

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABDELHAMID BEN BADIS MOSTAGANEM



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences agronomiques

Laboratoire Biodiversité et Conservation des Eaux et des Sols

Thèse

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Filière : Sciences Agronomiques

**Spécialité : Gestion Conservatoire des Eaux, des Sols et de
l'Environnement**

Présenté par :

BENCHETTOUH Ahmed

Sous le thème :

**L'EROSION HYDRIQUE DANS LES REGIONS MARNEUSES DU
TELL ORANAIS CAS DES BASSINS VERSANTS DE LA MINA
(RELIZANE) ET KRAMIS (MOSTAGANEM)**

Soutenu publiquement, le 09/07/2019 devant le jury composé de :

M. LOTMANI Brahim	Professeur Président	Université de Mostaganem
M. MEDERBAL Khalladi	Professeur Examineur	Université de Tiaret
M. ACHITE Mohammed	Professeur Examineur	Université de Chlef
M. KOURI Lakhdar	Professeur Promoteur	Université de Mostaganem
Mme. JEBARI Sihem	Professeur Invitée	INRGREF (Tunisie)

Année universitaire 2018/2019

Résumé

Pour répondre aux besoins pressants en eau en Algérie, l'Etat a mis en place une stratégie consistant en la création d'infrastructures hydrauliques de mobilisation des ressources en eaux superficielles. 74 barrages sont présentement en exploitation, ces ouvrages s'envasent à un rythme rapide, engendrant une perte estimée annuellement à 45 millions m³. Les barrages Saada et Kramis localisés dans le Tell oranais, avec une capacité en eau respectivement de l'ordre de 241 millions m³ et 45,4 millions m³ jouent un rôle crucial dans l'économie régionale. La protection de ces deux barrages contre les processus érosifs est un objectif économique pressant. Pour ce faire, on a utilisé l'approche RUSLE-AHP/SIG afin de cartographier l'aléa érosif. Parallèlement, une panoplie de tests statistiques (Khi-deux, tests de corrélation, ACP ... etc.) ont été utilisés pour pouvoir analyser les facteurs du milieu influençant les pertes en sol ainsi que de démêler leur interdépendance vis-à-vis du phénomène en question. Cette approche empirique permet d'évaluer les pertes en sol en tout point du bassin versant. Les résultats obtenus dans la Mina, suite à une subdivision de celle-ci en 1 315 parcelles homogènes, mettent en évidence une perte totale annuelle de l'ordre de 60 millions de tonnes avec une moyenne de 11,2 t/ha. Dans le bassin versant de Kramis, subdivisé en 6 934 parcelles, la perte totale annuelle était 82 millions de tonnes avec une perte moyenne de 27,3 t/ha. Sans toutefois tenir compte de l'action humaine dans la fragilisation des sols, la topographie contribue le plus dans les pertes en sol avec un poids de 43,3%. Elle est suivie respectivement par le couvert végétal avec 24,4 %, l'agressivité climatique avec 15,2 %, l'aspect des pentes avec 8,9 %, la densité de drainage avec 5,3 % et en dernier l'érodibilité du sol avec 3,1 %. Plus encore, cette approche donne l'opportunité de visualiser le territoire, gérer les pratiques CES existantes et réfléchir sur les possibilités d'aménagement. Dans le bassin de l'oued Kramis, 78,4 % de la surface du territoire, fournissent plus de 97 % des pertes totales nécessitant une panoplie de techniques antiérosives. Ces dernières permettraient de passer une moyenne annuelle des pertes en sol de l'ordre de 27,3 t/ha à 6,9 t/ha.

Mots clés: Algérie, Tell oranais, Bassin versant, Oued Mina, Oued Kramis, l'érosion hydrique, RUSLE-AHP/SIG.

Abstract

To meet the pressing water needs in Algeria, the state has put in place a strategy consisting of the creation of hydraulic infrastructure for the mobilization of surface water resources. 74 Dams are currently in operation; these structures are silting up at a rapid pace, generating an estimated annual loss of 45 million m³. Saada and Karmis dams located in the Oranian hill, with a water capacity of respectively 241 million and 45.4 million play a crucial economic role in this region. The protection of these two dams against erosive processes is a pressing economic goal. To do this, the RUSIE-AHP/GIS approach was used to map the erosive hazard. In addition, a variety of statistical tests (Khi-square, correlation tests, PCA, ... etc.) were used to analyze the environmental factors influencing soil loss and to disentangle their interdependence with the studied phenomenon. This empirical approach enables to evaluate soil losses at any point in the studied watershed. The results obtained in the Mina, following a subdivision of 1315 homogeneous land parcels, show a total annual loss of the order of 60 million tons with an average loss of 11.2 t / ha per year. In the Kramis watershed, subdivided into 6934 land parcels, the total annual loss was 82 million tonnes with an average loss of 27.3 t / ha per year. If we omit the human action in the weakening of the soil, the topographic contributes heavily to the estimated soil losses with a weight of 43.3%. It is respectively followed by vegetation cover with 24.4%, climatic aggressiveness with 15.2%, slope appearance with 8.9%, drainage density with 5.3% and lastly, soil susceptibility to erosion with 3.1%. Moreover, this approach gives the opportunity to visualize the territory, manage existing CES practices and reflect on the possibilities of development plan. In the Kramis catchment, 78.4% of the territory's surface provides more than 97% of the total losses requiring a range of anti-erosion techniques. These last would make it possible to pass an average annual losses in soil of the order of 27.3 t/ha to 6.9 t/ha.

Key words: Algeria, Oranian hill, Catchment, Wadi Mina, Wadi Kramis, RUSIE-AHP/GIS.

ملخص

لتلبية الاحتياجات الملحة للمياه في الجزائر ، وضعت الدولة استراتيجية تعتمد على انشاء هياكل قاعدية هيدرولوجية لتعبئة المياه السطحية. ان 74 سداً حالياً قيد الاستغلال تتعرض لتوحد سريع يقدر سنويا بـ 45 مليون متر مكعب. يلعبا سدي مينا وكراميس الواقعان في التل الوهراني، ذو سعة تبلغ على التوالي 241 مليون متر مكعب و 45.4 مليون متر مكعب ، دوراً مهماً في اقتصاد المنطقة. ان حماية هذين السدين ضد حت التربة هدف اقتصادي عاجل. للقيام بذلك، تم استخدام منهجاً هاج مختلفاً من الاختبارات الإحصائية (Khi-deux, tests de corrélation, ACP ... etc.) لتحليل العوامل البيئية التي تؤثر على تآكل التربة وتحليل كل منها على حدة لدراسة هذه الظاهرة. هذا المنهج التجريبي يجعل من الممكن تقييم خسائر التربة في أي نقطة من الاحواض المائية المدروسة. حيث أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في سد مينا، بعد تقسيمها إلى 1315 قطعة أرضية متجانسة، خسارة سنوية إجمالية تبلغ حوالي 60 مليون طن بمتوسط 11.2 طن / هكتار. اما بخصوص حوض سد كراميس، المقسم إلى 6934 قطعة أرض، بلغ إجمالي الخسارة السنوي 82 مليون طن مع متوسط خسارة يقدر بـ 27.3 طن / هكتار. حيث انه دون الأخذ بعين الاعتبار العامل البشري في تأثيره على جرف التربة، فإن التضاريس تساهم بأكثر قدر في الخسائر في التربة بتأثير قدر بـ 43.3%. يتبع ذلك الغطاء النباتي بنسبة 24.4% ، المساواة المناخية بنسبة 15.2% ، المنحدر بنسبة 8.9% ، وكثافة الصرف المائي بنسبة 5.3% وأخيراً هشاشة التربة مع 3.1%. علاوة على ذلك ، يتيح هذا المنهج الدراسي الفرصة لتصوير المنطقة في إدارة تقنيات الحماية والتسيير المحافظ على التربة والماء CES والتفكير في إمكانيات التنمية. حيث في حوض وادي كراميس، ما نسبته 78.4% من مساحة الكلية يساهم في أكثر من 97% من إجمالي خسائر التربة يتطلب مجموعة من التقنيات ضد التوحد. حيث ان معدل التآكل بعد تجسيد هذه التقنيات ميدانيا سينخفض الى معدل سنوي 6.9 طن / هكتار بعد ما كان 27.3 طن/هكتار.

الكلمات المفتاحية : الجزائر، التل الوهراني، الحوض المائي، وادي مينا، وادي كراميس، الحت المائي،
RUSLE/AHP/SIG

Remerciements

Même si cette Thèse est un travail personnel, je souhaite ici rendre hommage et exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et à son aboutissement.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon Directeur de thèse, le Professeur KOURI Lakhdar. Tout au long de ce travail, il a eu m'apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.

Ils s'adressent aussi à Madame JEBARI Sihem, Professeur à l'Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts (Tunisie) qui a également participé vivement à ce travail de recherche. Son écoute, ses connaissances, ses critiques et ses conseils constructifs m'ont guidé tout au long de cette thèse.

Ils s'adressent également mes profondes reconnaissances aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner cette thèse et de m'avoir délivré le titre de docteur.

Monsieur LOTMANI Brahim, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis (Mostaganem), Monsieur ACHITE Mohamed Professeur à l'Université Hassiba Benbouali (Chlef) et Monsieur MEDARBEL Khalladi, Professeur à l'Université Ben Khaldoun (Tiaret).

Benchettouh Ahmed

Liste des Abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principale

AHP : Analytical Hierarchy Process

ANBT: Agence Nationale des Barrages et de Transferts

CEHQ: Centre d'Expertise Hydrique du Québec

CES: Conservation de l'Eau et des Sols

CMPEPCQJ_20mm : Cumul Mensuel des Précipitations des Evénements Pluvieux Continus
de Quelques Jours ≥ 20 mm

CN : Courbes de Niveau

COO : Classification Orientée-Objet

DSA : Direction des Services Agricoles

DH : Direction d'hydraulique

ENVI : Environment for Visualizing Images

ETM: Enhanced Thematic Mapper

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus

GTZ: Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit

INRGREF: Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (Tunisie)

MADR: Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche

ML: Merge Level

MNT: Modèle Numérique de Terrain

MRE: Ministère des Ressources en Eau

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

Ocs : Ouvrage de capture de sédiments

OLI : Operational Land Imager

PCS : Projected Coordinate System

PIR : Proche InfraRouge

Rc : Retenues collinaires

RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid & Milieu (National Institute of Public Health
and the Environment, Pays-Bas)

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

SBV : Sous Bassin Versant

SIG : Système d'Information Géographique

SL : Scale Level

SMBAli : Sidi Mhamed Benali

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission ou images satellitaires optique et radar

SSSM : Seuil de Saturation des Sols Marneux

THRS: Très Haute Résolution Spatiale

TIRS : Thermal Infrared Sensor

TM : Thematic Mapper

TM+ : Thematic Mapper Plus

USA : United States of America

USDA : United States Department of Agriculture

USLE : Universal Soil Loss Equation

UTM : Universal Transverse Mercator

Liste des figures

Figure 1. Diagramme du plan de la Thèse	6
Figure 2. Organigramme méthodologique de l'approche RUSLE/SIG (Benchettouh <i>et al.</i> , 2017) ...	30
Figure 3. Localisation de la zone d'étude	40
Figure 4. Courbe hypsométrique du bassin de l'oued Mina	48
Figure 5. Courbe hypsométrique du bassin de l'oued Kramis:.....	48
Figure 6. Carte des pentes du bassin de l'oued Kramis	50
Figure 7. Carte des pentes du bassin de l'oued Mina	50
Figure 8. Carte d'exposition des reliefs du bassin versant de l'oued Kramis	52
Figure 9. Carte d'exposition des reliefs du bassin de l'oued Mina	53
Figure 10. Réseau hydrographique du bassin de l'oued Kramis	55
Figure 11. Réseau hydrographique du bassin de l'oued Mina	56
Figure 12. Projections des SBV sur les plans factoriels F1 et F2:.....	62
Figure 13. Résultats de la validation croisée des données de précipitations par la méthode <i>Kriging/CoKriging</i>	65
Figure 14. Résultats de la validation croisée des données de températures par la méthode <i>Kriging/CoKriging</i>	65
Figure 15. Répartition spatiale de précipitations moyennes annuelles dans le bassin de l'oued Kramis:.....	66
Figure 16. La quantité des précipitations (mm) en fonction des altitudes maximales (m):.....	67
Figure 17. La quantité des précipitations (mm) en fonction des degrés longitudinaux (dd):...	67
Figure 18. Les températures moyennes annuelles en fonction des altitudes maximales	68
Figure 19. Répartition spatiale des températures moyennes annuelles dans le bassin de l'oued Kramis	69
Figure 20. Surfaces d'influence des stations pluviométriques déterminées par la méthode des polygones de Thiessen:.....	70
Figure 21. Diagramme Ombrothermique (SMBAli: 1994 – 2016)	72
Figure 22. Fluctuation annuelle des précipitations (SMBAli: 2010 – 2016)	74

Figure 23. Relation entre les précipitations et les températures max et min journalières (SMBAlI: 2010 – 2016)	75
Figure 24. Évolution de la densité de population rurale (1998 – 2016)	79
Figure 25. Diagramme de la méthode de classification orientée-objet de l'occupation du sol	85
Figure 26. Diagramme de la méthode de classification orientée-objet de la lithologie du sol	86
Figure 27. Carte d'occupation du sol du bassin de l'oued Kramis	90
Figure 28. Carte lithologique du bassin de l'oued Kramis	95
Figure 29. Evolution de la surface de la cuvette du barrage	96
Figure 30. Évolution spatio-temporelle de la cuvette du barrage Kramis (2004 - 2017)	97
Figure 31. Répartition spatiale de l'érosivité des pluies dans le bassin de l'oued Mina	102
Figure 32. Analyse géostatistique des paramètres entraînés appliquant un contrôle de validation croisée sur le facteur R estimé	103
Figure 33. Carte d'érodibilité du sol du bassin de la Mina	105
Figure 34. Carte de la topographie du bassin de l'oued Mina	107
Figure 35. La régression linéaire du C en fonction du NDVI	108
Figure 36. Carte du facteur C du bassin de l'oued Mina	109
Figure 37. Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'oued Mina	110
Figure 38. Carte des pertes en sol du bassin de l'oued Mina	114
Figure 39. Distribution des pertes en sol par rapport à la moyenne dans le bassin de la Mina	118
Figure 40. Répartition spatiale de l'érosivité des pluies dans le bassin de l'oued Kramis	124
Figure 41. L'érodibilité des sols (K) du bassin de l'oued Kramis	127
Figure 42. La topographie (LS) du bassin de l'oued Kramis	128
Figure 43. Carte du NDVI du bassin de l'oued Kramis	129
Figure 44. Carte du couvert végétal (C) du bassin de l'oued Kramis	130
Figure 45. Evolution des pertes en sol en fonction la densité de drainage	131
Figure 46. Les pertes moyennes en sol en fonction de l'exposition des pentes :	132
Figure 47. Schéma du Modèle <i>Builder</i> de l'AHP	133
Figure 48. Carte des pertes en sol selon le modèle RUSLE du bassin de l'oued Kramis	134

Figure 49. Distribution des pertes en sol en fonction des surfaces	135
Figure 50. Distribution des pertes en sol par rapport à la moyenne dans le bassin de l'oued Kramis	136
Figure 51. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction de l'érosivité des pluies	138
Figure 52. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction de l'érodibilité	140
Figure 53. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction de la topographie	141
Figure 54. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction du couvert végétal	141
Figure 55. Carte de localisation des SBV de l'oued Kramis	142
Figure 56. L'état de deux retenues collinaires Benzakouane et Kaider	150
Figure 57. Les trois catégories des pertes en sol	153
Figure 58. Les différents types d'aménagements au niveau du BV de l'oued Kramis	160
Figure 59. Sites d'implantation des retenues collinaires et de l'ouvrage de sédimentation	160
Figure 60. Les classes des pertes en sol après aménagement	160
Figure 61. Prévion du volume utile du réservoir du barrage avec et sans interventions antiérosives	161
Figure 62. Sites d'implantation de deux nouvelles retenues collinaires sur SBS2 et SBV3	162

Liste des photos

Photo 1 (a,b). L'effet de <i>splash</i> suivi par le déplacement des particules du sol par ruissellement (Le Bissonais <i>et al.</i> , 2002) :.....	14
Photo 2. Erosion par rigoles :.....	15
Photo 3. Erosion par ravinement :.....	15
Photo 4. Dispositif d'une parcelle expérimentale (Mohamadi et Kavian, 2015) :.....	19
Photo 5. Dispositif de parcelles expérimentales d'un simulateur des pluies (Site web : www.alismiri.com/uploads/coursces1.pdf consulté le 13/10/2017) :.....	26
Photo 6. Vue sur les barrages : oued Kramis à gauche et la Mina à droite (ANBT, 2017) :....	41
Photo 7. Cultures de fonds des vallées irriguées (Auteur, 2013) :.....	51
Photo 8. Un relief escarpé coiffé par des sommets des collines à activité agricole (Auteur, 2013) :.....	51
Photo 9. Déversement de la cuvette du barrage Kramis (ANBT: 27/01/2017) :.....	98
Photo 10. Technique de terrasses (ANBT, 2010) :.....	112
Photo 11: Cultures maraichères suivant les CN (Auteur, 2012) :.....	112
Photo 12. Reboisements en banquettes (Algérie) :.....	112
Photo 13. Haie vive antiérosive (Algérie) :.....	112
Photo 14. Plantation fruitière (Algérie) :.....	112
Photo 15. Les cordons de pierre suivant les CN :.....	112
Photo 16. Quelques aspects de dégradation du sol (A): dessiccation des terres marneuse, (B): éboulement, (C): glissement, (D): ravins (Auteur, 2017) :.....	149

Liste des tableaux

Tableau 1. Les formes d'incision de l'érosion linéaire (Ludwing <i>et al.</i> , 1996)	15
Tableau 2. L'échelle fondamentale des nombres absolus (Saaty, 2008)	35
Tableau 3. Matrice de comparaison par paires et calcul de son vecteur propre	35
Tableau 4. Valeurs de CA pour $n = 1, 2, 3, \dots, 11$ (Saaty, 1980)	36
Tableau 5. Les stations pluviométriques du bassin de l'oued Kramis	44
Tableau 6. Les stations pluviométriques du bassin de l'oued Mina	45
Tableau 7. Classes des altitudes des deux bassins versants	47
Tableau 8. Caractéristiques physiographiques des bassins versants de la zone d'étude	55
Tableau 9. Caractéristiques physiographiques des SBV de l'oued Kramis:.....	59
Tableau 10. Valeurs propres de la matrice de corrélation des paramètres physiographiques des SBV	60
Tableau 11. Matrice de corrélation entre les variables physiographiques	60
Tableau 12. Corrélation entre variables et facteurs	61
Tableau 13. Les valeurs du coefficient d'abattement (Ki) (1994 - 2016)	67
Tableau 14. Pluviométrie moyenne interannuelle (1994 - 2016)	71
Tableau 15. Les températures moyennes et les précipitations mensuelles de la station de SMBAli (1994 - 2016)	71
Tableau 17. L'indice de Desfontaines (SMBAli: 1994 - 2016)	73
Tableau 18. Evénements torrentiels et les températures maxima et minima journalières (SMBAli : 2010 – 2016)	76
Tableau 19. Evolution de la population rurale du bassin de l'oued Kramis (1998 - 2016)	79
Tableau 20. Caractéristiques spectrales et spatiales des satellites Landsat 4-5 (TM) et Landsat 8 (OLI et TIRS)	84
Tableau 21. Résultat de la segmentation de l'occupation du sol au seuil de forte compatibilité	87
Tableau 22. Tableau croisé <i>Merge level</i> * Compatibilité * <i>Scale level</i> de l'occupation du sol ..	88
Tableau 23. Tests du Khi-deux (χ^2) de l'occupation du sol	89
Tableau 24. Classes d'occupation des sols du bassin de l'oued Kramis	89

Tableau 25. Résultat de la segmentation de la lithologie du sol au seuil de forte compatibilité	93
Tableau 26. Tableau croisé <i>Merge level</i> * Compatibilité * <i>Scale level</i> de la lithologie du sol ..	94
Tableau 27. Tests de Khi-deux (χ^2) de la lithologie du sol	95
Tableau 28. Les classes de lithologie des sols du bassin de l'oued Kramis	95
Tableau 29. L'érosivité des pluies (R) du bassin de l'oued Mina	101
Tableau 30. Les types des sols du bassin de l'oued Mina	104
Tableau 31. Les classes des pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Mina	117
Tableau 32. Les pertes en sol en fonction des classes d'occupation des sols du bassin de l'oued Mina	120
Tableau 33. L'érosivité des pluies du bassin de l'oued Kramis	123
Tableau 34. Résultats des analyses granulométriques des altérites du bassin de l'oued Kramis	126
Tableau 35. Les classes des valeurs du facteur K du bassin de l'oued Kramis	126
Tableau 36. Les types des sols du bassin de l'oued Kramis	127
Tableau 37. Les classes de la topographie du bassin de l'oued Kramis	128
Tableau 38. Le résultat de l'indépendance des facteurs RUSLE (ACP)	131
Tableau 39. Les classes des pertes en sol dans le bassin de l'oued Kramis (RUSLE)	134
Tableau 40. Taux moyen des pertes en sol calculé au moyen de RUSLE dans quelques bassins similaires au bassin versant de l'oued Kramis	136
Tableau 41. Variabilité spatiale des pertes en sol dans quelques bassins au Nord algérois	137
Tableau 42. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction de classes de l'érosivité des pluies	138
Tableau 43. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction de l'érodibilité du sol	139
Tableau 44. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction de la topographie	140
Tableau 45. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction du couvert végétal	141
Tableau 46. Les pertes moyennes en sol des SBV de l'oued Kramis	143
Tableau 47. Matrice de comparaison par pair des facteurs d'AHP	144
Tableau 48. Valeurs de CA pour n = 6	144
Tableau 49. Classes de sévérité des pertes en sol par l'approche RUSLE/AHP	145

Tableau 50. Les catégories des pertes en sol :.....	153
Tableau 51. L'effet de quelques aménagements antiérosifs sur les pertes en sol :.....	154
Tableau 52. Les pertes en sol produisent avant et après la mise en place de différentes techniques d'aménagement dans les zones prioritaires :.....	155
Tableau 53. Sites d'implantation des retenues collinaires et de l'ouvrage de capture de sédiments dans les oueds :.....	157

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION GENERALE	1
1.1. Contexte et problématique.....	1
1.2. Objectif de l'étude.....	5
1.3. Plan de la Thèse	5

PARTIE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EROSION HYDRIQUE ET ANALYSE DES CARACTERES PHYSIQUES DU MILIEU

CHAPITRE I

L'EROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

1.1. Introduction.....	7
1.2. Les facteurs de l'érosion hydrique.....	8
1.2.1. Le climat.....	8
1.2.2. La lithologie.....	8
1.2.3. La topographie.....	9
1.2.4. Le couvert végétal.....	10
1.3. Techniques de Conservation des Eaux et des Sols (CES)	12
1.4. Les formes de l'érosion hydrique.....	13
1.4.1. Érosion en nappe	14
1.4.2. Érosion linéaire.....	14
1.4.3. Érosion en masse.....	15
1.5. Conséquences de l'érosion hydrique.....	16
1.6. Méthode d'évaluation de l'érosion hydrique	18
1.6.1. Méthodes quantitatives	18
1.6.1.1. Parcelles expérimentales.....	19
1.6.1.2. Les mesures par repères	20
1.6.1.3. Techniques de traçage des sources des sédiments	20
1.6.1.4. Les stations de jaugeage: turbidimétrie (débits solides)	22
1.6.1.5. Les mesures d'envasement et d'accumulation des sédiments: la bathymétrie	24
1.6.2. Méthodes qualitatives	25
1.6.2.1. Simulateur de pluie	25
1.6.2.2. Méthodes cartographiques	26
1.7. Méthodes d'études de l'aléa érosif dans la zone d'étude	27
1.7.1. Le modèle RUSLE.....	27
1.7.1.1. Utilisation et objectifs de RUSLE	28
1.7.1.2. Le principe du modèle.....	29
1.7.1.3. Les facteurs du modèle	31
1.7.1.3.1. R: L'érosivité des pluies	31
1.7.1.3.2. K: L'érodibilité du sol	32
1.7.1.3.3. LS: La topographie	33
1.7.1.3.4. C: Le couvert végétal	33
1.7.1.3.5. P: Les techniques antiérosives.....	34
1.7.2. La technique AHP	35
1.8. Conclusion.....	37

CHAPITRE II
 CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
 DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. Introduction.....	38
2.2. Contexte géographique et climatique de la région d'étude :	39
2.3. Matériel et méthodes.....	42
2.3.1. Délimitation des bassins versants de la zone d'étude :	42
2.3.2. Modélisation des caractères physiographiques :	43
2.3.3. Modélisation des paramètres climatiques :	44
2.3.3.1. Données utilisées.....	44
2.3.3.2. Caractéristiques des stations pluviométriques.....	44
2.4. Résultats et discussion.....	46
2.4.1. Analyse physiographique.....	46
2.4.1.1. Les courbes de niveau.....	46
2.4.1.2. Les pentes.....	49
2.4.1.3. L'exposition des reliefs :	52
2.4.1.4. Le réseau hydrographique.....	53
2.4.1.4.1. La densité de drainage (D_d) :	56
2.4.1.4.2. La densité hydrographique (F) :	58
2.4.1.4.3. La fréquence des cours d'eau (F1) :	58
2.4.1.4.4. Le coefficient de torrentialité (Ct) :	58
2.4.1.5. Analyse des paramètres physiographiques des SBV de l'oued Kramis.....	59
2.4.2. Analyse climatique du bassin de l'oued Kramis :	64
2.4.2.1. Etude de la fiabilité des données climatiques (précipitations et températures).....	64
2.4.2.2. Variabilité spatiotemporelle des facteurs climatiques :	66
2.4.2.2.1. Les pluies :	66
2.4.2.2.2. Les températures :	68
2.4.2.3. La station de référence :	70
2.4.2.3.1. Caractéristiques bioclimatiques.....	70
2.4.2.3.2. Les événements pluvieux et les températures journalières maximales :	73
2.5. Analyses socio-économiques du bassin de l'oued Kramis :	78
2.5.1. La population rurale :	78
2.5.2. Evolution de la population rurale entre 1998 et 2016.....	79
2.6. Conclusion.....	80

CHAPITRE III
 ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET
 L'EXTRACTION DE LA COUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT
 DE L'OUED KRAMIS

3.1. Introduction.....	82
3.2. Matériel et méthodes.....	83
3.2.1. Images satellites utilisées.....	84
3.2.2. Principe et démarche de la méthode :	84
3.2.3. Choix du pourcentage de niveau <i>Scale level</i> et <i>Merge level</i>	86
3.3. Résultats et discussion.....	87
3.3.1. L'occupation du sol :	87
3.3.1.1. Segmentation :	87
3.3.1.2. Extraction des classes de l'occupation du sol.....	90

3.3.1.3. Description générale de l'utilisation des terres de la zone d'étude :.....	91
3.3.1.4. Quelques anomalies de la méthode de segmentation:.....	92
3.3.2. La lithologie du sol :.....	93
3.3.2.1. Segmentation:.....	93
3.3.2.2. Extraction des classes de la lithologie du sol :.....	95
3.3.3. Évolution spatiotemporelle de la cuvette du barrage:.....	96
3.4. Conclusion:.....	99

PARTIE II

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODEL RUSLE ET L'APPROCHE RUSLE/AHP AU MOYEN DES SIG ET DE LA TELEDETECTION ET PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHE RUSLE/AHP AU MOYEN DES SIG ET DE LA TELEDETECTION

4.1. Introduction:.....	100
4.2. L'estimation des pertes en sol dans le bassin de l'oued Mina :	101
4.2.1. Les facteurs du modèle RUSLE :	101
4.2.1.1. Le facteur R :	101
4.2.1.2. Le facteur K:.....	104
4.2.1.3. Le facteur LS:.....	106
4.2.1.4. Le facteur C :	107
4.2.1.5. Le facteur P :	111
4.2.2. Validation des résultats :	114
4.2.2.1. Répartition des pertes en sol en fonction de leur tolérance à l'érosion :	115
4.2.2.2. Les classes des pertes en sol dans la zone d'étude :	117
4.2.2.3. Répartition des pertes en sol par rapport à la moyenne:.....	118
4.2.3. Travaux de recherche réalisés sur le bassin versant de l'oued Mina:.....	118
4.2.4. Proposition d'aménagements :	120
4.3. L'estimation des pertes en sol dans le bassin de l'oued Kramis:.....	123
4.3.1. Le modèle RUSLE et ses facteurs :	123
4.3.2. La technique AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>) :	131
4.3.2.1. Les facteurs de l'AHP :	131
4.3.2.2. Validation des résultats:.....	134
4.3.2.2.1. Les classes des pertes en sol:.....	134
4.3.2.2.2. Répartition des pertes en sol par rapport à la moyenne:.....	136
4.3.2.2.3. Comparaison des résultats de pertes en terre avec ceux obtenus dans d'autres bassins :	136
4.3.2.2.4. Influence des facteurs de RUSLE sur les pertes en sol:.....	137
4.3.2.2.5. Les pertes en sol au niveau des SBV de Kramis :	142
4.3.2.3. Réévaluation des pertes en sol par la méthode d'AHP :	144
4.4. Conclusion :	146

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT
DE L'OUED KRAMIS

5.1. Introduction.....	148
5.2. Rappel concernant le diagnostic et l'identification des problèmes majeurs de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant de l'oued Kramis:.....	149
5.3. Proposition d'une stratégie d'intervention pour la protection du bassin versant:.....	151
5.4. Chronologie et efficacité de chaque technique d'aménagement:.....	158
5.5. Evaluation des apports solides atteignant le réservoir après chaque aménagement:.....	159
5.6. Conclusion :	163
CONCLUSION GENERALE :	164
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	167

VALORISATION DE LA THESE

INTRODUCTION GENERALE

1.1. Contexte et problématique

L'érosion hydrique est un phénomène qui résulte de la dégradation des couches superficielles de la couverture pédologique et du déplacement des matériaux la constituant (Antoni *et al.*, 2006) sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et du transport par l'eau des particules du sol de leur emplacement initial (Kinnell, 2016). Elle est l'une des principales causes de dégradation des sols dans le monde (Beatriz *et al.*, 2002) menaçant de façon significative à la fois les sociétés humaines et l'environnement (Singh *et al.*, 2007). Ce qui la rend un sérieux problème à l'échelle mondiale et particulièrement préoccupante dans certaines régions du monde (Mondal *et al.*, 2016).

Vers 1930, aux Etats-Unis, 20 % des terres cultivables ont été gravement endommagées par l'érosion suite à une sécheresse prolongée. C'est l'époque sombre du phénomène de « *dust bowl* » (Römken, 2010). Ce qui a eu pour conséquence la création d'un service de conservation de l'eau et des sols par le gouvernement américain. Parallèlement, un réseau de stations de recherches a été mis en place, qui, trente ans plus tard, aboutit à la formulation de l'équation USLE (Wischmeier et Smith, 1965; 1978).

Kanwar (1982) a montré que, sur 13,5 milliards d'hectares de surfaces exondées dans le monde, 22 % seulement sont cultivables. Ces dernières décennies, les pertes en terres cultivables ont augmenté de 7 à 10 millions d'hectares par an et à ce rythme-là, deux siècles suffiraient pour détruire toutes les terres cultivables.

Selon le Rapport des Nations Unies publié en 2015 sur l'état des ressources en sol du monde, les pertes de production céréalière dues à l'érosion ont été estimées à 7,6 millions de tonnes par an (FAO, 2017). Au terme de ce rapport, les chercheurs du monde ont constaté que si rien n'est fait pour atténuer l'érosion, on pourrait arriver à une réduction de plus de 253 millions de tonnes de céréales d'ici 2050. Cette perte de rendement équivaldrait à retirer de l'activité agricole près de 15 milliards d'hectares de terre. Ces chiffres plus dramatiques donnèrent l'alarme dans différents pays du monde afin de prendre toutes les mesures nécessaires en particulier sur les pentes des versants à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terres et de l'impact anthropozoïque

INTRODUCTION GENERALE

défavorable (déforestation, incendies, surpâturage, mauvaise conduite agricole, urbanisme chaotique etc.).

Face à ce problème, plusieurs études ont été réalisées sur des parcelles agricoles d'une centaine de mètres carrés (Bertol *et al.*, 2016 ; Fernández et Vega, 2016; Kinnell, 2016 ; Sadeghi *et al.*, 2016 ; Anache *et al.*, 2017), sur des micro-bassins versants de quelques hectares (Prasannakumar *et al.*, 2012 ; Ozsoy *et al.*, 2012 ; Jebari *et al.*, 2012 ; Benslimane, 2013), sur de grands bassins de milliers de kilomètres carrés (Ganasri et Ramesh, 2015 ; Haregeweyn *et al.*, 2017 ; Zhang *et al.*, 2017 ; Benchettouh *et al.*, 2017) et sur des vastes étendues (pays et/ou région du monde) (Panagos *et al.*, 2015 ; Zhang *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2016).

Les résultats des pertes en sol varieraient de 1 à 200 t/ha/an (jusqu'à 700 t/ha/an) sous des cultures propres aux régions forestières où les pentes allant de 30 à 60 % et de 0,5 à 40 t/ha/an sous mil, sorgho, arachide et coton sur des longs glacis ferrugineux tropicaux des régions Soudano-sahéliennes dont les pentes varient entre 4 et 25 % (Boli *et al.*, 1993).

Aux Etats Unis, sur des terres cultivées, les pertes en sol étaient estimées entre 5 et 12 t/ha/an (Pimentel *et al.*, 1995). En Europe, De Ploey (1989) estime que 25 millions d'hectares ont été gravement affectés par l'érosion.

Au Maghreb, les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées (Roose *et al.*, 1993 ; Touaibia *et al.*, 2000 ; Mazour et Roose, 2002 ; Jebari *et al.*, 2012 ; Morsli *et al.*, 2012) et où le phénomène de l'érosion hydrique est très répandu. La majorité des bassins versants sont caractérisés par des fortes dégradations dépassant 20 tonnes/ha/an (Benchettouh *et al.*, 2017), ce qui entraîne un envasement moyen annuel des retenues des barrages à raison de 125 millions de m³ (Remini, 2003). Selon Souadi (2011), l'érosion hydrique au Maroc, provoque des pertes en sol allant de 5 t/ha/an à plus de 50 t/ha/an selon les régions, et un envasement moyen annuel des retenues des barrages de l'ordre de 75 millions de m³. Soit une réduction annuelle de 0,5 % de leur capacité de stockage, ce qui provoque une détérioration de la qualité de l'eau potable mobilisée et une diminution de ressources hydriques pouvant irriguer 10 000 ha/an. La Tunisie septentrionale et centrale, disposent actuellement de plus de 30 barrages d'une capacité totale de stockage de 3,5 milliards de m³ (Souadi, 2011 ; Benslimane, 2013 ; Hajji *et al.*, 2015). Le suivi de l'envasement de ces ouvrages hydrauliques, a permis d'évaluer une

INTRODUCTION GENERALE

perte de leur capacité de stockage estimée à 30 millions de m³/an, soit une réduction annuelle de 1 %. L'envasement accéléré de certaines retenues (ex: Saadine, Arara, Jannet) avec des durées de vie inférieures à 10 ans indique clairement que l'érosion hydrique soulève un sérieux problème dans ces régions tunisiennes (Hentati *et al.*, 2010) et dégrade les terres cultivables (Remini, 2003). Selon le Ministère de l'Agriculture, des Ressources hydrauliques et de la Pêche (2003), l'érosion a touché près de 3 millions d'hectares des terres agricoles du pays, soit plus de la moitié de la surface agricole utile en affectant la capacité de production de l'agriculture tunisienne (Benslimane, 2013).

