la méthodologie utilisée est représentée par l'utilisation des approches AHP et FAHP, intégrées dans un cadre SIG, pour analyser la susceptibilité des zones inondables aux fortes précipitations dans les sous-bassins versants de Boussellam et de K'sob, en Algérie.

Évaluer comment plusieurs caractéristiques physiques, y compris la lithologie, la densité de drainage, la distance aux rivières, les précipitations, l'utilisation et la couverture des sols, la pente, la courbure, l'élévation, MNDWI, TWI et le NDVI, affectent la probabilité d'inondations. Créer des cartes des précipitations avec une représentation détaillée des effets des différentes périodes de retour sur les inondations, sur la base des précipitations annuelles moyennes et des périodes de retour de 2, 5, 10, 100 et 1 000 ans. Utiliser les techniques AHP et FAHP pour traiter et évaluer les données recueillies, déterminer le poids relatif des différents éléments, puis inclure ces aspects dans le SIG. Afin d'identifier les zones de danger, les données recueillies sont traitées et évaluées à l'aide des méthodes AHP et FAHP pour déterminer le poids relatif des différents éléments. Ces facteurs sont ensuite intégrés dans l'environnement SIG. Pour garantir la précision des résultats, comparez la carte des précipitations pour la période de retour de 100 ans avec une autre carte basée sur les précipitations annuelles moyennes. Utiliser les courbes ROC pour confirmer la précision des résultats et l'efficacité de la prédiction des zones inondables. Cette phase est cruciale pour l'aide à la décision. Cette méthode offre un moyen pratique de créer des plans de contrôle des inondations à long terme. De nombreuses études ont démontré que les modèles AHP et FAHP sont des méthodes fiables pour l'évaluation des risques, car ils sont transparents et mathématiquement corrects, ce qui facilite la prise de décision. Afin de déterminer les zones les plus exposées aux inondations, les données primaires de cette étude ont été collectées à l'aide de la télédétection et d'autres sources secondaires, traitées et pondérées dans le SIG à l'aide des méthodologies AHP et FAHP.

5.2. Méthodologie :

L'application de ces méthodes nécessite une compréhension globale des processus et des facteurs qui influencent la sensibilité des zones inondables aux précipitations extrêmes. Cela implique une analyse approfondie de l'interaction entre les éléments environnementaux, hydrologiques et géologiques qui contribuent aux inondations. Afin d'assurer une base solide à cette étude, un examen approfondi de la littérature pertinente a été effectué, en s'appuyant sur

des contributions significatives d'études récentes (Hagos, Andualem et al. 2022 ; Topuz et Deniz 2023 ; Mokhtari, Abdelkebir et al. 2024 ; Nguyen, Fukuda et al. 2024).

L'étude a intégré un large éventail de facteurs connus pour influencer les inondations, notamment la courbure, la pente, l'altitude, les précipitations, l'utilisation des terres, la couverture terrestre, la densité de drainage, la proximité des rivières, la lithologie et les indices de télédétection tels que l'indice de différence normalisée de l'eau modifié (MNDWI), l'indice d'humidité topographique (TWI) et l'indice de différence normalisée de la végétation (NDVI). Ces variables ont été soigneusement sélectionnées pour leur pertinence à saisir la nature multidimensionnelle des risques d'inondation et leur utilité dans l'analyse spatiale.

Pour faciliter l'analyse, les couches thématiques requises ont été méticuleusement développées à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3. Les ensembles de données spatiales proviennent de divers fournisseurs et référentiels fiables, garantissant une couverture géographique complète et la précision des données (comme détaillé dans le tableau 1). Ces couches ont été intégrées dans un système d'information géographique (SIG), permettant une modélisation et une visualisation efficaces de la vulnérabilité aux inondations. Une telle approche systématique améliore non seulement la précision des évaluations des risques d'inondation, mais fournit également des informations précieuses aux décideurs et aux planificateurs pour atténuer les impacts des précipitations extrêmes dans les régions vulnérables.

Les données utilisées dans cette analyse ont été recueillies auprès de plusieurs sources fiables afin de garantir leur exactitude et leur pertinence par rapport aux objectifs de l'étude. Ces sources sont les suivantes

Données pluviométriques : Les relevés de précipitations ont été obtenus auprès des stations météorologiques locales gérées par l'Agence nationale des ressources en eau (ANRH) pour la période 1973-2013. Ces données à long terme fournissent une base solide pour évaluer les tendances des précipitations et leur impact sur la vulnérabilité aux inondations.

Données topographiques : Les informations concernant l'altitude et le relief ont été extraites des données de télédétection accessibles dans la base de données USGS Earth Explorer et le téléchargeur de séries temporelles d'usage/occupation du sol Sentinel-2 10m. Ces ressources fournissent des informations spatiales à haute résolution et actuelles, indispensables pour une modélisation exacte du paysage.

Données géologiques : Les couches géologiques proviennent de la base de données mondiale World Geologic Maps. Cette base de données offre une couverture étendue des régions géologiques du monde entier, garantissant la cohérence et l'adéquation des applications géospatiales. Les données géologiques locales provenant d'instituts nationaux ont été délibérément exclues en raison de leur dépendance à l'égard de cartes périmées présentant des lacunes susceptibles de compromettre la précision des résultats. En revanche, l'ensemble des données mondiales offre des informations plus récentes et plus complètes, ce qui réduit les incertitudes de l'analyse.

5.2.1 Hypothèses et limites :

Les données géologiques utilisées, issues des bases de données mondiales, ont été considérées comme une approximation raisonnable des conditions géologiques des sous-bassins étudiés, en l'absence de données locales plus détaillées, et que les influences climatiques historiques restent constantes au cours de la période d'étude, malgré le potentiel de changement climatique futur. Bien que ces hypothèses simplifient l'analyse, elles introduisent certaines limites. Par exemple, les données globales peuvent ne pas tenir compte des variations locales, telles que des changements subtils dans le type de sol ou les schémas d'utilisation des sols. Toute imprécision dans les données relatives à des régions spécifiques pourrait conduire à une identification erronée des zones sujettes aux inondations.

5.2.2 Traitement des données :

Tous les jeux de données ont été normalisés et projetés dans le système de coordonnées WGS 84 UTM Zone 31N afin de garantir l'alignement spatial au cours de l'analyse. On a procédé à un rééchantillonnage en se servant de la technique du voisin le plus proche afin de préserver l'intégrité des données catégoriques, comme l'usage des terrains et les strates géologiques.. Malgré les limitations inhérentes, les données utilisées dans cette étude sont très fiables pour les analyses à l'échelle régionale, fournissant une base solide pour l'évaluation des risques d'inondation et soutenant une prise de décision éclairée pour la planification de l'atténuation des inondations.

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

Tableau 5.1. Sources d'information et méthodologies employées pour générer des couches de données thématiques.

Type de données	Source des données	Description
Élévation, Aspect, Curvature, Pente, TWI, distance de la rivière	Explorateur de la Terre de l'USGS	Modèle Numérique d'Élévation Global ASTER
Land Use/Land Cover (LU LC)	Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Timeseries Downloader (Mature Support) https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2	Dérivé des images Sentinel-2 en utilisant la classification supervisée d'ArcGIS.
Indice Différentiel Normalisé de l'Eau (NDWI), Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI)	Explorateur de la Terre de l'USGS	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$ $NDWI = \frac{Grren - NIR}{Grren + NIR}$
Lithologie	Cartes géologiques mondiales https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-maps/	
Précipitations	Agence nationale des ressources en eau (ANRH) Pour la période 1973-2013	Utilisation des outils d'interpolation d'ArcGIS, extraits des données pluviométriques
Densité de drainage	Cours d'eau extrait du MNT	Calculé à l'aide d'ArcGIS à partir de la superficie du bassin versant et de la longueur du cours d'eau.

5.3. Facteurs déclencheurs des inondations

Précipitations (R) : Les données pluviométriques, comprenant les moyennes annuelles et les valeurs maximales journalières, ont été recueillies auprès de 24 stations situées à l'intérieur ou à proximité des bassins versants de l'oued Boussellam et de l'oued K'sob, pour la période allant de 1972 à 2013. Ces données ont été analysées à l'aide du logiciel Hydrolab, afin de réaliser une analyse de fréquence journalière basée sur la distribution de Gumbel des valeurs extrêmes. Cette méthode a permis d'estimer les précipitations maximales associées à différentes périodes de retour, à savoir 2, 5, 10, 100 et 1000 ans. Les valeurs obtenues ont ensuite été utilisées pour produire des cartes pluviométriques illustrant la distribution spatiale des précipitations. À cet effet, le logiciel ArcGIS a été utilisé en appliquant la méthode de Kriging, une technique d'interpolation géographique permettant d'estimer les valeurs spatiales en fonction des données disponibles aux stations de mesure. Cette méthode génère une surface continue des précipitations, offrant une représentation précise et détaillée de leur distribution dans la zone étudiée.

Des cartes spécifiques ont été produites pour chaque période de retour mentionnée, ainsi qu'une carte des précipitations moyennes annuelles. Ces cartes constituent un outil essentiel pour l'identification et l'analyse des zones les plus exposées aux fortes précipitations et aux

risques d'inondation. La **figure (4.1)** présente les cartes résultant de ces analyses, incluant la carte des précipitations moyennes annuelles et celles des précipitations maximales pour différentes périodes de retour.

$$X_p(T) = G_d \cdot U + P_0 \dots\dots\dots (5.01)$$

Avec :

$X_p(T)$: est le quantile de la période de retour T

P_0 : Paramètre de position en (mm)

G_d : Gradex (pente de la ligne d'ajustement)

La carte obtenue est exactement la même que celle du chapitre 4, intitulée (4.1)

Élévation (EL) :

Les données du modèle numérique d'élévation (MNE), avec une résolution spatiale de 30 mètres, ont été extraites de la plateforme **USGS Earth Explorer**. Ces données ont été traitées à l'aide du logiciel **ArcGIS 10.3**, en effectuant un prétraitement rigoureux et en extrayant les caractéristiques pertinentes pour assurer une précision optimale. Une carte de relief a été conçue suite à une étude minutieuse des variations d'altitude dans la zone d'analyse, un élément essentiel pour juger la vulnérabilité aux inondations. L'altitude influence significativement la gestion des risques d'inondation, étant donné que les régions de faible altitude sont souvent plus susceptibles d'être touchées par ces événements. Les données d'élévation, dérivées du modèle SRTM, ont été classifiées en catégories distinctes et intégrées dans l'analyse de superposition en tant que variable principale. Cette classification a permis une représentation claire des différentes zones altitudinales et de leur contribution respective à la susceptibilité aux inondations.

L'altitude de la zone d'étude varie entre 164 et 1868 mètres au-dessus du niveau de la mer. Comme le montre la **figure (5.2a)**, les zones de faible altitude, principalement localisées dans les parties nord-ouest et sud-ouest, sont les plus vulnérables aux inondations. En revanche, les zones de haute altitude situées à l'est (notamment dans les parties nord-est et sud-est) sont considérées comme peu ou très peu exposées à ce risque. Pour affiner l'analyse, la carte d'élévation a été reclassifiée en cinq catégories : (164-630 m), (630-865 m), (865-1045 m), (1045-1270 m) et (1270-1868 m). Parmi ces catégories, environ 5,80 % de la zone d'étude (soit 334,97 km²) présentent une susceptibilité très élevée, tandis que 10,11 % (584,28 km²) montrent une susceptibilité élevée. Les zones avec une susceptibilité moyenne, faible, et très faible

couvrent respectivement 45,06 % (2604,98 km²), 27,41 % (1584,51 km²) et 11,63 % (672,10 km²) de la région. La carte finale, présentée dans la **figure (5.2a)**, illustre la distribution spatiale des niveaux d'altitude. Elle constitue une base essentielle pour des analyses spatiales plus approfondies et pour évaluer les risques liés à la susceptibilité aux inondations.

Pente (P) :

La pente joue un rôle déterminant dans la régulation de la vitesse d'écoulement de l'eau, son infiltration dans le sol, ainsi que l'intensité du ruissellement. Elle influence directement la dynamique globale de l'écoulement hydrique. Une pente abrupte accélère le flux des eaux de surface, tandis qu'une pente faible favorise l'accumulation d'eau, augmentant ainsi le risque d'inondation et d'érosion des sols (Das et Gupta 2021, Zzaman, Nowreen et al. 2021, Negese, Worku et al. 2022, Borah, Longkumer et al. 2023). Par conséquent, les zones caractérisées par des pentes faibles ou modérées sont souvent plus vulnérables aux inondations, contrairement aux zones de forte pente qui résistent mieux à l'accumulation d'eau en raison de leurs inclinaisons marquées (Wang, Lai et al. 2015). Sur la base des recherches antérieures (Yariyan, Avand et al. 2020, Negese, Worku et al. 2022, Borah, Longkumer et al. 2023), la sensibilité des pentes face aux inondations est catégorisée en cinq classes : très élevée, élevée, moyenne, faible et très faible. En utilisant le logiciel **ArcGIS 10.3**, une carte détaillée des pentes de la zone d'étude a été générée à partir du modèle numérique d'élévation (MNE) avec une résolution spatiale de 30 mètres. Cette analyse a permis de révéler une corrélation directe entre la topographie et la susceptibilité aux inondations les pentes raides favorisent le ruissellement rapide des précipitations, tandis que les zones plus plates ou de faible pente augmentent significativement les risques d'inondation par saturation du sol et accumulation d'eau.

D'après la carte reclassée des pentes, il a été observé qu'environ 42,57 % de la zone d'étude (2 460,89 km²) présentent une pente allant de 0 à 5 degrés, les rendant très sensibles aux inondations. De plus, 21,76 % (1258,12 km²) se trouvent dans la catégorie des pentes de 5 à 10 degrés, avec une sensibilité élevée, et 24,71 % (1428,19 km²) affichent une sensibilité moyenne (10-20 degrés). Par ailleurs, les zones de faible sensibilité (20-30 degrés) représentent environ 5,94 % (343,15 km²), tandis que les zones de très faible sensibilité (30-73 degrés) couvrent environ 5,03 % (290,49 km²). La carte finale des pentes, illustrée à la **figure (5.2b)**, met en évidence la répartition spatiale des sensibilités aux inondations en fonction de la pente, fournissant un outil clé pour évaluer les risques hydrologiques et comprendre l'impact des caractéristiques topographiques sur la probabilité d'inondation.

Densité de drainage (DD) :

La carte de la densité de drainage constitue un outil essentiel pour évaluer la vulnérabilité des zones aux inondations. Elle est calculée en divisant la longueur cumulée de tous les cours d'eau dans un bassin versant par la superficie totale de ce dernier (Elkhrachy 2015). Dans ce travail, la carte de la densité du drainage a été réalisée en utilisant les outils d'analyse de densité proposés par ArcGIS 10.3, où le réseau de drainage a été transformé en valeurs mesurables grâce à l'extension « densité de ligne ». La densité de drainage affecte de manière significative la dynamique des eaux de surface ; une densité élevée indique une augmentation des flux d'eau de surface et un potentiel d'inondation accru, tandis qu'une faible densité reflète une susceptibilité réduite aux inondations (Dinesh Kumar, Gopinath et al. 2007). Par conséquent, un réseau de drainage dense est un facteur clé dans l'accroissement des flux d'eau de surface, ce qui augmente le risque d'inondation (Mahmoud et Gan 2018) . Dans la zone examinée, on a classifié la densité de drainage en cinq catégories basées sur son influence sur la vulnérabilité aux inondations:

- Les zones dont la densité de drainage est comprise entre 0,75 et 1, ainsi que celles supérieures à 1, sont classées comme ayant une sensibilité très élevée et élevée aux inondations, respectivement.
- Les zones avec une densité de drainage inférieure à 0,25 sont considérées comme ayant une sensibilité très faible.
- Les zones ayant une densité de drainage comprise entre 0,25 et 0,5 ainsi qu'entre 0,5 et 0,75 présentent respectivement une sensibilité faible et moyenne aux inondations.

La carte finale des densités de drainage, présentée à la **figure (5.2c)**, illustre la distribution des densités dans la zone d'étude, mettant en évidence les zones les plus sensibles aux inondations sur la base de la répartition du réseau de drainage. Après reclassification, le bleu clair représente les zones à très forte intensité de drainage, le vert indique une intensité de drainage modérée, et l'orange et le marron représentent les zones à faible et très faible intensité de drainage.