En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active qui varie entre 20 et 40 t/ha/an (Morsli *et al.*, 2012). Par ailleurs, les ouvrages hydrauliques localisés dans le Nord du pays (au nombre de 74 barrages d'après l'ANBT, 2017)¹; s'ensavent à un rythme rapide (MRE, 2015). Le potentiel hydraulique perd annuellement 45 millions de m³. Selon Remini (2010), la majorité des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'années. Seklaoui (2016) a montré qu'il y a eu une augmentation d'envasement dès le début des années 2000. Cela est dû principalement à la sécheresse qui a sévi dans notre pays durant les années 1990 suivi d'une période humide. La dégradation du couvert végétal a favorisé le processus d'envasement. L'alternance des phases d'humectation et de dessiccation des marnes favorise leur altération ce qui a provoqué une forte érosion des bassins versants (Kouri, 1993). Dans la partie Nord-ouest du pays en particulier la région marneuse du Tell oranais, Achite et Ouillon (2007), Kouri et Gomer (2010), ont constaté que le taux de sédimentation a augmenté ces dernières années. Cette augmentation serait due aux processus érosifs à l'échelle des bassins où l'érosion touche environ 47 % de l'ensemble des terres. Dans les régions montagneuses en particulier, l'érosion hydrique est un problème majeur, son intensité varie d'une zone à l'autre (Benchettouh *et al.*, 2017). Elle devient, en effet, néfaste sur la fertilité des terres agricoles et la potentialité en eau dès qu'elle dépasse le seuil tolérable (Toumi, 2013).

Le seuil de tolérance des pertes en sol varie d'une région du monde à l'autre. Il est lié à la productivité des terres et à leurs utilisations. En effet, en Asie, Prasannakumar *et al.* (2012) ont constaté que le seuil de tolérance des pertes en sol dans le sous bassin versant de Kelara en Inde était inférieur à 1,5 t/ha/an. Selon Balasubramani *et al.* (2015), les résultats de l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin de Tamil Nadu

¹<http://www.soudoud-dzair.com>

INTRODUCTION GENERALE

(Inde) indiquent que les pertes moyennes en sol dans cette région sont de l'ordre de 6 t/ha/an. En Europe, Panagos *et al.* (2015) ont déduit que, lorsque les pertes en sol dépassent un seuil de 5 t/ha/an sur des terres cultivées, ce dernier devient intolérable. Dans une étude menée au Sud-est de la région de l'Espagne par Sougnez *et al.* (2011), un taux de pertes en sol a été enregistré au-dessous des taux annuels tolérables pour la région du Nord de la méditerranée. Près de 90% de ses bassins ont des taux annuels moyens inférieurs à 2 t/ha. Au Nord-ouest de la Turquie, les résultats obtenus dans la région de Buyukcekmece par Demirci et Karaburun (2012), montrent qu'un taux de pertes en sol est faible pour une valeur inférieure à 1 t/ha/an, alors qu'au-delà de 10 t/ha/an, le phénomène érosif devient un sérieux problème.

Dans le bassin de l'Alaca en Turquie toujours, Imamoglu et Dengiz (2016) ont estimé un taux de tolérance de l'érosion hydrique pouvant atteindre 12 t/ha/an. Kouli *et al.* (2009) souligne que, toute perte en sol supérieure à 1 t/ha/an est considérée comme irréversible dans un laps de temps de 50 à 100 ans. Il suffit d'une perte en terre de 12 à 15 t/ha/an, soit environ 1 mm de sol par an (décapage de surface) pour dépasser la vitesse d'altération des roches. Yang *et al.* (2003) et Montgomery (2007a) ont estimé le taux de tolérance des pertes en sol à l'échelle du globe à 10,2 t/ha/an.

A cet effet, le problème de l'érosion hydrique mobilise la communauté scientifique pour la recherche de solutions susceptibles d'assurer la conservation des sols (Aké *et al.*, 2012). Dans un contexte marqué par des changements climatiques globaux et une pression anthropique soutenue sur les ressources naturelles, la menace de l'érosion des sols exige une attention particulière et continue (Aiello *et al.*, 2015).

L'utilisation des méthodes classiques pour évaluer le risque d'érosion du sol est coûteuse et prend beaucoup de temps. L'intégration des modèles actuels d'érosion des sols, des données de terrain et celles fournies par la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) est un atout précieux pour l'étude des processus d'érosion (Ganasri *et al.*, 2015).

Les SIG permettent d'afficher les données d'entrée numériques sous forme de cartes thématiques et aident, à calculer, comprendre et expliquer le risque érosif du sol pour les zones soumises à ce phénomène (Ochoa *et al.*, 2016). Néanmoins, leurs applications sur de vastes zones restent un défi en raison de l'indisponibilité des données. Une surveillance

efficace peut être réalisée grâce à l'intégration de données auxiliaires et de produits de télédétection dans un environnement SIG (Aiello *et al.*, 2015).

1.2. Objectif de l'étude

Les ouvrages hydrauliques localisés dans les régions marneuses du Tell oranais à savoir le barrage Saada celui de Kramis s'ensavent un rythme rapide. Le potentiel hydraulique dans ces régions perd annuellement 45 millions de mètre cube (Remini, 2010). C'est pourquoi la protection des bassins versants et leurs retenues est un objectif économique essentiel. L'objet de la Thèse consiste à analyser les processus d'érosion dans les différents types de marnes au moyen du modèle RUSLE (*Revised Universal Soil loss Equation*) et la méthode de AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Les facteurs explicatifs qui les constituent seront analysés et cartographiés au moyen d'outils spatiaux (SIG et télédétection).

De nombreux auteurs ont souligné la dégradation du sol causée par l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Mina (Gomer, 1994 ; Meddi, 1992 ; Kouri, 1993 ; Touaibia, 2000) comme pratiquement toute la région du Tell occidental algérien. Ce problème provoque l'ensablement rapide du barrage Saada situé dans la partie aval et celui de Bakhada situé en amont du bassin. Les conditions bioclimatiques sont à l'origine de ce phénomène, en effet, les précipitations proviennent majoritairement de pluies d'orages, très intenses et qui ont un fort pouvoir érosif en début de saison de pluies, cela s'explique également par la présence d'un couvert végétal dégradé assurant un faible recouvrement du sol durant toute l'année.

1.3. Plan de la Thèse

Le plan de la présente thèse est composé de cinq chapitres:

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les facteurs de l'érosion hydrique, les formes d'érosion, ses conséquences, ainsi que les différentes méthodes d'évaluation à savoir, le modèle RUSLE et l'approche AHP qui ont été choisis afin d'estimer les pertes en sol au niveau notre zone d'étude.

Le deuxième chapitre est consacré à la délimitation de la zone d'intérêt en se basant sur le positionnement de la digue du barrage à l'aide des images satellites intégrées dans un

INTRODUCTION GENERALE

environnement SIG ainsi qu'à l'extraction des caractères physiographiques du milieu d'étude intervenant dans les processus érosifs.

Le troisième chapitre, aborde l'étude spatiotemporelle du bassin versant de l'oued Kramis via la méthode de classification orientée-objet. Celle-ci nous permettra d'extraire les différentes utilisations des terres ainsi que les différentes formations lithologiques qui le constituent.

Le quatrième chapitre concerne, la présentation, l'analyse statistique et la validation des résultats obtenus par le modèle RUSLE au niveau du bassin de l'oued Mina et l'approche RUSLE/AHP au niveau du bassin de l'oued Kramis au moyen des SIG et de la télédétection.

Le cinquième chapitre, expose les différentes techniques retenues pour l'aménagement du bassin versant de l'oued Kramis.

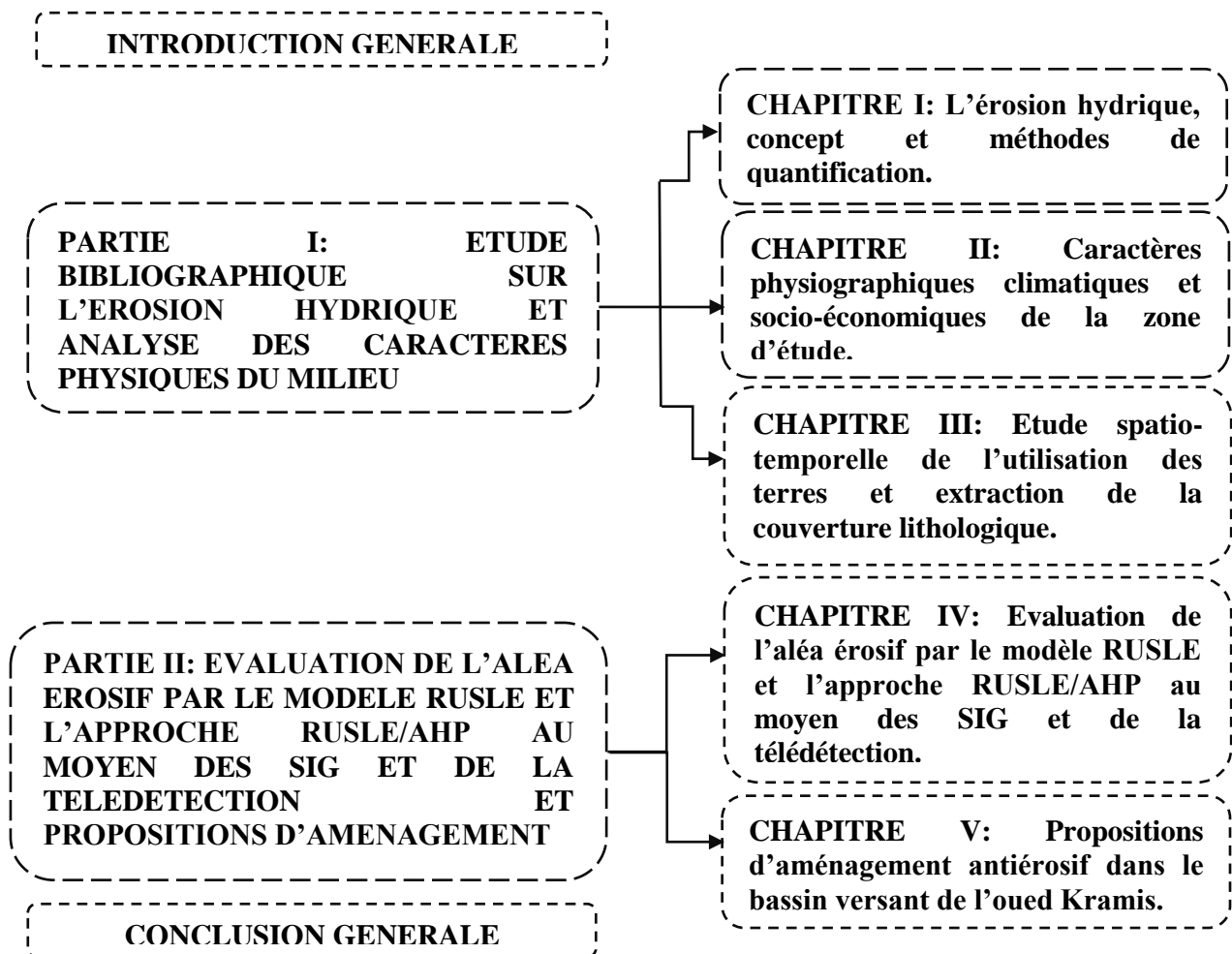


Figure 1. Diagramme du plan de la Thèse

PARTIE I

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EROSION
HYDRIQUE ET ANALYSE DES CARACTERES
PHYSIQUES DU MILIEU**

CHAPITRE I
L'EROSION HYDRIQUE CONCEPT ET
METHODES DE QUANTIFICATION

1.1. Introduction

Le Nord de l'Afrique où règne un climat méditerranéen semi-aride, est particulièrement affecté par l'érosion hydrique (Bouguerra et Bouanani, 2016). Les études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques indiquent une tendance à un accroissement des multiples facteurs du milieu qui accélèrent l'érosion hydrique. Ceci est dû aux longues périodes sèches suivies d'orages torrentielles érosives tombant sur des pentes raides aux sols fragiles. Les pratiques culturales inappropriées, la déforestation, le surpâturage et les activités anthropiques inappropriées sont autant de causes qui accentuent l'érosion des sols dans cette région qui a été qualifiée comme l'une des plus soumises à l'érosion hydrique (García-Ruiz *et al.*, 2013).

« Le terme érosion englobe toutes les formes d'usure affectant la couche superficielle de l'écorce terrestre. Celles-ci se distinguent habituellement selon la nature de l'agent en cause : érosion hydrique, éolienne, glaciaire, fluviale, marine. Le processus d'érosion se caractérise en général par trois phases : une phase de détachement ou d'ablation suivie d'une phase de transport et d'une phase de déposition ou de sédimentation (Soutter *et al.*, 2007) ».

Notre étude porte sur les processus d'érosion hydrique qui se manifestent sous différentes formes, telles que l'érosion diffuse « *sheet erosion* », en rigoles « *interrill erosion* », linéaire « *rill erosion* » ravinaire « *gully erosion* », glissement de terrain « *landslide* » et les sapements de berges « *bank erosion* ».

Ces formes sont les plus répandues dans les régions méditerranéennes (José *et al.*, 2012).

L'objectif de ce chapitre est tout d'abord d'exposer les facteurs influençant le risque érosif. Ensuite, nous présenterons les modèles de quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique. Enfin, à travers une synthèse bibliographique, nous essayerons de présenter quelques résultats des pertes en sols par l'application du modèle universel RUSLE intégré dans un environnement SIG à travers le monde et en Algérie.

1.2. Les facteurs de l'érosion hydrique

1.2.1. Le climat

Le climat méditerranéen est renommé pour ses averses érosives. Certains orages d'été ou d'automne sont en effet redoutables car ils provoquent localement des dégâts considérables (Roose, 1994). Cependant, à l'échelle des grands bassins versants, ce ne sont pas les orages localisés d'été ou d'automne qui apportent le plus de sédiments dans les grands réservoirs, mais les longues averses généralisées de faible intensité tombant entre Novembre et Mars, période durant laquelle, les sols sont nus et saturés (Bou Khir *et al.*, 2001). Il est largement admis aujourd'hui que l'érosion hydrique dépend de l'intensité, de la hauteur et de l'énergie des pluies (Roose *et al.*, 2012).

Bou Kheir *et al.* (2001) ont constaté que les seuils de tolérance de l'érosion sous un climat humide tempéré varient entre 2,5 t/ha/an pour un sol superficiel et de 12,5 t/ha/an pour un sol profond, de texture équilibrée et moyennement perméable. Cependant, cette tolérance doit être moindre dans les pays méditerranéens car:

- (i) La pédogenèse est beaucoup plus lente sous climat à aridité estivale accentuée et à saison sèche très longue.
- (ii) Les sols sont le plus souvent superficiels et les taux d'altération sont relativement bas.
- (iii) Les terres cultivables sont peu étendues et diminuent chaque année.

1.2.2. La lithologie

D'après Roose *et al.* (2012), les sols méditerranéens ne sont pas plus fragiles que les sols tropicaux, mais ils ont tendance à se dégrader rapidement dès qu'on les dénude et qu'on les prive d'un apport régulier de litière. Cependant, les régosols, les sols rouges ferralitiques, les sols bruns calcaires, les rendzines noires et les vertisols gris qui composent la majorité des versants méditerranéens sont assez résistants à l'érosion en nappe.

En effet, l'érodibilité des sols ferralitiques décroît de 0,2 à 0,01 t.ha/Mj.mm entre des roches à altérites argileuses (basalte) et des roches à altérites sableuses (grès fin). Celles à

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

altérites argilo-sableuses (granite) ou à altérites limoneuses (schistes) occupent une position intermédiaire. Les lithosols caillouteux, très fréquents en montagnes méditerranéennes, sont très résistants ($K = 0,01$ à $0,05$ t. ha/Mj.mm), mais peu fertiles.

Les vertisols calciques sont les plus résistants à l'érosion en nappe ($K = 0,001$ à $0,01$ t. ha/Mj.mm), mais ils sont sensibles aux glissements et aux ravinements. Les sols bruns calcaires sont d'autant plus résistants qu'ils ont une charge importante en cailloux (calcaire) et une forte teneur en argiles saturées en calcium ($K = 0,01$ à $0,10$ t. ha/Mj.mm). Par contre, les sols rouges ferralitiques méditerranéens lessivés sont généralement assez fragiles ($K = 0,20$ t.ha/Mj.mm), puis qu'ils sont pauvres en matières organiques. Les vertisols sodiques des plaines arides sont très sensibles à la battance des pluies ($K > 0,40$ t. ha/Mj.mm). La présence de sels ou de gypse au sein des marnes fragilisent les terrains tandis que le fer, le calcaire et les cailloux les consolident; mais cette résistance est relative et temporaire (Roose *et al.*, 2012).

Cette fragilité des terres méditerranéennes est aggravée par la déforestation, la mauvaise conduite agricole sur des versants à pente raides avec un faible taux des matières organiques (généralement $< 2\%$) conjointement aux températures estivales très élevées. Ces conditions accélèrent la minéralisation primaire des matières organiques des sols et les rendent fragiles, faiblement structurés et prédisposés au piétinement du bétail et à la formation de croûtes de battance. En conséquence, ces sols sont en général très sensibles à l'érosion (García-Ruiz *et al.*, 2013).

1.2.3. La topographie

L'érosivité des pluies et la lithologie du sol jouent un grand rôle, les effets de la topographie sont également jouent un rôle crucial et complexe dans l'érosion hydrique. Il est admis que, plus la pente est raide, plus la quantité d'eau ruisselée est importante, plus la force érosive sera dramatique (Bouguerra et Bouanani, 2016).

Dans les zones arides et semi arides, le gradient de la pente est corrélé positivement avec la rugosité de la surface du sol qui agit en diminuant le ruissellement et les pertes en sols (Abrahams et Parsons, 1991 ; Cooke *et al.*, 1993 ; Simanton et Toy, 1994).

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

En revanche, Roose *et al.* (2012) ont observé que la position topographique des versants est parfois plus importante que la pente elle-même. L'exposition des versants des montagnes méditerranéennes a une importance car les versants exposés au Sud sont généralement dénudés et subissent une érosion très élevée. Par ailleurs, sur les pentes concaves, les pertes des terres sont moins élevées (D'Souza et Morgan, 1976) que sur des pentes convexes. Or, il existe de multiples interactions entre l'influence de la pente, la rugosité du sol, la position topographique des versants, la forme des reliefs, le couvert végétal et la lithologie du sol, ce qui le rend un paramètre très complexe.

1.2.4. Le couvert végétal

Le couvert végétal est - après l'érosivité des pluies, l'érodibilité du sol et la topographie - le quatrième facteur influençant les processus érosifs. Dans le modèle RUSLE, l'effet du couvert végétal est incorporé au facteur d'aménagement du couvert (El-Garouani *et al.*, 2009 ; Bouguerra et Bouanani, 2016). Il est défini comme le ratio des pertes en sol sur terrain cultivé par rapport à la perte en sol sur le même terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978).

Sur sol paillé, l'énergie des pluies et celle du ruissellement sont dissipées même sur des fortes pentes, par le frottement avec les résidus d'une part. Ainsi, les pertes de terre restent très modestes (Jordán *et al.*, 2010 ; Sadeghi *et al.*, 2015a) réduisant de ce fait, le taux de ruissellement et les pertes en sol dans différents environnements, tels que, les régions agricoles (Keesstra *et al.*, 2016 ; Mwangi *et al.*, 2016 ; Prosdocimi *et al.*, 2016a,b), les prairies (Fernández *et al.*, 2012, 2014 ; Fernández et Vega, 2014 ; Sadeghi *et al.*, 2015a) et les sites boisés (Robichaud *et al.*, 2013a,b ; Prats *et al.*, 2014). D'autre part, l'énergie et la vitesse d'écoulement des eaux de surface sont réduites augmentant la rugosité du sol (Jordán *et al.*, 2010), piégeant les sédiments et les éléments nutritifs dans le flux des eaux ruisselées (Cerdà, 1998 ; Gholami *et al.*, 2013). En outre, le paillage améliore efficacement la capacité d'infiltration des eaux (Jordán *et al.*, 2010 ; Wang *et al.*, 2016) et augmente le taux de rétention de l'eau dans le sol (Cook *et al.*, 2006 ; Mulumba et Lal, 2008).

Roose *et al.* (2012) ont déduit que, le couvert des principales cultures d'Afrique du Nord réduit l'érosion de 20 à 60 % par rapport à une parcelle nue en fonction de la densité

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

de celles-ci et des techniques culturales utilisées. L'indice du couvert végétal diminue jusqu'à 0,01 sous cultures pérennes avec plantes de couverture et jusqu'à 0,001 sous forêt et cultures paillées.

Plusieurs études dont celle de Herbreteau (2003) montrent que le facteur déterminant dans l'érosion des vignobles est la couverture végétale. Le Bissonais (2008) confirme les observations de Herbreteau (2003) en affirmant que la couverture végétale est considérée comme le facteur principal de l'aléa d'érosion.

Au Maroc, Laouina (1992) a observé que lorsque le sol est couvert de matorral dense, d'herbes rases, de cistes ou de rocaille, l'érosion ne dépasse pas 0,2 à 2 t/ha/an, mais dès que le sol est labouré, l'érosion en année pluvieuse, peut s'élever à plus de 20 t/ha/an sur des pentes de 20 %. Toujours au Maroc, les résultats obtenus dans le bassin versant d'Oum Er-Rbia par Yjjou *et al.* (2014) montrent que 64 % de la superficie du bassin présente un taux très faible du couvert végétal. Ainsi, les pertes sont de l'ordre de 50 à 400 t/ha/an (Yjjou, 2009 ; Yjjou *et al.*, 2012a), ce qui témoigne de la forte érosion dépassant les seuils de tolérance qui est de l'ordre de 7 t/ha/an (Yjjou *et al.*, 2014).

En Belgique, dans la région de Wallonne, Goor (2005) a montré que le risque érosif est plus élevé lorsque les sols sont occupés par des cultures de type sarclé peu couvrantes ou par des plantes pastorales dégradées; ce risque est moins élevé sur des cultures de type non sarclé plus couvrantes, il est encore moins sur des prairies et des forêts denses. Dans la même région d'étude, Baron (2008) a confirmé que les sols couverts en permanence sur de faibles pentes présentent un risque reste très faible quel que soit l'érosivité des pluies.

Un couvert végétal bien développé protège le sol de l'action des pluies de diverses manières:

(i) L'interception des gouttes des pluies permet la dissipation de l'énergie cinétique, ce qui diminue dans une large mesure l'effet « *splash* ».

(ii) Les plantes ralentissent les eaux de ruissellement par la rugosité qu'elles donnent au terrain.

(iii) Son système racinaire maintient le sol en place et y favorise l'infiltration.

(iv) L'apport en matières organiques suite à l'activité microbienne dans la zone racinaire améliore la structure du sol et sa cohésion et par conséquent diminue les risques d'érosion.

Le couvert végétal est donc le paramètre le plus important à notre disposition pour réduire les risques d'érosion.

1.3. Techniques de Conservation des Eaux et des Sols (CES)

Des techniques agricoles effectuées dans quelques pays du Sahel (Mali, Nigeria et Soudan) par la population rurale locale montrent que l'influence de ces techniques n'est pas négligeable sur les longs glacis de pentes inférieures à 3 %.

Le labour et surtout le billonnage cloisonné en courbes de niveau améliorent la rétention d'eau par le sol et les rendements des cultures (Roose, 2012). Charreau et Nicou (1971) et Lai (1981), ont montré que le labour des sols sableux permet un meilleur enracinement et temporairement, une meilleure infiltration et détruit l'agrégation du sol ferrallitique. Cependant, Boli *et al.* (1992) et Diallo (1992) ont observé sur des sols ferrugineux sableux à argilo-sableux une réduction notable de l'érosion (y compris de la charge en suspension) et du ruissellement. Cette réduction s'observe sur des sols soumis au semis direct et dédié à une rotation coton/maïs intensive.

En Europe, les travaux antiérosifs réduisent le risque d'érosion des sols à un taux inférieur à 3%. Les haies végétatives ayant le plus grand impact (57% de la réduction totale du risque d'érosion) suivies de cordons des pierres sèches (38%) (Panagos *et al.*, 2015).

En Algérie, les zones montagneuses les plus productives situées au Nord du pays, sont soumises à une dégradation sévère par l'érosion. Ceci est dû non seulement à l'aridité de la région, mais aussi et d'une manière de plus en plus importante aux facteurs liés aux activités humaines (Roose *et al.*, 2008). Le surpâturage, la mauvaise conduite des travaux agricoles, la déforestation, les incendies et le défrichement des parcours ont connu une augmentation au cours du dernier siècle, en particulier du fait de la croissance démographique. En effet, 4,1 millions d'habitants et 2,5 millions d'hectares cultivés en 1890 (Boukarzaza, 1993) contre 40,4 millions d'habitants et 3 millions d'hectares cultivés actuellement (MADR, 2016).

Dans les régions du Tell algérien et face à la situation désastreuse de la dégradation des sols (réduction de la fertilité des terres agricoles et l'envasement rapide des ouvrages hydrauliques), l'ANBT (2006) désire identifier et préciser les mesures à mettre en œuvre

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

pour lutter efficacement contre l'envasement des retenues, préserver leur capacité utile et assurer la disponibilité future de l'eau. Les aménagements ainsi proposés peuvent être scindés en deux volets: (i) un premier volet qui concerne les aménagements biologiques, représentés par le reboisement, la revégétalisation de terres nues, le recouvrement continu des sols et l'installation des haies vives pour délimiter et protéger les parcelles contre l'érosion; (ii) quant au second volet, il concerne les aménagements dits de génie rural avec différentes techniques de stockage d'eau et de freinage du ruissellement, comme la mise en place de cordons des pierres sèches sur des versants à pente légère, des terrasses, des seuils et des gabions...etc. Ces aménagements peuvent contribuer efficacement contre l'envasement des barrages.

Le facteur de pratique antiérosive P dans le modèle USLE / RUSLE est rarement pris en compte dans la modélisation du risque d'érosion des sols à l'échelle sous continentale, car il est difficile de l'estimer pour de grandes surfaces (Panagos *et al.*, 2015).

La littérature rapporte divers tableaux et formules proposant des valeurs du facteur antiérosif pour les pratiques de conservation adoptées dans différents contextes environnementaux (e.g. Wischmeier et Smith, 1978 ; Renard *et al.*, 1997). Par exemple, les valeurs typiques vont d'environ 0,1 pour les cultures en billonnage cloisonné; de 0,75 pour le labour en courbe de niveau et de 1 où il n'y a pas de pratiques antiérosives (Roose, 1977). Dans le modèle USLE/RUSLE, ces valeurs sont obtenues à partir d'expérimentation sur des parcelles et des petits bassins versants. Lufafa *et al.* (2003) ont suggéré une approche alternative pour une approximation du facteur P en se basant sur des équations empiriques dont la méthode de Wener, où $P = 0,2 + 0,3 \theta$, et θ représente le degré de la pente en %. Cependant, il est difficile de quantifier l'impact des différentes pratiques antiérosives appliquées dans de très grandes régions en particulier les terrassements et le labour (Panagos *et al.*, 2015).

1.4. Les formes de l'érosion hydrique

Le phénomène de l'érosion hydrique se développe lorsque s'arrête l'infiltration des eaux de pluie dans le sol soit, sous l'effet de la saturation de ce dernier ou sous l'effet du phénomène de l'*hortenion*. Ainsi, ces pluies ruissellent sur les versants en emportant les

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

particules du sol. Une fois le ruissellement se déclenche, l'érosion peut prendre plusieurs formes, qui se combinent dans le temps et dans l'espace (Bouguerra et Bouanani, 2016).

Selon la combinaison et la localisation spatiale des mécanismes de détachement, on distingue en général trois grandes classes de formes d'érosion: en nappe et en rigoles, en ravins et en talus (Roose, 1994).

1.4.1. Érosion en nappe

La forme en nappe ou en diffuse est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique. On assiste au début à un déplacement des particules du sol sur des courtes distances sous l'effet de « *splash* » (Photo. 1a). Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par ruissellement (Photo. 2b) tandis que les cailloux trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1994).



Photo 1(a,b). L'effet de *splash* suivi par le déplacement des particules du sol par ruissellement
(Le Bissonnais *et al.*, 2002)

1.4.2. Érosion linéaire

L'érosion linéaire se produit quand le ruissellement en nappe se concentre et acquiert, par augmentation de la vitesse de l'eau, un pouvoir érosif accru, ce qui provoque des incisions linéaires du sol de plus en plus profondes (Foster, 2004).

On parle alors de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur et de rigoles (Photo. 2) lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur. En effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigoles succède à l'érosion en

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

nappe par concentration du ruissellement dans les creux (l'incision : tableau 1). A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles. Quand les rigoles constituent un réseau bien ramifié et atteignent une profondeur d'ordre métrique, on parle dans ce cas, de l'érosion par ravinement (*gully erosion*) (Photo. 3).



Photo 2. Erosion par rigoles



photo 3. Erosion par ravinement

Les ravins constituent la forme la plus évoluée de l'érosion linéaire, et se répartissent sur l'ensemble du terrain. Parfois, lorsque le substrat est dur, les ravins s'élargissent par sapement des berges constituant la principale source des sédiments transportés (Ludwing *et al.* 1996).

Formes	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griffe	Sinueux	<1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Centaine de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10-30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	30-50 cm
Petit ravin	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	50-200 cm

Tableau 1. Les formes d'incision de l'érosion linéaire (Ludwing *et al.*, 1996)

1.4.3. Érosion en masse

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol et le ravinement aux lignes de drainage du versant, l'érosion en masse déplace un volume de sol à l'intérieur de la couverture pédologique selon des formes telles que; les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain. C'est une forme qui a lieu sur les terrains en pente forte. Ces processus de mouvements de masse s'appellent généralement « *solifluxion* ». Cette dernière est un mouvement dû à la gravité tout comme le ruissellement et faisant partie d'un ensemble de processus tendant à enlever les formations meubles de la partie

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

superficielle des versants et qui peut se produire soit lentement, soit rapidement en affectant une partie plus ou moins vaste du versant (Hadir, 2010).

1.5. Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion des sols est un sérieux problème environnemental très répandu dans le monde. Chaque année, 75 milliards de tonnes des terres sont enlevées entraînant une perte de 20 millions d'hectares de terres agricoles (Pandey *et al.*, 2009c). Parallèlement, le volume utile en eau des barrages est réduit remarquablement ces dernières années. A ce comme conséquences, en plus des pertes des terres fertiles et la réduction de la capacité de stockages des ouvrages hydrauliques, on a aussi d'autres problèmes environnementaux, à savoir, le risque pour la sécurité alimentaire, l'augmentation du risque d'inondation dans les plaines inondables, la réduction de la qualité de l'eau et la perte de la biodiversité (Onyando *et al.*, 2005 ; Sthiannopkao *et al.*, 2007 ; Zhou *et al.*, 2008 ; Bewket et Teferi, 2009 ; Wang *et al.*, 2009).

En Europe, RIVM (2000) a déclaré que l'érosion hydrique est l'un des processus de dégradation des terres les plus importants. Il a également été signalé que les pays du Sud sont les plus exposés au risque érosif, enregistrant des taux de, 58%, 66%, 66% et 85% en France, en Italie, en Espagne et en Grèce respectivement (Imamoglu et Dengiz, 2016). En Turquie, l'érosion hydrique des sols est le plus grand problème de dégradation des terres. Selon le Ministère de l'Agriculture, des Forêts et des Villages, quelque 58,7% des terres sont exposées à une érosion grave ou très sévère dont 59% des terres agricoles, 54% des terres forestières et 64% des parcours (Imamoglu et Dengiz, 2016). Toujours en Turquie, en particulier dans les régions semi-arides et arides méditerranéennes, l'érosion est l'une des principales menaces pour la fertilité des sols et les ressources en eau. Elle réduit la capacité utile en eau des barrages par l'afflux et le dépôt des particules du sol. En outre, la sédimentation entraîne des impacts environnementaux spectaculaires sur la qualité de l'eau et l'habitat aquatique (Akay et Session, 2005; Akay *et al.*, 2008). Selon Yuksel *et al.* (2008), plus de 345 millions de tonnes de sédiments annuellement se déposent aux lacs, aux barrages et à la mer.

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

En Afrique subsaharienne, l'érosion des sols est généralement considérée comme la menace la plus sévère à la productivité des terres, créant des impacts négatifs sur la production agricole, l'infrastructure et la qualité de l'eau (Obalum *et al.*, 2012). Lal (1995) a estimé que l'érosion dans ces pays entraîne une réduction des rendements de 2 à 4% et que si la tendance actuelle se maintient, la réduction du rendement d'ici 2020 pourrait être 16,5%.

La zone méditerranéenne a la réputation d'être sujet à des risques érosifs très élevés (José *et al.*, 2012). Ce phénomène est caractéristique également des pays du Maghreb dont les potentialités en eau et en sol sont gravement menacées (Khanchoul *et al.*, 2012).

Au Maroc, l'érosion spécifique des sols allant de 0,5 t/ha/an au niveau du Moyen Atlas à 50 t/ha au niveau du Rif. Ceci se traduit par une érosion de 15 millions d'hectares de terres agricoles et une diminution progressive et inquiétante de la fertilité des sols et par conséquent leur productivité (Khali Issa *et al.*, 2016). Avec ces pertes, non seulement la fertilité des sols endommagée, mais aussi le volume utile en eau des barrages est réduit. Le Haut-commissariat des eaux et des forêts du Maroc (2008) chiffre l'envasement annuel des retenues des barrages de l'ordre de 75 millions de m³, soit, comme nous l'avons noté, une réduction annuelle de 0,5 % de leur capacité de stockage, ce qui provoque une détérioration de la qualité de l'eau potable mobilisée et une importante perte en eaux permettant d'irriguer 10 000 ha/an.

En Algérie, 45 % des terres fertiles ont été endommagées par l'érosion (Gay *et al.*, 2016). L'érosion spécifique annuelle moyenne varie entre 136 t/Km² et 7 200 t/Km² (Achite et Ouillon., 2007). Environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion active (Morsli *et al.*, 2012). En plus des pertes de la fertilité des terres agricoles, le phénomène de l'envasement a touché l'ensemble des barrages où plus de 45 millions de m³ de sédiments se déposent chaque année au fond de ces retenues (Meddi *et al.*, 2016).

Ainsi, l'Algérie se situe aujourd'hui parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialité hydrique, c'est-à-dire, en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque mondiale qui est de l'ordre de 1 000 m³ par habitant et par an (Touati, 2010). En effet, en 1962, la disponibilité annuelle en eau théorique était de 1 500 m³/hab, ce qui

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

plaçait le pays dans une situation confortable. Elle n'était plus que de 720 m³ en 1990, de 630 m³ en 1998 et de 500 m³ aujourd'hui (Morgan et Alexis, 2013) à comparer avec les 3600 m³ par habitant en France et plus de 3 200 m³ en Italie (Truchot, 2006), les 950 m³ par habitant au Maroc (Allain El Mansouri, 2001), les 925 m³ par habitant en Egypte (Ayebe, 2004) et les 490 m³ par habitant en Tunisie (Cote, 2005). Avec ce rythme, elle ne sera plus que de 300 m³ d'ici 2050 (Touati, 2010).

1.6. Méthode d'évaluation de l'érosion hydrique

1.6.1. Méthodes quantitatives

L'étude des processus d'érosion a fait appel, durant les trois dernières décennies, à une panoplie de techniques de quantification des pertes en sol: parcelles expérimentales, les mesures par repères, simulateur des pluies, les stations de jaugeage, technique de traçage des sources des sédiments au moyen des éléments radionucléides, la cartographie thématique et les mesures bathymétriques.

Selon les objectifs recherchés, la complexité des processus érosifs (Mohamadi et Kavian, 2015) et les conséquences quelquefois non prédictives de ce phénomène, des approches et des techniques diverses fûtes adoptées pour quantifier les matériaux meubles arrachées par l'érosion. Selon Sadiki (2004), des mesures de différents type et à différents stades du processus de l'érosion ont été effectuées:

- ☞ au moment de l'impact des gouttes des pluies;
- ☞ au cours de flux des sédiments;
- ☞ après la sédimentation fluviale au niveau des barrages et des bacs.

Selon Sabir (1986), les approches de la quantification de l'érosion peuvent être regroupées en trois niveaux différents: (i) étude au niveau du versant (ii) étude du transit des matières solides transportées au niveau d'une section en travers du cours d'eau; (iii) étude de l'envasement (accumulation des sédiments) des retenues, des barrages et des bacs à l'aval d'un bassin versant.

Cependant, la quantification et la cartographie de l'érosion hydrique au niveau des bassins versants hydrologiques via des outils spatiaux devient un enjeu majeure (Park *et al.*,

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

2011 ; Xu *et al.*, 2012 ; Panagos *et al.*, 2015 ; Zhao *et al.*, 2015 ; Borrelli *et al.*, 2016 ; Zhang *et al.*, 2017).

1.6.1.1. Parcelles expérimentales

C'est la méthode la plus utilisée et la plus fiable, toutefois, elle est relativement coûteuse et délicate. Elle consiste en une parcelle de terrain de dimension variable (quelques mètres carrés à quelques centaines de mètres carrés), limitée sur tous ses côtés par des parois métalliques afin d'éviter les interférences avec le reste des versants et de ne recueillir que l'eau de la parcelle d'intérêt.

Elle est munie en aval d'un bassin de réception pour recueillir les eaux de ruissellement chargées de sédiments (Photo 4). Les mesures des débits solides et liquides se font d'une façon régulière avec une fréquence plus élevée lors des événements pluvieux importants qui faisant l'objet d'analyses de masse volumique et de granulométrie.

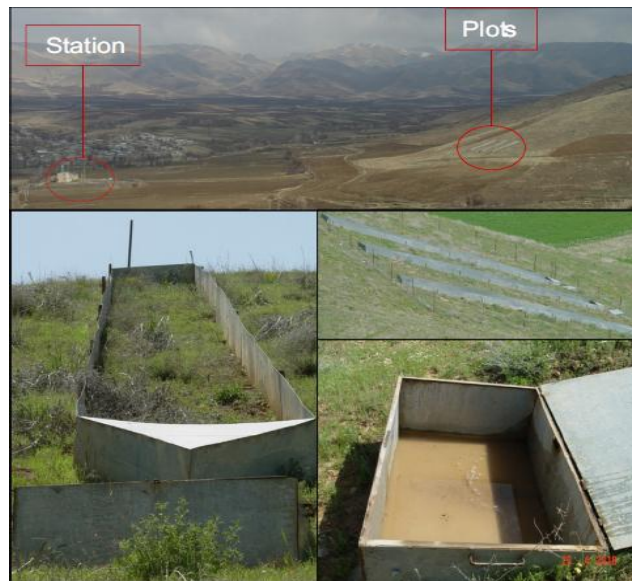


Photo 4. Dispositif d'une parcelle expérimentale (Mohamadi et Kavian, 2015)

Cette technique a permis à Wischmeier et Smith (1965) d'aboutir à l'équation universelle des pertes en sol (Sadiki, 2004). Cela a nécessité un nombre important de parcelles fonctionnant sur plusieurs années mais les résultats ont encouragé les aménageurs à utiliser cette équation un peu partout dans le monde (Mohamadi et Kavian, 2015 ; Sadeghi *et al.*, 2016 ; Kinnell, 2016 ; Bertol *et al.*, 2016 ; Anache *et al.*, 2017). Cette méthode démontre ainsi la possibilité d'étudier l'érosion à grande échelle.

1.6.1.2. Les mesures par repères

Cette technique est valable pour quantifier aussi bien l'érosion en nappe que l'érosion linéaire. Son principe est très simple, il s'agit de suivre l'évolution topographique de la surface du sol d'une parcelle des dimensions données et préalablement délimitée afin d'éviter l'influence du voisinage. A partir de cette évolution topographique et par un double intégration, sur la largeur et la longueur, on peut déterminer le volume de sédiments emportés par l'érosion.

On peut utiliser soit un maillage de piquets ou perches graduées (20 cm de côté) enfoncés et stabilisés dans le sol sur des parcelles de 1 ou 2 m²; soit faire les relevés des hauteurs entre la surface du sol et une règle métallique horizontale. Les mesures se font par des barres graduées qui coulissent dans des trous équidistants dans la règle et dont les bases plates viennent reposer sur la surface du sol (Olivry, 1984).

1.6.1.3. Techniques de traçage des sources des sédiments

Les mesures d'érosion hydrique en parcelles expérimentales sur les versants du bassin, constituent une approche longue, coûteuse et ne tient en compte que de l'érosion en nappe et en rigole. Par ailleurs, ces mesures doivent être poursuivies pendant plusieurs années, afin d'intégrer les fluctuations climatiques interannuelles. Le nombre de parcelles requises peut également devenir très important, si l'on désire estimer les risques d'érosion sous une variété de conditions édaphiques et agronomiques. De plus, dans certains pays du monde, l'érosion nivale résultant de la fonte de neige, doit être prise en considération, même si sa mesure est difficile à réaliser.

Dans ce contexte, l'utilisation de marqueurs permanents incorporés dans le sol est adoptée comme un complément essentiel aux méthodes conventionnelles (McHenry, 1968). Des divers éléments isotopiques dans le sol ont été suggérés comme traceurs du processus érosif.

La technique de traçage des sources des sédiments a été abordée aux USA à partir des années quatre-vingt (Ritchie et McHenry, 1990), puis a été utilisée un peu partout dans le monde (He et Walling, 1996 ; Benmansour *et al.*, 2006a ; Li *et al.*, 2010 ; Walling *et al.*, 2011 ; Yang *et al.*, 2011 ; Wilkinson *et al.*, 2015) en particulier dans les régions

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

méditerranéennes à savoir, le Maroc (Damnati *et al.*, 2004 ; Sadiki, 2004 ; Zouagui *et al.*, 2012 ; Benmansour *et al.*, 2013), la Tunisie (Benslimane *et al.*, 2013), l'Algérie (Toumi, 2013), la Roumanie (Robu et Giovani, 2009) et la Slovénie (Zupanc et Mabit, 2010).

Les éléments radionucléides dans le sol sont issus de la retombée nucléaire des essais atmosphériques en haute atmosphère dans les années 1950 et 1960 (Benmansour *et al.*, 2013). Ces éléments ont prouvé leur efficacité pour estimer les sources des sédiments au sein du bassin versant et en déduire les processus dominants.

Les éléments radioactifs qui font l'objet de cette étude sont, le Béryllium (^7Be) (Mabit *et al.*, 2008 ; Huisman *et al.*, 2013 ; Taylor *et al.*, 2014), le Radium-226 (^{226}Ra), le Radium-228 (^{228}Ra), le Thorium-234 (^{234}Th), le Thorium-228 (^{228}Th), le Potassium-40 (^{40}K), le Carbone organique total, l'Azote total, le Phosphore total (Benslimane, 2013), le Césium-137 (^{137}Cs) et le Plomb-210 ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) (Benmansour *et al.*, 2013).

Il s'avère que les éléments radioactifs dans le sol notamment, le Césium-137 (^{137}Cs) et le Plomb-210 ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$), peuvent constituer une excellente technique alternative par rapport aux autres techniques de mesure de l'érosion hydrique traditionnelles «érosion/sédimentation» au niveau du bassin versant (Zupanc et Mabit, 2010).

Le principe de cette technique est très simple, il consiste à comparer la teneur en élément radioactif dans le sol par rapport à sa teneur dans des sites témoins non érodés. Comme la surface étudiée est plus grande, il est jugé préférable de prendre en compte plusieurs sites représentant les retombées initiales pour intégrer la variabilité spatiale de ces dernières.

Cette démarche consiste à sélectionner des sites de référence non perturbés (site stable: ni érodé ni inondé). Le site de référence doit être plat, et n'avoir subi aucune activité agricole dès l'année de cette retombée nucléaire (1960) et préférentiellement devrait être couverte par des prairies (Toumi, 2013). A partir de ces sites de référence, et à l'aide d'un instrument d'enfouissement dans le sol, les échantillons du sol sont pris à des intervalles de profondeur de 2 centimètres afin d'établir un profil de profondeur de la répartition quantitative verticale de différents éléments radioactifs étudiés. Par la suite, les modèles de conversion mathématique permettent de convertir les activités de radionucléides ponctuelles en taux d'érosion et / ou de dépôt (Walling *et al.*, 2002).

1.6.1.4. Les stations de jaugeage: turbidimétrie (débits solides)

L'érosion hydrique se produit lorsque les particules de sol sont détachées sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et transportées par des écoulements superficiels peu profonds et s'accumulées sous forme de sédiments en aval. Le débit solide est la quantité (en kilogramme) de sédiment (particules, argiles, limons, sables, graviers, ...) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant une unité de temps (seconde).

Dans les zones semi-arides, si l'érosion linéaire n'est pas active, l'érosion en nappe est la principale source de sédiments (Benkadja *et al.*, 2013).

Achite et Meddi (2004) ont constaté que, l'estimation du taux de sédimentation des barrages et de leur durée de vie nécessite une bonne connaissance des apports solides.

Différents modèles empiriques ont été développés à travers le monde pour calculer les quantités de sédiments. Pandey *et al.* (2016) ont exposé tous les modèles utilisés à travers le monde. On cite par exemple: SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) (Rostamian *et al.*, 2008 ; Setegn *et al.*, 2009 ; Wang *et al.*, 2010 ; Oeurng *et al.*, 2011 ; Cai *et al.*, 2012 ; Zhang *et al.*, 2014 ; Zabaleta *et al.*, 2014), WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) (Raclot et Albergel, 2006 ; Pandey *et al.*, 2008 ; Pandey *et al.*, 2009c), AGNPS (*Agricultural Non-point Source Model*) (Haregeweyn et Yohannes, 2003 ; Mohammed *et al.*, 2004 ; Chowdary *et al.*, 2004 ; Jianchang *et al.*, 2008 ; Cho *et al.*, 2008), ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*) (Moehansyah *et al.*, 2004 ; Ahmadi *et al.*, 2006 ; Singh et Frevert, 2006) et SHETRAN (*Système Hydrologique European-TRANsport*) (Figueiredo et Bathurst, 2007). Leur application en fonction de l'espace (ponctuel ou global) de l'échelle (parcelle ou bassin versant), du temps (contenu ou pour un événement précis) et de l'estimation de l'érosion diffuse ou concentrée ainsi que, de leur possibilité d'intégration avec les SIG donne des meilleurs résultats. Certain nombre d'algorithmes ou d'équations empiriques ont été utilisés pour l'estimation des pertes en sol soit sur les versants soit au niveau des cours d'eau (Pandey *et al.*, 2016).

Certains investigateurs mettent l'accent sur les relations directes entre le débit liquide (m^3/s) et des débits solides (Kg/s) ($Q_s = aQ^b$), en utilisant des données de concentration de sédiments en suspension dans des sites contrôlés dans les cours d'eau (Asselman, 2000 ;

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

Abdellaoui *et al.*, 2002 ; Achite et Ouillon, 2007 ; Bencheikha *et al.*, 2008 ; Benkadja, 2008; Ouechtati et Baldassare, 2011 ; Khanchoul *et al.* 2012).

D'autres chercheurs ont utilisé des approches différentes pour estimer la quantité en sédiments à l'échelle du bassin. Shoa *et al.* (2013) ont utilisé le modèle de ratio de distribution de sédiments (SDR = *Sediment Distribution Ratio*) dans un environnement SIG pour estimer la quantité des sédiments des grands bassins en fonction des processus de leur distribution et des caractéristiques des averses. Rawat *et al.* (2013) ont utilisé le modèle de l'indice de la quantification des sédiments (SYI= *Sediment Yield Index*) dans le but d'examiner l'utilisation des terres en Inde. Cet indice rationalise l'apport de sédiments dans le plan d'eau en tant que fonction multiplicative du facteur potentiel d'érosivité du sol et de la valeur du rapport de distribution. Les modèles SDR et SYI ont tous deux ignoré certains paramètres importants en particulier, le type de roches exposées à l'intérieur du bassin et leur degré de fracturation (Abdel Monsef, 2015).

Arekhi *et al.* (2012) ont appliqué l'équation universelle modifiée de perte en sol (MUSLE) dans la prévision de la production des sédiments dans la bassin versant de Kengir (Iran) en remplaçant le facteur d'érosivité des pluies R dans l'équation de RUSLE par le modèle de puissance: $11,8 (Q.q_p)^{0.56}$ tel que, Q et q_p représentent respectivement le volume de ruissellement consécutif à l'averse (m^3) et le débit de pointe (m^3/s).

En Algérie, Touaibia *et al.* (2000) ont modélisé la concentration moyenne des sédiments en suspension à l'échelle de la crue pour l'oued Mina. En 2001, cet auteur a raffiné son approche en greffant aux données de télédétection un modèle basé sur les lois de la physique. En comparant les résultats obtenus par leur modèle avec une cinquantaine de mesures prises lors d'un seul événement pluviométrique, ils ont démontré l'efficacité du modèle. Toutefois, ce modèle nécessite une foule de données qui ne sont pas toujours disponibles.

Toujours dans le bassin versant de la Mina, Touaibia (2000) ont examiné à l'échelle mensuelle les relations reliant les débits solides (Q_s) aux débits liquides (Q_l) pour le sous-bassin versant de l'oued Haddad et celui de l'oued El-Abtal. Parmi les différents modèles explorés, le modèle de puissance ($Q_s = aQ_l^b$) était le plus performant où les valeurs des coefficients a et b varient en fonction du mois et la localisation du bassin versant.

Meddi *et al.* (1998) ont employé la régression multiple "pas à pas" afin d'établir les relations entre la dégradation spécifique (variable expliquée) et les paramètres explicatifs: le débit liquide moyen annuel et la superficie des bassins versants.

1.6.1.5. Les mesures d'envasement et d'accumulation des sédiments: la bathymétrie

La bathymétrie représente un ensemble de mesures de profondeur de la retenue d'eau du barrage. Ces mesures visent à connaître la topographie du fond submergé (CEHQ, 2008). Habituellement, cette technique à la retenue se fait par sondages ponctuels du fond de la retenue, suivant des transversales entre les deux rives du barrage.

Ainsi, cette méthode d'évaluation du transport solide à l'exutoire du bassin a été mise au point à partir de mesures régulières de la bathymétrie des lacs collinaires et d'un suivi du bilan hydrologique de la retenue. Les extrémités de chaque transversale sont nivelées et positionnées sur le plan de recollement de la retenue. Un modèle numérique de terrain est réalisé. La comparaison entre les volumes du réservoir à la cote de déversement, d'une mesure à l'autre, permet d'estimer la quantité de matériaux retenus. On attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matières en suspension obtenue par échantillonnage.

Le transport solide entre deux mesures bathymétriques est ainsi obtenu à partir de l'équation suivante (Albergel *et al.*, 2004):

$$T = V_s * d + \sum_1^n S_i * C_i$$

T: transport solide total entre deux mesures bathymétriques (t);

V_s: volume de vase mesurée (m³);

d: densité de la vase;

n: nombre de crues ayant déversé entre deux mesures;

S_i : volume déversé pendant la crue i (m³);

C_i: concentration moyenne en matière en suspension mesurée durant la crue i (t/m³).

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

Cette méthode, simple à mettre en œuvre, permet d'obtenir une bonne estimation des transports solides à l'exutoire d'un bassin-versant équipé d'une retenue. Elle globalise les pertes en terre dues aux trois formes d'érosion hydrique:

- l'érosion en nappe qui provient du ruissellement des pluies sur les versants;
- le ravinement causé par les écoulements linéaires sur les versants à forte pente;
- l'érosion des berges et du fond produite par les écoulements dans le réseau hydrographique principal.

Récemment, et en accord avec l'utilisation des outils spatiaux et leurs produits, de nombreuses méthodes pour déterminer et cartographier la bathymétrie et la topographie des systèmes aquatiques ont été suggérées à l'exutoire des bassins versants (Dongerren *et al.*, 2008 ; Babonneau *et al.*, 2013 ; Pattanaik *et al.*, 2015 ; Muto *et al.*, 2016 ; Chen *et al.*, 2017).

Les techniques de traitement d'images qui impliquent des données multi-spectrales de télédétection sont considérées comme très attrayantes pour les applications de bathymétrie. Elles fournissent une solution rentable et efficace en temps pour l'estimation de la profondeur d'eau (Doneus *et al.*, 2012 ; Jagalingam *et al.*, 2015 ; Pattanaik *et al.*, 2015 ; Profe *et al.*, 2016).

1.6.2. Méthodes qualitatives

1.6.2.1. Simulateur de pluie

Cette technique de mesure permet d'examiner le comportement textural du sol dans le temps (durant l'expérience) vis-à-vis l'infiltration et le ruissellement en fonction de la quantité et de l'intensité des pluies. On répète l'expérience, sous des conditions contrôlées, en fonction des variables du terrain telle que: la pente, le couvert végétal, le type du sol, l'humidité initiale du sol... etc.. Selon le simulateur utilisé, la surface impliquée peut être d'un à plusieurs mètres carrés et la hauteur de chute des gouttes de quelques décimètres à quelques mètres.

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION



Photo 5. Dispositif de parcelles expérimentales d'un simulateur des pluies
(Site web : www.alismiri.com/uploads/coursces1.pdf consulté le 13/10/2017)

Ce dispositif (Photo 5) permet de suivre avec précision la dynamique de l'infiltration et de tester la détachabilité de la surface d'un sol, mais pas l'érosion car la faible longueur de pente ne permet pas à l'énergie du ruissellement de s'exprimer. Ainsi, les résultats restent valables seulement pour comparer les réactions de différents types de sols sous différentes occupations de ces derniers sur des pentes variables. Car il est pratiquement impossible de réunir toutes les facteurs influençant l'érosion hydrique sur une surface de quelques mètres carrés en particulier la vitesse et la direction du vent, l'énergie et l'angle des gouttes des pluies ... etc.

Par ailleurs, l'irrégularité de ses précipitations, le climat méditerranéen connu par des événements pluvieux différents d'une région à l'autre rend l'extrapolation des résultats obtenus impossible sur des vastes étendues.

1.6.2.2. Méthodes cartographiques

La méthode cartographique consiste à diviser la surface du bassin versant en unités différenciées. La hiérarchisation selon leur vulnérabilité à l'érosion permet de déterminer les zones les plus fragiles potentiellement pourvoyeuses de sédiments (Sadiki, 2004). Elle se base sur des cartes thématiques dont chacune correspond à un facteur influençant l'érosion. Les valeurs de chaque facteur sont distribuées en différentes classes selon son ordre d'importance. La superposition des cartes thématiques avec leurs bases de données dans un environnement SIG aboutit à une carte synthétique d'érosion. Les zones ayant des degrés d'influence élevés correspondent aux celles les plus vulnérables à l'érosion.

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

Soti (2003) a élaboré un arbre décisionnel pour la réalisation de la carte de sensibilité des sols à l'érosion en se basant sur la déclivité de la pente, l'érodibilité des sols et la couverture végétale. Tout d'abord une hiérarchisation du facteur de pente en trois classes en fonction de son influence sur le phénomène érosif est définie. Une déclivité de 0 à 10 % représente une sensibilité faible à l'érosion, de 10 à 25 %, une sensibilité moyenne, et de plus de 25 % une sensibilité forte. Ensuite un regroupement des valeurs de l'érodibilité des sols en trois classes (faible, moyenne et forte) a été défini. Enfin, un regroupement des valeurs du couvert végétal a été opéré en trois classes selon le degré de protection de l'occupation du sol (peu protectrice, protectrice et très protectrice). La superposition de ces cartes et les différentes combinaisons (27 au total), débouchent sur une carte de sensibilité à l'érosion hydrique.

En Inde dans le bassin versant de Ghats, Pradeep *et al.* (2015) ont évalué la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique en utilisant la méthode multicritère AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Le résultat obtenu par cette technique montre que les pertes en sol diffèrent d'un secteur à l'autre. En effet, 44,2 % de la surface montre un risque des pertes en sol est nul à faible, 33,2 % ont un risque faible et 22,6 % présente un risque élevée à dangereux. Jaiswal *et al.* (2015) dans une étude portant sur l'analyse de décision multicritères (MCDA = *Multi Criteria Decision Analysis*) ont montré que le taux de l'érosion hydrique varie d'un sous bassin versant à l'autre. Cette étude a abouti à une hiérarchisation des zones qui seront traitées en priorité.

Au Maroc, Sadiki *et al.* (2004) ont intégré des cartes thématiques de différents facteurs d'USLE dans l'environnement SIG. Les résultats obtenus ont mis en évidence une hiérarchisation des zones du bassin versant vis-à-vis le degré de vulnérabilité.

1.7. Méthodes d'études de l'aléa érosif dans la zone d'étude

1.7.1. Le modèle RUSLE

Depuis les années 40 plusieurs auteurs ont travaillé à l'élaboration de modèles empiriques pour quantifier les pertes en sol. Renard *et al.* (1997) décrivent l'évolution des études sur les modélisations mathématiques pour la prédiction de l'érosion.

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

Le développement de modèles empiriques pour estimer les pertes en sol a commencé avec Zingg (1940) qui a formulé la perte en sol à la longueur de la pente ainsi qu'à la pente. Smith (1941) déterminait des facteurs de l'influence des cultures et des pratiques de conservation sur la perte en sol (Laflen et Flanagan, 2013).

En 1947, Browning et ses collaborateurs ont ajouté à l'équation de Smith le facteur érodibilité du sol, et ont préparé plusieurs tableaux de valeurs relatives de chaque facteur pour différents types de sols, de rotations de culture et de longueur de pentes. Smith et Whitt (1947) ont fourni de nombreuses données sur les pertes des terres argileuses sur différentes pentes et pour une large gamme de systèmes de culture. Musgrave (1947) a introduit le facteur « précipitations ».

En 1948, Smith et Whitt ont proposé une équation « rationnelle » d'estimation des pertes en sol, mais sur des sols argileux et sous certaines conditions (Sadiki, 2004).

L'équation universelle de perte de terre, USLE proprement dite, a été développée aux Etats Unis au centre national du ruissellement et de calcul de perte en sol (*National Runoff and Soil Loss Data Center*) créé en 1954. En 1958, des projets de recherche en coopération entre l'Université de Perdue et l'Etat Fédéral ont abouti à la mise au point, d'un modèle empirique de prévision de perte de terre par Wischmeier et Smith. Vingt ans plus tard, c'est-à-dire en 1978, une version plus complète de cette formule a été développée et publiée par ces deux chercheurs.

En 1997, Renard et ses collaborateurs ont proposé le modèle RUSLE qui a la même formule que l'USLE de Wischmeier et Smith (1978). Cependant, plusieurs améliorations sont apportées pour la détermination des différents facteurs érosifs. Ceci inclus, une approche différente de l'érodibilité des sols K, une nouvelle équation pour le facteur topographique LS, et une nouvelle valeur pour le facteur C et les pratiques de conservation.

1.7.1.1. Utilisation et objectifs de RUSLE

A l'instar de modèle de l'USLE (Sadiki, 2004), l'équation universelle de perte de terre révisée RUSLE a été utilisée un peu partout dans le monde parallèlement au développement des SIG et les possibilités de la cartographie et du calcul rapide qu'ils offrent.

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

L'approche RUSLE/SIG adoptée pour ce travail associe le modèle de Wischmeier et l'outil cartographique SIG. Elle permet d'évaluer le potentiel des pertes en sol en tout point du bassin versant. Mieux encore, elle donne l'opportunité de comparer les diverses actions ou facteurs sur lesquels il faut agir pour limiter le phénomène de l'érosion hydrique. Cette approche donne l'avantage de visualiser le territoire, gérer les pratiques CES existantes et raisonner sur les possibilités d'aménagement (Renard *et al.*, 2011 ; Jebari *et al.*, 2012).

Certains auteurs ont utilisé l'équation à lui seule pour quantifier l'érosion, on cite entre autres: Kouli *et al.* (2009) ; Grauso *et al.* (2010) ; Pradhan *et al.* (2012) ; Tanyas *et al.* (2015) ; Benchettouh *et al.* (2017).

D'autres ont adapté le RUSLE comme une approche combinée avec le transport solide dans les bassins, comme par exemple; Arekhi *et al.* (2012) ; Marques Da Silva *et al.* (2012) ; Saygin *et al.* (2014) ; Abd-ElMonsef (2015).

1.7.1.2. Le principe du modèle

L'équation de perte en sol s'exprime par la formule suivante:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Où

A: est le taux annuel de perte en sol en t/ha.

R: est le facteur de l'érosivité des pluies exprimé en Mj.mm /ha.h.

K: est l'érodibilité des sols, exprimé en t. ha/Mj.mm.

LS: est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m).

C et P: sont des facteurs sans dimension qui représentent, respectivement, l'effet de la couverture végétale et le rapport qui tient compte des techniques culturales antiérosives.

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

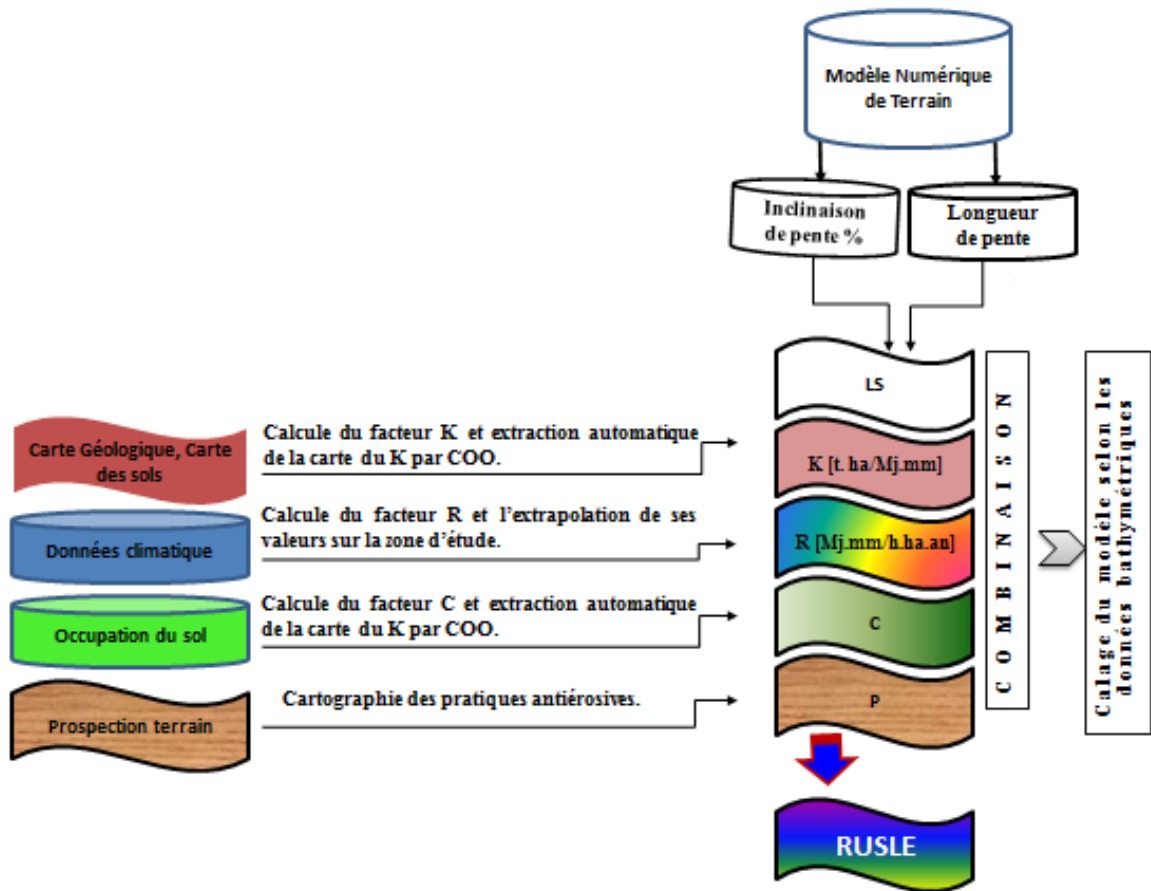


Figure 2. Organigramme méthodologique de l'approche RUSLE/SIG (Benchettouh *et al.*, 2017)

Les différents facteurs de RUSLE sont tous des rapports de pertes en sol relatifs à l'influence de chaque facteur, de telle sorte que le produit de l'ensemble est le taux de perte de terre totale de la zone étudiée. Si l'un des rapports tend vers 0 les pertes en sol tendent vers 0.

Le modèle de chaque facteur a été mis en évidence dans des conditions pour lesquelles, tous les autres facteurs sont égaux à 1, pour que la variation de perte enregistrée soit uniquement liée au seul facteur qu'on fait varier.

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

L'application de RUSLE pour la modélisation des pertes en sol par l'érosion hydrique au moyen des outils spatiaux, nécessite le calcul des différents facteurs intervenant dans les processus érosifs et en les représentant sous forme de cartes thématiques (fig. 2).

1.7.1.3. Les facteurs du modèle

1.7.1.3.1. R: L'érosivité des pluies

L'érosivité des précipitations (le facteur R ou $E_c.I_{30}$) (en $Mj.mm/ha.h.an$) dans le modèle RUSLE est définie comme une moyenne à long terme du produit de l'énergie cinétique. Cette dernière, est responsable du détachement des particules du sol sous le choc des gouttes de pluie (E_c) multiplié par l'intensité maximale en 30 minutes des pluies (I_{30}) qui exprime l'effet du ruissellement.

Le facteur R annuel est la somme des facteurs R calculés de toutes les averses dépassant 12,7 mm (Wischmeier et Smith, 1978). Ces averses doivent être séparées chacune de l'autre de plus de 6 heures, au cours desquelles tombe moins de 1,27 mm de pluie. Wischmeier et Smith (1978) ont suggéré une période de mesures de 22 ans pour que l'estimation de l'érosivité des pluies soit significative (Sadiki *et al.*, 2012).

Le calcul du facteur R par la méthode directe de Wischmeier et Smith (1978) ne peut s'appliquer que dans des régions qui sont équipées par un pluviographe qui enregistre instantanément les pluies, mais dans la majorité des cas, les stations pluviométriques n'enregistrent que la moyenne journalière (Jebari, 2009).

La majorité des auteurs qui ont utilisé le modèle RUSLE/USLE pour la quantification de l'érosion hydrique, ont adopté, pour le calcul du facteur R, des équations alternatives qui se basent sur des données aisément collectées.

De nombreuses études menées à travers le monde montrent que l'érosivité des pluies présente une corrélation significative avec les précipitations annuelles (Van der Knijff et Jones, 1999; Lin *et al.*, 2002 ; Yang *et al.*, 2003 ; Torri *et al.*, 2006 ; Xin *et al.*, 2010 ; Dumas et Olivier, 2015). D'après Lee et Heo (2011), l'indice de Fournier modifié (*MFI*) développé par Arnoldus (1977 ; 1980) pour le Maroc est un bon exemple de cette approche (Lahloui *et al.*, 2015).

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

Récemment, cet indice a été utilisé largement en Europe (Ozsoy *et al.*, 2012 ; Demirci et Karaburun, 2012) et en Asie (Pandey *et al.*, 2009 ; Prasannakumar *et al.*, 2012).

D'autres approches effectuées dans les pays méditerranéens ont été basées sur des données horaires, journalières, mensuelles et annuelles, c'est le cas de l'Italie (Diodato, 2004 ; Diodato et Bellocchi, 2010 ; De Paola *et al.*, 2013), de l'Espagne (Nekhay *et al.*, 2009) et de l'Algérie (Meddi *et al.*, 2016 ; Benchettouh *et al.*, 2017).

Pour surmonter ce problème, nous avons utilisé dans le présent travail un modèle simplifié pour estimer l'érosivité des pluies R en se basant sur des données disponibles (précipitations annuelles et les précipitations journalières maximales/an). Ce modèle utilise le concept de Diodato (2004 ; 2005) qui s'exprime comme suit:

$$R_{\text{MedREM}} = b_0 \cdot P \cdot \sqrt{d} (\alpha + b_1 \cdot L) \text{ (Mj.mm/ha.h.an)}$$

Où:

$$b_0 = 0,117 \text{ en } \text{Mj ha}^{-1} \text{ h}^{-1}.$$

$$b_1 = - 0,015 \text{ (d}^{0,5} \text{ mm}^{-0,50-1}\text{)}.$$

$$\alpha = 2,00.$$

L, est la longitude de la station météorologique d'étude exprimée en degré décimal.

P, est les précipitations moyennes interannuelles en millimètres et d, représente les précipitations journalières maximales par année en millimètres.

1.7.1.3.2. K: L'érodibilité du sol

L'érodibilité du sol désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion (Benslimane, 2013). Elle est fonction des propriétés physiques du sol (la texture, la structure, la perméabilité et la teneur en matière organique) et de la cohésion qui existe entre ses particules. Une faible cohésion va entraîner une forte érodibilité (Govers *et al.*, 1990 ; Poesen et Govers, 1990). Heusch (1970) et Demmak (1984) ont constaté qu'il existe une corrélation étroite entre la lithologie et l'intensité du ruissellement.

Le facteur K est donc, une mesure empirique de l'érodibilité du sol conditionnée par ses propriétés intrinsèques (Fu *et al.*, 2005). Il est lié à la vitesse de perméabilité, au type

de texture, au taux de matières organiques et aux autres paramètres granulométriques tels que, l'argile, le limon et le sable fin (Renard *et al.*, 1997).

1.7.1.3.3. LS: La topographie

Les facteurs L et S dans RUSLE reflètent l'effet de la topographie sur l'érosion. Selon les expériences de Wischmeier, le taux d'érosion augmente avec la longueur de pente. En effet, l'accumulation et l'accélération du ruissellement sur les plus longues pentes augmentent sa capacité au détachement et au transport des particules (Zhang *et al.*, 2013).

La longueur de la pente peut être définie comme la distance du point d'origine du ruissellement jusqu'au point où la diminution du degré de la pente marque le début de la sédimentation. Elle est mesurée selon la projection horizontale et non d'une façon parallèle à la surface du sol (Wischmeier et Smith, 1978). Le facteur topographique (LS) a été calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur (Renard *et al.*, 1997). Il est déterminé empiriquement à partir du modèle numérique de terrain (Kinnel, 2000; Van Remortel *et al.*, 2001 ; Wang *et al.*, 2002).

1.7.1.3.4. C: Le couvert végétal

Dans le modèle RUSLE, l'effet du couvert végétal est incorporé au facteur d'aménagement du couvert (El Garouani *et al.*, 2008). Il est défini comme un ratio de pertes en sol sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport aux pertes en sol correspondantes sur un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978). Il est déterminé en utilisant les équations empiriques qui contiennent des mesures sur le terrain de la couverture du sol (Wischmeier et Smith 1978 ; Renard *et al.*, 1997). Récemment, et avec l'évolution de la télédétection, les chercheurs ont développé de nombreuses méthodes pour estimer le facteur C en utilisant les valeurs de l'indice NDVI (Wang *et al.*, 2002 ; Lin *et al.*, 2002). Ces méthodes utilisent le modèle de régression en faisant des analyses de corrélation entre les valeurs de facteur C mesurées sur le terrain ou obtenues à partir de tables de guidage et celles du NDVI dérivé des images satellitaires. L'Indice de Végétation Différence Normalisée (NDVI), est un indicateur de la vigueur et de l'activité de la végétation. Le NDVI, est un indice de végétation qui estime la densité foliaire et son intensité chlorophyllienne. Il est largement utilisé dans l'analyse de la végétation en raison

de sa capacité à mettre en évidence des différences dans la couverture végétale qui ne sont pas facilement visibles autrement. Le calcul de cet indice est basé sur la propriété de réflectance du couvert végétal dans le spectre visible rouge (*RED*) et dans le proche infrarouge (*NIR*). Il varie entre (-1) (sol dépourvu de végétation) et (+1) (une forte activité chlorophyllienne).

1.7.1.3.5. P: Les techniques antiérosives

Le facteur P explique les différentes techniques agricoles et agro-forestières qui réduisent le potentiel érosif du sol ; par leur influence sur les schémas de drainage, sur la vitesse et la concentration de ruissellement, ainsi que sur les forces hydrauliques résultantes du ruissellement surfacique du sol (Renard *et al.*, 1991). C'est une expression chiffrée des effets globaux des pratiques antiérosives (le labour selon les courbes de niveau, la culture des bandes, le terrassement, le drainage souterrain ... etc.) sur les pertes en sol dans un site particulier. Car ces pratiques affectent l'érosion hydrique en modifiant le sens d'écoulement de surface en réduisant le volume et la vitesse de ruissellement (Renard *et al.*, 1997). Il chiffre ces pratiques par des valeurs qui vont de 1 pour les sols nus où il n'y a aucune pratique antiérosive à 0,0001 pour une forêt dense de conifères mixte ou une forêt dense à feuilles larges (Panagos *et al.*, 2015).