Distance à la rivière (Distance from River) :

La distance par rapport à la rivière joue un rôle essentiel dans la détermination de l'étendue des zones inondables, car la gravité et la prévalence des inondations sont grandement influencées par ce facteur (Khosravi, Pham et al. 2018). Dans un bassin versant, les zones plus éloignées du lit de la rivière sont moins exposées au risque d'inondation que les zones plus proches du lit. En effet, les zones proches des rivières, en particulier lorsque la capacité de

stockage de la rivière est faible, sont plus susceptibles d'être inondées (Askar, Zeraat Peyma et al. 2022, Borah, Longkumer et al. 2023). Les réseaux de cours d'eau ont été identifiés à l'aide du logiciel ArcMap, où tous les cours d'eau de la zone d'étude ont été considérés comme faisant partie du système de drainage naturel. Une carte de la distance par rapport à la rivière a été produite à l'aide de l'outil Distance euclidienne de la boîte à outils ArcGIS.

En reclassant la carte de la distance à la rivière, les résultats ont montré qu'environ 6.53 % des zones tombent dans la catégorie des très faibles probabilités d'inondation, 14.72 % dans la catégorie des faibles probabilités, 21.39 % dans la catégorie des moyennes, 36.68 % dans la catégorie des fortes probabilités, tandis que 20.68 % des zones tombent dans la catégorie des très fortes probabilités d'inondation. La carte finale de la distance par rapport à la rivière **figure (5.2d)** montre la distribution spatiale de ces catégories et la manière dont elles sont liées au risque d'inondation.

Occupation et utilisation du sol (LULC) :

Les classifications et catégories d'utilisation et d'occupation des sols (LULC) influencent de manière significative divers processus hydrologiques, tels que la production de ruissellement, l'évapotranspiration, la transpiration et l'infiltration. Dans cette étude, la zone de recherche a été subdivisée en cinq principales catégories d'utilisation et d'occupation des sols : les masses d'eau, la végétation, les prairies, les terres agricoles et les zones bâties (**figure 5.2e**). Selon la carte de reclassification du LULC, la végétation occupe environ 4.82 % de la superficie de la zone, suivie par les prairies (23.69 %), les terres agricoles (62.78 %), les zones bâties (8.56 %) et les masses d'eau (0.15 %). Les résultats révèlent que les zones dominées par la végétation présentent un risque d'inondation très faible, tandis que les zones bâties sont classées comme ayant un risque modéré. En revanche, les terres agricoles et les plans d'eau sont caractérisés par une sensibilité élevée à très élevée aux inondations.

Les inondations sont particulièrement fréquentes dans les zones résidentielles situées à proximité des berges des rivières, notamment dans la région de Bordj Bou Arreridj, qui constitue l'une des wilayas de la zone d'étude. Ces régions, ayant récemment connu des épisodes d'inondation, subissent des impacts amplifiés en raison de la forte densité de population locale.

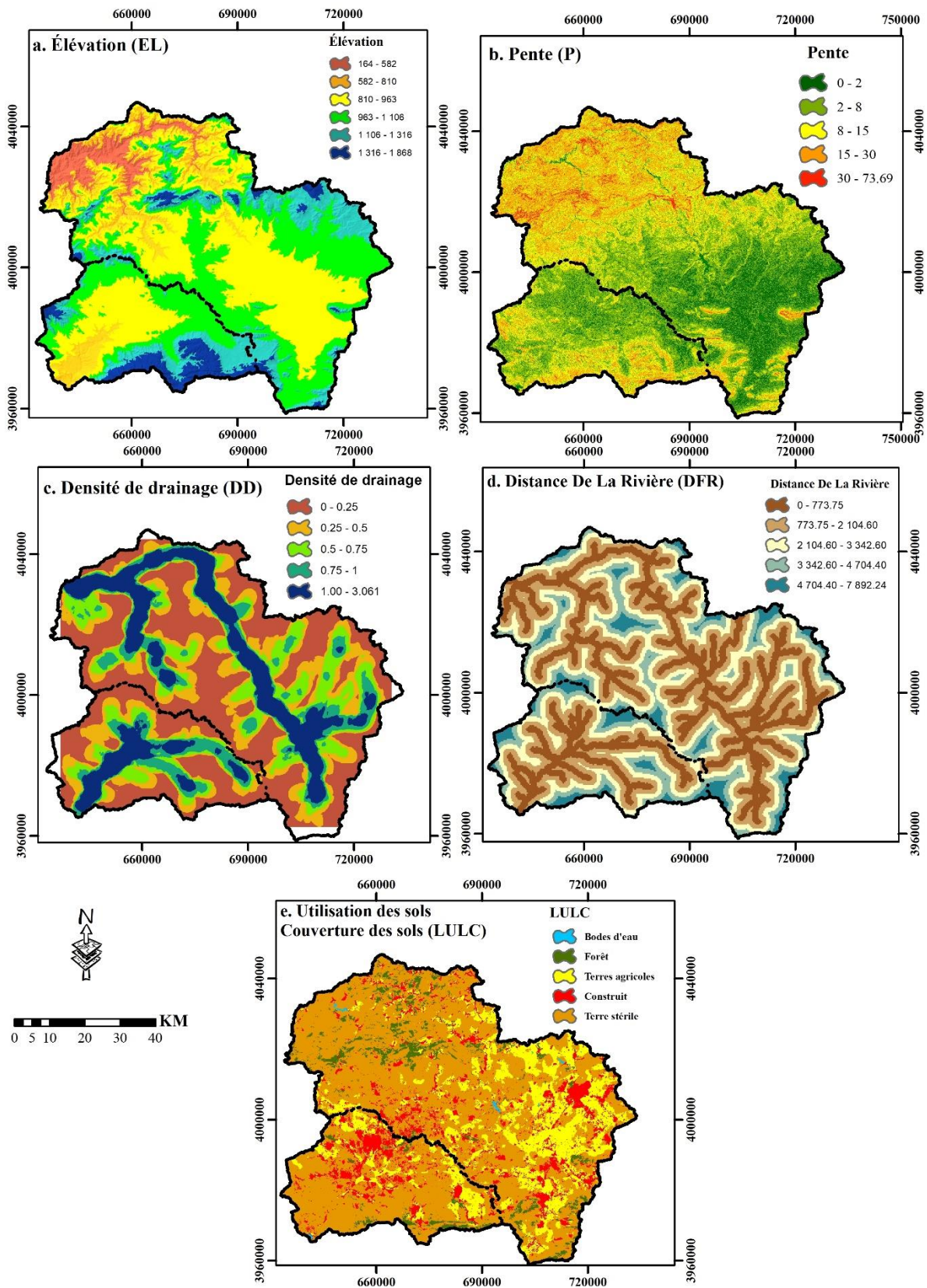


Figure 5.2. Cartes des différents éléments qui influencent la sensibilité des zones inondables : (a) Élévation, (b) Pente, (c) Densité de drainage (d) Distance à la rivière, (e) LULC.

Indice topographique d'humidité (TWI) :

L'indice d'humidité topographique (TWI) est l'un des facteurs les plus couramment utilisés dans les études sur les risques d'inondation, en raison de son rôle important dans l'augmentation du ruissellement des eaux de surface et dans l'identification des zones sujettes à l'engorgement, ainsi que de celles qui ont le potentiel de produire des écoulements de surface (Hong, Panahi et al. 2018) . Le TWI est inversement et directement lié au risque d'inondation ; la probabilité qu'une zone soit inondée augmente avec les valeurs élevées du TWI (Das et Gupta 2021) . Le TWI est généralement calculé à l'aide d'informations sur la pente et l'accumulation de débit, selon l'équation (5.02) :

$$TWI = Ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) \dots\dots\dots (5.02)$$

a représente l'accumulation du débit, qui reflète la capacité à diriger l'eau d'un point spécifique vers un point de décharge majeur. β représente la pente de chaque cellule du modèle, qui est calculée à l'aide des données du modèle numérique d'élévation (MNE). Dans cette étude, les valeurs de TWI ont été calculées à l'aide de la carte du modèle numérique d'élévation extraite des données du SRTM DEM pour la zone d'étude. L'indice TWI a été classé en cinq catégories, les zones présentant des valeurs supérieures à 13 étant considérées comme présentant un risque d'inondation très élevé, tandis que les valeurs comprises entre 10 et 13 étaient associées à un risque d'inondation élevé. Les autres valeurs ont été classées comme suit : 7.5 à 10 avec un risque d'inondation moyen, 6 à 7.5 avec un risque faible, et moins de 6 avec un risque très faible. La carte de la (figure 5.2f) montre la distribution de ces catégories et valeurs dans la zone d'étude, en mettant en évidence les zones les plus exposées au risque d'inondation sur la base de l'analyse TWI.

Lithologie (Li) :

La lithologie a un rôle crucial dans l'impact du risque d'inondation en contrôlant l'infiltration et le flux de l'eau de la surface terrestre vers le sous-sol. Lors de l'analyse de la vulnérabilité aux inondations, il est crucial de considérer les éléments lithologiques tels que les variétés de roches, les pentes, les ressources naturelles, les sédiments et les dépôts alluviaux. Dans cette étude, la carte lithologique a été obtenue en découpant l'ensemble des données lithologiques mondiales disponibles sur la plateforme de l'U.S. Geological Survey (<https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-maps/>) et traitée pour s'adapter à la zone

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

d'étude (**figure 5.2g**). La carte lithologique finale a été classée en cinq catégories en fonction de leur susceptibilité aux inondations :

Très Faible (Jurassique) ,Faible (Crétacé) , Modéré (Mésozoïque) , Élevé (Quaternaire) ,Très élevée (Tertiaire).

Cette classification souligne les divers niveaux de vulnérabilité aux inondations selon les propriétés lithologiques, fournissant des orientations importantes pour la gestion des risques d'inondation et les tactiques d'atténuation dans le secteur étudié.

Courbure (Cu) :

La courbure est un paramètre essentiel dans la modélisation et la prévision des inondations, car elle indique les variations de la courbure de la pente dans une direction donnée. Les valeurs de courbure positives représentent des pentes convexes vers le haut, tandis que les valeurs négatives signifient une concavité vers le bas ou l'absence de courbure (Moazzam, Lee et al. 2020, Ullah et Zhang 2020, Lee et Kim 2021) . Dans cette étude, la carte de courbure de la zone a été générée à l'aide d'ArcGIS 10.3, directement à partir d'un modèle numérique d'élévation (MNE) avec une résolution de grille de 30 mètres (**figure 5.2h**). La carte de courbure finale a été classée en cinq catégories sur la base des niveaux de susceptibilité aux inondations : les zones dont les valeurs de courbure sont supérieures à 1,25 ont été classées dans la catégorie « susceptibilité très élevée », les valeurs comprises entre 0,15 et 1,25 dans la catégorie « susceptibilité élevée », celles comprises entre -0,52 et 0,15 dans la catégorie « susceptibilité modérée », celles entre -1,62 et -0,52 dans la catégorie « susceptibilité faible » et celles inférieures à -1,62 dans la catégorie « susceptibilité très faible ». Cette classification met en évidence le rôle de la courbure des pentes dans l'écoulement et l'accumulation de l'eau, les pentes plus raides ou convexes vers le haut étant plus susceptibles de contribuer au risque d'inondation.

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) :

Bien que le NDVI ne contribue pas directement aux inondations, il constitue un facteur clé dans l'interception des eaux de pluie et la réduction du ruissellement. Des valeurs élevées du NDVI sont associées à une végétation dense et saine, tandis que des valeurs faibles traduisent souvent une déforestation ou une dégradation du couvert végétal. Selon l'étude de (Nguyen, Fukuda et al. 2024), les zones présentant de faibles valeurs de NDVI sont davantage exposées aux risques d'inondation par rapport à celles ayant des valeurs élevées. Dans le cadre de cette

étude, le NDVI a été calculé à partir des données du satellite Landsat 8, en utilisant l'équation (5.03) :

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \dots\dots\dots (5.03)$$

Où Bn5 et Bn4 représentent respectivement la bande proche infrarouge et rouge. Les résultats ont révélé que les zones de la région d'étude avec un NDVI inférieur à 0,1 sont les plus vulnérables aux inondations. Par ailleurs, il a été observé que la majorité des zones urbaines de la région présentent des valeurs de NDVI faibles, avec un nombre limité de zones où le NDVI est inférieur à 0,16, indiquant un niveau très élevé de vulnérabilité aux inondations. En outre, les zones avec des valeurs de NDVI comprises entre 0,2 et 0,25 ont été classées comme modérément vulnérables aux inondations. Les zones avec des valeurs de NDVI comprises entre 0,25 et 0,3 correspondent à une faible vulnérabilité, tandis que celles dont les valeurs dépassent 0,3 affichent une vulnérabilité très faible. La **(figure 5.2j)** illustre la carte NDVI calculée pour la zone d'étude, soulignant la relation entre la densité du couvert végétal et les niveaux de susceptibilité aux inondations.

Indice de différence d'eau normalisé modifié (MNDWI) :

L'indice hydrique normalisé modifié (MNDWI) est un outil largement utilisé pour quantifier et identifier la présence de masses d'eau ou la teneur en eau de la végétation. Pour cette étude, le MNDWI a été calculé à l'aide de l'outil de calcul raster de l'application ArcMap, en utilisant les bandes vertes et NIR (Near-Infrared) des données du satellite Landsat 8 ([Mokhtari, Abdelkebir et al. 2024](#)). La carte obtenue **(figure 5.2k)** a été reclassée en cinq catégories en fonction de leur contribution à la susceptibilité aux inondations : très élevée, élevée, modérée, faible et très faible. Les zones présentant des valeurs de MNDWI plus élevées étaient associées à un risque d'inondation accru, tandis que les zones présentant des valeurs plus faibles indiquaient une probabilité d'inondation réduite.

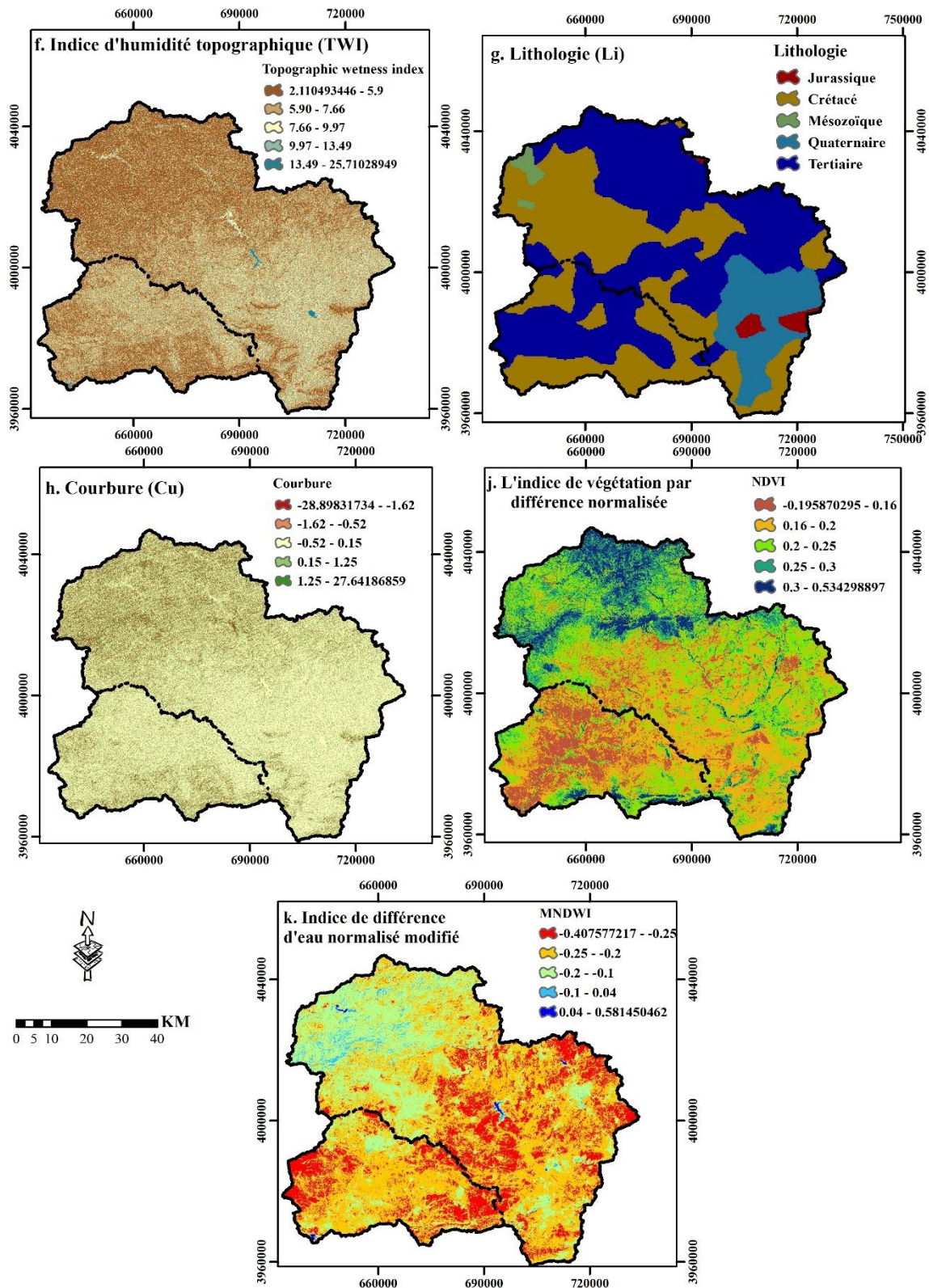


Figure 5.2. Cartes des différents éléments qui influencent la sensibilité des zones inondables : (f) Indice d'humidité topographique (TWI), (g) Lithologie, (h) Courbure (Cu), (j) Indice de

végétation par différence normalisée, (NDVI) et (k) Indice d'eau par différence normalisée modifié.

L'approche mise en œuvre dans cette recherche s'est focalisée sur l'élaboration de cartes de sensibilité aux inondations pour repérer les régions les plus vulnérables aux inondations dans la zone d'investigation, en se servant des divers intervalles de retour des précipitations intenses comme élément déterminant. L'évaluation spatiale de ces cartes a été réalisée en utilisant les méthodes AHP (Processus Analytique par Hiérarchie) et FAHP (Processus Fuzzy Analytique par Hiérarchie), dans le cadre d'un environnement de Système d'Information Géographique (SIG). L'étude était basée sur l'intégration d'une série de facteurs environnementaux et géomorphologiques qui influencent l'occurrence des inondations, y compris : La courbure, la pente, l'élévation, la pluviométrie, l'utilisation et la couverture des sols (LULC), la densité de drainage, la distance à la rivière, la lithologie, l'indice hydrique modifié (MNDWI), l'indice d'humidité topographique (TWI) et l'indice de végétation naturelle (NDVI). L'objectif premier de l'analyse décisionnelle multicritère (MCDA) basée sur le SIG était d'identifier les zones présentant une sensibilité différente aux inondations, qui ont été classées en cinq catégories : Sensibilité très élevée, élevée, élevée, moyenne, faible et très faible.

Le cadre méthodologique de l'étude comprenait quatre phases principales, comme le montre la figure (5.3) :

- **Analyse documentaire, collecte des données et prétraitement** : Cette phase comprenait l'examen des sources scientifiques pertinentes, la collecte de données spatiales et temporelles relatives à la zone d'étude et le prétraitement des données à l'aide de techniques SIG. Elle comprenait également des enquêtes sur le terrain afin d'identifier les points d'inondation historiques et de créer une carte d'inventaire des inondations historiques.
- **Sélection et évaluation des facteurs sensibles** : Les facteurs affectant la sensibilité aux inondations ont été sélectionnés sur la base d'études antérieures et d'expériences sur le terrain. Ces facteurs ont été évalués et classés en fonction de leur importance, et le poids relatif de chaque facteur a été déterminé à l'aide du processus de hiérarchie analytique (AHP) afin de garantir l'objectivité et la précision de l'évaluation.
- **Analyse de superposition et création d'une carte de susceptibilité aux inondations** : L'environnement SIG a été utilisé pour effectuer une analyse de superposition, qui a permis d'élaborer la carte de susceptibilité aux inondations. Cette étape consiste à

combiner les facteurs classés en fonction de leur importance pour déterminer les zones les plus sensibles aux inondations.

- **Évaluation et validation des cartes obtenues** : La performance de la carte de vulnérabilité aux inondations a été évaluée à travers l'utilisation de la courbe caractéristique d'exploitation du récepteur (courbe ROC), afin de mesurer l'exactitude et la fiabilité du modèle dans la détection des régions susceptibles aux inondations..

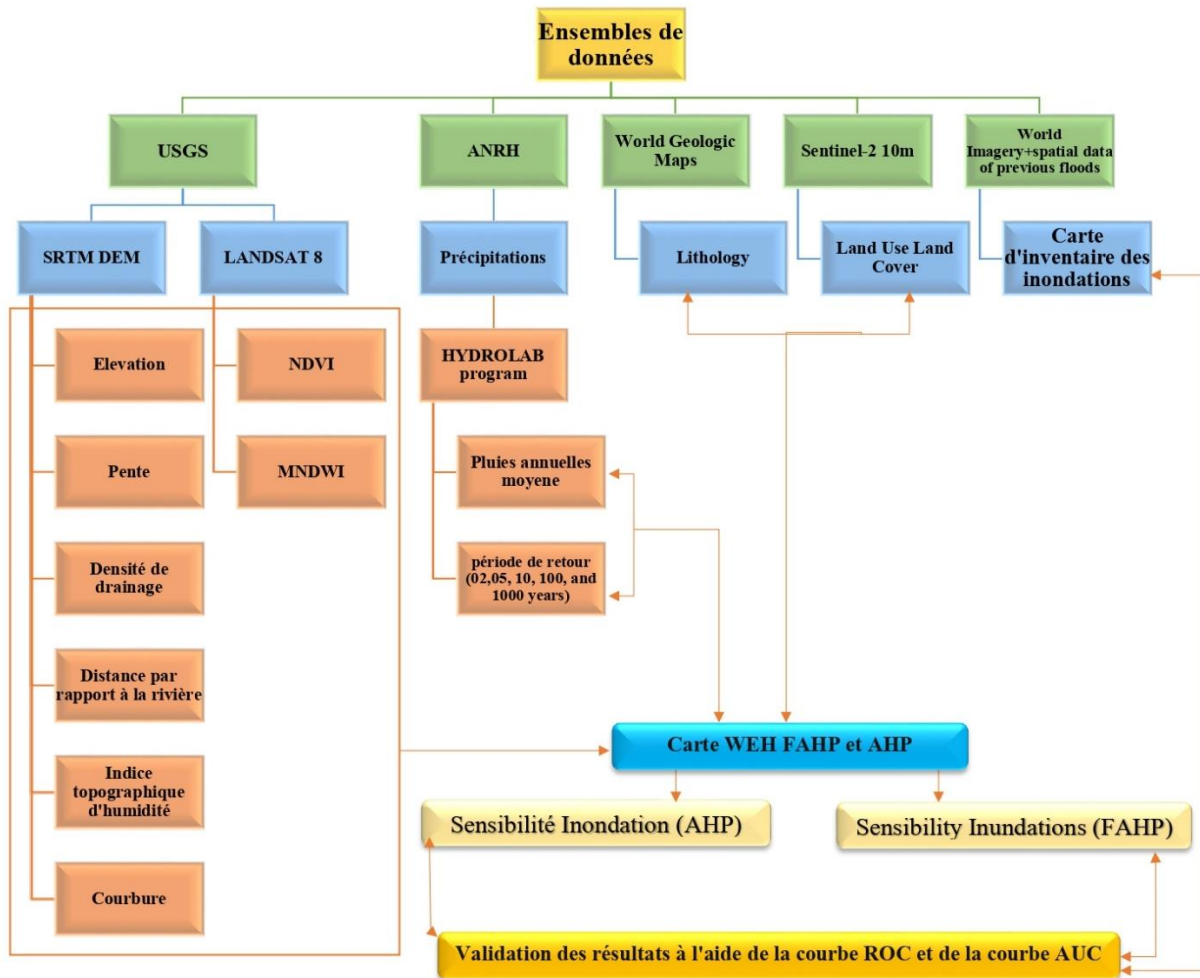


Figure 5.3. Représentation schématique de la procédure générale de cartographie de la sensibilité aux inondations pour différentes périodes de retour.

5.4. Le processus de hiérarchisation analytique (AHP) :

Le processus de hiérarchisation analytique (AHP) peut être utilisé pour évaluer la sensibilité aux inondations et prendre des décisions efficaces sur les stratégies de gestion des inondations. Fondée par Thomas Saaty (Saaty, 1987), cette méthode est basée sur la détermination des poids appropriés pour un ensemble de critères d'entrée, ce qui permet des comparaisons systématiques

et une évaluation complète de différentes solutions dans des situations complexes. Les étapes suivies pour déterminer la sensibilité aux inondations comprenaient la définition de l'objectif, la sélection et la hiérarchisation des critères pertinents, et la construction d'une structure hiérarchique reflétant les relations entre les critères. Une matrice de comparaison par paire a été créée à l'aide d'une échelle de Satti allant de 1 à 9, les autres critères se voyant attribuer une valeur opposée. Le processus décisionnel consiste à attribuer des valeurs numériques représentant des degrés de préférence, en classant les facteurs en fonction de leur poids relatif.

Une enquête auprès d'experts a été menée lors de réunions scientifiques, au cours desquelles les critères et les facteurs utilisés ont été débattus, puis hiérarchisés selon leur importance respective. Les personnes interrogées comprenaient des experts de notre université et d'autres provenant de différentes institutions académiques du pays. Cette recherche se fondait sur l'évaluation de la pertinence relative des éléments d'adaptation aux inondations, en se basant sur les priorités établies à partir d'études antérieures, ainsi que sur les données recueillies lors des investigations sur le terrain. Les facteurs de calcul sélectionnés ont ensuite été acceptés par les experts discutés, ainsi que par les études précédentes dans ce domaine au niveau international. Une matrice de comparaison en duo a été élaborée en se basant sur les comparaisons en duo réalisées et évaluée grâce au coefficient de cohérence (CR). On juge acceptable un coefficient de cohérence si CR est supérieur à 0,1.

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

Tableau 5.2. Poids des paramètres de vulnérabilité et des paramètres géophysiques dans la méthode AHP et matrice pour les comparaisons par paire.

(EL) Élévation, (S) Pente, (R) Précipitations, (DD) Densité de drainage, (DR) Distance à la rivière, (TWI) Indice topographique d'humidité, (LULC) Occupation du sol, (Cu) Courbure, (NDWI) Indice de différence normalisé de l'eau, (NDVI) Indice de différence normalisé de la végétation, (Li) Lithologie.

Parametres	EL	S	R	DD	DR	TWI	LULC	Cur	MNDWI	NDVI	Li
EL	1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	9
S	0.50	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9
R	0.33	0.50	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DD	0.25	0.33	0.50	1	2	3	4	5	6	7	8
DR	0.20	0.25	0.33	0.50	1	2	3	4	5	6	7
TWI	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1	2	3	4	5	6
LULC	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1	2	3	4	5
Cur	0.13	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1	2	3	4
MNDWI	0.13	0.13	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1	2	3
NDVI	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1	2
Li	0.11	0.11	0.11	0.13	0.14	0.17	0.20	0.25	3.00	0.50	1
SUM	3.07	4.94	7.83	11.72	16.59	22.45	29.28	37.08	47.50	54.50	63.00
CR	0.065										
Weights AHP	0.27	0.21	0.15	0.11	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01

Après avoir obtenu des valeurs de CR acceptables à partir des matrices de comparaison par paire, les valeurs d'entrée ont été moyennées pour produire une seule matrice de comparaison par paire (comme indiqué dans le tableau 4.2). La matrice finale de comparaison par paire a été ajustée pour obtenir un coefficient de cohérence acceptable et optimiser les poids des facteurs de conditionnement. Suite au calcul des poids, la carte de vulnérabilité aux inondations a été élaborée grâce à une méthode de superposition et de somme pondérée dans un système d'information géographique (SIG). Chaque élément a été multiplié par le poids correspondant selon l'équation (4.04).

$$\text{Indice de sensibilité aux inondations (AHP)} = \sum_{i=1}^n W_i X_i \dots \dots \dots (5.04).$$

Où :

W_i = poids du facteur i ; X_i = score du critère des facteurs i .

5.5. Modèle Fuzzy AHP :

La méthode AHP flou est une technique mathématique qui s'appuie sur les principes de la logique floue. On la désigne aussi comme un système expert hiérarchique flou. Cette démarche consiste à élaborer un système capable de simuler et d'examiner des systèmes intégrés pour formuler des déductions logiques à partir des éléments fournis. Des fonctions d'appartenance floues sont utilisées dans la construction d'un modèle AHP flou pour permettre une représentation continue des données caractérisées par l'ambiguïté ou l'imprécision. Les inondations dans la zone de recherche ont été identifiées en fusionnant toutes les catégories de sujets sélectionnées. Toutes les cartes vectorielles ont été converties en données matricielles avant le processus de superposition, au cours duquel l'importance relative de chaque couche d'attributs a été déterminée (Benaïche, Mokhtari et al. 2024). En outre, les couches spatiales discrètes ont été classées de 1 à 5, indiquant une influence faible au fur et à mesure que l'influence augmente. Le classement a été déterminé sur la base du classement des données disponibles et des expériences précédentes des experts.

Ces méthodes ont comporté plusieurs étapes pour déterminer l'importance relative de plusieurs catégories et évaluer le coefficient de cohérence (CI). L'analyse de superposition a été utilisée pour déterminer la sensibilité des sites exposés aux inondations après avoir établi des couches de critères d'évaluation et attribué des facteurs de pondération. Des notes de priorité ont été attribuées à chaque élément à l'aide d'un modèle AHP flou. En utilisant l'approche de la somme pondérée dans ArcGIS 10.3, une carte de sensibilité aux inondations a été créée en superposant toutes les données. L'équation (4.05) a ensuite été appliquée pour créer la carte de sensibilité aux inondations pour différentes périodes de retour.

$$\text{Indice de sensibilité aux inondations (FAHP)} = (EL) \times 0.26 + (S) \times 0.21 + (R) \times 0.16 + (DD) \times 0.11 + (DR) \times 0.08 + (TWI) \times 0.06 + (LULC) \times 0.04 + (Cu) \times 0.03 + (NDWI) \times 0.02 + (NDVI) \times 0.02 + (Li) \times 0.01 \dots \dots \dots (5.05)$$

5.6. Vérification et évaluation de l'efficacité des cartes de sensibilité pour les zones inondables

L'étude visait à évaluer la capacité des modèles à distinguer la sensibilité des zones inondables et non inondables pour différentes périodes de retour en utilisant des cartes de sensibilité aux inondations. Cette évaluation a consisté à tester environ 900 sites, les régions

inondables servant d'échantillons positifs et les régions non inondables d'échantillons négatifs. Actuellement, l'aire sous la courbe (AUC) et les courbes caractéristiques d'exploitation du récepteur (ROC) sont des méthodes largement utilisées pour évaluer la fiabilité et la précision des modèles d'inondation. La sensibilité évalue la compétence du modèle à repérer avec précision les zones susceptibles d'être inondées, alors que la spécificité juge sa performance en matière de différenciation des zones non sujettes aux inondations..

Les courbes ROC sont générés en traçant la sensibilité sur l'axe des ordonnées et le taux de faux positifs (FPR) sur l'axe des abscisses. Les valeurs de l'AUC, comprises entre 0 et 1, reflètent la performance globale du modèle, 1 indiquant un modèle parfait et des valeurs plus proches de 0 signifiant une faible fiabilité. Ces mesures permettent de valider et d'interpréter les cartes de sensibilité pour différentes périodes de retour, ce qui constitue un outil essentiel pour les stratégies d'atténuation des risques d'inondation. Les valeurs de l'AUC sont classées en cinq niveaux de performance, d'excellent à médiocre, offrant des informations essentielles pour la prise de décision.