En effet, le labour en courbes de niveau oriente la rugosité du sol perpendiculairement à la pente de telle sorte à ralentir le ruissellement en diminuant les pertes en sol jusqu'à 75 % (Roose *et al.*, 2012). Un réseau des banquettes d'infiltration sur des pentes inférieures à 6 % associée à un fruitier d'olivier, par exemple, diminue l'effet érosif de 1 t/ha/an à 0,0227 t/ha/an (Panagos *et al.*, 2015). Une série des murettes construites sur des pentes dépassant 12% avec des cultures intensives peuvent se réduire l'érosion de 1 t/ha/an à 0,02 t/ha/an. Lorsque la pente du terrain est douce (< 12%), il est nettement préférable d'utiliser la technique des cordons de pierres sèches. l'installation de ces derniers sur les versants raides avec la mise en place de seuils dans les ravines suppriment le ruissellement des petites averses. Et par conséquent réduisant les débits de pointe et donc les transports solides qui envasent les barrages (Albergel *et al.*, 2004 ; Bergaoui *et al.*, 2008). Les parcours bien protégés, qui diminuent les pertes en sol de 1 t/ha/an à 0,0903 t/ha/an sont également plus efficaces que les cordons de pierres sèches dans un parcours libre où les pertes sont estimées à 0,38 t/ha/an (Panagos *et al.*, 2015).

CHAPITRE I

L'ÉROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

1.7.2. La technique AHP

L'AHP c'est une technique qui demande l'élaboration d'une matrice de comparaison binaire pour chaque facteur en précisant une échelle allant de 1/9 jusqu'à 9 selon l'importance de ce dernier (tableau 2). Les poids attribués aux facteurs (tableau 3, colonne 7) sont des valeurs relatives à leur importance dans le processus érosif. Il est nécessaire de calculer un ratio de cohérence (RC) pour indiquer la fiabilité des jugements de la matrice calculée (Saaty, 1977). Pour que cette matrice soit cohérente, il faut que la valeur de RC soit inférieure à 10 %.

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre
5	Importance forte ou déterminante
7	Importance très forte ou attestée
9	Importance absolue
2, 4, 6, 8	Valeur associée à des jugements intermédiaires

Tableau 2. L'échelle fondamentale des nombres absolus (Saaty, 2008)

Facteurs	F1	F2	F3	...	Fn	Wi
F1	$1/\sum F1$	$W2-1/\sum F2$				$\sum F1/n$
F2	$W1-2/\sum F1$	$1/\sum F2$				$\sum F2/n$
F3	$W1-3/\sum F1$		$1/\sum F3$			$\sum F3/n$
...			
Fn	$W1-n/\sum F1$				$1/\sum Fn$	$\sum Fn/n$
	$\sum F1$	$\sum F2$	$\sum F3$...	$\sum Fn$	

Tableau 3. Matrice de comparaison par paires et calcul de son vecteur propre

Quand w_{ij} représente le jugement quantitatif de la paire de caractéristiques C_i, C_j , il est défini par les règles suivantes :

Si, $w_{ij} = \alpha$, alors $w_{ji} = 1/\alpha$, $\alpha \neq 0$

Si, C_i est considéré comme étant d'une importance relativement égale à celle de C_j , alors $w_{ij} = 1$, pour tout i .

Le vecteur propre de la matrice peut être trouvé par la formule suivante :

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{ij} \right)^{1/n}$$

CHAPITRE I

L'EROSION HYDRIQUE CONCEPT ET METHODES DE QUANTIFICATION

En outre, celui-ci doit être normalisé pour que la somme de ses facteurs soit égale à l'unité. Pour cela, il suffit de calculer la proportion de chaque facteur par rapport à l'addition.

$$T = \left[\frac{W_1}{\sum W_i} \quad \frac{W_2}{\sum W_i} \quad \dots \quad \frac{W_n}{\sum W_i} \right]$$

Soit T le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque facteur.

Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, Saaty (1977) propose de suivre le calcul suivant :

$$\lambda_{\max} = T \cdot W$$

Où W est calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaison et λ_{\max} est la valeur maximale d'Eigen value (Malczewski, 1999).

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Où n est le nombre des facteurs de la matrice.

Pour déterminer si les comparaisons sont conformes ou non, on a recours au calcul du ratio de cohérence (RC) selon la formule:

$$RC = \frac{CI}{CA}$$

Où RC est le ratio entre CI et l'indice de cohérence aléatoire (CA). Ce dernier présenté dans le tableau 4 est issu d'un échantillon de 500 matrices réciproques positives gérées de façon aléatoire, dont la taille atteint 11 par 11.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Tableau 4. Valeurs de CA pour n = 1, 2, 3, ... 11 (Saaty, 1980)

1.8. Conclusion

À travers la présentation succincte d'une panoplie d'informations sur l'érosion des sols; les différents facteurs qui l'influencent, ses formes ainsi que ses conséquences sur l'environnement, nous avons abouti aux différentes méthodes de mesure et d'estimation de l'érosion.

Récemment, et en accord avec l'utilisation croissante des outils satellitaires ainsi que leurs produits performants dans l'étude des phénomènes naturels géo spatiotemporels, le modèle RUSLE dans l'estimation et la cartographie de l'aléa érosif devient une approche indispensable. Son utilisation à l'échelle d'un bassin versant a donnée des résultats pertinents et encourageants. Cependant, l'application de ce modèle seul dans les pertes en sol l'expose à certaines limites. Ceci car, il ne s'applique qu'à l'érosion due à des facteurs bien définis. L'utilisation des techniques complémentaires au modèle RUSLE, telles que la technique AHP présente beaucoup d'avantages, notamment dans la faculté de démêler la complexité de l'interdépendance de ces facteurs pour mieux cerner l'impact de chacun d'eux, en évaluant sa contribution aux pertes en sol.

CHAPITRE II

**CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES,
CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE**

2.1. Introduction

La modélisation hydrologique s'attache à représenter schématiquement les différents phénomènes physiques liés à l'eau et à son comportement afin de mieux les étudier et d'analyser l'influence qu'ils exercent sur le bassin hydrologique. L'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets est le bassin versant. Celui-ci est théoriquement une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire (Ecuyer, 2003; Ed-Daoudi et Bouloumou, 2012).

Le diagnostic physico-géographique, première étape de la connaissance des bassins versants, permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans les processus érosifs à savoir les facteurs: orographiques, morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques. L'interaction de ces facteurs est déterminante dans le comportement hydrologique des bassins (Baba Hamed et Bouanani, 2016).

Le développement des techniques modernes d'acquisition et de mise à disposition d'informations digitales par le biais du modèle numérique de terrain (MNT) et des données satellitaires multi-dates a rendu possible la caractérisation physiographique et climatique d'un bassin versant. Ces informations sont de plus en plus utilisées dans la description des caractéristiques du milieu et à la cartographie numérique.

Afin de mettre en relief le comportement hydrologique de l'aléa érosif dans les deux bassins versants à savoir, la Mina et Kramis vis-à-vis leurs caractéristiques physiographiques, une étude préliminaire de connaissance et d'investigation du terrain est préalable afin d'analyser ces caractéristiques.

Le présent travail consiste à réaliser dans un premier temps des cartes thématiques à l'aide des données satellites intégrées dans un environnement SIG pour étudier les caractéristiques physiographiques (localisation, hypsométrie, pentes, expositions, hydrographie, lithologique, ... etc.) et bioclimatiques (occupation des sols, isohyètes, carte iso-thermique, ... etc.) de notre zone d'étude. Ensuite et à l'aide d'une analyse statistique

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

(ACP) nous essayerons de regrouper les dix-sept sous-bassins semblables physiquement similaires.

2.2. Contexte géographique et climatique de la région d'étude

Le bassin de l'oued Kramis se situe dans la partie Nord-ouest de l'Algérie. Il fait partie du grand bassin côtier algérois. D'une superficie de 302 Km² et d'une forme allongée ($K_G = 1,7$), il est encadré par le massif montagneux du Dahra au Nord, et par les monts de Taougrite et Chaabnia à l'Est. Au Sud limité par les monts Nord de la plaine de Chélif. Il se situe entre les latitudes Nord de 36° 16' 00'' et 36° 6' 30'' et les longitudes Est de 0° 39' 30'' et 0° 56' 30'' (Fig. 3).

L'altitude du bassin varie de 63 m à 757 m. Elle décroît de l'Est vers l'Ouest avec une élévation moyenne de 380 m. Ses reliefs présentent des caractères très contrastés, constitués de plateaux entaillés et de versants raides. Seul 44,6 % de la superficie du bassin est occupée par des plaines à activité agricole. Ces dernières sont limitées au Nord par les monts de Taougrite, à l'Est par ceux de Chaabnia, au Sud par ceux d'Ain Merane et à l'Ouest par les monts de Sidi Mhamed Benali. Le cours d'eau principal prend sa source dans les monts de Taougrite et de Chaabnia à l'Est pour confluer dans la plaine d'Achaacha au Nord après un parcours de 32,5 Km.

Vu son importance socioéconomique, le bassin de l'oued Kramis est doté en aval d'un barrage d'eau d'une capacité de 45,4 millions de m³ (ANBT, 2017). Ce barrage a été mis en service en 2004 (Photo 6) pour répondre aux besoins d'approvisionnement en eau potable d'une population totale de 73 289 habitants appartenant aux agglomérations de Nekmaria, Khadra, Ouled Boughanem et Achaacha d'une part et aux besoins des activités agricoles sur un périmètre de 4 300 hectares d'autre part (nommé périmètre d'Achaacha).

Le bassin versant de la Mina est situé au Nord-ouest de l'Algérie dans le domaine de l'Atlas tellien entre latitude 34° 42' 36" et 35° 35' 2" N et longitude 0° 23' 51" et 1° 8' 56" Est. Il s'allonge sur 90 Km sur les monts de Frenda au Sud et ceux de la Mina au Nord et sur 50 Km de l'Ouest à l'Est entre les monts des Beni-Chougrane et le massif de l'Ouarsenis, respectivement. Elle s'étend sur une surface de 4 800 Km². Les reliefs présentent une légère asymétrie, cet aspect est dû à des différences de pédogénèse, de météorisation et d'ablation selon l'exposition.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

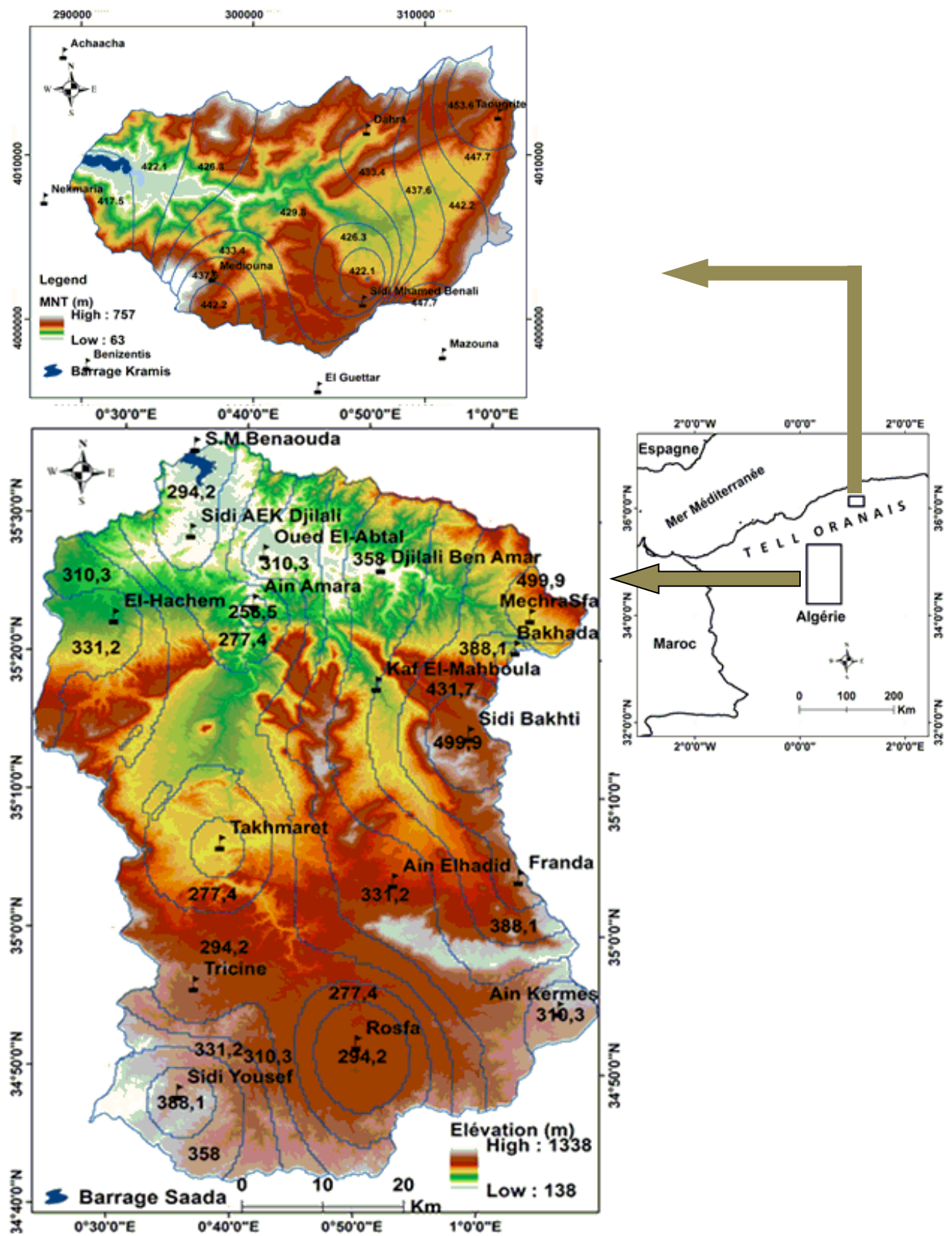


Figure 3. Localisation de la zone d'étude

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

L'hypsométrie avec des tranches d'altitude de 100 m, nous donne une altitude moyenne de 771,2 m. Le climat est de type semi-aride (310 mm/an) dont l'écart thermique atteint parfois 41,2 °C entre Juillet et Janvier et où les pluies sont rares et irrégulières. Le coefficient d'abattement montre que le secteur Est est plus arrosé que celui situé à l'Ouest. L'indice de Desfontaines montre que le mois d'Avril présente une plus forte érosivité des pluies (Benchettouh, 2012).

L'oued principal de la Mina prend sa source dans les monts de Frenda au Sud pour confluer au Nord avec l'Oued Chélif après un parcours de 125 Km. Deux barrages ont été construits; Bakhadda, mis en service en 1936 sur le cours supérieur qui draine un sous bassin de 1 300 Km² et à l'aval de celui-ci est construit le barrage Saada (nommé également Sidi Mhamed Benaouda). Ce dernier répond à des besoins d'approvisionnement en eau potable de la ville de Relizane en valet des besoins agricoles par le développement de l'irrigation sur un périmètre de 23000 hectares situés dans la plaine de la Mina et du Bas Chélif (Toumi, 2013). L'oued Mina forme de loin, le cours d'eau le plus important avec ses principaux affluents: oued Haddad, oued El-Abed et oued Taht (Fig. 11). Le réseau hydrographique est assez dense, ce qui montre une activité importante du phénomène érosif. Les principaux types d'occupation du sol sont le milieu naturel (72,8%), oùdominent le matorral et la forêt suivie de l'activité agricole (26,2%).



Photo 6. Vue sur les barrages : oued Kramis à gauche et la Mina à droite (ANBT, 2017)

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat en 2008, le bassin de la Mina compte une densité humaine d'environ 72 habitants/ Km². Cette densité est élevée par rapport à la moyenne nationale (15,9 habitants/ Km²). Il est réparti sur quatre Wilayas, à savoir, Tiaret, Mascara, Relizane et Saida. La wilaya de Tiaret occupe 48,22% de la superficie totale de la région d'étude, suivie de la wilaya de Relizane qui occupe 26,59% du secteur. Les wilayas de Mascara et de Saida n'occupent respectivement que 15,79 et 9,4% de la superficie totale du bassin (Toumi, 2013).

2.3. Matériel et méthodes

Le SIG peut être défini comme un outil qui permet de localiser, d'analyser et de représenter des données ayant une référence spatiale (El Hmaïdi *et al.*, 2014).

Le principe de ce travail est basé sur une succession d'étapes permettant l'élaboration des cartes thématiques de la zone d'étude. L'une des applications principales du programme SIG est la représentation cartographique d'une unité topographique et le stockage des informations des objets géographiques avec leurs attributs numériques.

2.3.1. Délimitation des bassins versants de la zone d'étude

Les images TM (*Thematic Mapper*) ayant une résolution spatiale de 30 mètres fournissent des informations spectrales dans les sept bandes dont le visible (*VIS*), proche infrarouge (*NIR*), courtes ondes infrarouges (*SWIR*) et infrarouges thermiques (*TIR*). En 1999, un nouveau capteur Landsat; le *Thematic Mapper* amélioré plus (*ETM+*) était mis en service pour surveiller les ressources de la terre. Celui-ci a des bandes thermiques supplémentaires sur l'ancien capteur TM.

En 2013, un nouveau capteur *TIRS* du satellite Landsat8 (*OLI*) a été installé avec des améliorations supplémentaires à la précédente série Landsat, particulièrement pour le nombre ainsi que la résolution spatiale des bandes thermiques (Storey *et al.*, 2014).

Dans notre étude une scène multi spectrale de Landsat_5TM de *Path_197/Row_035*, acquise le 22/10/2006 après deux ans de la mise en service de barrage de l'oued Kramis, a été utilisée pour pouvoir positionner la digue de celui-ci. Deux scènes multi spectrales Landsat_8 *OLI/TIRS* (*Operational Land Imager*) (*Thermal Infrared Sensor*) de

Path_197/Row_035 et celle de Path_197/Row_036, acquises le 18 mars 2014, ont été également téléchargées et traitées afin de positionner la digue du barrage de l'oued Mina. Ces images sont fournies au format *Geotif* par le site d'USGS².

Le modèle numérique du terrain de deux bassins a été extrait à partir de cinq images *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) : N36E00, N35E00, N35E01, N34E00 et N34E01. Ces images ont été téléchargées à partir du site précédemment cité.

Toutes ces informations digitales sont intégrées et analysées dans un environnement SIG pour modéliser les caractères physiographiques ainsi que les phénomènes qui s'y produisent dans la zone d'étude.

2.3.2. Modélisation des caractères physiographiques

Les données de modèle numérique de terrain sont introduites et analysées au moyen du kit « *spatial analyst* » intégré dans l'ArcGIS 10.2 afin de délimiter les deux bassins et leurs sous-bassins drainés par les différents cours d'eau existants. Deux principaux modèles « *hydrology* » et « *conditional* » existants dans le kit « *spatial analyst* » ont été utilisés avec leurs applications « *fill, flow direction, flow accumulation* et *con* ». Ces différentes applications sont effectuées en premier lieu pour déterminer le réseau hydrographique qui draine l'ensemble d'un bassin versant. Ensuite les deux applications « *Stream ordre* » et « *Stream to feature* » dans le modèle « *hydrology* » ont été utilisées. Enfin, le bassin versant et ses sous-bassins sont délimités en fixant l'exutoire de l'oued principal qui draine chacun d'eux en appliquant l'outil « *Watershed* ».

Outre les applications citées précédemment, le kit « *spatial analyst* » génère automatiquement d'autres informations complémentaires qui semblent indispensables dans notre travail entre autres; la pente, les courbes de niveau, l'exposition des reliefs ... etc. Les couches thématiques obtenues sont des données superposables dans le SIG pixel par pixel.

²<http://earthexplorer.usgs.gov>

2.3.3. Modélisation des paramètres climatiques

La zone d'étude (la Mina et Kramis) est encadrée par le moyen Chélif à l'Est, le bassin de la Macta à Ouest, le massif de Dahra au Nord et le Chott Ech-Chergui au Sud. La partie septentrionale s'insère dans le Tell oranais et comprend la retombée Sud-orientale de l'Ouarsenis à l'Est. À l'Ouest, il est limité par les Monts des Béni Chougrane.

2.3.3.1. Données utilisées

Les données pluviométriques téléchargées³ ont été complétées par des données obtenues auprès de l'ANRH, de la DSA, de la conservation des forêts ... etc.

2.3.3.2. Caractéristiques des stations pluviométriques

Les stations pluviométriques de l'oued Kramis

n°	Station	PCS: Nord_Sahara_1959_UTM_Zone_31N					
		X (dd)	Y (dd)	Altitude (m)	Localisation	Période de mesure	P (mm)
1	Taougrite	0,92	36,25	530	(+)	22	453,6
2	Mazouna	0,88	36,13	454	(-)	22	449,7
3	SMBAli	0,85	36,15	481	(+)	22	417,5
4	Dahra	0,85	36,26	489	(-)	22	427,6
5	Ain Merane	0,98	36,16	497	(-)	22	451,9
6	Nekmaria	0,62	36,19	308	(-)	22	410,2
7	Achaacha	0,64	36,25	236	(-)	22	431,8
8	Khadra	0,58	36,25	151	(-)	22	406,5
9	Benizentis	0,66	36,11	421	(-)	22	395,7
10	Mediouna	0,75	36,13	463	(+)	22	440,2
11	Dadas	0,55	36,23	154	(-)	10	340,0

(+) se localise au sein de la zone d'étude, (-) se localise hors zone d'étude

Tableau 5. Les stations pluviométriques du bassin de l'oued Kramis

Les stations pluviométriques du bassin de l'oued Kramis sont réparties spatialement comme suit: trois stations localisées au sein de celui-ci et huit autres sont situées hors de la zone d'étude (tableau 5). Tandis que, celles du bassin de la Mina, cinq stations se trouvent hors de celle-ci et dix-sept stations se localisent au sein de la zone d'intérêt (tableau 6).

³ ont été obtenues à partir du site Web: <http://tn.freemeteo.com/letemps/historique/historique-quotidien/?gid=2492205&date=2015-05-06&station=13004&language=french&country=algeria> (disponible sur net au cours de notre d'étude) pour les onze stations (Taougrite, Mazouna, Sidi Mhamed Benali, Dahra, Ain Merane, Nekmaria, Achaacha, Khadra, Benizentis, Mediouna et Dadas) de la zone d'étude

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Les stations pluviométriques de l'oued Mina

<i>PCS: Nord_Sahara_1959_UTM_Zone_31N</i>							
N°	Stations	X (dd)	Y (dd)	Altitude (m)	Localisation	Période de mesure	P (mm)
1	Ain Amara	0,68	35,39	325	(+)	35 ans	248
2	Kaf El-Mahboula	0,98	35,24	525	(+)	30 ans	352
3	MechraSfa	1,06	35,38	654	(+)	35 ans	497
4	Djilali Ben Amar	0,85	35,44	284	(+)	35 ans	347
5	Takhmaret	0,64	35,10	639	(+)	35 ans	248
6	Oued El-Abtal	0,69	35,45	281	(+)	35 ans	310
7	Sidi AEK Djilali	0,59	35,48	240	(+)	35 ans	231
8	El-Hachem	0,49	35,37	490	(+)	35 ans	321
9	S.M.Benaouda	0,60	35,58	238	(+)	35 ans	231
10	Rélizane	0,56	35,69	176	(-)	35 ans	346
11	Aouf	0,21	35,33	256	(-)	27 ans	409
12	Bakhada BRG	1,04	35,34	583	(+)	35 ans	318
13	Tiaret	1,32	35,37	978	(-)	35 ans	531
14	Frenda	1,05	35,07	1077	(+)	35 ans	398
15	Ain El hadid	0,88	35,06	828	(+)	35 ans	313
16	Sidi Bakhti	0,98	35,24	943	(+)	25 ans	500
17	Ain Kermes	1,11	34,91	1127	(+)	28 ans	299
18	Rosfa	0,84	34,86	908	(+)	21 ans	219
19	Tricine	0,61	34,93	1039	(+)	20 ans	279
20	Maamora	0,53	34,64	1121	(-)	23 ans	320
21	Med El Habib	0,26	34,80	1086	(-)	17 ans	365
22	Sidi Yousef	0,60	34,80	1097	(+)	24 ans	377

(+) se localise au sein de la zone d'étude, (-) se localise hors zone d'étude

Tableau 6. Les stations pluviométriques du bassin de l'oued Mina

Les données ponctuelles des précipitations et des températures moyennes mensuelles sont traitées tout d'abord dans une page Excel avec leurs coordonnées géographiques en utilisant la projection « *PCS: Nord_Sahara_1959_UTM_Zone_31* », ensuite ces données sont introduites dans l'ArcGIS. L'outil « *geostatistical analyst* » a été utilisée afin d'extrapoler ces données qui ont été déjà calculées selon des formules empiriques adoptées. Les cartes résultantes nous ont permis d'interpréter la variabilité spatiale de l'effet de ces fondamentaux facteurs climatiques sur l'ensemble du territoire de la zone d'étude.

2.4. Résultats et discussion

2.4.1. Analyse physiographique

L'étude des reliefs dans une approche environnementale est un paramètre clé, détermine en grande partie, l'effet interdépendant des facteurs climatiques et leur influence sur le paysage des terres ainsi que, le comportement hydrologique d'un bassin versant (El Hmaidi *et al.*, 2014).

2.4.1.1. Les courbes de niveau

L'hypsométrie consiste à joindre les points d'égales altitudes; dans le cas où elles sont rapprochées la pente est raide et lorsqu'elles sont éloignées la pente est faible et le terrain a un aspect plat.

Les courbes de niveau de notre zone d'étude ont été extraites à partir du modèle numérique de terrain intégré dans le logiciel ArcGIS au moyen de l'outil « *surface* » dans le kit « *spatial analyst* ». Le produit de cette extraction de deux bassins est mentionné dans le tableau 7.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de l'oued Mina					
Classes d'altitude (m)	S. entre CN (Km ²)	% Surface	S. cumulée (Km ²)	S. à la limite d'inférieure %	Elévation (m)
138 - 238	71,20	1,48	71,20	100	138
238 - 338	205,30	4,28	276,50	98,52	238
338 - 438	298,81	6,23	575,31	94,24	338
438 - 538	438,36	9,13	1013,68	88,01	438
538 - 638	515,26	10,73	1528,94	78,88	538
638 - 738	597,76	12,45	2126,70	68,15	638
738 - 838	529,98	11,04	2656,67	55,69	738
838 - 938	601,20	12,52	3257,87	44,65	838
938 - 1038	691,62	14,41	3949,49	32,13	938
1038 - 1138	627,30	13,07	4576,78	17,72	1038
1138 - 1238	201,56	4,20	4778,34	4,65	1138
1238 - 1338	21,66	0,45	4800,00	0,45	1238
Toatal	4800	100		0,00	1338

Le bassin versant de l'oued Kramis					
Classes d'altitude (m)	S. entre CN (Km ²)	% Surface	S. cumulée (Km ²)	S. à la limite d'inférieure %	Elévation (m)
63-113	4,8	1,6	4,8	100,0	63
113-163	8,7	2,9	13,5	98,4	113
163-213	12,4	4,1	25,9	95,5	163
213-263	17,5	5,8	43,4	91,5	213
263-313	35,3	11,6	78,7	85,7	263
313-363	56,1	18,4	134,8	74,1	313
363-413	42,0	13,8	176,8	55,7	363
413-463	59,0	19,6	235,8	41,9	413
463-513	32,0	10,8	267,8	22,3	463
513-563	16,0	5,5	283,8	11,5	513
563-613	11,1	3,6	294,9	6,0	563
613-663	4,6	1,5	299,5	2,3	613
663-713	2,1	0,7	301,6	0,8	663
713-757	0,4	0,1	302	0,1	713
Total	302	100		0,0	757

Tableau 7. Classes des altitudes des deux bassins versants

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

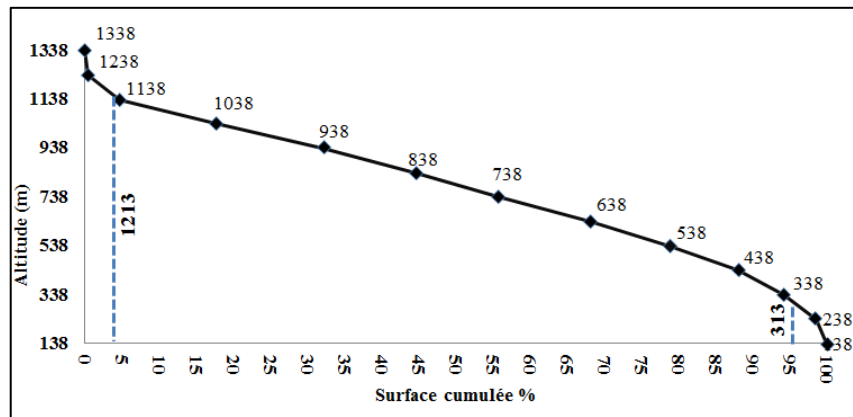


Figure 4. Courbe hypsométrique du bassin de l'oued Mina

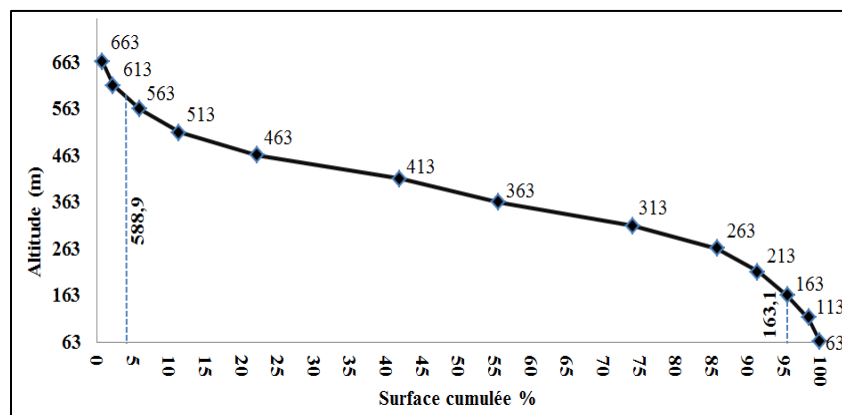


Figure 5. Courbe hypsométrique du bassin de l'oued Kramis

Les figures 4 et 5 représentent, respectivement, les courbes hypsométriques du bassin versant de la Mina et celui de Kramis.

L'altitude des reliefs du bassin de la Mina varie entre 1 338 m et 138 m. Elle décroît du Sud vers le Nord. Les reliefs sont très contrastés, constituent de plateaux entaillés et de versants raides (Toumi, 2013). Seuls 9,13 % de la surface sont occupées par des plaines se situent dans le secteur Nord dont les classes d'altitude comprises entre 438m et 538m (tableau 7).

Dans le secteur Sud (Ain Kermes et Sidi Youcef) et celui Est (Frenda par exemple), la majorité des reliefs sur une surface de 17,72 % (classe d'altitude : 1038 m – 1338 m) se caractérisent par des altitudes dépassant les 1 000 mètres. Ces altitudes au seuil de 5% et 95% de la surface cumulée sont de l'ordre de 1 213 m et 313 m respectivement (Fig. 4).

Concernant le bassin versant de l'oued Kramis, la dénivelée maximale des terres, de même que celle des terres à 5% et 95% d'altitude, reflètent la présence d'un massif montagneux car elles atteignent respectivement plus de 624 m et 157 m. De ce fait, la

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

majorité du Nord-est (Taougrite, Dahra) et du Sud (Sidi Mhamed Benali et Mediouna) de la région d'étude est caractérisée par des reliefs relativement accidentés couvrant une surface de 49,6%. En amont, les terres sont caractérisées par des reliefs plats qui représentent en majeure partie des vallées à activité agricole. Dans la partie avale du bassin, les versants qui la constituent présentent des pentes douces mais avec des aspérités des reliefs.

2.4.1.2. Les pentes

Toumi (2013) a constaté que l'aspect orographique du bassin de la Mina est assez diversifié lorsqu'il a distingué des plaines, des plateaux et des zones montagneuses. Ces entités façonnent des milieux naturels découpant l'espace de la zone en unités physio-géographiques.

Comme nous l'avons noté dans le chapitre I, si l'érosivité des pluies, la lithologie du sol et le couvert végétal jouent un rôle crucial dans les processus érosifs, les effets de la topographie sont également jouent un rôle important et complexe dans l'érosion hydrique. Dans les zones arides et semi arides méditerranéennes, le gradient de la pente est corrélé positivement avec la rugosité de la surface du sol qui agit en diminuant le ruissellement et les pertes en sols (Abrahams et Parsons, 1991 ; Cooke *et al.*, 1993 ; Simanton et Toy, 1994).

Lopez (1976) a montré que la potentialité et les limites d'utilisation du territoire dépendent dans leur majeure partie de la pente puisque celle-ci contribue à la détermination des possibilités d'érosion en relation avec d'autres facteurs socioéconomiques du milieu à savoir la mécanisation des cultures, les modalités d'irrigation, les possibilités de pâturage et l'éventualité de la reforestation.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

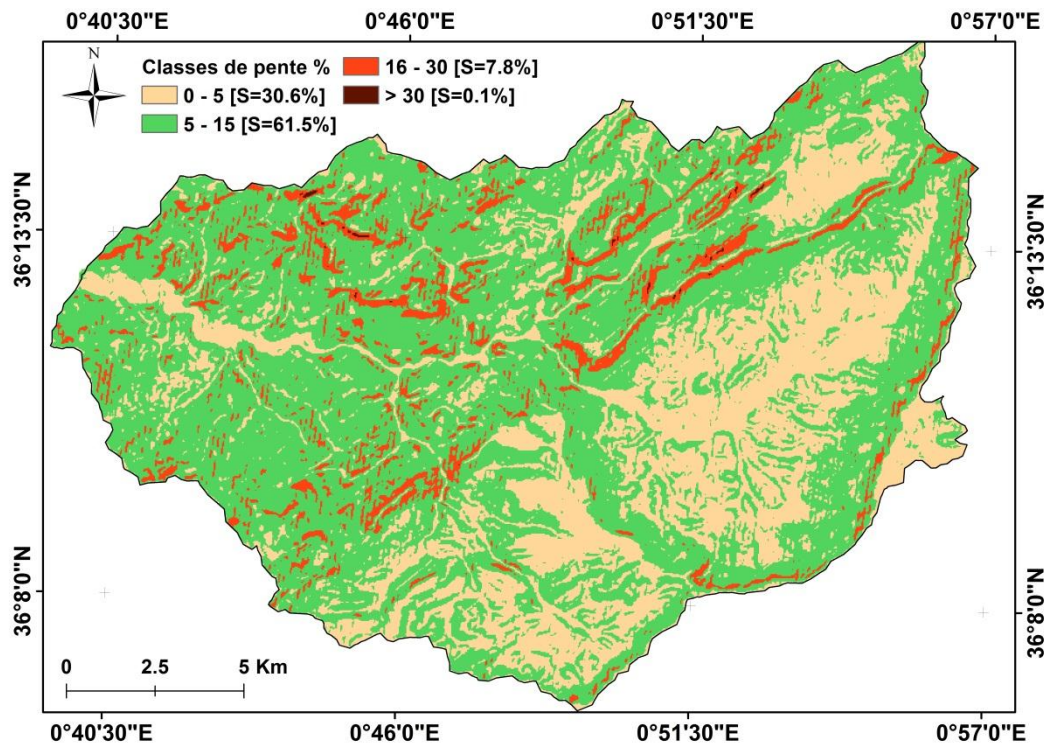


Figure 6. Carte des pentes du bassin de l'oued Kramis

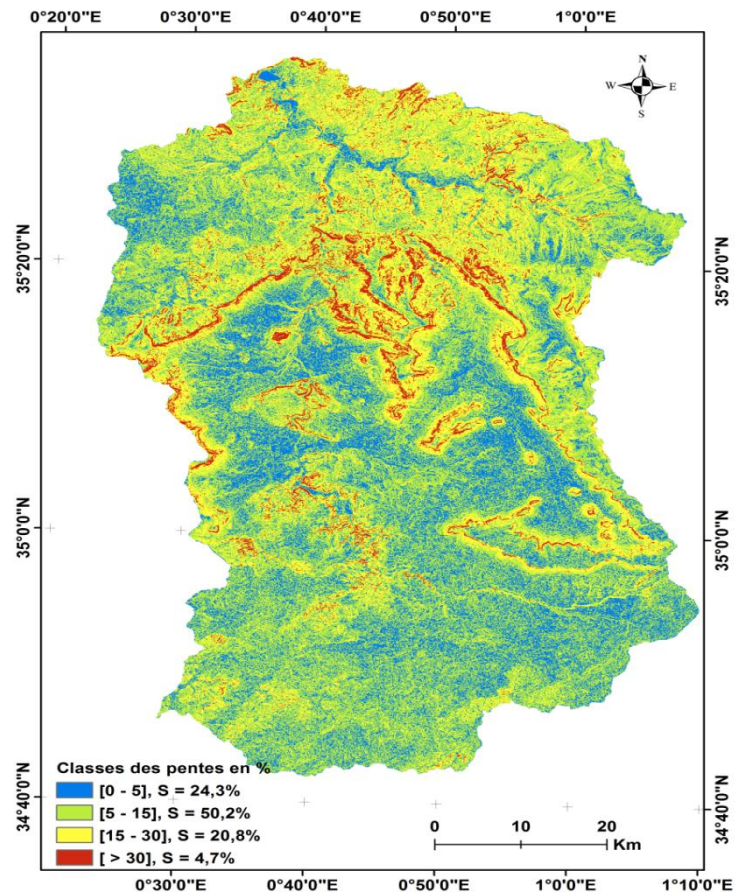


Figure 7. Carte des pentes du bassin de l'oued Mina

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Les cartes des pentes représentées par les figures 6 et 7 sont établies à partir du modèle numérique de terrain, les valeurs des pentes sont regroupées en 4 classes selon la classification de Dimitrios *et al.* (2013), ainsi :

✓ Pente : 0 - 5% caractérise l'ensemble des terrains dont la topographie est généralement plane. Ce sont les fonds de vallées (Photo 7), les plaines et les plateaux. Cette classe témoigne la stabilité des terres avec un risque d'érosion faible. Elle couvre en moyenne 27,5 % de la superficie totale de deux bassins versants.