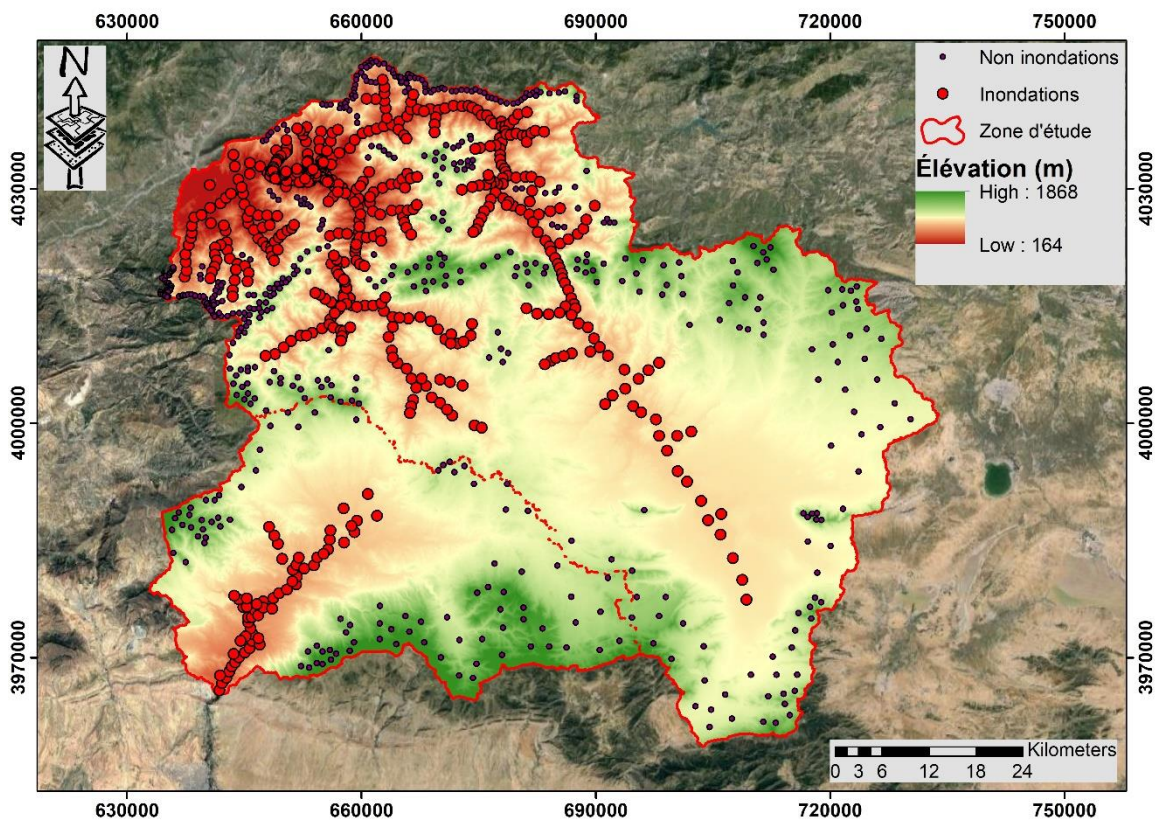


Figure 5.4. Données d'inventaire des inondations pour la zone d'étude

5.7. Résultats et discussion

Les échanges antérieurs ont démontré que le taux de cohérence de la matrice de comparaison binaire était de 0,065 pour les deux modèles, ce qui suggère que les poids des facteurs conditionnels extraits étaient constants et dignes de confiance. Cette cohérence renforce la crédibilité de la méthode employée pour définir les poids et juger les éléments d'influence.

À partir de ces conclusions, des cartes illustrant la réactivité des zones sujettes aux inondations lors de fortes pluies pour diverses fréquences de retour ont été créées en utilisant les méthodes AHP et FAHP. Ces techniques méthodologiques sont largement reconnues et appliquées dans le domaine des systèmes d'information géographique (SIG). Ces cartes montrent comment de multiples critères peuvent être combinés et analysés pour identifier les zones les plus vulnérables. Les cartes (5 et 8) montrent les différences résultant de l'utilisation de formules différentes pour le facteur R (coefficient de précipitations) dans le calcul de la sensibilité des zones. Cette variation des valeurs indique qu'il existe une variation significative de la sensibilité des zones inondables lorsque l'on traite de périodes de retour multiples. Cette approche montre l'importance d'une sélection et d'une analyse précises des facteurs d'influence, car les différences dans les calculs du facteur R peuvent affecter de manière significative les résultats finaux, et donc les décisions relatives à la gestion des risques d'inondation.

Ces résultats soulignent l'importance d'utiliser des outils avancés tels que AHP et FAHP pour analyser des critères multiples et fournir des cartes précises qui contribuent à améliorer notre compréhension du risque d'inondation. Ils soulignent également la nécessité de se concentrer sur les variations de valeurs résultant des facteurs d'influence afin de garantir une prise de décision objective et scientifiquement fondée.

5.7.3. Modèle Processus analytique hiérarchique

Après avoir déterminé les poids relatifs des facteurs de conditionnement des inondations dérivés de la matrice de comparaison par paire, dont la contribution spatiale varie en fonction de leur valeur pondérée, ces facteurs ont été combinés pour obtenir les cartes finales à l'aide d'une approche AHP. Cette approche a permis de produire des cartes montrant la sensibilité des zones inondables aux fortes précipitations pour différentes périodes de retour, à savoir : Deux ans, cinq ans, dix ans, cent ans et mille ans, ainsi qu'une carte des précipitations annuelles moyennes (figure 4.5). Chaque carte a été classée en cinq catégories, à savoir : Très faible, Faible, Moyen, Élevé et Très élevé, car ces classifications représentent la distribution de la sensibilité des zones étudiées. Pour chaque cellule de la zone d'étude, la sensibilité du site aux

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

inondations a été évaluée. Il a été constaté que les zones à faible pente présentaient une sensibilité très élevée et élevée aux inondations. Pour l'occupation du sol, y compris les zones urbaines, désertiques et agricoles, la sensibilité était modérée. En bordure de la zone d'étude, une sensibilité très faible et faible a été enregistrée dans les zones à fortes pentes et à forte densité de drainage.

Les résultats ont montré que les zones à faible densité de drainage, les pentes plus raides, la très faible densité de population et les sols perméables étaient associés à la prévalence de zones peu ou très peu sensibles. Le pourcentage de chaque catégorie de sensibilité couvert par les différentes zones est indiqué dans le tableau (4.3) et la figure 4.6. En particulier, les cartes pour les périodes de retour de deux ans et de dix ans ont montré des changements distincts et significatifs. Dans les zones moins pentues, la sensibilité très faible et faible ressort, tandis que les zones à sensibilité élevée commencent à augmenter, contrairement aux zones à sensibilité faible et très faible qui deviennent moins prononcées, reflétant un changement progressif de la dynamique de la sensibilité aux inondations au fur et à mesure que les périodes de retour changent.

Tableau 5.3 Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude à l'aide du modèle AHP pour différentes périodes de retour

Sensibilité	Très faible	Faible	Médium	élevé	Très élevé
ans	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)	Pourcentage (%)
2	18.84	29.05	33.41	16.52	2.19
5	12.31	24.27	33.10	25.80	4.51
10	9.89	21.31	30.36	31.53	6.91
100	5.75	16.31	25.53	35.32	17.09
1000	4.14	13.86	22.37	34.09	25.55
annuelles moyennes	8.37	18.85	27.34	31.86	13.58

Pour les périodes de retour inférieures à 100 et 1000 ans, l'analyse révèle une diminution des zones de sensibilité intermédiaire, accompagnée d'une augmentation des régions à forte sensibilité aux inondations. Alors que les zones classées comme ayant une sensibilité faible ou très faible ont diminué, celles classées comme ayant une sensibilité moyenne, élevée ou très élevée ont connu une augmentation notable. Cette tendance s'aligne sur les résultats concernant les précipitations annuelles moyennes, qui reflètent de manière similaire des changements

cohérents avec les modèles observés pour les périodes de retour spécifiées, ce qui renforce la fiabilité de ces résultats.

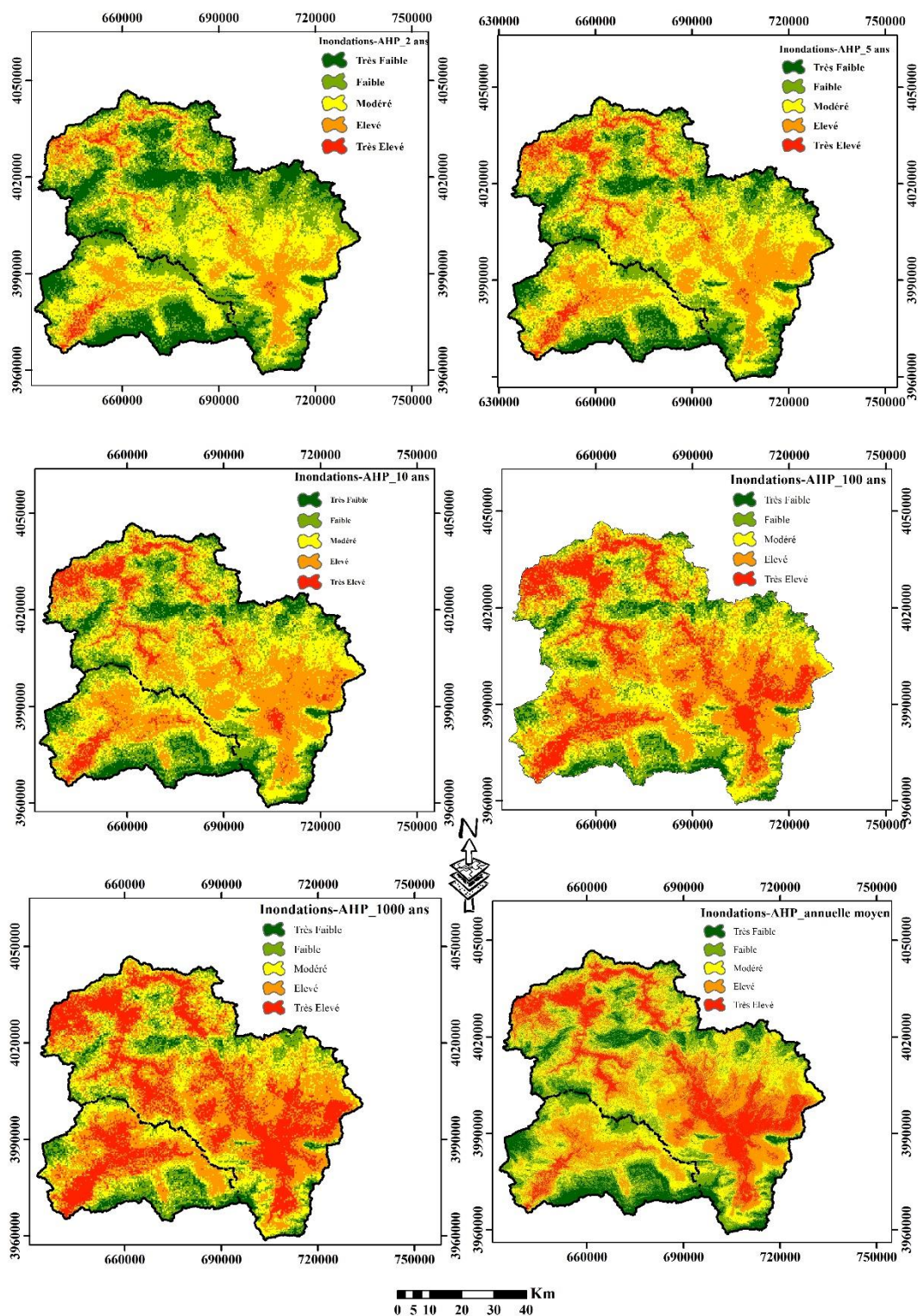


Figure 5.5. Cartes de la sensibilité des zones inondables aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide du modèle AHP

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

Les conclusions finales montrent que les régions hautement vulnérables aux inondations semblent se développer avec la hausse de l'intensité des pluies. Cette hausse est largement déterminée par des modifications des niveaux de précipitations, la répartition géographique des zones fortement peuplées et les propriétés de l'environnement naturel, comme la densité moyenne du réseau d'évacuation des eaux de pluie et la présence dominante de pentes abruptes. L'ensemble de ces facteurs contribue à accroître la vulnérabilité des zones à sensibilité élevée et très élevée.

En outre, l'extension des zones de sensibilité élevée vers des zones de plus faible altitude, par rapport à d'autres catégories de risque, met en évidence l'interaction dynamique entre les facteurs environnementaux et anthropogéniques dans l'élaboration du risque d'inondation. Cela souligne la nécessité de stratégies d'atténuation ciblées, en particulier dans les régions où les conditions topographiques et infrastructurelles exacerbent la vulnérabilité aux précipitations extrêmes.

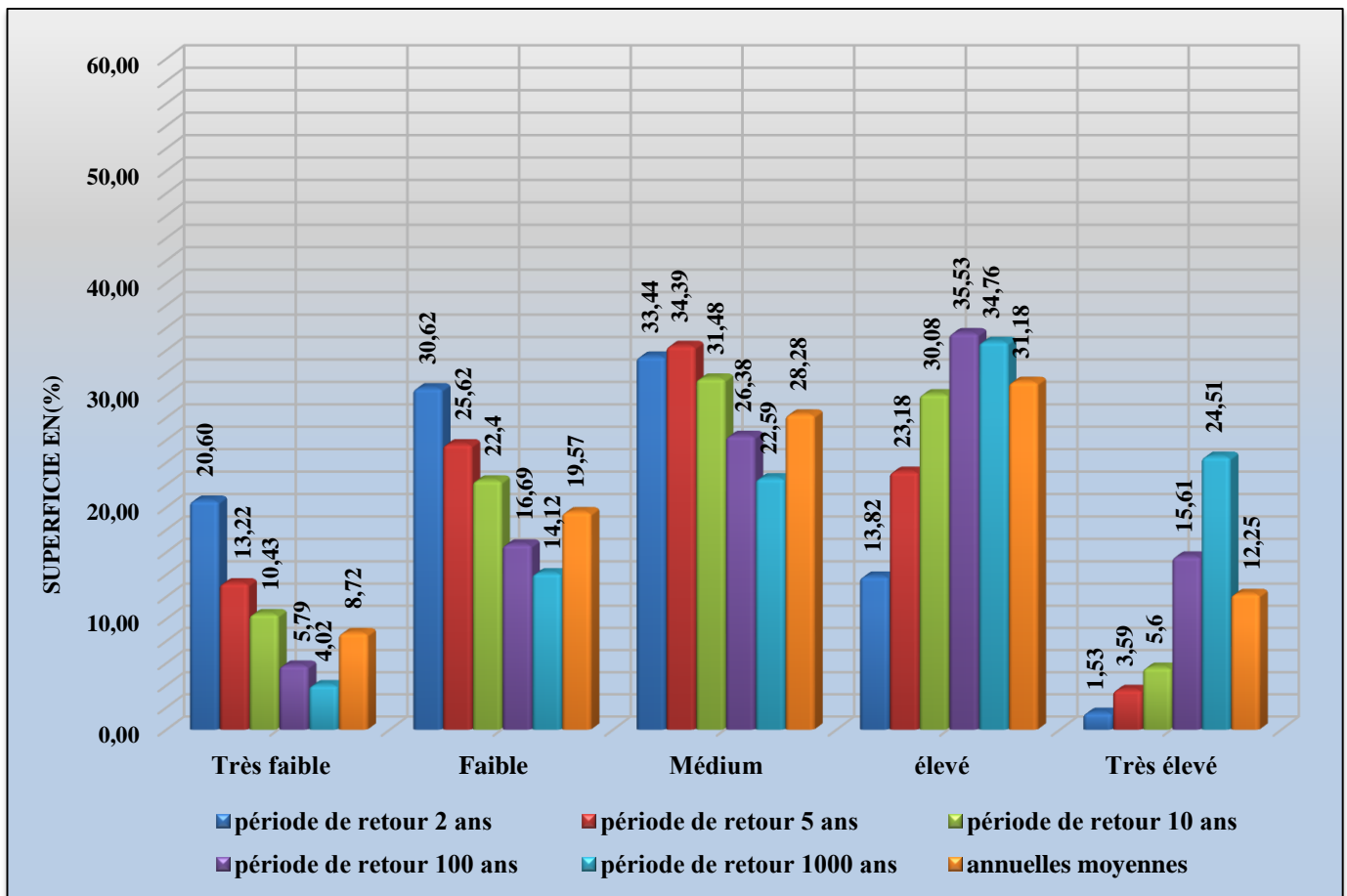


Figure 5.6 : Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour différentes cartes de sensibilité des zones inondables à l'aide du modèle AHP

5.7.2 Modèle Fuzzy AHP :

Dans toutes les cartes générées pour des périodes de retour variables, les simulations basées sur l'approche de la FAHP montrent un alignement remarquable avec les régions à forte sensibilité aux inondations, principalement situées dans les zones de basse altitude des bassins d'étude. Comparée au processus de hiérarchie analytique (AHP), la technique de FAHP fournit des résultats plus précis et plus détaillés. Notamment, certaines régions classées par la méthode AHP comme ayant une sensibilité limitée ont été identifiées comme modérément sensibles lorsqu'elles ont été analysées à l'aide de l'approche de la FAHP. Ceci met en évidence la capacité supérieure du modèle de FAHP à capturer les variations subtiles de la sensibilité aux inondations dans la zone d'étude.