Photo 7. Cultures de fonds des vallées irriguées (*Auteur, 2013*)

✓ Pente 5 - 15% caractérise généralement un relief escarpé (Photo 8), qui peut être des plateaux ou bas de collines. Le risque d'érosion sur ces versants reste faible mais peut être fort avec la présence des activités agricoles principalement céréaliculture qui domine l'occupation du sol. Elles couvrent une surface moyenne de 55,9 % dans les deux zones d'étude.



Photo 8. Un relief escarpé coiffé par des sommets des collines à activité agricole (*Auteur, 2013*)

✓ Pente 15 - 30% représente un accès difficile aux activités agricoles. Elle caractérise le plus souvent les zones de piémonts qui sont le prolongement des reliefs montueux.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Ce sont généralement des terrains de parcours et des terrains forestiers. Les risques d'érosion sont présents avec apparition des signes dus au ruissellement diffus. Ces terrains occupent 20,8% du bassin versant de l'oued Mina et 7,8% de celui de l'oued Kramis.

✓ Pente > à 30%, elle représente les hauts piémonts et les zones montagneuses de forte déclivité généralement couverte par la végétation forestière.

2.4.1.3. L'exposition des reliefs

Tout phénomène naturel dans une région terrestre varie d'un secteur à un autre. Dans celui-ci la variabilité paysagère spatiale est due principalement au facteur relief et son exposition.

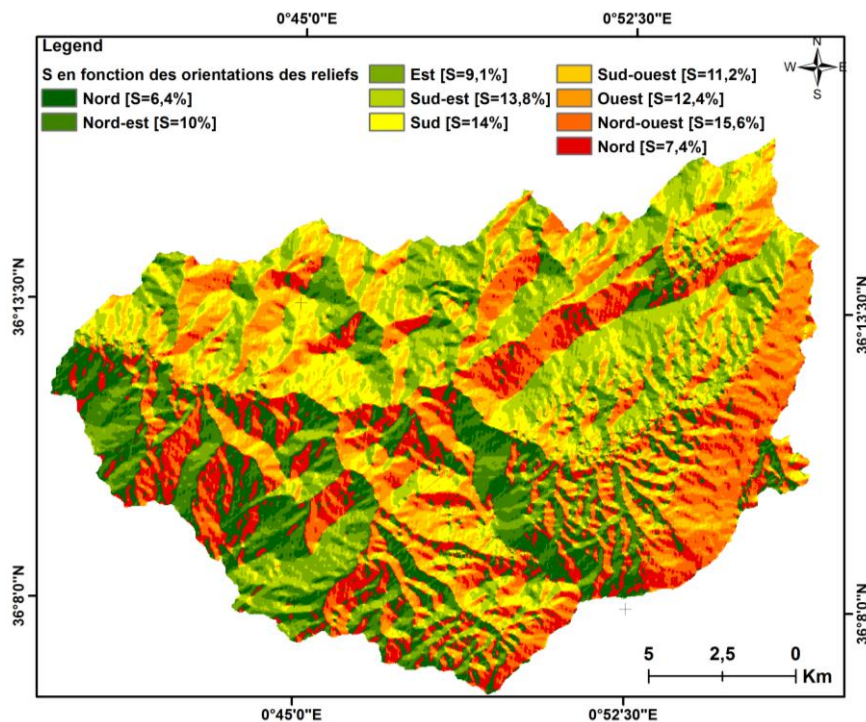


Figure 8. Carte d'exposition des reliefs du bassin versant de l'oued Kramis

Roose *et al.* (2012) ont observé que l'exposition des versants est parfois plus importante que la pente elle-même. Dans les régions semi-arides des montagnes méditerranéennes l'exposition orographique a une importance, car ; les versants exposés au Sud sont généralement dénudés et subissent une érosion très élevée que ceux exposés au Nord. Par ailleurs, D'Souza et Morgan (1976) ont constaté que sur les pentes concaves, les pertes en sol sont moins élevées que sur des pentes convexes. Or, il existe une forte interdépendance entre l'influence de la pente, la rugosité du sol, la position topographique

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

des versants, la forme des reliefs, le couvert végétal et la lithologie du sol, ce qui la rend un paramètre clé et très complexe dans les processus érosifs.

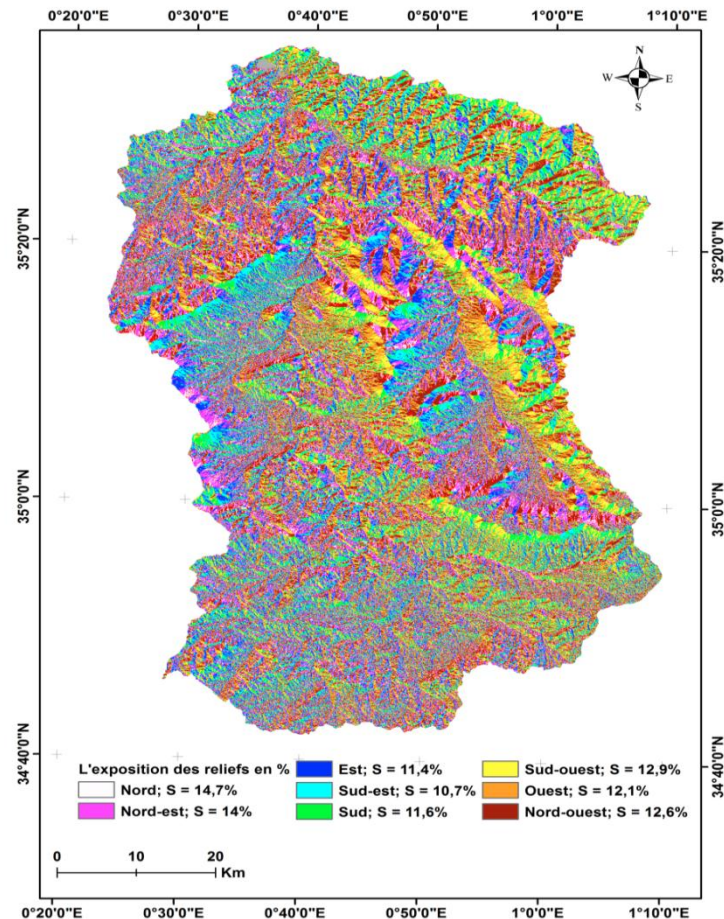


Figure 9. Carte d'exposition des reliefs du bassin de l'oued Mina

Les cartes d'exposition des reliefs de notre zone d'étude sont extraites automatiquement sur la base du modèle numérique de terrain à l'aide de l'outil « *surface/aspect* » dans le kit « *spatial analyst* ». Huit classes d'orientation sont considérées : Nord, Nord-est, Est, Sud-est, Sud, Sud-ouest, Ouest et Nord-ouest. D'après les figures 8 et 9, on remarque que les expositions dominantes dans les deux bassins versants; oued Kramis et la Mina sont respectivement le Nord-ouest (15,6%) et le Nord-est (14%).

2.4.1.4. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'un des caractéristiques physiographiques les plus importantes dans l'étude de l'aléa d'érosion hydrique. Il désigne un ensemble hiérarchisé

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

et structuré de chenaux qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire. Il est d'autant plus dense que les pluies sont plus abondantes et les pentes sont plus fortes.

D'après Bentekhici (2006), la différenciation du réseau hydrographique est due au quatre facteurs principaux qui sont:

(i) **La géologie** : par sa grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique.

(ii) **Le climat**: le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

(iii) **La pente du terrain**: détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones de pente plus élevée, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

(iv) **La présence humaine**: le drainage des terres agricoles, la construction des barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

Les paramètres indiquent la sensibilité à l'érosion linéaire (ravinement) sont la densité de drainage et le coefficient de torrentialité (Bouchetata et Bouchetata, 2006).

La codification des cours d'eau est indispensable pour le traitement automatique des données. Il existe plusieurs types de classifications des tronçons des cours d'eau, dont la classification de Strahler (1957) qui est la méthode la plus utilisée dans les régions méditerranéennes (Bentekhici, 2006). Elle nous a permis de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage de l'amont vers l'aval de la zone d'étude en se basant sur les règles suivantes:

(i) Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.

(ii) Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.

(iii) Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté d'un.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Le résultat des caractéristiques physiographiques obtenus au cours de cette étude sont résumés dans le tableau 8.

Variables physiographiques	BV de l'oued Kramis	BV de la Mina
	Valeur	
Superficie du bassin versant (Km ²)	302	4800
Périmètre du bassin versant (Km)	103,3	375,3
Le plus long talweg (Km)	32,5	199
Indice de compacité de <i>Gravelius</i> (K _G)	1,7	2,1
Longueur du rectangle équivalent (L)	46,2	125
Largeur du rectangle équivalent (l)	6,5	65,3
Altitude maximale (m)	757	1338
Altitude minimale (m)	63	238
Élévation moyenne (m)	380	771,2
Altitude à 5% de la superficie du bassin (m)	624	1213
Altitude à 95% de la superficie du bassin (m)	157	313
Indice de pente global (I _g)	10,1	9,98
Dénivelée spécifique (D _s)	175,5	1201
Densité de drainage (D _d) (Km/Km ²)	1,5	0,67
La fréquence des cours d'eau (F1)	3,5	0,2
Le coefficient de torrentialité (Ct)	4,8	0,064

Tableau 8. Caractéristiques physiographiques des bassins versants de la zone d'étude

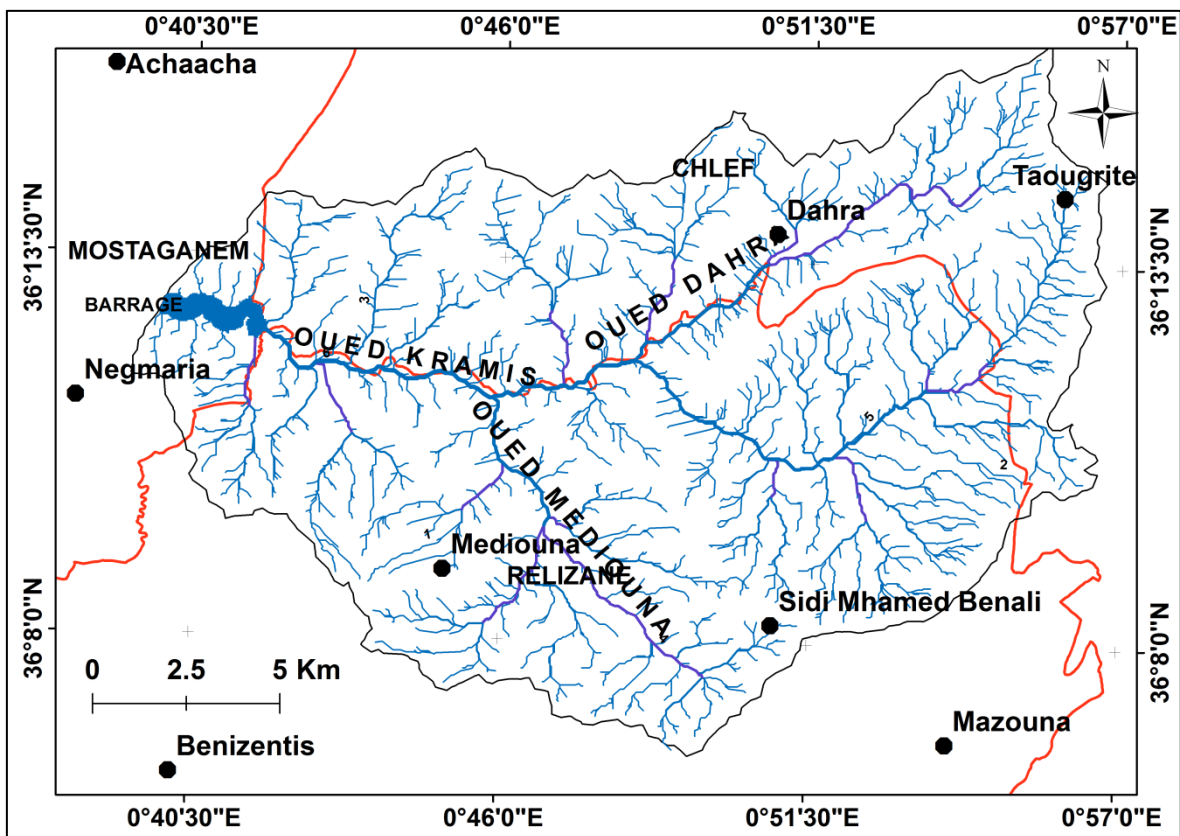


Figure 10. Réseau hydrographique du bassin de l'oued Kramis

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

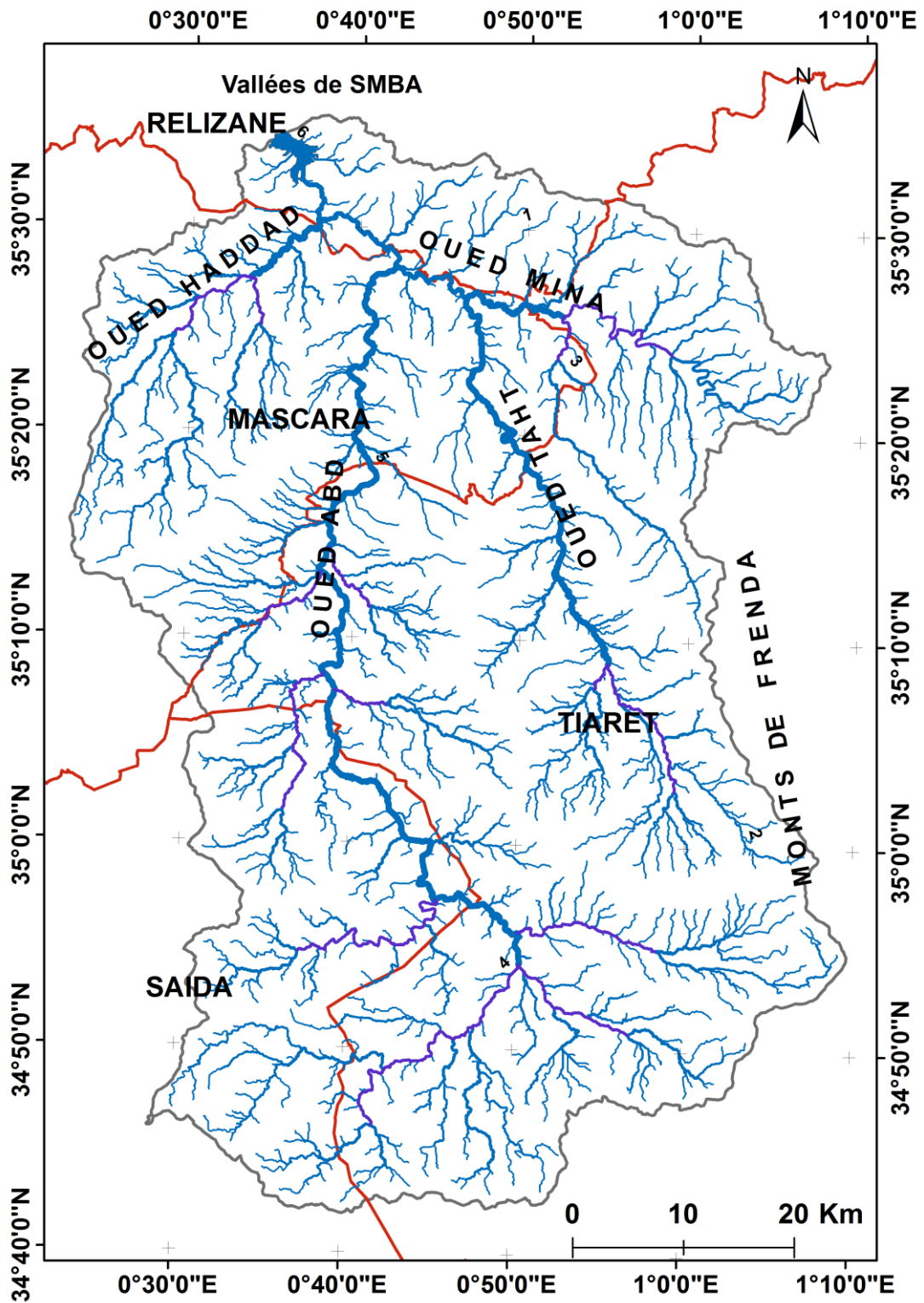


Figure 11. Réseau hydrographique du bassin de l'oued Mina

2.4.1.4.1. La densité de drainage (D_d)

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant, telle que :

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

$$D_d = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A}$$

Avec:

D_d : Densité de drainage (Km/Km²).

L_i : Longueur des cours d'eau (Km).

A : Surface du bassin versant (Km²).

La densité de drainage, comme cité auparavant, dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin et dans une certaine mesure; des conditions climatiques et anthropiques. Elle a été extraite automatiquement à partir du modèle numérique de terrain en se basant sur la méthode de Strahler. Les valeurs obtenues au niveau du bassin de l'oued Mina et celui de l'oued Kramis sont respectivement de l'ordre de 0,67 et 1,5 Km/Km² (tableau 8). Cette dernière valeur indique que le bassin de l'oued Kramis est en général assez drainé que celui de la Mina. Ce qui indique une activité importante de phénomène de l'érosion hydrique à l'échelle de cette zone quasiment marneuse, surtout dans les zones où la nature des pentes permet d'amorcer le processus d'incision régressive. Toutefois, ils sont particulièrement denses, ramifiés, parfois jusqu'à former des badlands tout au long de la partie Sud des monts de Sidi Mhamed Benali jusqu'à ceux de Nekmaria à l'Ouest. Les différents affluents, qui alimentent l'oued principal provenant de la rive droite du bassin, prennent naissance à partir des monts de Taougrite, Dahra et Sidi Moussa. Alors que ceux qui sont dans la rive gauche, prenant naissance à partir des monts de Sidi Mhamed Benali, de Mediouna et de Nekmaria (Fig. 10).

D'après la figure 11, le cours d'eau le plus important de l'oued Mina compris depuis les monts de Frenda jusqu'aux vallées de la ville de Sidi Mhamed Benouda. Les principaux affluents prenant naissance à partir des montagnes et se déversant dans l'oued Mina sont:

- ✓ Oued Abd, prend naissance à partir des monts de Sidi Youcef et Boudfir et draine le djebel d'Argoub, Toukiret, Moualek et Djebel Maida.
- ✓ Oued Taht draine les monts de Kaf Safsaf passant par les monts de Keskas et Coulamzan.
- ✓ Oued Haddad draine les monts de Loukda.

2.4.1.4.2. La densité hydrographique (F)

La densité hydrographique (F) représente le nombre des cours d'eau par unité de surface:

$$F = (\sum N_i) / A$$

Où

F: Densité hydrographique (Km⁻²).

N_i: Nombre des cours d'eau.

A: Superficie du bassin (Km²).

Les valeurs de la densité hydraulique (F) obtenues dans les deux bassins versants ; oued Kramis et la Mina sont respectivement de l'ordre de 6,8 et 0,38 Km⁻². La haute valeur enregistrée au niveau du bassin de l'oued Kramis montre que, ce bassin se caractérise par une forte densité de drainage hydrographique. Cette valeur se traduit la présence d'un substratum imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux.

2.4.1.4.3. La fréquence des cours d'eau (F1)

La fréquence des cours d'eau représente le rapport du nombre du cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin. Dans notre cas, la fréquence du cours d'eau (F1) enregistrée dans les deux bassins versants ; oued Mina et oued Kramis sont respectivement de l'ordre de 0,2 et 3,5. Cette dernière valeur montre que le bassin de l'oued Kramis présente une fréquence des cours d'eau assez élevée, avec une forte hiérarchisation dans le réseau hydrographique.

2.4.1.4.4. Le coefficient de torrentialité (Ct)

Le coefficient de torrentialité tient compte de la densité de drainage et de la densité des talwegs élémentaire d'ordre 1 (Bouchetata et Bouchetata, 2006). D'après le tableau 8, on remarque que le bassin de l'oued Kramis a une valeur plus élevée (4,8 Km/Km²) que celui de l'oued Mina (0,064 Km/Km²). Ce qui explique que le bassin de l'oued Kramis se caractérise par un aspect morpho-métrique adapté à l'écoulement, et qu'il est constitué par des formations imperméables dont l'infiltration est médiocre.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

2.4.1.5. Analyse des paramètres physiographiques des SBV de l'oued Kramis

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique statistique largement utilisée (Eslamian *et al.*, 2010), consistant à représenter sous forme graphique le plus d'informations possibles contenues dans un tableau. Elle réduit le nombre de variables à celles qui sont les plus significatives parmi un ensemble de variables utilisées afin de trouver un lien entre celles-ci et les individus pour les regrouper en régions homogènes (Baba Hamed et Bouanani, 2016).

SBV	Variables									
	S	P	K _G	Lr	lr	D _a	Alt_m	Ct	Tc	Ig
SBV1	93,3	50,9	1,5	20,76	4,49	1,6	379,7	10,5	4,29	0,024
SBV2	50,5	43,52	1,7	18,92	2,67	1,5	452,6	9,7	2,79	0,031
SBV3	65	42,36	1,5	17,25	3,77	1,5	422	9,3	2,81	0,05
SBV4	13,9	18,62	1,4	7,35	1,89	1,3	450,5	7,8	1,46	0,089
SBV5	11,1	18,07	1,5	7,48	1,48	1,3	377,4	6,8	1,41	0,077
SBV6	10,7	18,29	1,6	7,68	1,39	1,5	352,8	8,7	1,43	0,097
SBV7	7,4	13,63	1,4	5,39	1,37	1,2	274,5	2,6	1,37	0,105
SBV8	5,8	13,25	1,5	5,52	1,05	1,6	290,9	13,8	1,13	0,173
SBV9	14,8	29,37	2,1	13,47	1,1	1,5	245,2	14,2	2,25	0,045
SBV10	5,7	11,24	1,3	4,23	1,35	1,7	256,4	20,6	1,31	0,167
SBV11	5,3	9,92	1,2	3,33	1,59	1,4	346,1	9,2	1,25	0,091
SBV12	4,6	10,47	1,4	4,06	1,13	1,4	357,9	6,1	0,97	0,181
SBV13	1	4,1	1,1	1,2	0,83	1,3	154,2	9,1	1	0,125
SBV14	1	4,2	1,2	1,33	0,75	1,2	279,7	26,4	0,72	0,25
SBV15	6,1	19,3	2,2	8,89	0,69	1,3	175,05	4,5	1,44	0,303
SBV16	2	6,3	1,2	2,23	0,9	0,6	214,1	0,6	0,93	0,276
SBV17	2,1	8,7	1,7	3,81	0,55	0,98	187,3	1,4	0,97	0,355

S: la superficie (en Km²), P: le périmètre (en Km), K_G: l'indice de compacité de Gravelius, Lr: la longueur et lr: la largeur du rectangle équivalent, D_a: la densité de drainage (Km/Km²), Alt_m: l'altitude moyenne (en mètres), Ct: le coefficient de torrentialité (selon la formule de Giandotti), Tc: le temps de concentration (en heures) et Ig: l'indice de la pente global.

Tableau 9. Caractéristiques physiographiques des SBV de l'oued Kramis

Dans cette approche statistique, nous avons soumis dix paramètres (variables) physiographiques calculés pour les dix-sept sous-bassins (individus), constituant le bassin de l'oued Kramis, à une ACP (tableau 9). Cette analyse statistique a pour but de déterminer l'affinité physiographique entre les sous-bassins et déduire les paramètres les plus caractéristiques. Pour ce faire, une matrice de corrélation a été utilisée et les composantes

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

ont été déterminées selon le type de rotation des axes orthogonaux expliquant le pourcentage d'inertie.

	F1	F2	F3
<i>Eigenvalue</i>	6,0133	1,5728	1,1781
<i>Variability (%)</i>	60,1330	15,7285	11,7809
<i>Cumulative %</i>	60,1330	75,8615	87,6424

Tableau 10. Valeurs propres de la matrice de corrélation des paramètres physiographiques des SBV

Le tableau 10 montre que les trois premiers facteurs représentent le maximum d'informations. Ainsi ces trois premiers axes factoriels expriment 87,64% de la variance totale, avec 60,13 % pour le premier facteur (F1), 15,73 % pour le deuxième facteur (F2) et 11,78 % pour le troisième facteur (F3). Ce pourcentage d'inertie nous a permis de déduire que nous avons un excellent résumé qui synthétise presque parfaitement les dix variables.

Variables	S	P	K_G	Lr	lr	D_d	Alt_m	Ct	Tc	Ig
S	1									
P	0,9329	1								
K_G	0,1437	0,4250	1							
Lr	0,9033	0,9963	0,4930	1						
lr	0,9657	0,8767	-0,0166	0,8323	1					
D_d	0,4045	0,4805	0,1958	0,4749	0,4392	1				
Alt_m	0,5626	0,5873	-0,0886	0,5550	0,6822	0,4135	1			
Ct	0,0262	-0,0045	-0,1747	-0,0114	0,0314	0,5186	0,0785	1		
Tc	0,9626	0,9630	0,3041	0,9481	0,9085	0,4664	0,4920	0,0255	1	
Ig	-0,5842	-0,6436	0,0415	-0,6204	-0,6766	-0,6097	-0,6809	-0,1532	-0,6446	1

Tableau 11. Matrice de corrélation entre les variables physiographiques

L'analyse de la matrice de corrélation (tableau 11), montre que la surface (S) est fortement et positivement corrélée avec respectivement, la largeur du rectangle équivalent (lr), le temps de concentration (Tc), le périmètre (P), et la longueur de rectangle équivalent (Lr), et est moyennement positivement corrélée avec l'altitude moyenne (Alt_m). Par contre, elle est moyennement et négativement corrélée avec l'indice de pente global (Ig).

Les dimensions du rectangle équivalent Lr et lr sont fortement et positivement corrélées avec le temps de concentration (Tc), et, moyennement positivement corrélées avec l'altitude moyenne (Alt_m). Elles sont en outre, moyennement et négativement

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

corrélées avec l'indice de pente global (Ig). Ce dernier à son tour est moyennement et négativement corrélé avec respectivement, l'altitude moyenne (Alt_m), la largeur du rectangle équivalent (lr), le temps de concentration (Tc), le périmètre (P), la longueur du rectangle équivalent (Lr), la densité de drainage (D_d) et la surface (S).

La densité de drainage (D_d) est moyennement et positivement corrélée avec le coefficient de torrentialité (Ct) et est négativement corrélée avec l'indice de pente globale (Ig).

L'altitude moyenne (Alt_m) est moyennement et positivement corrélée avec respectivement, la largeur du rectangle équivalent (lr), le périmètre (P), la surface (S) et la longueur du rectangle équivalent (Lr).

Le temps de concentration (Tc) est fortement et positivement corrélé respectivement avec, le périmètre (P), la surface (S), la longueur (Lr) et la largeur du rectangle équivalent.

Le périmètre (P) est fortement et positivement corrélée avec la longueur de rectangle équivalent (Lr), le temps de concentration (Tc) et la largeur de rectangle équivalent (lr), et moyennement positivement corrélée avec l'altitude moyenne (Alt_m). Par contre, il est moyennement négativement corrélé avec la pente globale (Ig).

Les axes F1, F2 et F3 ainsi retenus mettent en évidence leurs relations avec les paramètres étudiés.

	F1	F2	F3
S	0,9383	-0,1058	-0,1486
P	0,9692	-0,2158	0,0634
K_G	0,2587	-0,6358	0,6767
Lr	0,9509	-0,2572	0,1226
Lr	0,9317	0,0432	-0,2799
D_a	0,6003	0,4807	0,5029
Alt_m	0,6953	0,2954	-0,3207
Ct	0,1000	0,7593	0,4816
Tc	0,9541	-0,1666	0,0079
Ig	-0,7682	-0,3466	0,1138

Tableau 12. Corrélacion entre variables et facteurs

D'après le tableau 12 qui représente la matrice de corrélacion des variables et des facteurs du poids de variance on remarque que:

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

L'axe F1 (principal axe d'inertie) qui représente plus de 60,13% de variance est fortement et positivement corrélé respectivement au périmètre (P), au temps de concentration (Tc), aux dimensions du rectangle équivalent du bassin (Lr et lr) et à la surface (S) et à moindre degré avec l'altitude moyenne (Alt_m) et la densité de drainage (D_d). Il est aussi assez bien corrélé mais négativement à l'indice de pente global (I_g).

L'axe F2 avec 15,73 % de variance, est moyennement lié positivement avec le coefficient de torrentialité (Ct) et négativement avec l'indice de compacité de *Gravelius* (K_G). Ce dernier, est moyennement et positivement corrélé avec l'axe F3 qui représente presque 11,78 % de la variance.

Ces résultats sont synthétisés sur la figure 12, qui illustre également la projection des variables sur les plans factoriels F1 et F2.

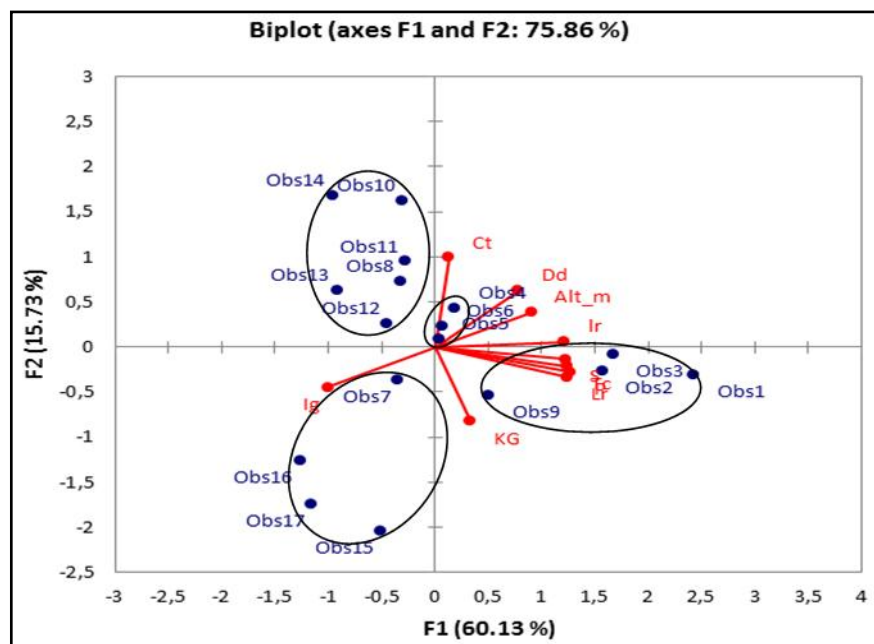


Figure 12. Projections des SBV sur les plans factoriels F1 et F2

La projection des observations (sous-bassins) sur le plan (F1 - F2), met en évidence quatre groupes de sous-bassins:

Le premier formé par les sous-bassins SBV1, SBV2, SBV3 et SBV9 occupant une surface largement supérieure (74 % de la surface du bassin) à celle des autres sous-bassins (tableau 46). Ce sont des régions à vocation agricole qui s'étendent sur une couverture

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

lithologique (alluvionnaire, marnes brunes et des sols rouges schisteux) occupant une surface près de 55 % du bassin versant (tableau 28). Cette formation occupe le secteur Est et celui du Sud et descend vers le milieu du bassin.

Le second groupe est formé par les sous-bassins SBV8, SBV10, SBV11, SBV12, SBV13 et SBV14. La grande partie de ces régions se localise dans la rive Sud du bassin versant (Fig. 55) occupant une surface de 7,7 % (tableau 46).

Le troisième groupe fusionne les sous-bassins SBV4, SBV5 et SBV6. Cette homogénéité physiographique représente une surface de 11,8 % de la surface totale du bassin versant (tableau 46). La formation lithologique est constituée d'argile bleue compacte et des marnes bleues armées de grés calcaires. La couverture végétative la plus répandue dans ces régions est le reboisement de pin d'Alep (2,5 % de la surface totale de la zone d'étude) (tableau 24).

Le quatrième groupe rassemble les sous-bassins SBV7, SBV15, SBV16 et SBV17. La formation lithologique qui les constitue se caractérise par un substrat marneux à des escarpements nettement calcaires. Ces régions avoisinant le lac du barrage ne représentent qu'une surface de 5,8 % de la surface totale.

La construction du regroupement des sous-bassins par la méthode statistique ACP nous a permis de mettre en évidence les affinités et les différences physiographiques entre les groupes et en déduire les variables qui caractérisent au mieux chaque groupe.

Pour les dix-sept sous-bassins étudiés de l'oued Kramis, la force des liaisons qui existent entre les variables explicatives a été définie par une matrice de corrélations simples entre les variables physiographiques étudiées. Ces corrélations, nous ont permis de déterminer que les variables explicatives retenues (la taille du sous-bassin : la surface (S), le périmètre (P), les dimensions du rectangle équivalent (Lr et lr)) et le coefficient de torrentialité (Ct)) sont hautement significatives. Ce qui nous a permis de montrer également que, l'utilisation de données physiographiques pouvait permettre une régionalisation par l'utilisation de l'ACP.

En ce qui concerne la répartition spatiale de ces zones, la corrélation a montré qu'elles ne forment pas toujours des régions contiguës, c'est le cas par exemple du SBV10,

SBV11 et SBV12. Par conséquent, la proximité géographique n'influence pas de manière significative la zonalité. Ces constatations concordent avec celles de Baba Hamed et Bouanani (2016). Cependant, on peut observer certaines cohérences spatiales, telles que, le SBV1, SBV2, SBV2 et SBV9 qui se rapprochent géographiquement et qui, généralement, apparaissent dans le même secteur.

L'examen des caractéristiques physiques des sous-bassins versants a montré que ce sont surtout les caractéristiques de forme (Superficie, Périmètre, Coefficient de compacité de Gravelius, Longueur, Largeur) qui ont régi le classement statistique des différents sous-bassins versants en groupes distincts.

2.4.2. Analyse climatique du bassin de l'oued Kramis

2.4.2.1. Etude de la fiabilité des données climatiques (précipitations et températures)

Avant d'entamer l'étude climatique du bassin versant de l'oued Kramis pour ce qui est des températures et des précipitations, on a procédé tout d'abord à la vérification de la fiabilité des données observées sur une période de 22 ans pour l'ensemble des stations de mesures.

Après l'application et le test de différentes techniques de prédiction géo-spatiale au moyen du logiciel ArcGIS, la méthode « *Ordinary Kriging/CoKriging* » et de type « *Ordinary et predict* » a été choisie pour interpoler les valeurs de ces deux paramètres climatiques. Cette méthode a donné de meilleurs résultats de la validation croisée et de la racine carrée de la moyenne des erreurs (*RMS = Root-Mean-Square Standardized*).