Pour les bassins de Boussellam et de K'sob, une carte de sensibilité aux inondations a été produite en utilisant le modèle de FAHP, qui a identifié des seuils distincts de sensibilité aux inondations à travers le bassin. L'analyse a révélé que la proportion de zones classées comme extrêmement sensibles augmente à mesure que la période de retour s'allonge (par exemple, 2, 5, 10, 100 et 1000 ans), comme le montre le tableau 4.4. Cette tendance souligne l'efficacité de la méthodologie de la FAHP, qui permet une compréhension plus fine et plus complète de la distribution des risques d'inondation, ce qui en fait un outil précieux pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation.

Tableau 5.4. Pourcentage des différentes zones de susceptibilité pour la zone d'étude à l'aide du modèle FAHP pour différentes périodes de retour

Sensibilité ans	Très faible Pourcentage (%)	Faible Pourcentage (%)	Médium Pourcentage (%)	élevé Pourcentage (%)	Très élevé Pourcentage (%)
2	20.60	30.62	33.44	13.82	1.53
5	13.22	25.62	34.39	23.18	3.59
10	10.43	22.40	31.48	30.08	5.60
100	5.79	16.69	26.38	35.53	15.61
1000	4.02	14.12	22.59	34.76	24.51
annuelles moyennes	8.72	19.57	28.28	31.18	12.25

Les valeurs des zones extrêmement sensibles varient de 1,53 % de la superficie du bassin pour une période de retour de deux ans, et augmentent jusqu'à atteindre 24,51 %. Pour une période de retour allant jusqu'à 1000 ans, ce qui représente environ un quart de la superficie du bassin. Alors que les zones très peu sensibles présentent une baisse significative pour chaque période de retour utilisée, variant de 20,60 % pour une période de retour de deux ans jusqu'à 4,02 % pour une période de retour de 1 000 ans. En outre, les autres régions à sensibilité

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

modérée représentent respectivement 33,44 % et 22,59 % de l'ensemble de la région. Ces résultats fournissent des informations importantes sur la distribution et la taille des différentes zones de sensibilité aux inondations (figure 5.8).

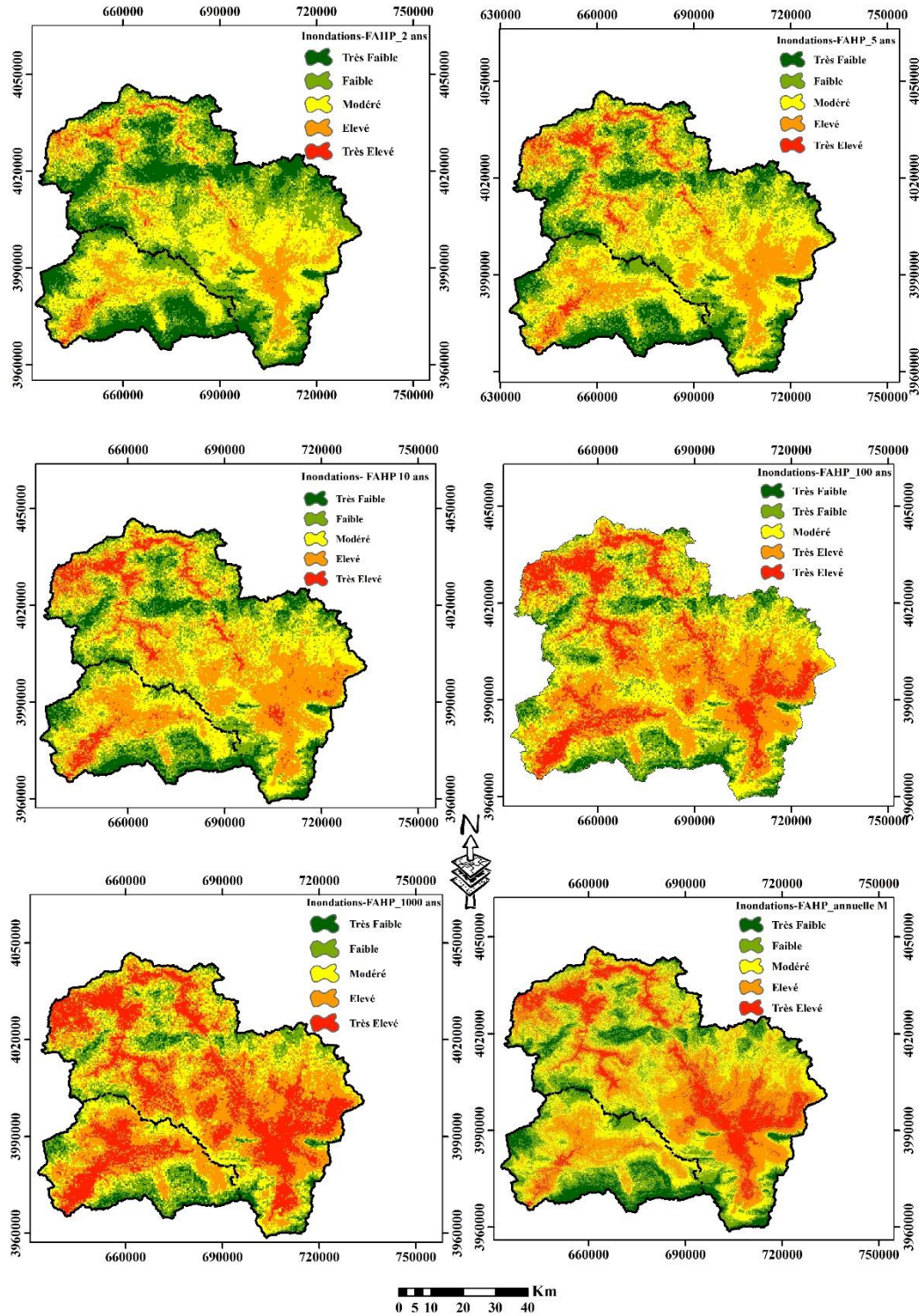


Figure 5.7. Cartes de la sensibilité des zones inondables aux précipitations extrêmes pour différentes périodes de retour et précipitations annuelles moyennes à l'aide de l'algorithme FAHP modal.

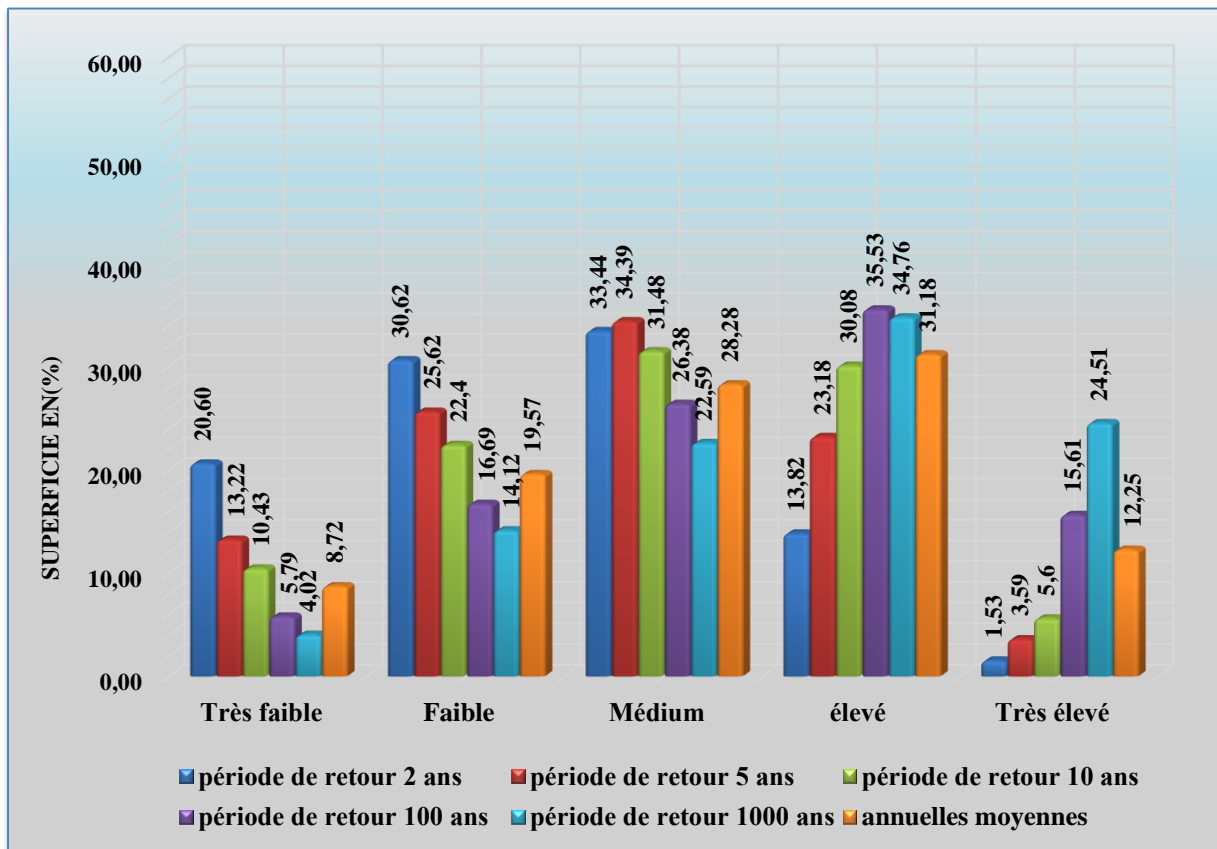


Figure 5.8. Sous-zones (%) pour chaque période de retour pour diverses cartes de sensibilité des zones inondables à l'aide de FAHP

Dans ce travail de recherche, des ajustements ont été effectués sur les cartes des périodes de retour pour mesurer leur influence sur la sensibilité des zones sujettes aux inondations. L'analyse de sensibilité a révélé des différences notables entre les régions de diverses altitudes. Les zones de faible altitude présentent une concentration plus élevée de zones inondables, particulièrement sensibles aux variations des cartes des périodes de retour. Lorsque ces périodes ont été réduites, ces zones ont montré une sensibilité accrue, en raison de leur proximité avec les rivières et les cours d'eau. En revanche, les régions de haute altitude ont affiché une réduction significative de la sensibilité aux inondations, quel que soit l'ajustement des périodes de retour, mettant en évidence le rôle crucial de l'altitude dans la réduction des impacts des inondations.

Les conclusions révèlent que les régions de basse altitude sont celles qui subissent le plus les changements dans les cartes de périodes de retour, corroborant l'idée que leur localisation près des rivières et des cours d'eau augmente leur exposition aux inondations. Cette distinction notable entre les zones de basse et de haute altitude souligne l'importance d'incorporer les cartes des périodes de retour dans l'étude des risques d'inondation pour une compréhension plus précise de la dispersion des inondations.

En outre, l'analyse de sensibilité a mis en évidence l'influence des variations de précipitations dans les différentes zones. Il a été observé que les régions de basse altitude sont directement touchées et que leur étendue s'étend avec l'augmentation des précipitations, tandis que les régions de haute altitude font preuve d'une plus grande résilience face aux inondations. Ces observations améliorent la compréhension globale de la distribution du risque d'inondation dans la zone d'étude et soulignent la valeur de l'intégration des facteurs topographiques et hydrologiques dans les évaluations de la sensibilité aux inondations.

5.7.3. Validation

L'évaluation de la précision du modèle est essentielle pour garantir sa fiabilité (Nguyen, Fukuda et al., 2024). Dans cette étude, la précision prédictive et les taux de réussite des modèles sélectionnés ont été évalués à l'aide de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic), en suivant les méthodologies des études précédentes (Khaddari, Jari et al., 2023 ; Benaiche, Mokhtari et al., 2024 ; Mokhtari, Abdelkebir et al., 2024).

Des cartes de sensibilité aux risques d'inondation pour différentes périodes de retour, ainsi qu'une carte de sensibilité pour les précipitations annuelles moyennes, ont été élaborées à l'aide des modèles AHP (Analytic Hierarchy Process) et FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process). La précision de ces modèles a été évaluée en comparant les ensembles de données de formation et de validation. Les valeurs de l'aire sous la courbe (AUC) obtenues démontrent une efficacité élevée des modèles, avec un score de 0,839 pour le modèle AHP et de 0,835 pour le modèle FAHP dans le cas des cartes correspondant à une période de retour de deux ans. Bien que les performances des deux modèles soient proches, le modèle FAHP a affiché une légère supériorité, comme illustré dans la figure (5.9).

Le modèle FAHP se distingue par sa capacité à différencier avec précision les zones à risque d'inondation des zones non exposées, confirmant ainsi son efficacité pour catégoriser les niveaux de risque de manière plus précise que les modèles alternatifs. Bien que certaines cartes

spécifiques révèlent une performance légèrement inférieure du modèle flou, celui-ci reste un outil prévisionnel fiable et robuste, justifiant son adoption généralisée dans le domaine de la gestion des risques d'inondation.