Pour toutes les stations météorologiques, la validation croisée compare les valeurs mesurées et prédites de températures et de précipitations mensuelles. Pour estimer l'erreur normalisée, les valeurs mesurées sont soustraites des valeurs prédites et ensuite divisés par les erreurs standards.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

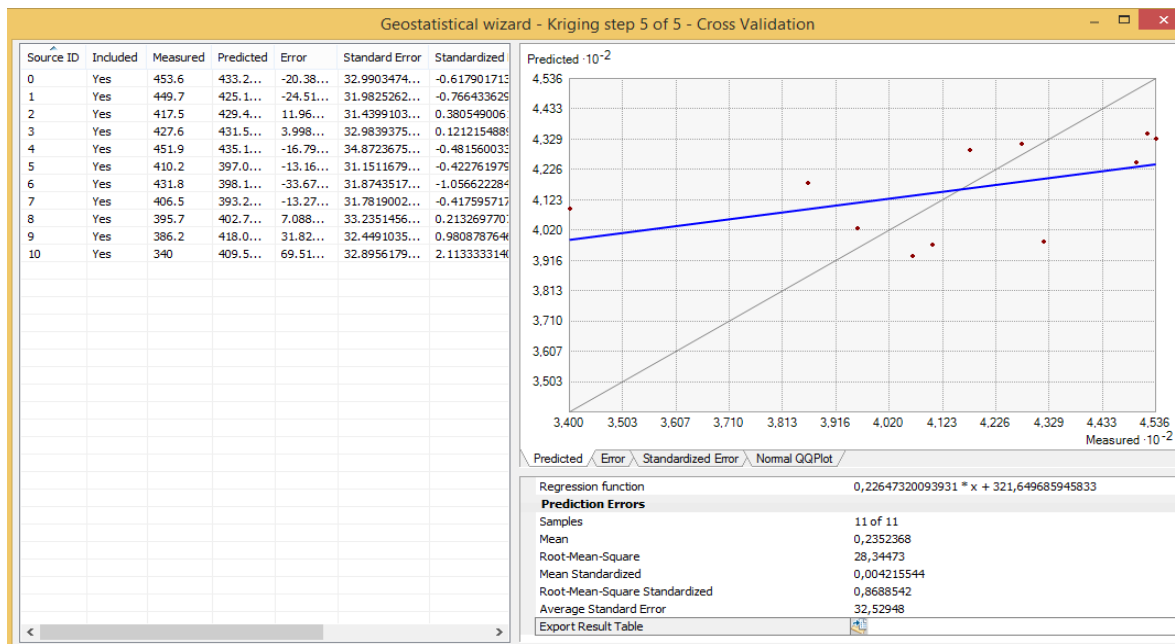


Figure 13. Résultats de la validation croisée des données de précipitations
 par la méthode *Kriging/CoKriging*

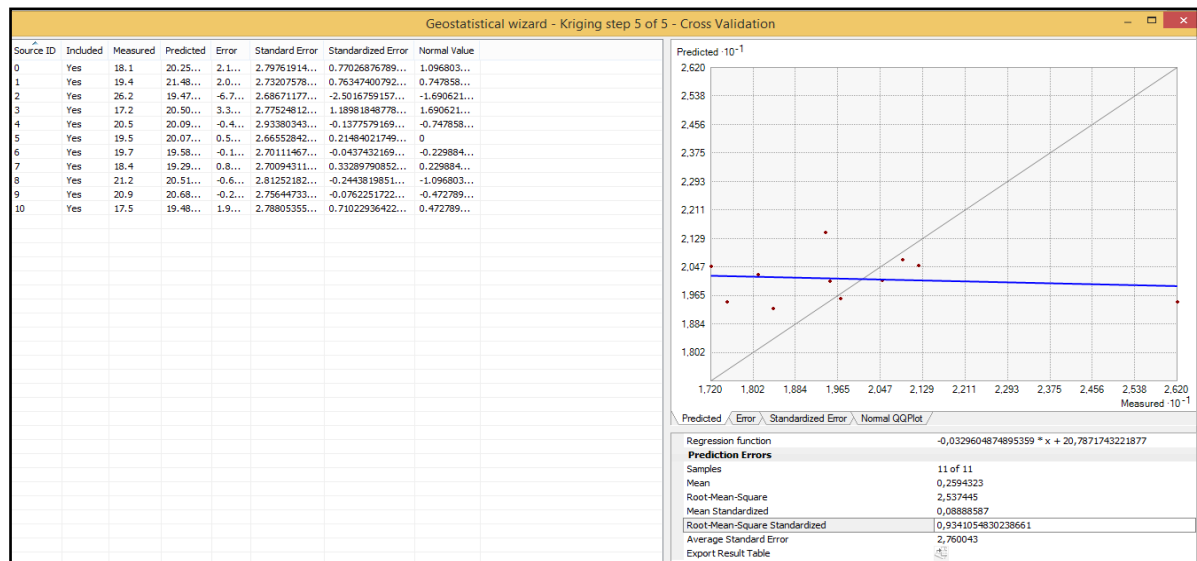


Figure 14. Résultats de la validation croisée des données de températures
 par la méthode *Kriging/CoKriging*

En général, le meilleur modèle est celui qui a la moyenne d'erreur plus proche de zéro (colonne 7 = *Standardized Error*, figures 13 et 14) ainsi qu'une petite erreur de prédiction de racine carrée moyenne (RMS). En effet, les figures 13 et 14, montrent que l'erreur de prédiction de racine carrée moyennes (RMS) des données de précipitations et de

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

températures moyennes mensuelles validées par la méthode de « *ordinary Kriging/CoKriging* » a donné respectivement des petites valeurs de 0,87 et 0,93.

Par ailleurs, Kouli *et al.* (2009) ont déduit que, si les erreurs de prédiction ne sont pas biaisées, l'erreur de prédiction moyenne devrait être proche de zéro. Toutefois, qu'il faudrait garder à l'esprit que cette valeur dépend de l'échelle spatiale des données utilisées.

2.4.2.2. Variabilité spatiotemporelle des facteurs climatiques

2.4.2.2.1. Les pluies

Les précipitations constituent la principale entrée des systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. Ce sont l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

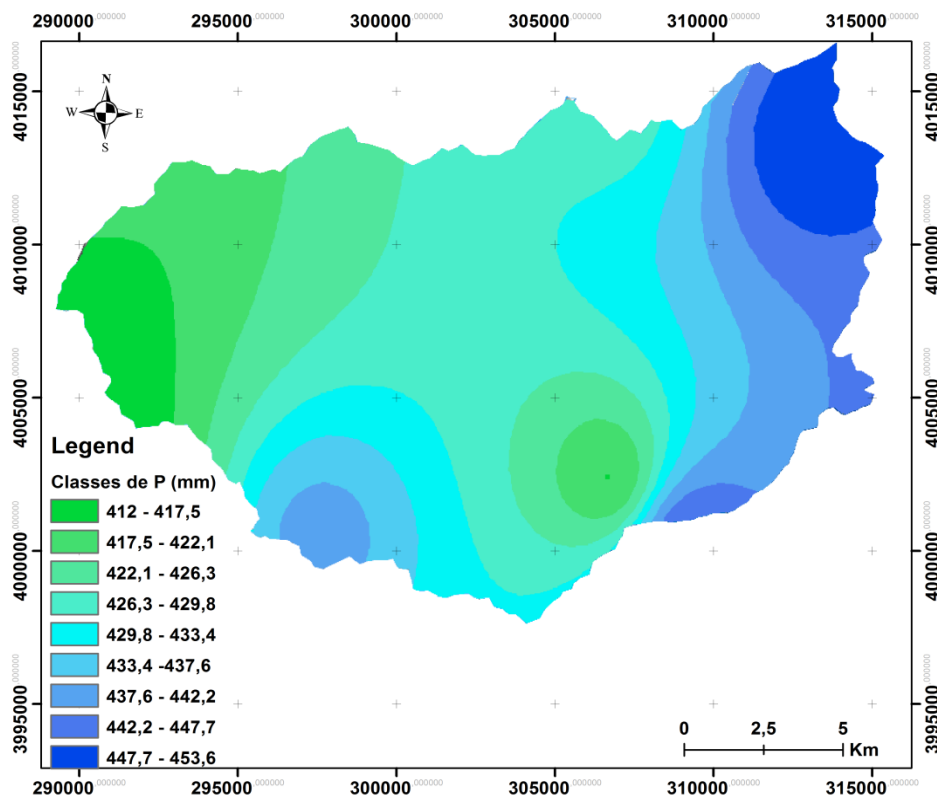


Figure 15. Répartition spatiale de précipitations moyennes annuelles dans le bassin de l'oued Kramis

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Parallèlement à la représentation graphique de la répartition des précipitations, le coefficient d'abattement a été également calculé. Ce coefficient permet de sélectionner la station pluvieuse de celle qui l'est moins. Les valeurs de Ki mentionnées dans le tableau 13 représentent le rapport entre la pluie moyenne ponctuelle Pi d'une station pluviométrique et la pluie moyenne enregistrée sur l'ensemble de la zone d'intérêt.

Stations	Mediouna	Taugrite	Ain Merane	Mazouna	Achaacha	Dahra	SMBAl	Nekmaria	Benizentis
Ki	1,1	1,09	1,08	1,08	1,03	1,02	1,00	0,98	0,95

Tableau 13. Les valeurs du coefficient d'abattement (Ki) (1994 - 2016)

Cette variabilité spatiale est expliquée par le fait de deux facteurs physiographiques à savoir : l'altitude maximale (en mètre) et les coordonnées longitudinales (en degrés décimaux).

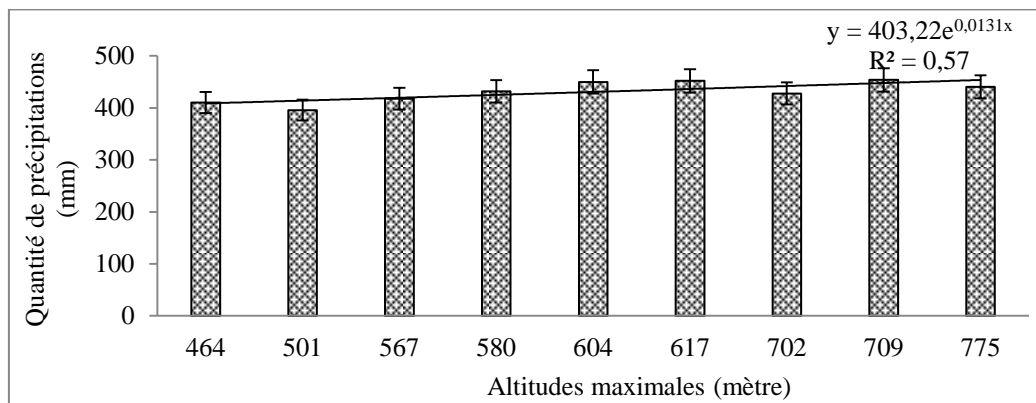


Figure 16. La quantité des précipitations (mm) en fonction des altitudes maximales (m)

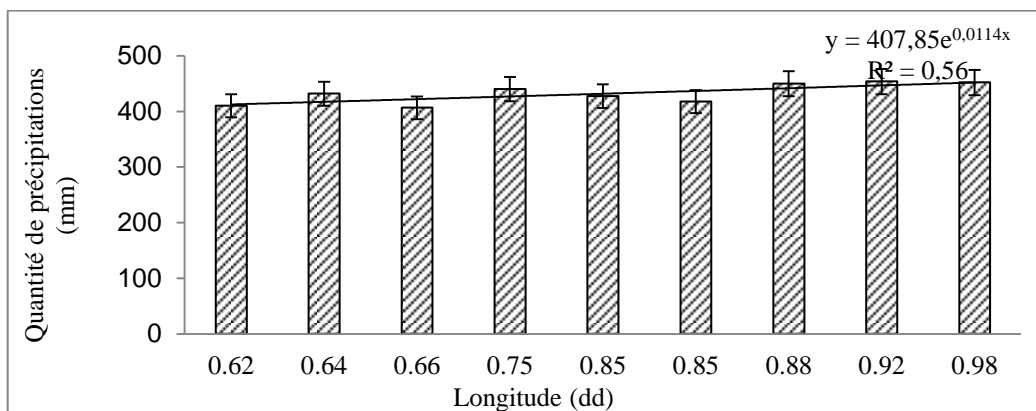


Figure 17. La quantité des précipitations (mm) en fonction des degrés longitudinaux (dd)

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

D'après les figures 16 et 17, on constate que les chutes des pluies augmentent proportionnellement avec l'altitude maximale des reliefs ainsi que les degrés longitudinaux des stations de mesure. Le coefficient de détermination R^2 de cette évolution montre une corrélation assez forte entre les quantités des pluies et la hauteur des reliefs d'une part, et les coordonnées longitudinales d'autre part, avec des valeurs respectivement de 0,57 et 0,56 significative au seuil de 5%.

Sur une période de 22 ans (1994 – 2016) et au vu des résultats obtenus on constate que l'altitude des reliefs et les coordonnées géographiques, en particulier celles longitudinales, agissent de manière frappante sur la répartition spatiale des chutes des pluies et par conséquent, sur l'aléa érosif dans cette région marneuse.

En se référant à la figure 15, on remarque que, la répartition des moyennes de précipitations se fait selon un gradient pluviométrique sur le bassin d'Est en Ouest. A l'Est, la moyenne annuelle des précipitations dépasse 450 mm/an. Elle diminue progressivement vers l'Ouest. Elle devient très faible à l'Ouest enregistrant une valeur de 398 mm/an.

2.4.2.2. Les températures

L'outil « *geostatistic alanalysis Kriging/CoKriging* » dans un environnement SIG a été utilisé pour pouvoir interpréter l'effet des altitudes de relief sur la température, et par conséquent l'effet de la température sur le comportement des marnes dans la zone d'étude.

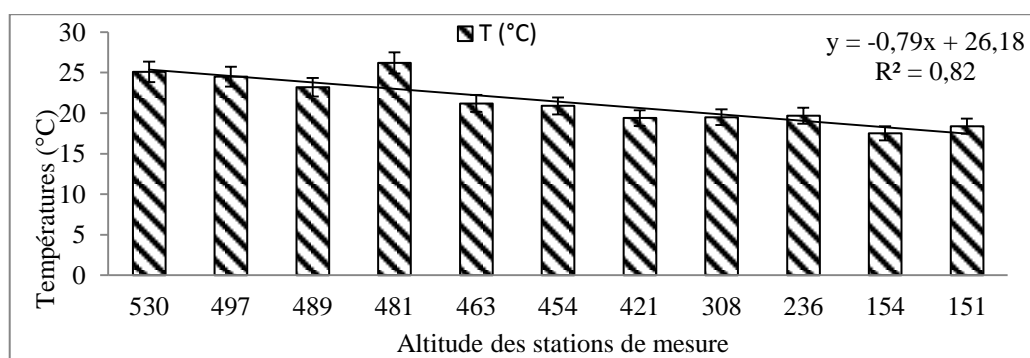


Figure 18. Les températures moyennes annuelles (°C) en fonction des altitudes maximales (m)

D'après la figure 18, on constate que les températures moyennes annuelles diminuent proportionnellement avec des altitudes. Le coefficient de détermination montre une forte

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

corrélation entre les valeurs des températures moyennes annuelles et l'effet des altitudes des reliefs ($R^2 = 0,82$).

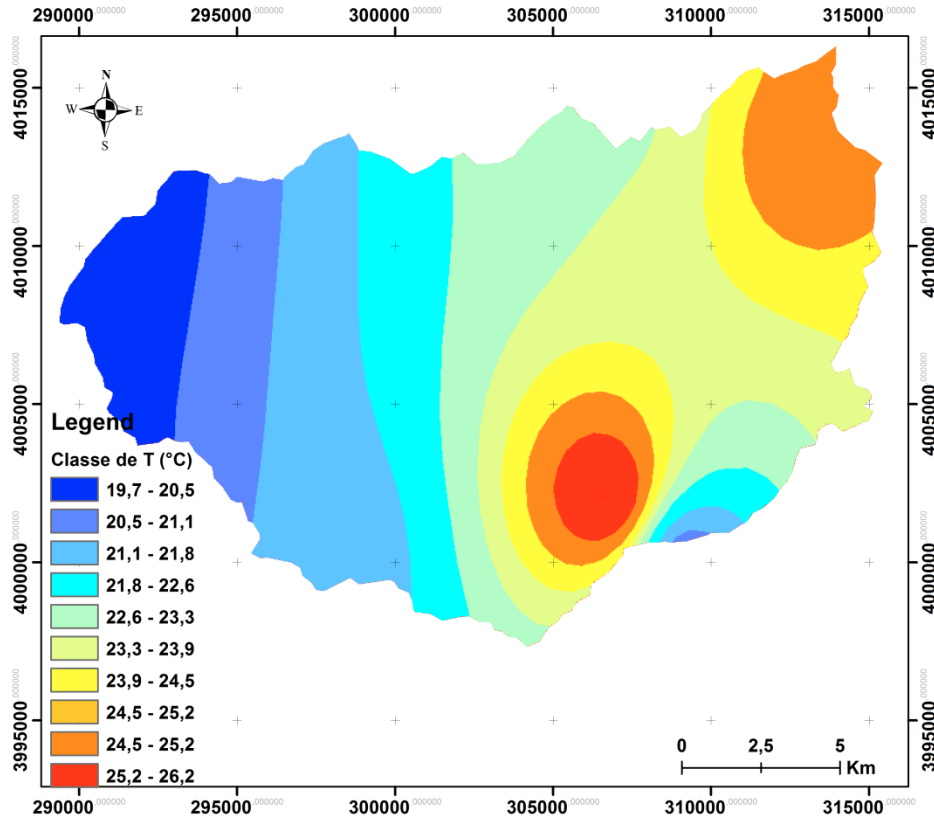


Figure 19. Répartition spatiale des températures moyennes annuelles
dans le bassin de l'oued Kramis

De la figure 19, on observe que comme les précipitations ; les températures moyennes annuelles présentent ainsi un gradient d'un secteur à l'autre. Le secteur Sud a enregistré des valeurs relativement élevées par rapport à celui qui se situe au Nord. Cette variabilité spatiale est la conséquence de certaines conditions écologiques dont l'altitude des reliefs et leur exposition aux vents continentaux. En effet, les monts de Sidi Mhamed Benali et ceux de Mazouna qui représentent le dos Sud du bassin versant sont exposés immédiatement aux vents provenant des plaines de la Mina. Ces dernières sont caractérisées par un climat très rude et très contrasté par des étés très chauds et des températures basses en hiver (Douaouni *et al.*, 2006). Ce qui favorise le phénomène des cycles d'humectation-dessiccation des marnes.

2.4.2.3. La station de référence

2.4.2.3.1. Caractéristiques bioclimatiques

Pour déterminer la pluviométrie interannuelle de la zone d'étude, la méthode des polygones de Thiessen (EPFL, 2003) a été utilisée à l'aide du logiciel ArcGIS. Les résultats sont illustrés dans la figure 20.

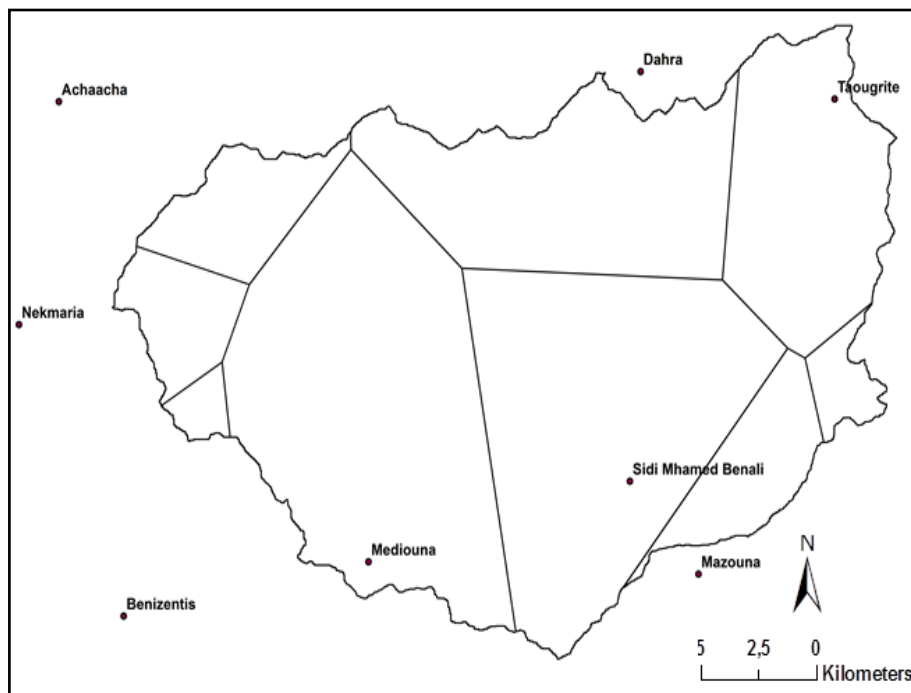


Figure 20. Surfaces d'influence des stations pluviométriques déterminées par la méthode des polygones de Thiessen

Par ailleurs, la pluviométrie interannuelle a été calculée selon la formule ci-dessous.

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i P_i}{S}$$

Où:

n : le nombre de stations pluviométriques.

S_i : surface d'influence de chaque station pluviométrique (Km²);

P_i : pluviométrie moyenne interannuelle de chaque station (mm);

S : surface totale de la zone d'étude (Km²).

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

Station Pluviométrique	Surface		Pi (mm)	Si*Pi	P moyennes (mm)
	Km ²	%			
Achaacha	15,2	5,0	431,8	6 568	
Nekmaria	11,4	3,8	410,2	4 684	
Mediouna	84,4	28,0	440,2	32 607	
SMBAli	75,3	24,9	417,5	31 454	
Mazouna	15,5	5,1	449,7	6 970	
Ain Merane	5,2	1,7	451,9	2 359	<u>417,8</u>
Taougrite	40,3	13,4	453,6	18 295	
Dahra	51,6	17,1	427,6	22 068	
Benizentis	3,0	1,0	395,7	1 187	
Total	302	100	/	126 194	

Tableau 14. Pluviométrie moyenne interannuelle (1994 - 2016)

En raison de leur éloignement du bassin versant, les deux stations Khadra et Dadas n'ont pas été prises en considération par la méthode de Thiessen.

Le choix de la station de Sidi Mhamed Benali, comme étant une station de référence de notre région d'étude, repose sur les constatations suivantes:

✓ Les précipitations moyennes interannuelles qui sont de l'ordre de 417,5 mm/an (tableau 15) sont proches de précipitations moyennes interannuelles de l'ensemble des stations qui ont une valeur de 417,8 mm/an (tableau 14) enregistrant ainsi un écart entre elles de l'ordre de 0,3 mm.

✓ La station de Sidi Mhamed Benali se trouve parmi celles qui se localisent au sein de la zone d'étude.

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Moy.
P (mm)	8,0	26,3	72,1	40,6	43,4	84	51,8	45,4	31,9	6,2	1,3	6,5	417,5
Max (°C)	39	36,4	28	21,7	21,7	23,6	27,5	33,7	36,4	42,2	44,6	43,6	33,2
Min (°C)	24,7	21,9	17	12,5	9	12	14	15,6	20	25	27,6	27,7	18,91
Moy (°C)	31,9	29,2	22,5	17,1	15,4	17,8	20,8	24,7	28,2	33,6	36,1	35,7	26,1
(M-m)* (°C)	14,3	14,5	11	9,2	12,7	11,6	13,5	18,1	16,4	17,2	17	15,9	14,3

*écart entre la valeur maximale et minimale (Source: Station de Sidi Mhamed Benali, 2016)

Tableau 15. Les températures moyennes et les précipitations mensuelles de la station de SMBAli (1994 - 2016)

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

En se référant à Bagnouls et Gaussen (1953), la période sèche est définie comme étant celle durant laquelle, la moyenne des précipitations (mm) est inférieure ou égale au double de la moyenne des températures (°C).

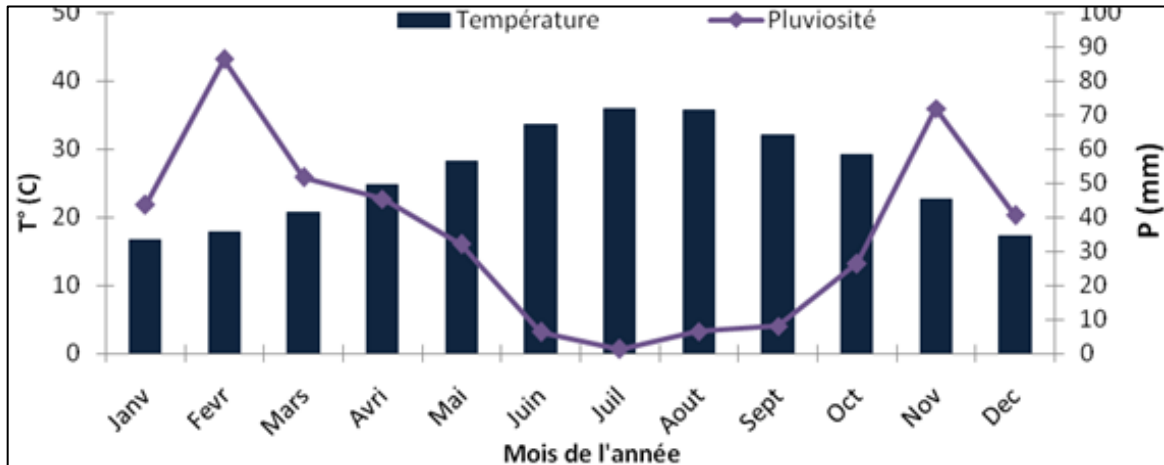


Figure 21. Diagramme Ombrothermique (SMBAli: 1994 – 2016)

Selon cette règle, et d'après la figure 21, la période de sécheresse de la zone du bassin versant de Kramis s'étale sur sept mois (d'Avril à Octobre). Le mois de Février est le mois le plus humide avec un cumul pluviométrique moyen mensuel de 84 mm/an, alors que le mois du Juillet n'enregistre qu'une valeur de 1,3 mm/an.

Les températures moyennes mensuelles sont maximales au cours de la période allant du mois d'Avril à Octobre (saison chaude) et atteignent leur maximum pendant le mois du Juillet avec une valeur de 44,6 °C. Elles sont minimales au cours de la période du mois de Novembre à Mars (saison froide) et atteignent une valeur de 11,5 °C pendant le mois de Janvier.

Ainsi, les monts du Dahra comme ceux de la Mina, ont un climat de type méditerranéen semi-aride caractérisé par une sécheresse estivale prononcée.

2.4.2.3.2. Les événements pluvieux et les températures journalières maximales

L'Indice d'érosivité des pluies de Desfontaines modifié (1968)

Cet indice est utilisé à l'échelle mensuelle afin de classer les mois de l'année les plus torrentiels. Il est donné par la formule suivante:

$$ID = b * c$$

Où:

b: Nombre moyen de jours de pluies du mois ≥ 20 mm/24 heures.

c : % de pluies mensuelles tombées sous forme de pluies journalières ≥ 20 mm.

Des mesures des débits solides effectuées par Kouri (1993) pendant quatre années consécutives à l'exutoire des sous-bassins versants de la région marneuse de l'oued Mina, montrent que, toutes les pluies journalières ≥ 20 mm provoquent un ruissellement et un transport solide des particules du sol. C'est pourquoi nous avons retenu un seuil de 20 mm de pluie pendant 24 heures pour calculer l'indice de Desfontaines (ID).

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
ID	0,05	2,14	1,45	1,20	2,34	0,36	0	0,57	0,46	0,33	1,02	1,20

Tableau 17. L'indice de Desfontaines (SMBAl: 1994 - 2016)

Du tableau 17, on remarque qu'il y a un régime saisonnier très variable. En effet, les mois de Novembre et de Décembre présentent un ID respectivement de 1,02 et 1,2, tandis que ceux de Février, Mars, Avril et Mai enregistrent des valeurs relativement élevées de 2,14, 1,45, 1,2 et 2,34 respectivement. Les valeurs d'ID sont très faibles durant la période estivale (Juin, Juillet et Aout) et celle automnale (Septembre et Octobre) n'atteignant qu'un seuil de 0,57 remarqué pendant le mois d'Aout.

Les précipitations durant la saison printanière apportent généralement une quantité considérable de sédiments en l'aval du bassin versant. Vu leurs torrentialité après une longue période d'humectation qui s'étale sur sept mois environ (du Novembre à Mai), ces

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

précipitations provoquent des sapements des berges au niveau des oueds ainsi que les grands ravins favorisant des glissements de terrain.

Par ailleurs, Kouri (1993) a constaté que, l'effet de l'alternance de cycles humectation – dessiccation joue un rôle crucial dans l'altération des marnes et contribue à la dégradation des roches dans le bassin versant de l'oued Mina.

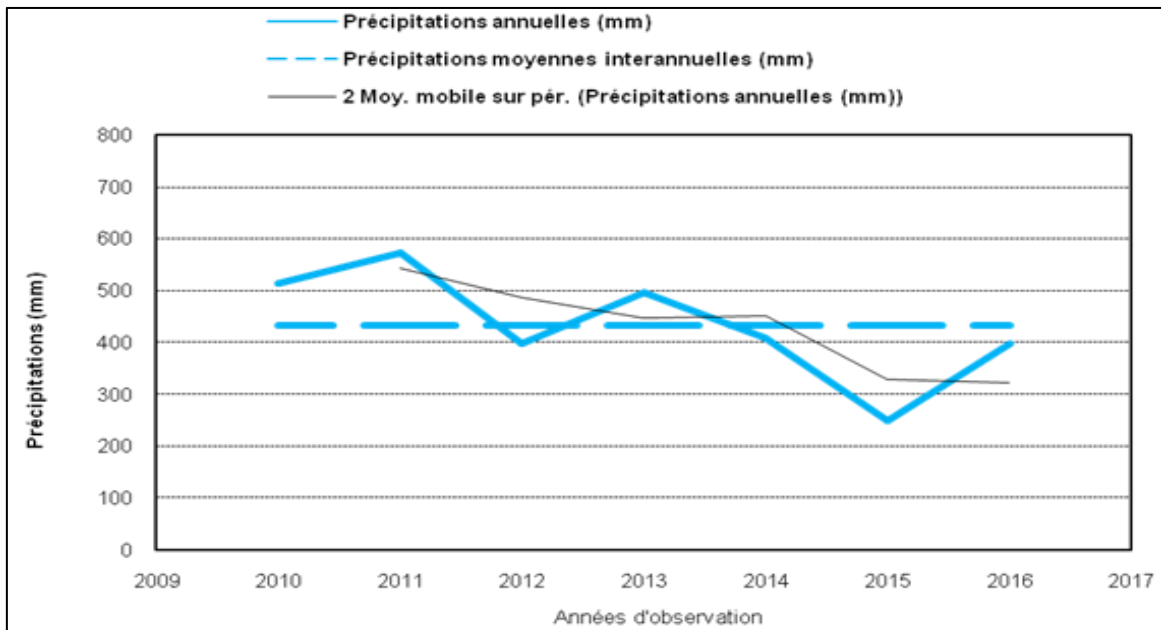


Figure 22. Fluctuation annuelle des précipitations (SMBAl: 2010 – 2016)

Cependant, les fluctuations de la variabilité pluviométrique annuelle en fonction des températures moyennes annuelles ne permettent pas d'aboutir à des conclusions sur la périodicité des cycles d'humectation - dessiccation sur la formation marneuse qui constitue la majeure partie du bassin de l'oued Kramis. Car l'oscillation thermique annuelle ne présente qu'un écart de 1,26 °C. Tandis que, les précipitations ont un important écart interannuel. Ce dernier atteint une valeur de 324,1 mm. Ainsi, la variabilité annuelle des précipitations ne concorde pas à celle des températures moyennes annuelles.

A cet effet, une étude des températures maxima et minima journalières ainsi que les intensités pluviales correspondantes sur une période de sept années (2010 – 2016) sera abordée.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
DE LA ZONE D'ETUDE

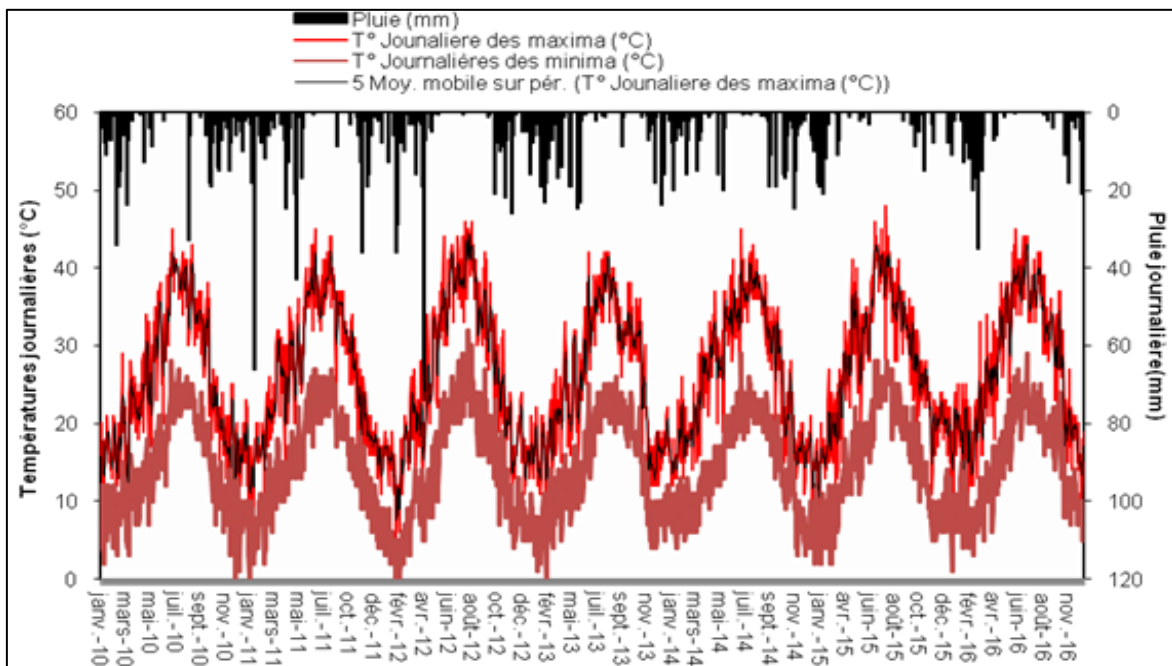


Figure 23. Relation entre les précipitations et les températures max et min journalières
(SMBAl: 2010 – 2016)

D'un jour à l'autre, l'irrégularité climatique est plus frappante pour les pluies ainsi que pour les températures. Comme l'on constate sur la figure 23 où les écarts thermiques ainsi que pluviaux peuvent être très élevés. En effet, durant le mois de Janvier 2011 on a enregistré une valeur journalière minimale qui tend vers 0°C suivie par des températures journalières maximales atteignant des valeurs de 45 °C durant la période estivale. Ces dernières valeurs durent parfois plusieurs jours consécutifs. Par ailleurs, durant cette année, nous avons enregistré six événements pluvieux. Un événement durant le mois de Février, l'autre durant le mois d'Avril, deux événements au cours de mois du Mai et deux autres événements pendant le mois de Novembre avec des valeurs mensuelles respectives de 94,9 mm/2jours, 48,6 mm/8jours, 104,6 mm/11 jours et 101,3 mm/8 jours (tableau 18).

CHAPITRE II

CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES

DE LA ZONE D'ETUDE

Mois		Janvier	Février	Mars	Avril	Aout	Octobre	Novembre	Décembre
2010	CMPEPCJ \geq 20 mm (SSSM)	33,7mm/11j	94,9 mm/9j dont le 3 ^{eme} jour torrentiel (34 mm)	56,2 mm/8j dont le 3 ^{eme} jour torrentiel (23,8 mm)	25,8mm/2j	41 mm/3j dont 1 ^{er} jour torrentiel (33 mm)	48,6 mm/5j	28,8 mm/2j	30,7 mm/4j
	T° max des maxima j.	17	20	17	23	32	25	20	14
	T° min des minima j.	2	3	4	13	22	14	12	3

Mois		Février	Avril	Mai	Novembre
2011	CMPEPCJ \geq 20 mm (SSSM)	94,9mm/2j	48,6 mm/8j dont le 7 ^{eme} jour torrentiel (24,8mm)	35,7 mm/6j 68,9 mm/5j, 2 ^{eme} jour 21mm 4 ^{eme} 42,9 mm	62,8mm/3j 38,5 mm/5j
	T° max des maxima j.	12	30	35	24
	T° min des minima j.	4	10	11	10

Mois		Février	Avril	Octobre	Novembre
2012	CMPEPCJ \geq 20 mm (SSSM)	108,1mm/7j dont le 1 ^{er} et le 4 ^{eme} jour torrentiel dépassant respectivement 36 mm et 28,8 mm /j	127,9mm/5j dont le 2 ^{eme} jour torrentiel 73,9 mm	21 mm/j	54,3 mm/6j 2 ^{eme} jour torrentiel (22 mm/j)
	T° (°C) max des maxima j	12	17	24	21
	T° (°C) min des minima j	0	5	13	8

Mois		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Décembre
2013	CMPEPCJ \geq 20 mm (SSSM)	31,9mm/6j	52,1mm/6j dont le 1 ^{er} jour torrentiel (23,1 mm/j)	20,7 mm/2j	56,9mm/5j	24,8mm/j 23,6mm/2j	28,8mm/2j dont le 1 ^{er} jour torrentiel (23,8 mm/j)
	T° max des maxima j	16	19	15	25	19 16	18
	T° min des minima j	6	0	6	9	15 11	8

Mois		Janvier	Mars	Septembre	Novembre	Décembre
2014	CMPEPCJ \geq 20 mm (SSSM)	27,8mm/2j	35,8 mm/6j	29,9 mm/3j	48,8 mm/6j	57,6 mm/10j
	T° (°C) max des maxima j	15	24	35	22	18
	T° (°C) min des minima j	6	7	20	10	4

Mois		Février	Mars	Novembre
2015	CMPEPCJ \geq 20 mm (SSSM)	58 mm/6 jours	31 mm/9 jours	22 mm/2 j
	T° (°C) max des maxima j.	13	13,5	25
	T° (°C) min des minima j.	3	4	12

CHAPITRE II

CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES

DE LA ZONE D'ETUDE

Mois		Février	Mars	Novembre	Décembre	
2016	CMPEPCJ \geq 20 mm (SSSM)	30,5mm/4j	67,9 mm/8j dont le 5 ^{ème} j = 20 mm	35 mm/1jour	42 mm/4j	55,2 mm/7j dont le 6 ^{ème} jour est torrentiel (21 mm/j)
	T° (°C) max des maxima j	19	16	17	16,5	16
	T° (°C) min des minima j	4	3	10	10	7

CMPEPCQJ_20mm : Cumul Mensuel des Précipitations des Evénements Pluvieux Continus de Quelques Jours \geq 20 mm, (SSSM = Seuil de Saturation des Sols Marneux)

Tableau 18. Evénements torrentiels et les températures maxima et minima journalières (SMBAli : 2010 – 2016)

D'après le tableau 18, il a été constaté ce qui suit:

Durant l'année 2010, il a été enregistré une saison automnale (Octobre et Novembre) des plus sévères, où on a observé une chute de 77,4 mm/7 jours sur un cumul annuel de 513,3 mm. Par ailleurs, durant le mois d'Aout de la même année, un évènement pluvieux exceptionnel a été enregistré, durant lequel le cumul pluvieux était de 41 mm/3 jours, avec un pic de 33 mm durant le 1^{er} jour. Cet évènement a été observé après une longue période de sécheresse (plus de 3 mois) avec des maxima thermiques atteignant 45 °C, enregistrés au début du mois de Juillet. Ce qu'a favorisé le phénomène de dessiccation des marnes qui représentent plus de 60% des terres du bassin versant.

Durant l'année 2012, et, au cours du mois d'Avril, une quantité importante de pluie a été enregistrée estimée à 127,9 mm et étalée sur 5 jours, dont le pic a été observé durant le 2^{ème} jour de cet évènement de 73,9 mm. Ceci a pu favoriser le phénomène d'humectation des marnes; avec un l'écart thermique de 47 °C enregistré durant la même année de -1 °C à 46 °C entre le mois de Février et celui d'Aout, a pu aussi déclencher le phénomène de dessiccation.

Les aptitudes thermiques suivis par des évènements pluvieux à caractère torrentiel favorisent l'altération des marnes par suite de cycles répétitifs humectation-dessiccation.

2.5. Analyses socio-économiques du bassin de l'oued Kramis

L'érosion accélérée et le ruissellement excessif dans la zone d'étude sont liés à un certain mode de développement déséquilibrant le paysage; défrichement de zones fragiles, dénudation et tassement par le surpâturage et épuisement du sol par les cultures intensives non compensé par les apports de matières organiques et de nutriments.

Selon la FAO (2013), l'érosion augmente en fonction de la densité de la population. Il est vrai que dans un système agraire donné, si la population dépasse certains seuils, les terres viennent à manquer et les mécanismes de restauration des sols deviennent problématiques.

2.5.1. La population rurale

Le bassin versant de l'oued Kramis recouvre une superficie de 302 Km² répartie sur sept communes à savoir; Achaacha, Nekmaria (Wilaya de Mostaganem), Dahra, Taougrite, Ain Merane (Wilaya de Chlef), Sidi Mhamed Benali et Mediouna (Wilaya de Rélizane).

Les communes de la wilaya de Rélizane représentent une surface de 60 % de la superficie totale du bassin versant, suivie des communes de la Wilaya de Chlef qui occupent 36,5%. Les communes de la Wilaya de Mostaganem viennent en troisièmes position en termes de surface avec un taux de 3,5 %. La population rurale totale de la région d'étude est estimée à 17 330 habitants en 2016⁴.

⁴ Ces données ont été obtenues auprès des services concernés (DSA, direction des forêts, services communaux) pour la période qui s'étale entre 1998 et 2016.

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES DE LA ZONE
D'ETUDE

2.5.2. Evolution de la population rurale entre 1998 et 2016

Code	Les communes et leurs surfaces au sein de la zone d'étude en Km ²	Wilaya	Population rurale du bassin versant de l'oued Kramis (habitant x1000)				
			1998	2004	2008	2016	
206	Taougrite	35,82	Chlef	5,0	4,3	5,7	6,9
217	Dahra	63,9	Chlef	4,9	3,1	5,5	7,4
232	Ain Merane	10,6	Chlef	1,7	1,2	2,2	3,9
2715	Nekmaria	8,04	Mostaganem	0,9	0,5	0,9	2,1
2717	Achaacha	3,06	Mostaganem	1,5	0,8	2,0	3,8
4808	SMBAli	80,2	Rélizane	1,9	1,2	1,7	2,6
4809	Médiouna	102,4	Rélizane	3,3	1,2	2,6	4,4
Moyenne				2,8	1,8	2,9	4,4

Tableau 19. Evolution de la population rurale du bassin de l'oued Kramis (1998 - 2016)

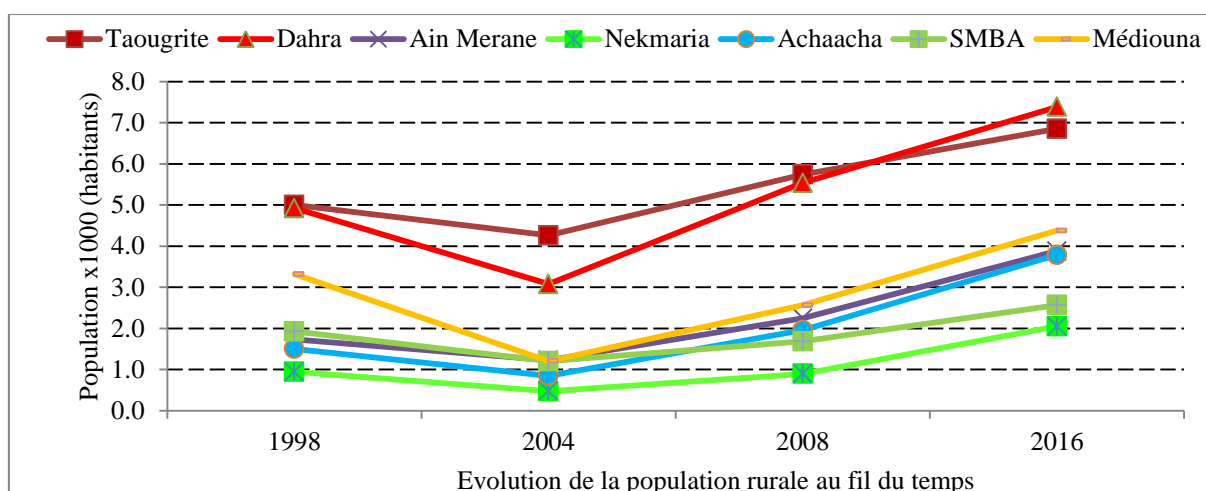


Figure 24. Évolution de la densité de population rurale (1998 – 2016)

D'après le tableau 19 et la figure 24, on constate que la population rurale a diminué considérablement durant la période qui s'étale entre 1998 et 2004 (exode rural) pour les sept communes du bassin versant qui le constitue. Après l'année 2004 et avec l'effort considérable fourni par l'Etat algérien pour le développement du secteur agricole par le soutien à l'investissement et l'accompagnement technique et financier des agriculteurs, on remarque l'accroissement en matière de création d'emploi. Ce dernier a augmenté remarquablement dans les communes qui se localisent autour du périmètre irrigué situé en aval du barrage de l'oued Kramis (Périmètre d'Achaacha).

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES DE LA ZONE
D'ETUDE

En 2000, l'Etat algérien a mis en place une stratégie opérationnelle intégrée au domaine rural à la faveur de nouvelles attributions. Cette stratégie appelée Plan National de Développement Agricole et Rural (PNDAR), a pour mission la réhabilitation des espaces ruraux et la stabilisation de populations rurales par l'amélioration des conditions de vie des ménages et le soutien au retour des populations ayant fui leurs localités pour des raisons économiques et sécuritaires.

D'après les services de la DSA de la wilaya de Mostaganem (2017), le périmètre irrigué d'Achaacha a subi durant ces dernières années une intense activité agricole. Ceci explique clairement l'augmentation du nombre des agriculteurs de la commune de Nekmaria. La densité de la population est passée de 17 Hab/Km² en 2008 à 39 Hab /Km² en 2016. La commune de Achaacha a enregistré également une augmentation de sa densité de population qui est passée de 30 Hab/Km² en 2008 à 58 Hab/ Km² en 2016.

2.6. Conclusion

L'érosion hydrique est un phénomène complexe résultant de l'action de divers facteurs interdépendants.

Le développement des techniques modernes d'acquisition et de mise à disposition d'informations digitales par le biais de modèle numérique de terrain et des données satellitaires a rendu possible l'étude de l'effet de chaque facteur sur l'érosion indépendamment des autres.

Du point de vue physiographique, la disposition des reliefs, leurs expositions, leurs altitudes et leur situation géographique peuvent jouer un grand rôle dans la juxtaposition des milieux bioclimatiques. La présence du massif montagneux sur les terrains marneux de Taougrite à l'Est à celui de Mazouna au Sud, dépassant plus souvent l'altitude de 700 m, confère au bassin versant une activité érosive importante.

L'analyse statistique des paramètres physiographiques de dix-sept sous-bassins formant l'ensemble du bassin de l'oued Kramis montre que, ce sont surtout les caractéristiques de forme (Superficie, Périmètre, Coefficient de compacité de *Gravelius*, Longueur, Largeur) qui ont régi le classement de ces sous-bassins versants en groupes distincts. Cet examen montre

CHAPITRE II
CARACTERES PHYSIOGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES DE LA ZONE
D'ETUDE

également certaines cohérences spatiales entre les grands sous-bassins qui s'étalent sur une surface d'environ de 74 % de la surface totale.

L'érosion hydrique dépend donc des caractéristiques de l'évènement pluvieux, de l'état physiographique et de lithologie qui reçoivent les pluies. Sous la prédominance de roches marneuses et marno-calcaires relativement tendres, les averses automnales et printanières intenses, atteignent parfois une valeur de 74 mm/jour après une sécheresse prononcée, peuvent donner lieu à toutes sortes de processus érosifs. Sur ces formations tendres, les intensités des pluies instantanées pendant la saison automnale peuvent provoquer les sapements des berges au niveau des oueds et les grands talwegs rapportant une quantité importante de sédiments déposés au niveau du lac du barrage.

Sur une superficie de 302 Km² où la population rurale atteint une densité de 38 Hab/Km² en moyenne rend, l'activité agricole dominée par la céréaliculture en rotation avec les jachères, soumise aux contraintes climatiques assez sévères. En effet, la région d'étude est exposée à un climat semi-aride méditerranéen où la pluviométrie annuelle est faible (418 mm/an), les évènements pluvieux ont souvent un caractère torrentiel et irrégulier aussi bien dans l'espace que dans le temps (84 mm/an pendant le mois de Février contre 1,3 mm/an à la fin de mois du Juillet).

Face à ces conditions sévères du milieu; l'installation du barrage de l'oued Kramis a donné de nouvelles perspectives encourageantes en agriculture intensive. Ces perspectives entraînent une croissance remarquable de la population rurale en 2016, où la densité au Km² a dépassé le double de ce qu'elle était en 2004.

CHAPITRE III

**ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE
L'UTILISATION DES TERRES ET
L'EXTRACTION DE LA COUVERTURE
LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE
L'OUED KRAMIS**

3.1. Introduction

L'apparition de l'imagerie satellite à très haute résolution spatiale (THRS), issue de *Ikonos* (Bhaskaran *et al.*, 2010), *World View-2* (Jia *et al.*, 2013), *Spot-5* (Achbun *et al.*, 2013 ; Kassouk *et al.*, 2014) ou *Quick bird* (Pham et He, 2015), ouvre de nouvelles applications en télédétection permettant en effet, la mise à jour des bases de données spatiales d'une région donnée.

La terre émergée est extrêmement hétérogène tant au niveau spatial qu'au niveau spectral. La complexité spatiale se manifeste par la densité et la diversité des objets qui s'y trouvent. La résolution spectrale, à l'intérieur d'une classe d'occupation du sol, augmente quand la taille de pixel est réduite, comme dans le cas des capteurs à THRS (Pham et He, 2015). La classification par pixels n'est pas capable de séparer les classes d'occupation des sols. Cela confirme que l'information spectrale à elle seule, y compris celle obtenue avec des images THRS, est insuffisante pour distinguer les objets terrestres (Guindon, 1997). De nouvelles études se sont donc penchées sur une autre approche appelée « orientée objet », qui intègre d'autres types d'informations que les signaux spectraux, ainsi elle est basée sur la création d'objets d'image (Hay et Castilla, 2006). Plusieurs auteurs montrent que cette approche donne de meilleures cartographies géomorphologiques (Jia *et al.*, 2013), géologiques ou lithologique (Kassouk *et al.*, 2014 ; Hereher et Shehta, 2017) ainsi que celles de l'utilisation des terres (Bhaskaran *et al.*, 2010 ; Achbun *et al.*, 2013).

L'approche orientée-objet comprend deux étapes principales; la segmentation d'image et la classification. En effet, la segmentation fusionne les pixels en objets, ensuite des données spectrales, spatiales et contextuelles sur ces objets sont recueillies afin d'orienter la classification.

ENVI (*Environment for Visualizing Images*) est un logiciel professionnel de la société « *EXELIS* » qui permet la visualisation, le traitement, l'analyse, et la présentation de nombreux types d'images numériques (Cardona, 2016) dont les images satellites sont issues du satellite Landsat.

Bien que le logiciel *ENVI_{ZOOM}* soit accessible et facile à manipuler par les utilisateurs qui ne maîtrisent pas des outils de programmation, il est important d'établir une procédure

de segmentation efficace dans ce logiciel. L'objectif principal de cette étude est donc de déterminer de façon empirique les paramètres de segmentation en utilisant le logiciel *ENVI_{ZOOM}* avec l'algorithme « *k plus proche voisin* » pour l'extraction des classes d'occupation du sol ainsi que celle de la lithologie de la région d'étude.

Pour l'occupation de sol du bassin versant de l'oued Kramis, nous visons en premier lieu dix classes: terrains incultes, lac du barrage, surfaces bâties, terrains calcaires, céréaliculture, Pin d'Alep, jachère, parcours, reboisement (Pin d'Alep) et matorral. Et en second lieu, nous effectuons les tests de segmentation au moyen de deux variables *Scale level (SL)* et *Merge level (ML)* variant chacun de 10% à 100% sur l'aire d'entraînement du logiciel *ENVI_{ZOOM}*. Suite à quoi les objets produits par la segmentation testée sont classifiés suivant l'occupation du sol citée auparavant et en fin, quelques limitations et anomalies de cette classification pour notre région d'intérêt font l'objet de notre discussion.

En ce qui concerne la lithologie, la même démarche fût adopté, sauf que les classes sont en nombre de neuf: sol alluvionnaire, marnes brunes, marnes bleues compactes, marnes vertes, marnes bleues armées de grés calcaires, sols rouges calcaires, sols rouges schisteux, terrains calcaires et le lac du barrage.

3.2. Matériel et méthodes

En Algérie, le comblement des retenues par les sédiments présente un problème majeur pour les barrages. La relation entre l'évolution de l'occupation des sols et le changement climatique est mal connue dans ces régions par manque d'études à ce sujet.

Le bassin versant de l'oued Kramis qui est l'une de ces régions connaît un risque érosif relativement élevé (Belkalem, 2017). Outre, ce problème environnemental crucial, la zone d'étude subit ces dernières décennies une extension agricole importante. Ceci résulte de sa position géoéconomique et sa vocation agricole. Dans ce contexte, une base de données de l'occupation et de lithologie du sol pour une gestion efficace de ce milieu rural devient indispensable.

3.2.1. Images satellites utilisées

Outre, les sources des données qui ont été mentionnées dans le Chapitre II, nous avons utilisé une série d'images issue de deux générations du satellite landsat: Landsat 4-5 *Thematic Mapper (TM)* et celles de Landsat 8 *Operational Land Imager (OLI)* et *Thermal InfraredSensor (TIRS)*. Les caractéristiques spectrales et spatiales de ces séries d'images figurent dans le tableau 20.

	Landsat 4 et 5	Landsat 8 OLI et TIRS
Pays	USA	USA
Date de lancement	1984	2013
Altitude	705 Km	705 Km
Capteur	TM	OLI et TIRS
Type	radiomètre à balayage	radiomètre à balayage
Bandes spectrales		1 (CA) [0,43 - 0,45 μm]
		2 (B) [0,45 - 0,51 μm]
	1 (B) [0,45 - 0,52 μm]	3 (V) [0,53 - 0,59 μm]
	2 (V) [0,52 - 0,60 μm]	4 (R) [0,64 - 0,67 μm]
	3 (R) [0,63 - 0,69 μm]	5 (IR) [0,85 - 0,88 μm]
	4 (IR) [0,76 - 0,90 μm]	6 (SWIR1) [1,57 - 1,65 μm]
	5 (IRM) [1,55 - 1,75 μm]	7 (SWIR2) [2,11 - 2,29 μm]
	6 (IRT) [10,4 - 12,5 μm]	8 (Pan) [0,50 - 0,68 μm]
	7 (IRM) [2,08 - 2,35 μm]	9 (Cirrus) [1,36 - 1,38 μm]
		10 (IRT1) [10,60 - 11,19 μm]
		11 (IRT2) [11,50 - 12,51 μm]
Résolution spatiale	30 m	30 m
(dimension des pixels)	Bande 6 : 120 m	Bande 8 : 15 m Bande 10 et 11 : 100 m
Dimension d'une scène	185 x 172 Km	185 x 172 Km
Stéréoscopie	Non	Non
Fréquence de passage	16 jours	16 jours
Vocation	Végétation et occupation du sol	Végétation et occupation du sol
Particularité	Grande variété spectrale	Grande variété spectrale

Tableau 20. Caractéristiques spectrales et spatiales des satellites
Landsat 4-5 (TM) et Landsat 8 (OLI et TIRS)

3.2.2. Principe et démarche de la méthode

La démarche suivie pour la classification comporte plusieurs étapes initialisées, par une définition des classes d'occupation du sol ainsi que sa lithologie, que l'on souhaite rechercher dans l'extrait des images traitées.

Le choix des classes s'est fait, suite aux prospections réalisées sur terrain, lors desquelles nous avons utilisé un GPS portatif, des images satellitaires et des cartes topographiques.

ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET L'EXTRACTION DE LACOUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

A cet effet, pour l'occupation du sol, nous avons distingué trois catégories correspondantes à l'utilisation des terres à savoir; (i) le tissu artificialisé et rocheux, (ii) les terres à utilisation agricole (iii) et les terrains naturels et boisés (Fig. 25). La distinction entre les classes de ces catégories est assez délicate en particulier celles de la première catégorie. Les dix classes d'occupation du sol sont hiérarchisées selon le diagramme suivant:

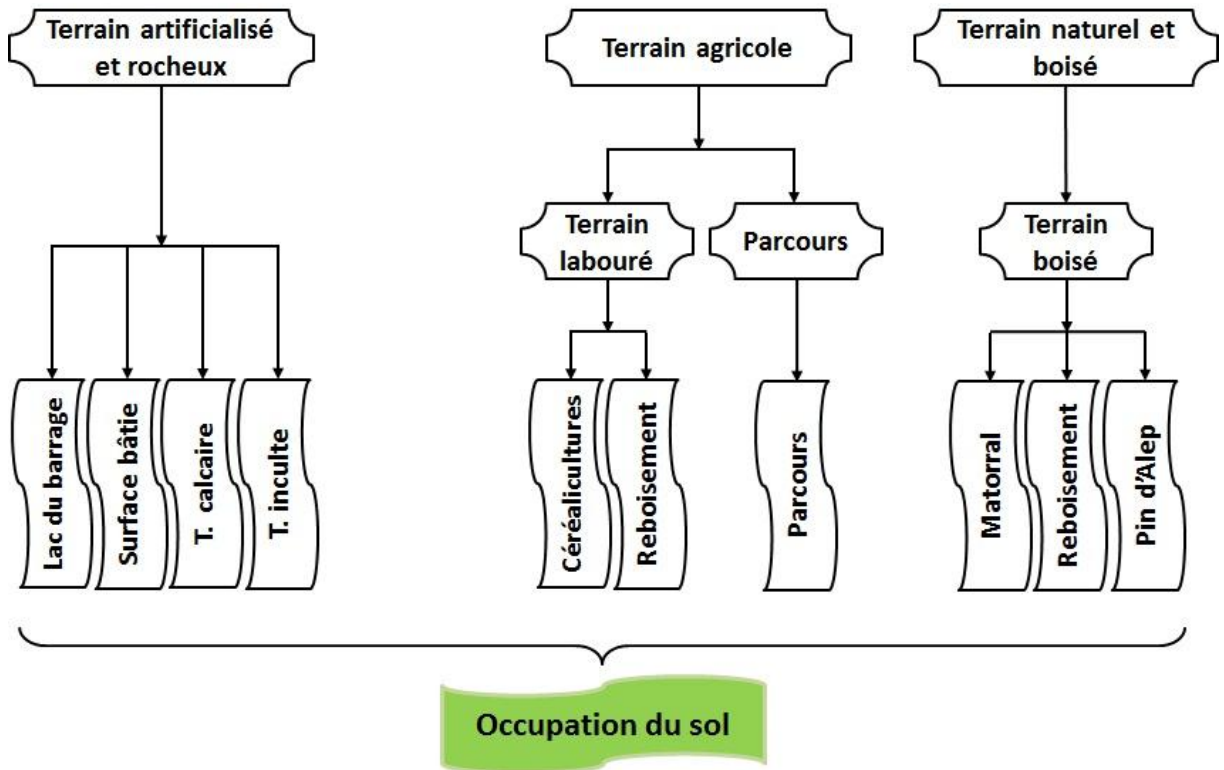


Figure 25. Diagramme de la méthode de classification orientée-objet de l'occupation du sol

Concernant, la lithologie des sols, nous avons constaté cinq catégories: sol alluvionnaire, terrain marneux, sols rouge calcaires, terrains calcaires et lac du barrage. La distinction entre ces classes est également assez délicate en particulier celles qui ont la même couleur: sol rouge schisteux et sol rouge calcaire. Ces deux types du sol sont regroupés dans la même classe, à cause de leur similitude en termes de réflectance spectrale. Les neuf classes de lithologie des sols sont hiérarchisées selon le diagramme suivant:

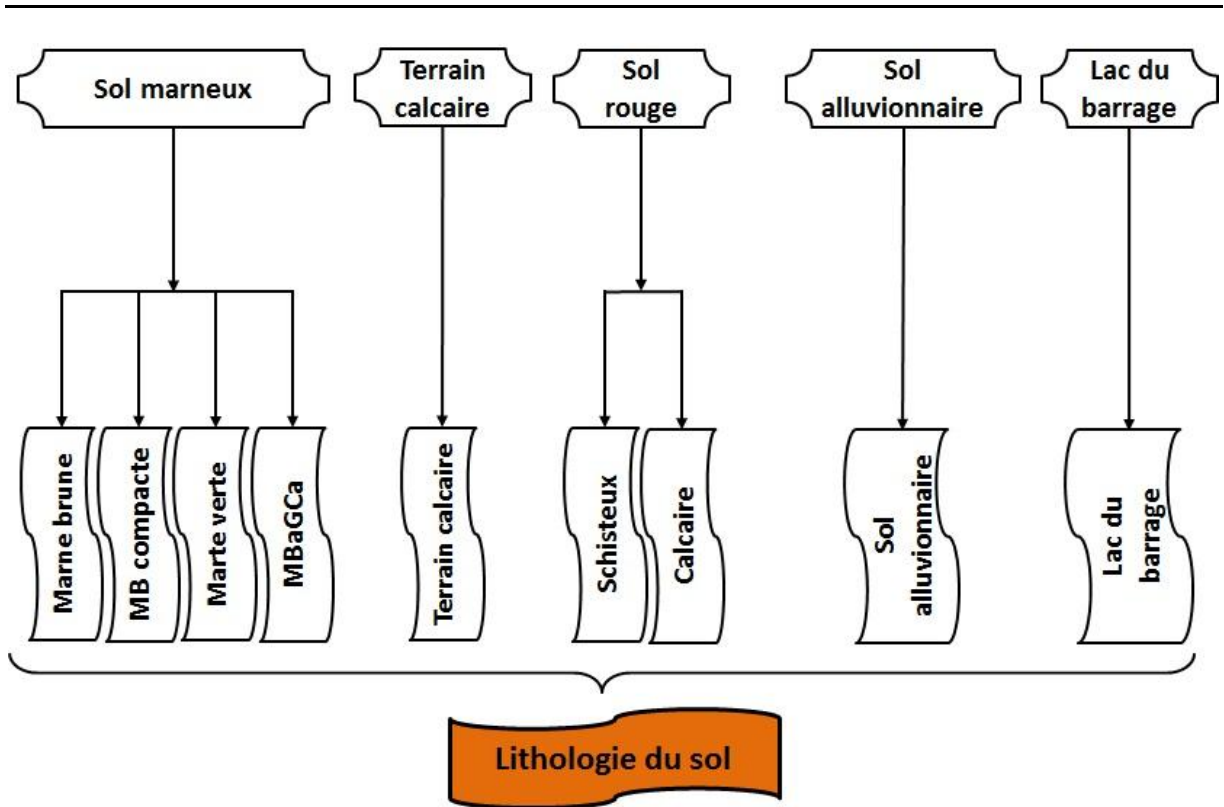


Figure 26. Diagramme de la méthode de classification orientée-objet de la lithologie du sol

3.2.3. Choix du pourcentage de niveau *Scale level* et *Merge level*

Le choix de meilleur pourcentage qui varie de 10 % à 100% pour les deux niveaux *Scale level* et *Merge level* sur l'aire d'entraînement du $NDVI_{ZOOM}$, repose sur la combinaison entre les objets du terrain interprétés visuellement et ceux extraits automatiquement de la technique de segmentation noté à chaque fois par des indices de 1 à 4. Ces derniers représentent un symbole qualitatif descriptif subdivisé en quatre constatations selon la répartition suivante :

- ☞ Object non compatible à l'objet terrestre noté 1.
- ☞ Object moyennement compatible à l'objet terrestre noté 2.
- ☞ Object compatible à l'objet terrestre noté 3.
- ☞ Object fortement compatible à l'objet terrestre noté 4.

3.3. Résultats et discussion

3.3.1. L'occupation du sol

3.3.1.1. Segmentation

Pour les dix classes de l'occupation du sol interprétées, des recherches de la forte compatibilité selon les indices cités précédemment ont été faites pour les dix niveaux de *Scale level*, en variant chaque fois les niveaux de *Merge level* qui à leur tour varient de 10% à 100%.

Catégories	Occupation du sol	Niveau de <i>Scale level</i> 60 %				Niveau de <i>Scale level</i> 70%						
		Niveaux de <i>Merge level</i> %				Niveaux de <i>Merge level</i> %						
		60	70	80	90	40	50	60	70	80	90	
1	Catégorie i	Lac du barrage	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	Catégorie ii	Terrain inculte	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
3	Catégorie iii	Parcours	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3
4		Reboisement	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3
5		Forêt	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
6	Catégorie iv	Céréaliculture	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
7		Jachère	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
8	Catégorie v	Matorral	3	4	4	4	3	3	4	4	4	3
9		Surface bâties	3	4	4	4	3	3	4	4	4	3
10	Catégorie vi	Terrain calcaire	3	4	4	4	3	3	4	4	3	3

Tableau 21. Résultat de la segmentation de l'occupation du sol au seuil de forte compatibilité

D'après le tableau 21 on remarque qu'une forte compatibilité regroupe les dix classes d'occupation du sol en six catégories:

(i) La classe du lac du barrage a une forte compatibilité lorsque le niveau de *Scale level* atteint une valeur de 60% avec ses niveaux de *Merge level* variant entre 60% et 90%. Cette observation a été enregistrée même pour un seuil de 70% de *Scale level* avec ses niveaux de *Merge level* qui varient entre 40% et 90%.

(ii) Cette constatation a été également enregistrée pour la classe de terrain inculte sur une aire d'entraînement jusqu'au seuil de 70% de *Merge level* correspondant à un niveau de 70% de *Scale level*.

CHAPITRE III

ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET L'EXTRACTION DE L'ACOUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

(iii) Les classes des parcours et du reboisement ont la même allure. En effet, le niveau de *Scale level* au seuil de 60% a une forte compatibilité lorsque ses niveaux de *Merge level* compris dans une fourchette allant de 70% à 90%. Tandis que, le niveau de *Scale level* au seuil de 70% atteint sa forte compatibilité lorsque les niveaux de *Merge level* varient sur une fourchette de 40% à 70%.

(iv) Concernant les classes des forêts, de céréaliculture et de jachère, leur forte compatibilité a été enregistrée au seuil de 60% et 70% du niveau de *Scale level* avec les niveaux de *Merge level* allant respectivement de 60% à 90% et de 40% à 80%.

(v) Pour les deux classes d'occupation du sol à savoir, le matorral et les surfaces bâties leur forte compatibilité a été enregistrée lorsque le niveau de *Scale level* atteint un seuil de 60% et 70%, et que ses niveaux de *Merge level* varient sur une fourchette allant respectivement de 70% à 90% et de 60% à 80%;

(vi) En ce qui concerne, la classe du terrain calcaire, la forte compatibilité a été observée au seuil de 60% et de 70% de *Scale level* avec leurs niveaux de *Merge level* qui s'étalent sur une fourchette allant respectivement de 70% à 90% et de 60% à 70%.

D'une manière générale, les valeurs de la forte compatibilité communes entre tous les objets terrestres étudiés ont été obtenues dans les seuils de 60% et 70% de *Scale level* avec leurs niveaux de *Merge level* allant respectivement de 70% à 90% et de 60% à 70%.

L'analyse statistique du Khi-deux (χ^2) de l'occupation du sol

		Tableau croisé <i>Merge level</i> * Compatibilité * <i>Scale level</i>						
				Compatibilité				Total
				1	2	3	4	
<i>Scale level</i>	60%	70%	Effectif	0	0	0	10	10
			% compris dans <i>Merge level</i>	,0%	,0%	,0%	100%	100 %
		80%	Effectif	0	0	0	10	10
	% compris dans <i>Merge level</i>		,0%	,0%	,0%	100%	100 %	
	90%	Effectif	0	0	0	10	10	
			% compris dans <i>Merge level</i>	,0%	,0%	,0%	100%	100 %
70%		60%	Effectif	0	0	0	10	10
	% compris dans <i>Merge level</i>		,0%	,0%	,0%	100 %	100 %	
	70%	Effectif	0	0	0	10	10	
% compris dans <i>Merge level</i>		,0%	,0%	,0%	100 %	100 %		

Où les différents indices de compatibilité correspondants à 1: *Non Compatible*, 2: *Moyennement Compatible*, 3: *Compatible*, 4: *Fortement Compatible*

Tableau 22. Tableau croisé *Merge level* * Compatibilité * *Scale level* de l'occupation du sol

CHAPITRE III

ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET L'EXTRACTION DE LACOUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

Les résultats mentionnés dans le tableau 22 montrent que l'utilisation de *Scale level* de 60% avec un niveau de *Merge level* de 70%, de 80% et de 90% ainsi que, l'utilisation de *Scale level* de 70% avec un niveau de *Merge level* de 60% et 70% donne une forte compatibilité pour les 10 classes de l'occupation du sol.

	Valeur	ddl	Signification asymptotique (bilatérale)
Khi-deux de Pearson	83,972 ^a	12	,000
Rapport de vraisemblance	107,332	12	,000
Association linéaire par linéaire	40,464	1	,000
Nombre d'observations valides	350		

Tableau 23. Tests du Khi-deux (χ^2) de l'occupation du sol

Du tableau 23, et à la lumière, de l'analyse statistique qui a été effectué au moyen du logiciel *PASW statistics v.18*, ainsi que les résultats obtenus du test de Khi-deux de Pearson (χ^2) on déduit qu'il existe une différence très significative entre les différents niveaux de *Scale level* et *Merge level* utilisés ($\chi^2 = 83,972$, $ddl = 12$ et $P < 0,001$).

Classes d'occupation du sol	Surface	
	Km ²	%
Terrain inculte	9,7	3,2
Lac du barrage	1,7	0,6
Surfaces bâties	4,7	1,6
Terrains calcaires	47,6	15,7
Céréalicultures	99,9	33,1
Forêt	1,3	0,4
Jachère	34,6	11,5
Parcours	92,9	30,8
Reboisement (Pin d'Alep)	7,7	2,5
Matorral	2,0	0,7
Total	302	100

Tableau 24. Classes d'occupation des sols du bassin de l'oued Kramis

3.3.1.2. Extraction des classes de l'occupation du sol

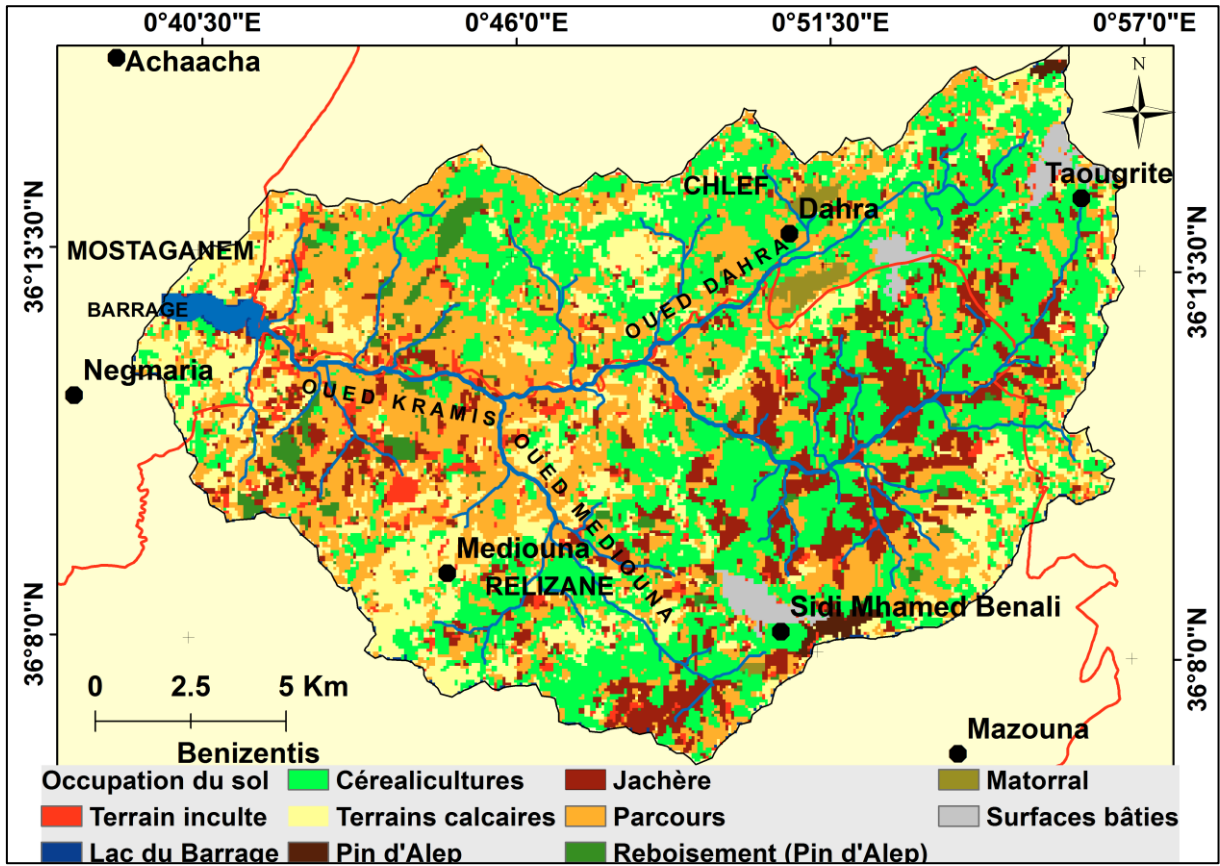


Figure 27. Carte d'occupation du sol du bassin de l'oued Kramis

D'après le résultat final de classification orientée-objet illustré dans la figure 27, nous pouvons affirmer que, les tests de segmentation effectués sur l'extrait de l'image Landsat8_OLI ont été très utiles, permettant une meilleure compréhension du processus de la segmentation pour des fins cartographiques de l'utilisation du sol. Nous pouvons également confirmer que le processus de la segmentation pour la classification orientée-objet via l'outil ENVI_{ZOOM}, nécessite une précision délicate entre les objets terrestres à cartographier.