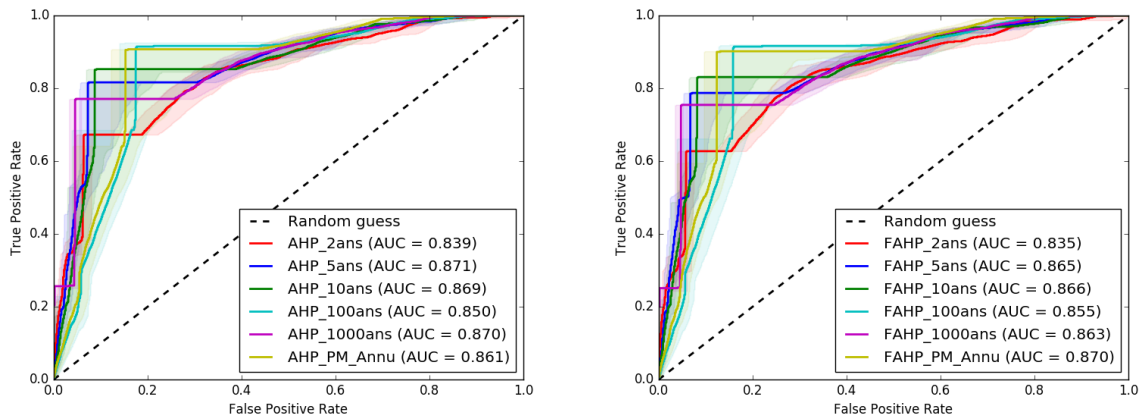


Figure 5.9. Courbes ROC pour vérifier la fiabilité des modèles de sensibilité (AHP, FAHP)

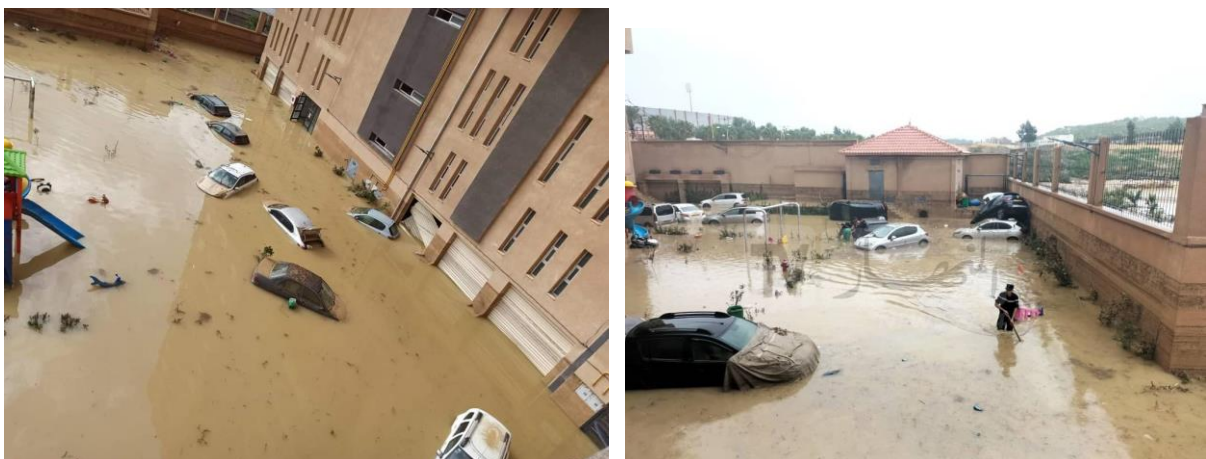
5.7.4. Comparaison des prévisions du modèle avec les données historiques sur les inondations

Après avoir analysé les courbes ROC, les résultats obtenus à l'aide des modèles AHP et FAHP ont été comparés aux données historiques sur les inondations dans la région. Cette comparaison visait à évaluer la concordance entre les zones identifiées comme très sensibles aux inondations par les modèles et les lieux ayant connu des inondations réelles. L'analyse a révélé une forte corrélation entre les prévisions des modèles et les données historiques. Notamment, les zones identifiées par les modèles comme étant très sensibles aux inondations correspondent étroitement aux endroits touchés par les inondations passées. Par exemple, la ville de Bordj Bou Arreridj, située dans le bassin versant du K'sob et sévèrement touchée par les inondations du 5 octobre 2022 (Gassi et Saoudi, 2023). Le modèle a montré une bonne concordance avec les données historiques sur les inondations. Cette ville, une zone de basse altitude à proximité des rivières, a été mise en évidence dans l'analyse actuelle comme l'une des plus vulnérables aux inondations. La concordance entre les résultats modélisés et les inondations historiques souligne la fiabilité des méthodes utilisées, notamment en ce qui concerne l'identification des zones de faible altitude sujettes aux inondations en raison de leurs caractéristiques géographiques et hydrologiques.

Chapitre 5. Cartographie des zones inondables en contexte de pluies extrêmes

Cependant, l'analyse a également révélé certaines divergences, en particulier dans les régions montagneuses. Ces zones, bien qu'identifiées comme vulnérables aux inondations par les modèles, n'ont pas connu d'inondations historiques significatives. Ces variations peuvent être imputées à la réactivité des modèles face à des éléments comme le possible changement climatique, les modifications dans les schémas de précipitation ou les transformations dans l'exploitation du sol et la couverture végétale. Cela indique que bien que ces régions n'aient pas subi d'inondations précédemment, elles pourraient se retrouver de plus en plus exposées aux inondations dans le futur, compte tenu des changements prévisibles du climat. Le degré élevé de concordance entre les résultats modélisés et les données historiques sur les inondations souligne la robustesse des modèles AHP et FAHP dans la prévision des zones sujettes aux inondations. En incorporant les données historiques comme référence de validation, les modèles ont démontré leur capacité à fournir des évaluations précises et fiables des risques d'inondation. En outre, l'identification de risques potentiels d'inondation dans des zones actuellement non touchées par les inondations met en évidence les capacités prédictives des modèles à anticiper les changements de vulnérabilité aux inondations induits par des facteurs environnementaux et climatiques.

Ces conclusions mettent en évidence la nécessité de combiner des données historiques avec des méthodes de modélisation sophistiquées pour augmenter la précision et la fiabilité des prévisions d'inondation, cruciales pour une prise de décision informée et des stratégies performantes de gestion des inondations.



Source : « Image des inondations à Bordj Bou Arreridj ». Récupéré de Google Images, consulté le [19/01/2025]. <https://www.google.com>.

Figure 5.10. Photos illustrant les impacts de diverses inondations ayant touché la ville de Bordj Bou Arreridj, située dans la zone d'étude.

5.8. Conclusions

Les crues soudaines sont des phénomènes naturels dont l'intensité varie en fonction de l'évolution des précipitations et qui peuvent avoir des conséquences imprévisibles. Il est donc essentiel d'identifier les zones les plus vulnérables aux inondations et de mettre en place des stratégies d'atténuation efficaces. Cette étude évalue la sensibilité des zones inondables des bassins versants de l'Oued Boussellam et de l'Oued K'sob face aux précipitations extrêmes, en intégrant les méthodologies des systèmes d'information géographique (SIG), du processus de hiérarchisation analytique floue (FAHP) et du processus de hiérarchisation analytique spatiale (AHP). Des cartes de sensibilité ont été élaborées afin de classer les zones inondables selon les périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000 ans) et les précipitations annuelles, en cinq catégories : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée.

Les résultats montrent que les zones les plus exposées se trouvent principalement dans les secteurs à topographie douce, notamment dans les zones de faible pente situées au sein du bassin versant. La carte de sensibilité associée à une période de retour de 100 ans a révélé une concentration du risque dans des localités comme Aïn Oulmane et Bordj Bou Arreridj. Le modèle AHP a présenté une performance robuste avec une AUC de 0,839, traduisant une bonne capacité à discriminer les zones à risque. Le modèle FAHP a également obtenu des résultats satisfaisants avec une AUC de 0,835 pour une période de retour de deux ans, confirmant sa pertinence pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations en fonction des précipitations annuelles.

Ces résultats sont cohérents avec des études antérieures, confirmant que les zones de faible altitude sont particulièrement vulnérables aux inondations en raison de leur proximité avec les rivières. Globalement, les cartes de sensibilité aux inondations fournissent des informations précieuses pour l'élaboration de stratégies efficaces de gestion des risques d'inondation, tant dans la zone d'étude que dans des régions similaires.

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion Générale et perspectives

L'érosion des sols et les inondations sont deux des phénomènes naturels les plus importants qui affectent la zone d'étude, leur intensité variant en fonction de l'évolution des fortes précipitations. Les effets négatifs de l'érosion ne se limitent pas à la perte de sols fertiles, mais comprennent également la dégradation des terres, la réduction de la productivité agricole et l'augmentation du risque d'inondation. Il est donc nécessaire d'intervenir efficacement en concevant des stratégies appropriées pour réduire l'érosion et les inondations et atténuer leurs effets négatifs, en mettant l'accent sur l'identification et la catégorisation des zones les plus vulnérables et en fournissant des outils pour une gestion durable. Dans cette étude, une analyse détaillée de la cartographie de sensibilité des zones sujettes à l'érosion hydrique et aux inondations dans les bassins de Boussellam et de K'sob a été menée, mettant en évidence l'impact des fortes précipitations comme facteur majeur d'exacerbation de ces phénomènes. La méthodologie est basée sur l'intégration des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) pour analyser avec précision les données spatiales.

L'étude morphométrique et hydrographique des bassins de l'oued K'sob et de l'oued Boussellam a été un élément clé dans la compréhension de la dynamique du ruissellement de surface, ce qui a permis d'évaluer avec précision les risques d'inondation et d'érosion. Les résultats de l'analyse ont révélé des différences significatives entre les deux bassins en termes de superficie, de topographie et de pentes, reflétant une nette variation de leur réponse hydrologique.

Le bassin versant de l'oued Boussellam, d'une superficie de 4 301 km², est plus vaste que celui de l'oued K'sob (1 479 km²) et possède des pentes plus douces, favorisant l'absorption des eaux et limitant le ruissellement. Toutefois, l'indice de pression topographique (Kc) indique une régularité plus élevée pour l'oued K'sob (1,61 contre 1,79), ce qui accélère l'évacuation des eaux et accroît le risque de crues soudaines.

Avec une altitude maximale de 1 850 m contre 1 750 m et une pente moyenne plus marquée (32,05 % contre 23,63 %), l'oued K'sob réagit plus rapidement aux précipitations, le rendant plus vulnérable aux crues éclairs et à l'érosion. En revanche, l'oued Boussellam, malgré un réseau de drainage plus étendu, reste exposé aux inondations en raison de sa morphologie.

La première partie de l'étude s'est concentrée sur la préparation de cartes détaillées de la sensibilité à l'érosion hydrique en intégrant une série de facteurs environnementaux et climatiques influençant le phénomène. Ces facteurs comprennent les pentes, les taux de

précipitations, les caractéristiques du sol, les modes d'utilisation des terres et la densité de la végétation. Les zones ont été classées en cinq catégories en fonction de leur sensibilité à l'érosion : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée.

Les résultats ont montré une nette variation de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique, les zones les plus sujettes à l'érosion étant concentrées dans le nord, ainsi que dans certaines zones de l'ouest et du sud de la zone d'étude, qui se caractérisent par des pentes abruptes et un terrain accidenté. Les cartes ont également mis en évidence l'impact des différentes périodes de retour, montrant que les zones élevées aux sols fragiles deviennent plus vulnérables à l'érosion à mesure que l'intensité et la fréquence des fortes pluies augmentent, ce qui renforce le besoin de stratégies efficaces pour gérer l'érosion et atténuer ses impacts sur l'environnement. La précision des modèles utilisés pour analyser le risque d'érosion hydrique a été évaluée à l'aide de courbes ROC (receiver operating characteristic).

Les résultats ont révélé que le modèle FAHP était supérieur avec une valeur AUC de 0,806 indiquant sa grande capacité à discriminer les zones en fonction de leur susceptibilité à l'érosion. D'autre part, le modèle AHP a également obtenu de bons résultats, avec une valeur AUC de 0,783, tandis que les modèles RUSLE et EPM se sont révélés moins précis que les deux modèles précédents, avec des valeurs AUC de 0,618 et 0,638 respectivement. Cette différence de performance reflète l'impact du choix du bon modèle sur les résultats de l'analyse du risque de corrosion, car il dépend de l'objectif de l'étude et de la nature des facteurs utilisés dans chaque modèle. Les résultats ont confirmé que le modèle FAHP fournit une vue plus complète et plus précise pour évaluer l'impact des différents facteurs sur l'érosion, ce qui en fait le meilleur choix pour étudier les zones caractérisées par des conditions environnementales complexes, car il améliore la précision de la catégorisation des zones sujettes à l'érosion, soutenant ainsi les stratégies de gestion durable des sols et de l'eau.

La deuxième partie de l'étude s'est concentrée sur l'analyse de la sensibilité des zones inondables des bassins versants de Boussellam et de K'sob aux précipitations extrêmes, en intégrant les techniques des systèmes d'information géographique (SIG) aux méthodologies d'analyse spatiale (AHP) et d'analyse floue (FAHP). Des cartes de sensibilité aux inondations ont été créées en fonction des périodes de retour (2, 5, 10, 100 et 1000 ans) et des précipitations moyennes annuelles, et les zones ont été classées en cinq catégories : Très faible, faible, faible, modéré, élevé et extrêmement élevé. Les résultats ont révélé que les zones les plus exposées aux inondations sont principalement concentrées dans les parties inférieures du bassin, car la topographie plane affecte la susceptibilité de ces zones à recevoir des eaux de ruissellement. La

carte de sensibilité pour la période de retour de 100 ans a également montré des risques significatifs dans les zones d'Ain Oulmane et Bordj Bou Arreridj, indiquant le besoin de mesures préventives efficaces dans ces zones.

En ce qui concerne la performance des modèles, le modèle AHP a obtenu de bons résultats dans la cartographie de la sensibilité aux inondations, tandis que le modèle FAHP a fourni d'excellents résultats. Les valeurs AUC pour chaque modèle étaient de 0,87 pour AHP et de 0,81 pour FAHP, ce qui reflète une bonne capacité à prédire les zones à risque sur la base des précipitations annuelles. Ces résultats sont conformes aux études précédentes qui confirment que les zones de faible altitude sont plus sujettes aux inondations en raison de leur proximité avec le lit des rivières.

Ces résultats soulignent l'importance de l'intégration des techniques de télédétection et de SIG avec des modèles analytiques pour fournir des visualisations précises de la distribution de l'érosion des sols et des inondations, ainsi que pour comprendre l'impact des différents facteurs climatiques et environnementaux. Cette approche met également en évidence le rôle critique des fortes précipitations dans l'exacerbation de ces deux phénomènes, car elles sont le principal moteur de l'augmentation du ruissellement et de l'enlèvement des couches de terre arable, en particulier dans les zones à fortes pentes et aux sols fragiles.

Cette étude constitue un cadre d'analyse utile pour les décideurs en matière de gestion des ressources naturelles, de prévention des risques et de planification environnementale. En identifiant les zones les plus vulnérables à l'érosion et aux inondations, elle permet d'orienter les interventions prioritaires afin de protéger les infrastructures, les terres agricoles et les écosystèmes sensibles.

Les travaux futurs que nous projetons de réaliser sont :

- Utilisation de l'intelligence artificielle pour la cartographie des risques : L'intelligence artificielle (IA) peut être intégrée aux systèmes d'information géographique (SIG) et aux techniques de télédétection pour améliorer la précision de la cartographie des zones vulnérables. Des algorithmes d'apprentissage automatique (Random Forest, CNN, SVM) peuvent analyser des données climatiques, topographiques et hydrologiques pour identifier les zones à haut risque. Le deep learning peut aussi être utilisé pour interpréter des images satellites et prédire les évolutions des inondations et de l'érosion.

- **Modélisation prédictive pour l'analyse des scénarios climatiques :**
Les modèles d'apprentissage automatique permettent de simuler différents scénarios basés sur les prévisions météorologiques et les tendances climatiques. Des réseaux de neurones récurrents (RNN) ou des modèles de forêts aléatoires peuvent anticiper l'impact des précipitations extrêmes et alerter sur les risques d'inondations et d'érosion à court et long terme.
- **Développement de systèmes d'aide à la décision pour la gestion durable :**
Des plateformes basées sur l'IA peuvent être conçues pour aider les décideurs à planifier des actions préventives, comme l'installation de barrières anti-érosion, la reforestation ciblée ou l'adaptation des infrastructures. L'analyse multi-critères combinée à l'IA peut prioriser les interventions selon la gravité du risque et l'impact socio-économique.
- **Amélioration de la précision des modèles existants :**
Les modèles AHP et FAHP utilisés dans l'étude pourraient être enrichis par des techniques de machine learning afin d'améliorer leur capacité à classer les zones de risque. Une approche hybride combinant l'IA et les modèles empiriques traditionnels permettrait d'affiner les prévisions et d'accroître la fiabilité des cartes de vulnérabilité.

En intégrant ces approches intelligentes, la gestion des risques d'inondation et d'érosion devient plus proactive et efficace, garantissant une meilleure protection des écosystèmes et des populations exposées.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

Abdelkebir, B., Maoui, A., Mokhtari, E., Engel, B., Chen, J., et Aboelnour, M. (2021). Evaluating Low-Impact Development practice performance to reduce runoff volume in an urban watershed in Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9), Article 814. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07178-0>.

Abdelghani, L. (2023). "Modeling of dam-break flood wave propagation using HEC-RAS 2D and GIS: case study of Taksebt dam in Algeria." *World Journal of Engineering* 21(2): 376-385.

Abdessamed, D. et B. Abderrazak (2019). "Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall-runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria." *Environmental Earth Sciences* 78(19): 586.

Achite, M., Touaibia, B., et Ouillon, S. (2006). Érosion hydrique en Algérie du Nord : ampleur, conséquences et perspectives. In *Proceedings of the 14th International Soil Conservation Organization Conference: Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments* (May 14–19, Marrakech, Morocco).

Ahmed, F. et K. Kilic (2019). "Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A performance analysis of various algorithms." *Fuzzy sets and systems* 362: 110-128.

Ali, A., Ullah, W., Khan, U. A., Ullah, S., Ali, A., Jan, M. A., Bhatti, A. S., et Jan, Q. (2024). Assessment of multi-components and sectoral vulnerability to urban floods in Peshawar – Pakistan. *Natural Hazards Research*, 4(3), 507–519. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.12.012>

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., et Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.

Askar, S., Zeraat Peyma, S., Yousef, M. M., Prodanova, N. A., Muda, I., Elshahabi, M., et Hatamiafkoueih, J. (2022). Flood susceptibility mapping using remote sensing and integration of decision table classifier and metaheuristic algorithms. *Water*, 14(19), Article 3062. <https://doi.org/10.3390/w14193062>.

Aslam, B., Maqsoom, A., Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Jabbar, T., et Zafar, A. (2021). Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1637–1649. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.09.015>.

Atanova-Pacemska, T., Lapevski, M., et Timovski, R. (2014, novembre). Analytical Hierarchical Process (AHP) method application in the process of selection and evaluation. Communication présentée à la conférence scientifique internationale UNITECH, Gabrovo, Bulgarie .

Atoma, H., Suryabagavan, K. V., et Balakrishnan, M. (2020). Soil erosion assessment using RUSLE model and GIS in Huluka watershed, Central Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 6, Article 12. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00365-z>.

Références Bibliographiques

- Baalousha, H. M., Younes, A., Yassin, M. A., et Fahs, M. (2023). Comparison of the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (F-AHP) and Fuzzy Logic for Flood Exposure Risk Assessment in Arid Regions. *Hydrology*, 10(7), 136. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070136>.
- Belkendil, A., Habi, M., Boutkhil, M., Bouzouina, O., et Boufeldja, S. (2018). Using Multi-Criteria Evaluation (MCE): Analytical Hierarchy Process (AHP) in investigation of erosion phenomenon in arid zones (case study: watershed of Bechar, southwest of Algeria). *Cinq Continents*, 8(18), 99–117.
- Benaiche, M., Mokhtari, E., Berghout, A., Abdelkebir, B., et Engel, B. (2024). Identification of soil erosion-susceptible areas using revised universal soil loss equation, analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach in sub-watersheds Boussellam and K'sob, Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 83, Article 34. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11339-7>.
- Benaiche, M., Mokhtari, E., et Berghout, A. (2023). Assessment of soil erosion in the Boussellam watershed, Algeria: integrated approach using the Erosion Potential Method (EPM) and GIS. *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 103(1), Article 113. <https://doi.org/10.2298/gsgd2401113b>.
- Benaiche, M., Mokhtari, E., Berghout, A., Abdelkebir, B., et Engel, B. (2025). Sensitivity of flood-prone areas to extreme rainfall using AHP and fuzzy AHP: A case study of Boussellam and K'sob watersheds, Algeria. *Journal of Water and Climate Change*, Advance publication, Article jwc2025520. <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.520>
- Benselama, O., Mazour, M., Hasbaia, M., Djoukbala, O., et 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), Article 735. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7117-1>.
- Benselama, O., Mazour, M., Hasbaia, M., Djoukbala, O., et 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). *Journal of Mediterranean Earth Sciences*, 11, 1–13. <https://doi.org/10.3304/JMES.2019.001>
- Berz, G. (2000). Flood disasters: Lessons from the past—worries for the future. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water and Maritime Engineering*, 142(3), 3–8. <https://doi.org/10.1680/wame.2001.148.1.57>
- Blinkov, I., et Kostadinov, S. (2010). Applicability of various erosion risk assessment methods for engineering purposes. *Conference BALWOIS 2010*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4762.7849>
- Blöschl, G., Gaál, L., Hall, J., Kiss, A., Komma, J., Nester, T., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., et Viglione, A. (2015). Increasing river floods: fiction or reality? *WIREs Water*, 2(4), 329–344. <https://doi.org/10.1002/wat2.1079>.
- Boardman, J., et Poesen, J. (Eds.). (2006). *Soil erosion in Europe: Major processes, causes and consequences* (1st ed.). Wiley. ISBN 978-0470859100.

Références Bibliographiques

- Borah, P. B., Longkumer, L., Handique, A., Dutta, C. K., Bori, D., et Acharjee, S. (2023, December 4). Assessment of flood susceptibility in the Cachar District of Assam using GIS-based multi-criteria decision making and Analytical Hierarchy Process. Preprint, Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3265618/v1>
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., et Sangati, M. (2007). Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 8(5), 1049–1067. <https://doi.org/10.1175/JHM593.1>.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., et Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8, Article 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Bouamrane, A., Gibert, B., Ghrab, M., Zeddouri, M., et Lahlou, A. (2020). A comparison of the analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach for flood susceptibility mapping in a semi-arid ungauged basin (Biskra basin: Algeria). *International Journal of River Basin Management*, 20(2), 203–213. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1725972>.
- Bouamrane, A., Bouamrane, A., et Abida, H. (2021). Water erosion hazard distribution under a semi-arid climate condition: Case of Mellah Watershed, North-eastern Algeria. *Geoderma*, 403, Article 115381. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115381>.
- Bouamrane, A., Gibert, B., Ghrab, M., Zeddouri, M., et Lahlou, A. (2022). A comparison of the analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach for flood susceptibility mapping in a semi-arid ungauged basin (Biskra basin: Algeria). *International Journal of River Basin Management*, 20(2), 203–213. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.XXXXXXX>.
- Bouanani, A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation : étude de quelques sous-bassins de la Tafna (Nord-Ouest Algérie) [Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen]. <https://theses-algerie.com/5691370831895844/>
- Bouguerra, H. (2018). Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG : application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est algérien) [Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen]. Thèses-Algérie.
- Boukhanef, I., Khadzhidi, A., Kravchenko, L., Tsarev, Y., Groshev, L., et Polushkin, O. (2019). Gestion du risque d'inondation dans la rivière Allala (Algérie) à l'aide de l'analyse de fréquence des crues et de la modélisation hydraulique. *E3S Web of Conferences*, 135, 01093. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501093>.
- Bouzeria, H. (2018). Quantification et modélisation des transports solides : cartographie des zones à risques d'érosion hydrique à partir d'une base de données gérée par un SIG : application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est algérien) [Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen]. Thèses-Algérie.

Références Bibliographiques

- Brunner, G. W. (1994). HEC river analysis system (HEC-RAS), US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., et Lloyd, C. D. (2015). *Principles of Geographical Information Systems* (3^e éd.). Oxford University Press. ISBN 978-0-19-874284-5.
- Boutheldja 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), Thèse de doctorat en Géographie à l'université de la Provence Aix-Marseille, p180.
- Campbell, J. B., et Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5^e éd.). The Guilford Press. ISBN 978-1-60918-176-5.
- Chachoua, A. (2010). *Gestion de crue dans un bassin versant : étude hydrologique, hydraulique et aménagement* [Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen]. Thèses-Algérie.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., et Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology* (1^{re} éd.). New York, NY : McGraw-Hill. ISBN 978-0070108103.
- Ciurean, R. L., Schröter, D., et Glade, T. (2013). Conceptual frameworks of vulnerability assessments for natural disasters reduction. In J. P. Tiefenbacher (Ed.), *Approaches to Disaster Management – Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters* (pp. 3–32). InTech. <https://doi.org/10.5772/55538>.
- Costache, R., Pham, Q. B., Sharifi, E., Linh, N. T. T., Abba, S. I., Vojtek, M., Vojteková, J., Nhi, P. T. T., et Khoi, D. N. (2020). Flash-Flood Susceptibility Assessment Using Multi-Criteria Decision Making and Machine Learning Supported by Remote Sensing and GIS Techniques. *Remote Sensing*, 12(1), Article 106. <https://doi.org/10.3390/rs12010106>.
- Das, B., Bordoloi, R., Thungon, L. T., Paul, A., Pandey, P. K., Mishra, M., et Tripathi, O. P. (2020). An integrated approach of GIS, RUSLE and AHP to model soil erosion in West Kameng watershed, Arunachal Pradesh. *Journal of Earth System Science*, 129(1), Article 94. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1356-6>.
- Das, S. et A. Gupta (2021). "Multi-criteria decision based geospatial mapping of flood susceptibility and temporal hydro-geomorphic changes in the Subarnarekha basin, India." *Geoscience Frontiers* 12(5): 101206.
- Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., Owusu, E. K., Pärn, E., et Edwards, D. J. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International Journal of Construction Management*, 19(5), 436–452. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452098>.
- Derdous, O., Djemili, L., Bouchehed, H., et Tachi, S. E. (2015). A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard – A case study of Zardezas reservoir “Skikda, Algeria”. *Journal of Water and Land Development*, 27(1), 15–20. <https://doi.org/10.1515/jwld-2015-0020>.

Références Bibliographiques

- DAUPHINÉ, A. et D. Provitolo (2005). "Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer. Paris." Francia, Armand Colin.
- Dragičević, N., Karleuša, B., et Ožanić, N. (2016). A review of the Gavrilović method (erosion potential method) application. *Gradevinar*, 68(9), 715-725. <https://doi.org/10.14256/JCE.1602.2016>
- Ding, L., Ma, L., Li, L., Liu, C., Li, N., Yang, Z., Yao, Y., et Lu, H. (2021). A survey of remote sensing and geographic information system applications for flash floods. *Remote Sensing*, 13(9), 1818. <https://doi.org/10.3390/rs13091818>.
- Kumar, P. D., Gopinath, G., et Seralathan, P. (2007). Application of remote sensing and GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(24), 5583–5601. <https://doi.org/10.1080/01431160601086050>.
- dos Santos, J. C. N., Andrade, E. M., Guerreiro, M. J. S., Medeiros, P. H. A., Palácio, H. A. Q., et Araújo Neto, J. R. (2017). Effect of rainfall characteristics on runoff and water erosion for different land uses in a tropical semiarid region. *Water Resources Management*, 31(1), 173–185. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1532-y>.
- Ebhuoma, O., Gebreslasie, M., Ngetar, S. N., Phinzi, K., et Bhattacharjee, S. (2022). Soil erosion vulnerability mapping in selected rural communities of uThukela catchment, South Africa, using the Analytic Hierarchy Process. *Earth Systems and Environment*, 6(4), Article 851. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00308-y>.
- El Garouani, A., Merzouk, A., et Ozer, A. (2003). Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. In *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (IAHS Publication 278*, pp. 380–388). IAHS.
- Elkhrachy, I. (2015). "Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA)." *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 18(2): 261-278.
- Evelpidou, N. et T. d. Figueiredo (2009). *Soil protection in sloping mediterranean agri-environments: lectures and exercises*, Instituto Politécnico de Bragança.
- Farhan, Y. et S. Nawaiseh (2015). "Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques." *Environmental earth sciences* 74(6): 4649-4669.
- Fredj, A., Mahamdallie, M., et Bouzar, L. (2024). Assessing soil erosion through the implementation of the RUSLE model and geospatial technology in the Isser watershed, northern Algeria. *Water Supply*. Advance online publication. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.154>.
- Fuchs, S., Birkmann, J., et Glade, T. (2012). Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges. *Natural Hazards*, 64(3), 1969–1975. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0352-9>.

Références Bibliographiques

- Fuchs, S., Kuhlicke, C., et Meyer, V. (2011). Editorial for the special issue: vulnerability to natural hazards—the challenge of integration. *Natural Hazards*, 58(2), 609–619. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9825-5>.
- Frydrych, R., Gozé, E., et Héquet, E. (1993). Effet de l'humidité relative sur les résultats obtenus au thermodétecteur. *Coton et Fibres Tropicales*, 48(4), 305–311.
- Ganasri, B. et H. Ramesh (2016). "Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin." *Geoscience Frontiers* 7(6): 953-961.
- Goumrassa, A., Guendouz, M., Guettouche, M. S., et Belaroui, A. (2021). Flood hazard susceptibility assessment in Chiffa wadi watershed and along the first section of the Algeria North–South highway using GIS and AHP method. *Applied Geomatics*, 13(4), 565–585. <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00381-4>.
- Gani, A. N. et S. M. Assarudeen (2012). "A new operation on triangular fuzzy number for solving fuzzy linear programming problem." *Applied Mathematical Sciences* 6(11): 525-532.
- Gayen, A., Saha, S., et Pourghasemi, H. R. (2020). Soil erosion assessment using RUSLE model and its validation by FR probability model. *Geocarto International*, 35(15), 1750–1768. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1581272>.
- Guesri, M. (2021). Influence de la variabilité climatique sur la production des sédiments (Thèse de doctorat, Université de Tlemcen - Abou Bekr Belkaid). Département Hydraulique.
- Hagras, A. (2023). "Estimating water erosion in the EL-Mador Valley Basin, South-West Matrouh City, Egypt, using revised universal soil loss equation (RUSLE) model through GIS." *Environmental Earth Sciences* 82(1): 47.
- Hong, H., Panahi, M., Shirzadi, A., Ma, T., Liu, J., Zhu, A.-X., Chen, W., Kougiaris, I., et Kazakis, N. (2018). Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro-fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. *Science of the Total Environment*, 621, 1124–1141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.114>.
- Ho, W. (2008). "Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review." *European Journal of operational research* 186(1): 211-228.
- Hudson, N. (1993). Field measurement of soil erosion and runoff. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://books.google.dz/books?id=rS1fiFU3rOwC>
- Jamro, S., Dars, G. H., Ansari, K., et Krakauer, N. Y. (2019). Spatio-Temporal Variability of Drought in Pakistan Using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Applied Sciences*, 9(21), 4588. <https://doi.org/10.3390/app9214588>.
- Kasperson, J. X., Kasperson, R. E., Turner, B. L. II, Dow, K., Adger, W. N., Schiller, P. E., et Hsieh, W. (2005). Vulnerability to global environmental change. In R. E. Kasperson (Ed.), *Social contours of risk: Volume II. Risk analysis, corporations and the globalization of risk* (pp. 245–285). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849772556-18>

Références Bibliographiques

- Kavian, A., Hoseinpoor Sabet, S., Solaimani, K., et Jafari, B. (2017). Simulating the effects of land use changes on soil erosion using RUSLE model. *Geocarto International*, 32(1), 97–111. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1130083>.
- Khosravi, K., Pham, B. T., Chapi, K., Shirzadi, A., et Shahabi, H. (2018). A comparative assessment of decision tree algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran. *Science of the Total Environment*, 627, 744–755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.266>.
- Lal, R. (1994). *Soil erosion research methods* (2nd ed.). CRC Press. <https://books.google.dz/books?id=1TK7dEOIM4gC>
- Lal, R. (2001). "Soil degradation by erosion." *Land degradation et development* 12(6): 519-539.
- Lang, M., Chastan, B., et Grelot, F. (2009). La méthode Inondabilité : appropriation par les hydrologues de la vulnérabilité dans le diagnostic sur le risque d'inondation. In *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés* (pp. 244–255).
- Le Bissonnais, Y. (2000). "Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion: la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés." *Ingénieries eau-agriculture-territoires*(22): p. 27-p. 36.
- Lee, J.-Y. et J.-S. Kim (2021). "Detecting areas vulnerable to flooding using hydrological-topographic factors and logistic regression." *Applied Sciences* 11(12): 5652.
- Léone, F., Asté, J.-P., et Leroi, É. (1996). L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain : pour une meilleure quantification du risque / The evaluation of vulnerability to mass movements : towards a better quantification of landslide risks. *Revue de géographie alpine / Journal of Alpine Research*, 84(1), 35–46..
- Li, L., Shi, Z. H., Yin, W., Zhu, D., Ng, S. L., Cai, C. F., et Lei, A. L. (2009). A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou Reservoir area, China. *Ecological Modelling*, 220(23), 3439–3447. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.09.005>.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., et Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7^e éd.). John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-34328-9.
- Liu, Q.-Q., Chen, L., et Li, J.-C. (2001). Influences of slope gradient on soil erosion. *Applied Mathematics and Mechanics*, 22, 510–519. <https://doi.org/10.1023/A:1016303213326>.
- Liu, Y., Weerts, A. H., Clark, M., Hendricks Franssen, H.-J., Moradkhani, S., Seo, D.-J., Schwanenberg, D., Smith, P., van Dijk, A. I. J. M., van Velzen, N., He, M., Lee, H., Noh, S. J., Rakovec, O., et Restrepo, P. (2012). Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(10), 3863–3887. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3863-2012>.
- Madsen, H. et F. Jakobsen (2004). "Cyclone induced storm surge and flood forecasting in the northern Bay of Bengal." *Coastal Engineering* 51(4): 277-296.

Références Bibliographiques

- Madi, M., Hafnaoui, M. A., Hachemi, A., Ben Said, M., Noui, A., Mghezzi Chaa, A., Bouchahm, N., et Farhi, Y. (2020). Flood risk assessment in Saharan regions: A case study (Bechar region, Algeria). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 16(1), 42–60.
- Mahmoud, S. H. et T. Y. Gan (2018). "Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East." *Journal of Cleaner Production* 196: 216-229.
- Marzen, M., Iserloh, T., de Lima, J. L. M. P., Fister, W., et Ries, J. B. (2017). Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management. *Science of the Total Environment*, 590–591, 502–513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.190>.
- Maref, N. (2019). Démarche méthodologique d'adaptation d'un système de prévision aux risques d'inondation en Algérie : cas du bassin versant de l'Oued Mekerra (Nord-Ouest algérien) [Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen].
- Makoka, D., et Kaplan, M. (2005). Poverty and Vulnerability – An Interdisciplinary Approach (MPRA Paper No. 6964). University Library of Munich. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/6964/>.
- Mallick, J., Alashker, Y., Mohammad, S. A. D., Ahmed, M., et Hasan, M. A. (2014). Risk assessment of soil erosion in a semi-arid mountainous watershed in Saudi Arabia by RUSLE model coupled with remote sensing and GIS. *Geocarto International*, 29(8), 915–940. <https://doi.org/10.1080/10106049.2013.868044>.
- Meigh, J. R., Farquharson, F. A. K., et Sutcliffe, J. V. (1997). A worldwide comparison of regional flood estimation methods and climate. *Hydrological Sciences Journal*, 42(2), 225–244. <https://doi.org/10.1080/02626669709492022>.
- Mihi, A., Benarfa, N., et 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/10.1007/s12518-019-00289-0>.
- Moazzam, M. F. U., Lee, B. G., Rahman, A. U., Farid, N., et Rahman, G. (2020). Spatio-statistical analysis of flood susceptibility assessment using bivariate model in the floodplain of River Swat, District Charsadda, Pakistan. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(5), 159–175. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.85010>.
- Mohammed, N., Edwards, R. E., et Gale, A. W. (2018). Optimisation of flooding recovery for Malaysian universities. *Procedia Engineering*, 212, 356–362. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.046>.
- Mokhtari E. (2017). Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement du barrage Ghrib, Thèse de Doctorat E-Sciences, université Hassiba BEN BOUALI, Chlef, Algérie .
- Mokhtari, E., Abdelkebir, B., Djenaoui, A., et Hamdani, N. E. H. (2024). Processus de hiérarchie analytique intégré et processus de hiérarchie analytique flou pour l'évaluation de la

Références Bibliographiques

susceptibilité aux inondations dans le bassin versant du Sahel, Algérie. *Water Practice & Technology*, 19(2), 453–475. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.012>.

Mokhtari, E., Djeddou, M., Hameed, I. A., et Shawaqfah, M. (2024). Avancées dans la prédiction de l'érosion des sols dans le bassin versant du Wadi Sahel-Soummam (Algérie) : analyse comparative entre réseaux de neurones profonds (DNN) et convolutionnels (CNN) intégrés au SIG. *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 104(1), 41–54. <https://doi.org/10.2298/GSGD2401041M>.

Mokhtari, E., Mezali, F., Abdelkebir, B., et Engel, B. (2023). Flood risk assessment using analytical hierarchy process: A case study from the Cheliff-Ghrib watershed, Algeria. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 694–711. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.316>.

Mokhtari, E. H., Merzouk, B., Chikhi, T., et Hamiche, M. S. (2018). Utilisation des systèmes d'information géographique pour la cartographie de l'érosion hydrique des sols du bassin versant du Wadi Sahel-Soummam (Algérie). Dans A. Kallel, M. Ksibi, H. Ben Dhia & N. Khélifi (Éds.), *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions : Proceedings of EMCEI-1, Tunisia 2017* (pp. 1741–1743). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_506

Molinari, D. et J. Handmer (2011). "A behavioural model for quantifying flood warning effectiveness." *Journal of Flood Risk Management* 4(1): 23-32.

Montgomery, D. R. (2007). "Soil erosion and agricultural sustainability." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(33): 13268-13272.

Morgan, R. P. C. (2005/2009). *Soil erosion and conservation* (3^e éd.). Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-405-11781-4.

Moslem, S., Farooq, D., Jamal, A., Almarhabi, Y., Almoshaogeh, M., Butt, F. M., et Tufail, R. F. (2022). An Integrated Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) Model for Studying Significant Factors Associated with Frequent Lane Changing. *Entropy*, 24(3), 367. <https://doi.org/10.3390/e24030367>.

Mostephaoui, T., Saifi, M., Sakaa, B., Hanafi, M. T., et Benazzouz, M. T. (2013). Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'El Hamel (Boussaâda), Algérie. *Journal Algérien des Régions Arides*, 12(1), 131–147.

Msabi, M. M. et M. Makonyo (2021). "Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania." *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 21: 100445.

Munpa, P., Kittipongvises, S., Phetrak, A., Sirichokchatchawan, W., Taneepanichskul, N., Lohwacharin, J., et Polprasert, C. (2022). Climatic and hydrological factors affecting the assessment of flood hazards and resilience using modified UNDRR indicators: Ayutthaya, Thailand. *Water*, 14(10), Article 1603. <https://doi.org/10.3390/w14101603>.

Références Bibliographiques

- Naiman, R. J., et Rogers, K. H. (1997). Large animals and system-level characteristics in river corridors. *BioScience*, 47(8), 521–529. <https://doi.org/10.2307/1313120>.
- Nearing, M. A., Pruski, F. F., & O’Neal, M. R. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(1), 43–50.
- Negese, A., Worku, D., Shitaye, A., & Getnet, H. (2022). Potential flood-prone area identification and mapping using GIS-based multi-criteria decision-making and analytical hierarchy process in Dega Damot district, northwestern Ethiopia. *Applied Water Science*, 12(12), Article 255. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01772-7>.
- Nguyen, H. N., Fukuda, H., & Nguyen, M. N. (2024). Assessment of the susceptibility of urban flooding using GIS with an analytical hierarchy process in Hanoi, Vietnam. *Sustainability*, 16(10), Article 3934. <https://doi.org/10.3390/su16103934>.
- Oldham, K. et K. Astbury (2018). "Evolution of disaster risk governance in Greater Manchester: a case study from the UK." *Procedia engineering* 212: 7-14.
- Olvera, L. Q. (2024, February). Coupling EM-DAT reported flash floods with IMERG precipitation data [Mémoire de Master, Graduate School of Climate Sciences, Université de Berne]. University of Bern Digital Archive.
- ONM (Octobre 2023). République Algérienne Démocratique et Populaire – Ministère de l’Environnement et des Énergies Renouvelables. (2023, octobre). Troisième communication nationale de l’Algérie à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (rev. 7) [Rapport national]. UNFCCC.
- Pham, B. T., Avand, M., Janizadeh, S., Phong, T. V., Al-Ansari, N., Ho, L. S., Das, S., Le, H. V., Amini, A., Bozchaloei, S. K., Jafari, F., et Prakash, I. (2020). GIS-based hybrid computational approaches for flash flood susceptibility assessment. *Water*, 12(3), Article 683. <https://doi.org/10.3390/w12030683>.
- Pham, T. G., Degener, J., et Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>
- Pimentel, D. et M. Burgess (2013). "Soil erosion threatens food production." *Agriculture* 3(3): 443-463.
- Pottier, N. (1998). L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation: évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne), Marne-la-vallée, ENPC.
- Rehman, S., Sahana, M., Hong, H., Sajjad, H., et Ahmed, B. B. (2019). A systematic review on approaches and methods used for flood vulnerability assessment: framework for future research. *Natural Hazards*, 96(2), 975–998. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-03567-z>.
- Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Références Bibliographiques

- Saaty, R. W. (1987). "The analytic hierarchy process—what it is and how it is used." *Mathematical modelling* 9(3-5): 161-176.
- Saaty, T. L. (1978). "Exploring the interface between hierarchies, multiple objectives and fuzzy sets." *Fuzzy sets and systems* 1(1): 57-68.
- Saaty, T. L. (1977). "A scaling method for priorities in hierarchical structures." *Journal of mathematical psychology* 15(3): 234-281.
- Saaty, T. L. (1984). *The analytic hierarchy process: Decision making in complex environments. Quantitative assessment in arms control: mathematical modeling and simulation in the analysis of arms control problems*, Springer: 285-308.
- Saaty, T. L. (2003). "Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary." *European Journal of operational research* 145(1): 85-91.
- Saaty, T. L. (2008). "Decision making with the analytic hierarchy process." *International journal of services sciences* 1(1): 83-98.
- Saha, S. (2003). "Water and wind induced soil erosion assessment and monitoring using remote sensing and GIS." *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*: 315-330.
- Saha, S. (2018). "Geo-Environmental Evaluation for Exploring Potential Soil Erosion Areas of Jainti River Basin Using AHP Model, Eastern India." *Universal Journal of Environmental Research & Technology* 7(1).
- Salimi, M., et Al-Ghamdi, S. G. (2020). Climate change impacts on critical urban infrastructure and urban resiliency strategies for the Middle East. *Sustainable Cities and Society*, 54, Article 101948. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101948>.
- Schanze, J. (2006). *Flood risk management—a basic framework. Flood risk management: Hazards, vulnerability and mitigation measures*, Springer.
- Schumann, A. H. (2011). *Flood risk assessment and management: How to specify hydrological loads, their consequences and uncertainties*, Springer Science & Business Media.
- Scholten, T., et Seitz, S. (2019). Soil erosion and land degradation [Editorial]. *Soil Systems*, 3(4), 68. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3040068>.
- Seejata, K., Yodying, A., Wongthadam, T., Mahavik, N., et Tantanee, S. (2018). Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province. *Procedia Engineering*, 212, 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.044>.
- Sodnomdarjaa, E., Lehmkuhl, F., Karthe, D., Knippertz, M., et Ganbat, G. (2023). Assessment of soil loss using RUSLE around Mongolian mining sites: a case study on soil erosion at the Baganuur lignite and Erdenet copper–molybdenum mines. *Environmental Earth Sciences*, 82, Article 230. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10897-0>.
- Sumi, T., Kantoush, S. A., et Saber, M. (Éds.). (2021). *Wadi Flash Floods: Challenges and Advanced Approaches for Disaster Risk Reduction*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4>.

Références Bibliographiques

- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., et Perera, B. J. C. (2017). Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. *Ecological Indicators*, 75, 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.043>.
- Tairi, A., Elmouden, A., et Aboulouafa, M. (2019). Soil erosion risk mapping using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information System in the Tifnout-Askaoun watershed, southern Morocco. *European Scientific Journal*, 15(30), 338–355. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n30p338>.
- Tanoue, M., Hirabayashi, Y., et Ikeuchi, H. (2016). Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years. *Scientific Reports*, 6, Article 36021. <https://doi.org/10.1038/srep36021>.
- Tessema, Y. M., Jasińska, J., Yadeta, L. T., Świtoniak, M., Puchałka, R., et Gebregeorgis, E. G. (2020). Soil loss estimation for conservation planning in the Welmel watershed of the Genale Dawa Basin, Ethiopia. *Agronomy*, 10(6), Article 777. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060777>.
- Torterotot, J.-P. (1993). *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes* (Thèse de doctorat, École nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France). ENPC..
- Troeh, F. R., Hobbs, J. A., et Donahue, R. L. (1980, réimpr. 2004). *Soil and Water Conservation for Productivity and Environmental Protection* (4^e éd.). Prentice Hall. ISBN 0-13-096807-2.
- Tucker, C. J. (1979). "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation." *Remote sensing of Environment* 8(2): 127-150.
- Ullah, K., et Zhang, J. (2020). GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of Panjkora River Basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. *PLOS ONE*, 15(3), e0229153. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229153>.
- Vojtek, M., et Vojteková, J. (2019). Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process. *Water*, 11(2), 364. <https://doi.org/10.3390/w11020364>.
- Wail, F. (2018). *Étude du risque hydrologique en zone urbaine : cas de la région de Oum El Bouaghi* [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra]. Thèses-Algérie.
- Ward, P. J., Jongman, B., Sperna Weiland, F., Bouwman, A., van Beek, R., Bierkens, M. F. P., Ligtoet, W., et Winsemius, H. C. (2013). Assessing flood risk at the global scale: model setup, results, and sensitivity. *Environmental Research Letters*, 8(4), Article 044019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044019>.
- Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 527, 1130–1141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.008>.
- Yahiaoui, A. (2012). *Inondations torrentielles : cartographie des zones vulnérables en Algérie du nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès)* [Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger]. École Nationale Polytechnique Repository.

Références Bibliographiques

Yariyan, P., Avand, M., Abbaspour, R. A., Torabi Haghighi, A., Costache, R., Ghorbanzadeh, O., Janizadeh, S., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping using an improved analytic network process with statistical models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2282–2314. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836036>.

Zeroual Sara. (2022). " Etude des précipitations extrêmes dans le contexte de changement climatique : Cas du bassin versant de Hodna " [Thèse, Doctorat LMD, Université Mohamed Boudiaf - M'sila]

Zeghmar, A., Marouf, N., & Mokhtari, E. (2022). Assessment of soil erosion using the GIS-based erosion potential method in the Kebir Rhumel Watershed, Northeast Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 52, 133-144. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140383>.

Zeghmar, A., Mokhtari, E., & Marouf, N. (2024). A machine learning approach for RUSLE-based soil erosion modeling in Beni Haroun dam Watershed, Northeast Algeria. *Earth Science Informatics*, 17(4), 2921–2936. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01305-7>.

Zekouda, N., Meddi, M., LaVanchy, G. T., & Remaoun, M. (2020). The impact of human activities on flood trends in the semi-arid climate of Cheliff basin, Algeria. *Water Resources*, 47(3), 409–420. <https://doi.org/10.1134/S0097807820030136>.

Zzaman, R. U., Nowreen, S., Billah, M., & Islam, A. S. (2021). Flood hazard mapping of Sangu River basin in Bangladesh using multi-criteria analysis of hydro-geomorphological factors. *Journal of Flood Risk Management*, 14(3), e12715. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12715>.

Annexe 6

Formulaire de levée de réserves après soutenance

Année universitaire : 2024/2025

Etablissement universitaire : Université de M'sila

Faculté ou Institut : Technologies

Département : Hydraulique

Données d'identification du doctorant :

Nom et prénom du candidat : ... **Benaïche Morad**.....

Intitulé de la Thèse : **Etude de sensibilité de l'érosion hydrique et des zones à risques d'inondations aux pluies extrêmes dans les bassins versants (K'sob) Hodna / (Boussellam) Soummam**".

Données d'identification du membre de jury :

Nom et prénom : **Dougha Mostafa**

Grade : **Professeur**

Lieu d'exercice : **Université de M'sila**

Vu le procès-verbal de soutenance de la thèse suscitée comportant les réserves suivantes :

Quelques erreurs mineures ont été relevées, portant sur l'orthographe, des fautes de frappe, la longueur excessive de certaines phrases, ainsi que la nécessité de restructurer quelques références bibliographiques.

Et après constatation des modifications et corrections suivantes :

Les erreurs signalées ont été corrigées dans la version définitive de la thèse. L'orthographe et les fautes de frappe ont été rectifiées, les phrases concernées ont été reformulées pour plus de clarté, et les références bibliographiques ont été réorganisées aux observations du jury.

Je déclare en ma qualité de président de jury de soutenance que la thèse citée remplit toutes les conditions exigées et permet au doctorant de déposer son dossier en vue de l'obtention de l'attestation de succès.

Le 18/06/2025

Président de jury de soutenance :

Pr. Dougha Mostafa