Nos résultats sont en concordance avec ceux trouvés par d'autres investigateurs (Pham *et al.*, 2013 ; Jia *et al.*, 2013 ; Kassouk *et al.*, 2014 ; Liu et Zhang, 2017). Vue son importance dans le domaine de la cartographie de différentes utilisations des terres, cette technique a été utilisée un peu partout dans le monde.

3.3.1.3. Description générale de l'utilisation des terres de la zone d'étude

L'image classifiée prise à la fin de la saison printanière, montre que le couvert végétal du bassin versant de l'oued Kramis est très modeste. Trois catégories d'occupation du sol coexistent:

Des terrains labourés, où les agriculteurs pratiquent des cultures annuelles (céréaliculture à base du blé et de l'orge) sur une surface de 33,1% (tableau 24). Cette activité agricole se trouve exclusivement dans les quatre sous-bassins versants: SBV1, SBV2, SBV3 et SBV4.

Des parcours dominés par des formations végétatives garnis de formations éparses d'alfa et quelques espèces steppiques endémiques telles que, *Atriplex glauca*, *Rosmarinus officinalis*, *Salsola vermiculata*, *Artemisia herba alba*, *Dactylis glomerata*, *Marrubium vulgare*, *Asphodelus microcarpussazlm*, *Caprisspinosa*, *Cistus monspeliensis*, *Cupressus sempervirens*, *Globularia alypum*, *Inula viscusa*, *Juniperus oscycedrus*, *Marrubium vulgare*, *Olea europea*, *Phillyrea angustifolia*, *Tetraclinis articulata*, *Thymeleahirsuta endel* ...etc. La dégradation par le surpâturage sur des parcours fragiles est remarquable, en particulier la région Sud de Dahra et de Sidi Moussa dans la rive Nord et celle de Sidi Mhamed Benali et Mediouna dans la rive Sud du bassin versant. Ces parcours occupent une surface de 30,8 % de la zone d'étude (tableau 24).

Des matorrals très dégradés constitués par des formations à base de pin d'Alep, de chêne vert et de Thuya se localisent principalement sur les monts du Dahra et sur les crêtes séparant les deux sous-bassins versants: SBV1 et SBV2. Cette formation ne représente qu'un taux de 0,7 % de la surface de la zone d'étude.

En plus des reboisements de pin d'Alep moyennement denses situés sur les monts Nord de Sidi Moussa, on note également, quelques associations dans le secteur Ouest de la zone d'étude. Cette association végétative n'occupe qu'une surface de 2,5%. Là aussi certaines zones notamment au Nord-est du bassin sur les monts de Taougrite, ne représentant qu'un taux de 0,4 % du bassin, sont également occupées par une formation de pin d'Alep (tableau 24).

Des terrains incultes, des terrains calcaires et des surfaces artificialisées (lac du barrage et surfaces bâties) sont également présents en proportion relativement importante (21,1 % de la zone d'intérêt) (tableau 24).

3.3.1.4. Quelques anomalies de la méthode de segmentation

La méthode adoptée a permis d'extraire les dix classes de l'utilisation du sol. Le niveau d'exactitude le plus élevé est obtenu pour la classe « lac d'eau » et le plus faible pour la classe « arbres isolés ».

La catégorie de plan d'eau atteint un niveau d'exactitude très élevé. Cette réponse spectrale nous a permis d'extraire aisément la surface de l'eau d'autres classes de l'occupation du sol. Ce fait est confirmé par d'autres travaux (Flanders *et al.*, 2003 ; Lang *et al.*, 2006 ; Platt et Rapoza, 2008).

Dans la catégorie formation végétale, nous avons obtenu des résultats hautement compatibles, excepté pour la classe « arbres isolés ». La faible exactitude de cette dernière classe s'explique par le fait qu'il est difficile d'identifier les arbres épars. Dans ce contexte, Laliberte *et al.* (2004) ont noté également la difficulté d'identifier les arbustes de petite taille dans leur classification. Cependant, plusieurs études récentes ont suggéré que les données du LiDAR ont un pouvoir très utile pour identifier les arbres dispersés en milieu urbain (Zhou et Troy, 2008 ; Sung, 2012).

3.3.2. La lithologie du sol

3.3.2.1. Segmentation

	Catégories	Lithologie du sol	Scale level			Scale level			
			60%			70%			
			Merge level			Merge level			
			60%	70%	80%	40%	60%	80%	90%
1	Catégorie i	Lac d'eau	4	4	4	4	4	4	4
2	Catégorie ii	Terrain calcaire	3	3	4	4	4	3	3
3		Sol alluvionnaire	3	3	4	4	4	3	3
4	Catégorie iii	Marnes brunes	3	3	4	3	4	3	3
5	Catégorie iv	Marnes vertes	4	4	4	3	4	3	3
6	Catégorie v	Marnes bleue compacte	4	3	3	3	4	3	3
7		Sol rouge calcaire	4	3	3	3	4	3	3
8		Marnes bleues armées de grés calcaires	4	3	3	3	4	3	3
9		Sol rouge schisteux	4	3	3	3	4	3	3

Tableau 25. Résultat de la segmentation de la lithologie du sol au seuil de forte compatibilité

Le tableau 25 montre que la forte compatibilité regroupe les neuf classes de la lithologie du sol en cinq catégories:

(i) La classe du lac d'eau a une forte compatibilité lorsque le niveau de *Scale level* atteint une valeur de 60% avec des niveaux de *Merge level* variant sur une gamme d'entraînement de 60% à 80%. Elle a également une forte compatibilité au seuil de 70% de *Scale level* avec une fourchette de *Merge level* variant entre 40% et 90%.

(ii) Les classes correspondant aux terrains calcaires et aux sols alluvionnaires ont la même tendance de forte compatibilité. Cette dernière a été enregistrée au seuil de *Scale level* de 60% avec un niveau de *Merge level* de 80%, ainsi qu'un seuil de 70% de *Scale level* avec des niveaux de *Merge level* variant entre 40% et 60%.

(iii) La classe des marnes brunes a une forte compatibilité marquée au seuil de *Scale level* de 60% avec un niveau de *Merge level* de 80% ainsi qu'un seuil de *Scale level* de 70% avec son niveau de 60% de *Merge level*.

(iv) Pour les marnes vertes, la forte compatibilité a été observée au niveau de 60% de *Scale level* avec des niveaux de *Merge level* variant entre 60% et 80%. La forte

CHAPITRE III

ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET L'EXTRACTION DE L'ACOUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

compatibilité au seuil de *Scale level* a été également remarquée pour la valeur de 70% avec un niveau de 60 % de *Merge level*.

(v) Concernant, les classes des marnes bleues compactes, le sol rouge calcaire, les marnes bleues armées de grés calcaires et le sol rouge schisteux, leur forte compatibilité a été enregistrée aux seuils de 60% et 70% de *Scale level* avec leur niveau de *Merge level* de l'ordre de 60%.

L'analyse statistique du Khi-deux (χ^2)

Tableau croisé <i>Merge Level</i> * Compatibilité * <i>Scale level</i>						
	<i>Scalelevel</i> 70%	Compatibilité				Total
		1	2	3	4	
<i>Merge level</i> 60%	Effectif	0	0	0	9	9
	% compris dans <i>Merge level</i>	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%

Où, 1: *Non Compatible*, 2: *Moyennement Compatible*, 3: *Compatible*, 4: *Fortement Compatible*

Tableau 26. Résultat du tableau croisé *Merge level* * Compatibilité * *Scale level* de la lithologie du sol

Les résultats mentionnés dans le tableau 26 montrent que l'utilisation de *Scale level* de 70% avec un niveau de *Merge level* de 60% donne une forte compatibilité pour les 9 classes de la lithologie du sol de la zone d'étude.

	<i>Scale level</i>	Valeur	ddl	Signification asymptotique (bilatérale)
60	Khi-deux de Pearson	64,059 ^e	12	,000
	Rapport de vraisemblance	63,680	12	,000
	Association linéaire par linéaire	22,064	1	,000
	Nombre d'observations valides	45		

Tableau 27. Tests de Khi-deux (χ^2) de la lithologie du sol

Le résultat du calcul du test Khi-deux de Pearson (χ^2) (tableau 27) nous a permis de déduire qu'il existe une différence très significative entre les différents niveaux de *Scale level* et *Merge level* utilisé ($\chi^2 = 64,059$, ddl = 12 et P < 0,001).

CHAPITRE III

ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET L'EXTRACTION DE L'ACOUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

3.3.2.2. Extraction des classes de la lithologie du sol

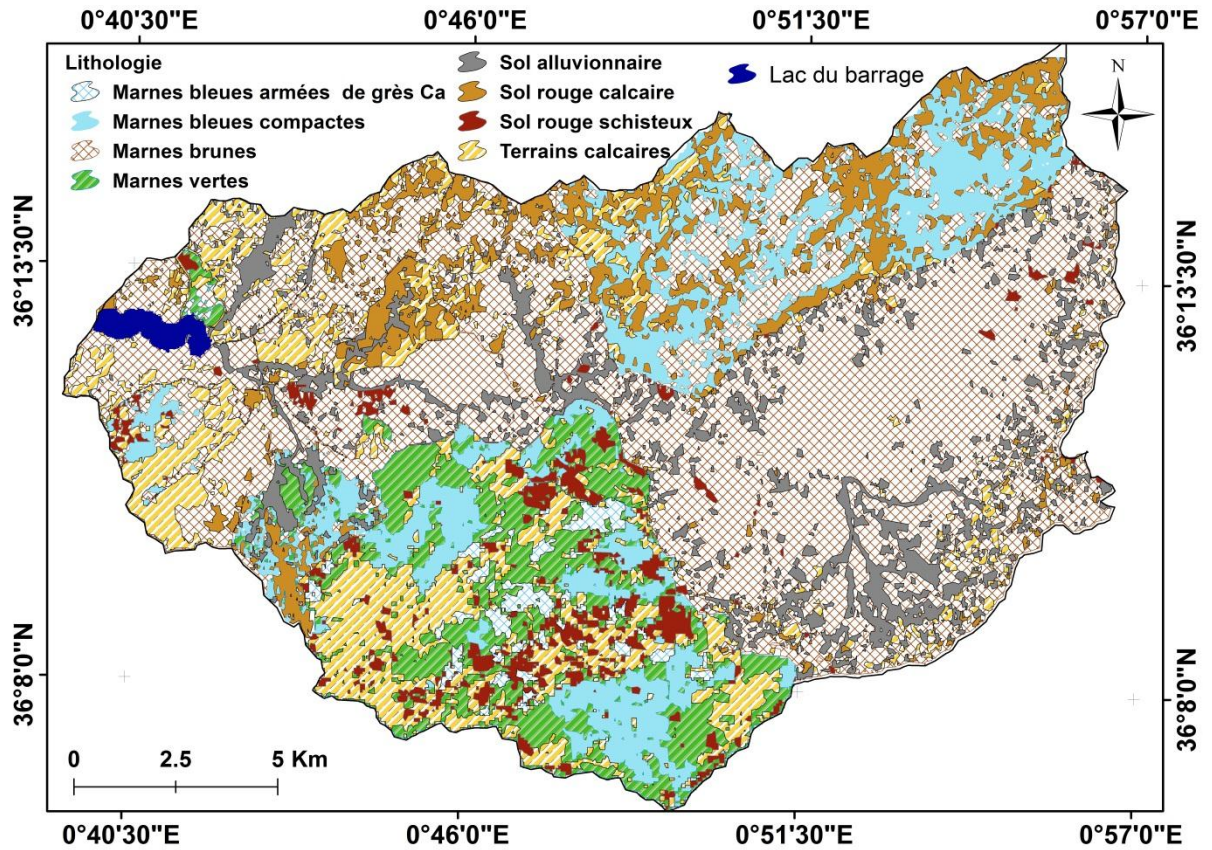


Figure 28. Carte lithologique du bassin de l'oued Kramis

La lithologie	Surface	
	Km ²	%
Sol alluvionnaire	26,3	8,7
Marnes brunes	125,5	41,6
Terrain calcaire	39,6	13,1
Sol rouge schisteux	14,5	4,8
Sol rouge calcaire	26,8	8,9
Marnes bleue compacte	37,4	12,4
Marnes vertes	20,1	6,7
Marnes bleues armées de grés calcaires	9,8	3,3
Lac du barrage (image satellite 2015)	1,7	0,6
Total	302	100

Tableau 28. Les classes de lithologie des sols du bassin de l'oued Kramis

3.3.3. Évolution spatiotemporelle de la cuvette du barrage

Le barrage de l'oued Kramis qui a été mis en service en 2004 avec une capacité de 45,4 millions m³ est exposé à l'envasement par son emplacement. Les mesures bathymétriques effectuées en 2014 au niveau de son lac montrent que ce dernier soumit à un taux d'envasement très avancé avec un volume annuel de sédiments de l'ordre de 400 000 m³ (ANBT, 2017).

Suite à la crue importante du Janvier 2017, à l'origine d'un déversement au niveau de la digue du barrage, une expertise française (à l'initiative de l'ANBT, 2017) de réhabilitation de réaménagement au niveau de cette dernière a été effectuée. Face à cette situation et vu son intérêt socioéconomique, ce barrage a eu une nouvelle révision au niveau de son infrastructure par l'Etat algérien et son partenaire Italien (ANBT, 2017).

Par ailleurs, et dans le but d'étudier l'évolution spatiotemporelle de la surface de la cuvette au moyen de la classification orientée-objet, nous avons utilisé une série d'images multi-spectrales: 2004, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 et 2017 ⁽⁵⁾. Les deux saisons de l'année ; l'Eté et l'Automne ont été choisies afin de télécharger ces images à l'exception de l'image acquise en 2017 qui a été téléchargée durant le mois du Mars. Le choix de ces saisons (Eté et l'Automne) fût conditionné par la netteté des images sur ces périodes.

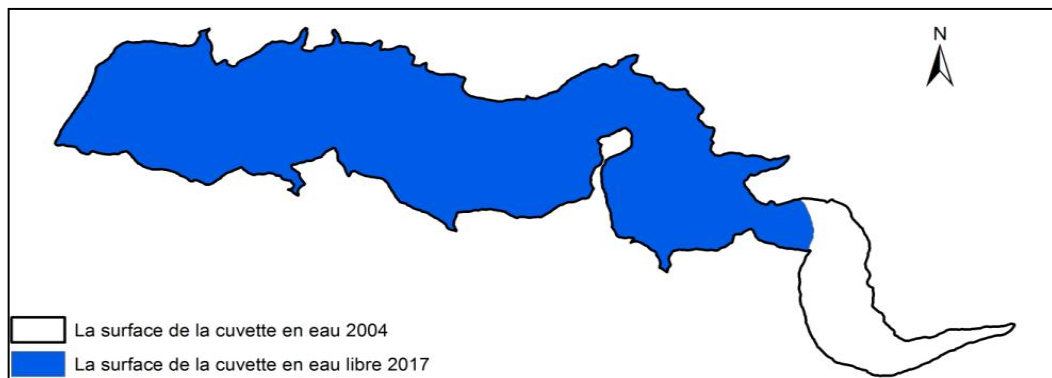


Figure 29. Evolution de la surface de la cuvette du barrage

D'après la figure 29 on remarque que la surface de la cuvette du barrage de l'oued Kramis présente une diminution en eau au fil du temps.

⁵ Selon leur disponibilité sur le site web : <http://earthexplorer.usgs.gov>, ainsi que leur netteté lors de sa prise par le satellite (Could cover).

CHAPITRE III

ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET L'EXTRACTION DE L'ACOUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

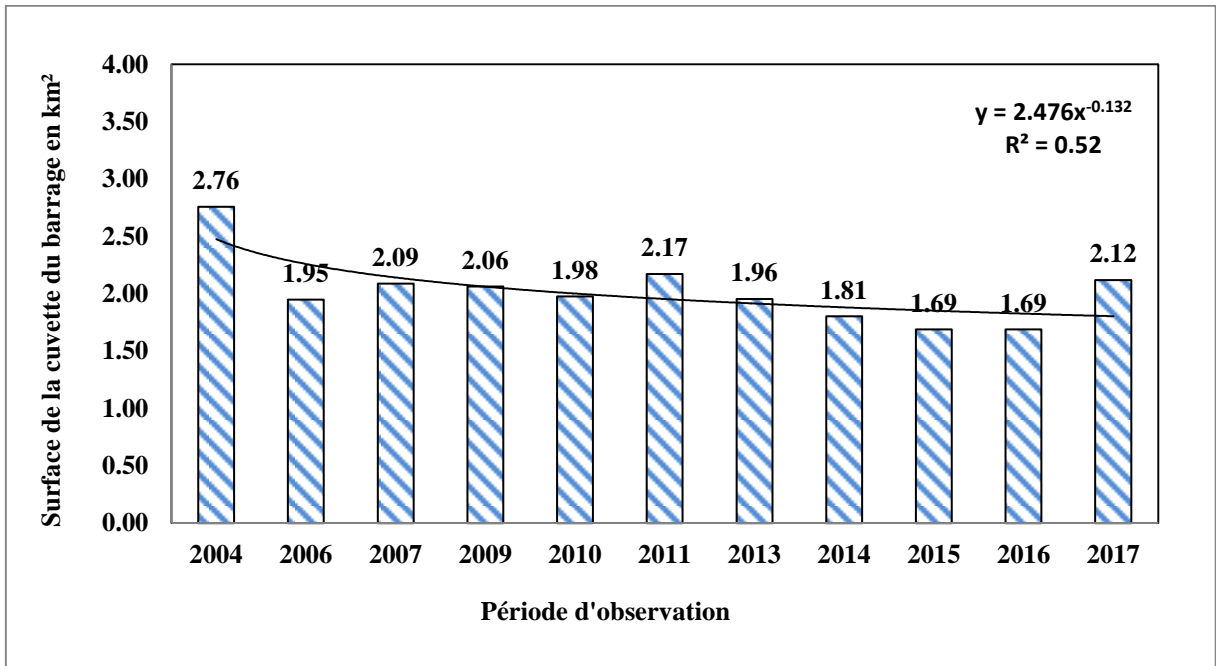


Figure 30. Évolution spatio-temporelle de la cuvette du barrage Kramis (2004 - 2017)

Cette diminution a connu une constance entre 2010 et 2011 avec une légère augmentation en surface d'eau de 0,19 Km². Toutefois, cette constance n'atténue pas la tendance générale de la courbe du volume d'eau, qui est une diminution relativement proportionnelle au fil des années. Cette diminution présente une corrélation significative ($R^2 = 0,52$) avec un rétrécissement spatio-temporelle du lac (Fig. 30).

Cependant, entre 2016 et 2017 on a enregistré une augmentation en surface de l'eau du barrage de l'ordre de 0,43 Km². Cette augmentation correspond au déversement du lac qui a été enregistré la première fois depuis sa mise en service en 2004. Ce déversement a pour origine de crue (Photo 9) qui correspond à un cumul pluvial journalier de 145,8 mm enregistrée durant des six jours consécutifs à la fin du mois de Janvier 2017.

CHAPITRE III

ÉTUDE SPATIOTEMPORELLE DE L'UTILISATION DES TERRES ET L'EXTRACTION DE L'ACOUVERTURE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS



Photo 9. Déversement de la cuvette du barrage Kramis (ANBT: 27/01/2017)

En se référant à la surface initiale utile de la cuvette du barrage qui a été 2,76 Km² en 2004 et actuellement (2017) n'est que 2,12 Km², on constate que le barrage du bassin versant a subi une perte en eau correspond à une surface de l'ordre de 0,64 Km².

3.4. Conclusion

L'apparition des images à très haute résolution spatiale (TRHS) et l'évolution croissante des outils spatiaux offrent une nouvelle source sur l'information terrestre.

En Algérie où le changement du milieu rural se déroule à grande vitesse avec des bases de données sont rares ou inaccessibles, l'utilisation de l'approche orientée-objet en combinaison avec les images satellites devient une vision alternative pour l'évaluation de l'environnement.

Dans cette étude, nous avons effectué une procédure de l'extraction des objets de l'utilisation du sol à partir d'une image Landsat8_OLI en première phase. Ensuite nous avons traité une série d'images issues de Landsat 4-5 TM avec une netteté spectrale proche de 0, afin de pouvoir suivre l'évolution spatiotemporelle de la cuvette du barrage depuis sa mise en service.

Bien que, la faible résolution spectrale de ces images, cette approche donne les résultats pertinents et encourageants dans le cadre de la cartographie spatiotemporelle de l'utilisation du sol, à l'exception de quelques objets terrestres isolés et ayant une taille inférieure à la taille de pixel de l'image (30 mètres) (arbres isolées, habitat rural, rues, ... etc.).

La segmentation proposée avec l'utilisation de l'algorithme « *k plus proche voisin* » et en se basant sur les caractéristiques spectrales, texturales et spatiales des objets terrestres aboutit aux différentes valeurs selon ces objets.

Comme perspectives, nous recommandons l'utilisation des images à THRS issues d'autres satellites tels que, Ikonos-2, Quickbird-1, Orbview-3, Orbview-4 ou ASAL (Agence Spatiale Algérienne), mais avec une petite échelle de surface de l'ordre de dizaines de Km² afin de pouvoir cartographier l'hétérogénéité spatiale du milieu.

PARTIE II

**EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR
LE MODEL RUSLE ET L'APPROCHE RUSLE/AHP
AU MOYEN DES SIG ET DE LA TELEDETECTION
ET PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT**

4

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHE RUSLE/AHP AU MOYEN DES SIG ET DE LA TELEDETECTION

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

4.1. Introduction

La planification scientifique pour la conservation des eaux et des sols exige la connaissance des facteurs qui causent la perte de ces ressources. Cette connaissance constitue un préalable à la conception de tout projet d'aménagement et un facteur d'efficience (Filippo et De Bonis, 2006).

L'évaluation du risque d'érosion des sols dans les deux bassins versants de la zone d'étude a nécessité la cartographie et l'analyse de nombreux facteurs intervenant dans le processus érosif à savoir : l'agressivité des précipitations, la pente et sa longueur, l'érodibilité des sols, le couvert végétal et les pratiques culturales. Chaque facteur présente un comportement différent d'une zone à l'autre, ce qui a donné lieu à une multitude de données à cartographier, stocker, structurer et traiter de manière méthodique. Le SIG permet de croiser des cartes aux thèmes différents, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur les valeurs numériques des facteurs d'érosion qui y sont rangées.

Le modèle RUSLE constitue la méthode empirique la plus largement utilisée pour l'estimation de perte en sol (Renard *et al.*, 2011). Cependant, elle est sujette à de nombreuses critiques. En effet, Roose *et al.* (2012) ont observé que l'exposition topographique des versants est parfois plus importante que la pente elle-même. Par ailleurs, Finlayson et Montgomery (2003) ; Nekhay *et al.* (2009) ; Rahmati *et al.* (2017) ; Pourghasemi *et al.* (2017) ont constaté que la densité de drainage a un impact déterminant sur la vulnérabilité du sol soumis aux eaux de crue.

L'utilisation des techniques complémentaires au modèle RUSLE dans un environnement SIG, entre autres la technique AHP (*Analytic Hierarchy Process*), présente beaucoup d'avantages, notamment ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans l'érosion et la faculté de démêler la complexité de l'interdépendance de ces facteurs pour mieux cerner l'impact de chacun d'eux, en évaluant sa contribution aux pertes en sol.

Notre objectif consiste tout d'abord à évaluer les pertes en sol par le modèle RUSLE dans les deux bassins, ensuite à réévaluer ces pertes par l'approche combinée RUSLE/AHP sur le bassin de l'oued Kramis en déterminant le degré de la similitude entre les deux méthodes (RUSLE et AHP). Enfin, en intégrant cette approche dans les SIG, nous serons en mesure de localiser les zones prioritaires pour d'éventuels aménagements hydro-agricoles et

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

de conduite culturale dans la zone de l'oued Kramis qui est l'une des régions méditerranéennes fortement soumises aux processus d'érosion.

4.2. L'estimation des pertes en sol dans le bassin de l'oued Mina

Le RUSLE est un modèle prédictif basé sur des formules empiriques relatives aux cinq facteurs influençant les pertes en sol à savoir : l'érosivité des pluies (R), la vulnérabilité du sol (K), la topographie du terrain (LS), le couvert végétal (C) et les techniques antiérosives (P) (Prasannakumar *et al.*, 2012).

4.2.1. Les facteurs de RUSLE

4.2.1.1. Le facteur R

Le facteur R représente l'énergie des gouttes de pluie qui déclenche le processus de détachement des agrégats, leur ruissellement et leur transport (Roose et Lelong, 1976).

n°	Stations	PCS		R (Mj.mm/ha.h.an)		
		Nord_Sahara_1959_ UTM_Zone_31 N		mesuré	prédictif	Err. standardisée
		X (m)	Y (m)			
1	Ain Amara	0,68	35,39	327	426,02	0,68
2	Kaf El-Mahboula	0,98	35,24	602	575,64	- 0,17
3	Mechra Sfa	1,06	35,38	757	669,83	- 0,56
4	Djilali Ben Amar	0,85	35,44	490	496,83	0,04
5	Takhmaret	0,64	35,10	326	469,73	0,79
6	Oued El-Abtal	0,69	35,45	457	359,87	- 0,68
7	Sidi AEK Djilali	0,59	35,48	264	420,91	1,09
8	El-Hachem	0,49	35,37	496	406,02	- 0,53
9	S.M.Benaouda	0,60	35,58	361	461,38	0,66
10	Rélizane	0,56	35,69	609	413,92	- 1,03
11	Aouf	0,21	35,33	709	509,43	- 0,89
12	Bakhada BRG	1,04	35,34	506	801,66	2,02
13	Tiaret	1,32	35,37	1037	628,02	- 1,86
14	Frenda	1,05	35,07	698	639,60	- 0,35
15	Ain Elhadid	0,88	35,06	509	552,61	0,27
16	Sidi Bakhti	0,98	35,24	922	624,88	- 1,95
17	Ain Kermes	1,11	34,91	486	532,66	0,24
18	Rosfa	0,84	34,86	326	505,15	0,98
19	Tricine	0,61	34,93	395	482,68	0,53
20	Maamora	0,53	34,64	543	603,12	0,29
21	Med El Habib	0,26	34,80	597	557,54	- 0,17
22	Sidi Youcef	0,60	34,80	669	450,34	- 1,33

Tableau 29. L'érosivité des pluies (R) du bassin de l'oued Mina

Ce parametre a été estimé par le modèle de Diodato (2004, 2005) (Chapitre I). Ce dernier a été appliqué à vingt-deux stations se trouvant dans ou à proximité du bassin de

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

l'oued Mina pour une série d'observation de 35 ans de l'ensemble des stations pluviométriques (1978-2013).

D'après le tableau 29, la valeur maximale de R (1037 Mj.mm/ha.h.an) a été enregistrée au niveau de la station de Tiaret (secteur Est), alors que celle minimale (326 Mj.mm/ha.h.an) a été observée au centre et au Sud de la zone d'étude au niveau des stations de Takhmaret et Rosfa respectivement (Fig. 31).

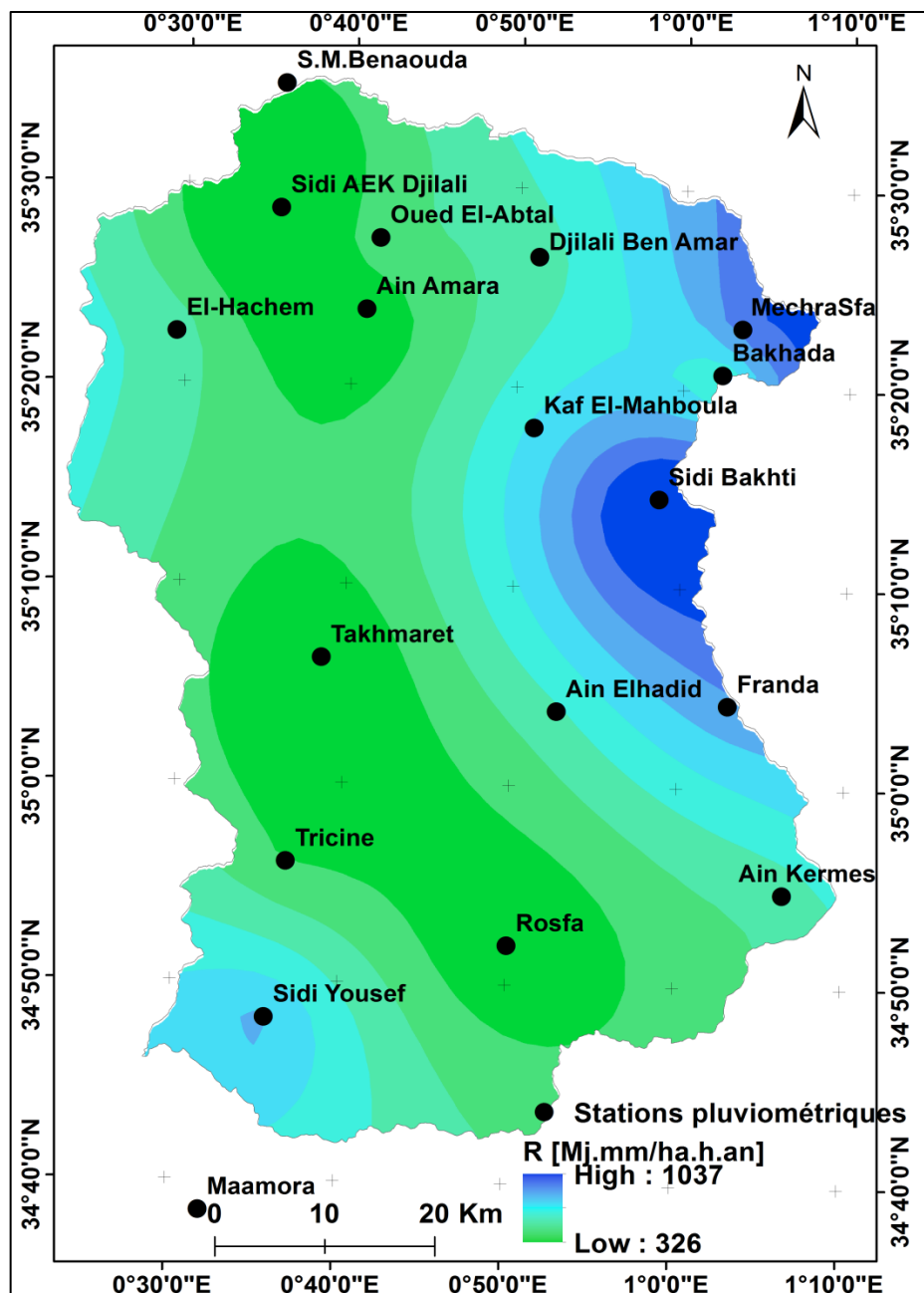


Figure 31. Répartition spatiale de l'érosivité des pluies dans le bassin de l'oued Mina

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Afin de vérifier la fiabilité des données du facteur R, l'érosivité des pluies calculée a été interpolée avec géostatistique au moyen du logiciel de l'ArcGIS.

Après l'application et le test de différentes techniques de prédiction géospatiale, la méthode *Ordinary Kriging/Cokriging* a été choisie pour interpoler les valeurs de R sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette méthode a donné des meilleurs résultats de la validation croisée et de la racine carrée de la moyenne des erreurs (RMS).

Pour toutes les stations pluviométriques, la validation croisée compare les valeurs mesurées et prédites de l'érosivité des pluies R. Les valeurs mesurées sont soustraites des valeurs prédites et ensuite divisés par les erreurs standards afin d'estimer l'erreur normalisée (tableau 29).

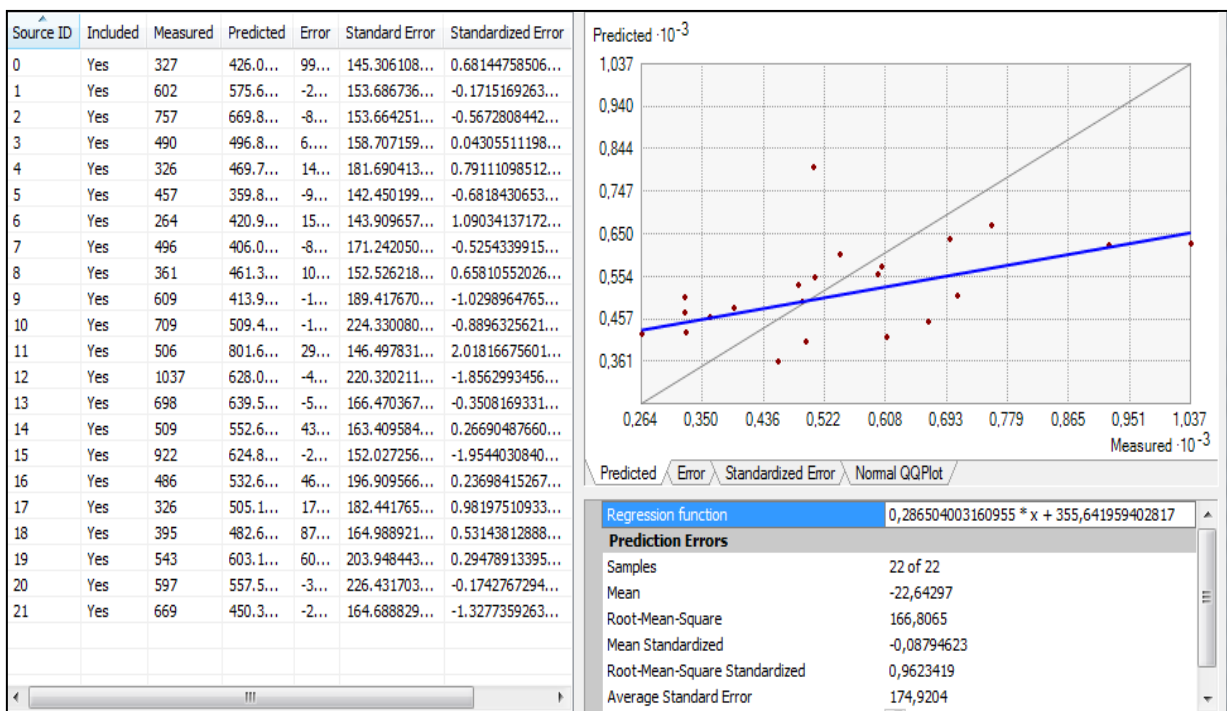


Figure 32. Analyse géostatistique des paramètres entraînés appliquant un contrôle de validation croisée sur le facteur R estimé

En général, comme nous l'avons noté dans le chapitre II (Caractères physiographiques, climatiques et socio-économiques de la zone d'étude), le meilleur modèle est celui qui a la moyenne la plus proche de zéro et la plus petite erreur de prédiction de racine carrée moyenne (RMS) (Fig. 32).

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

4.2.1.2. Le facteur K

Le facteur K est une mesure empirique d'érodibilité du sol affectée par les propriétés intrinsèques de celui-ci (Fu *et al.*, 2005). Il est lié à la classe de perméabilité, à la texture de sol, au taux de matière organique, et aux autres paramètres granulométriques tel que l'argile, limon et le sable fin. Il est en grande partie déterminé par le type de sol (Renard *et al.*, 1997).

Selon la carte des sols établie par le BNEDER, les principales classes des sols ont été regroupées en sept types: les *solontchak* (sols salés), les alluviaux, les sols calcaires, les sols calcaires humifères, les sols calciques, les sols insaturés et les roches mères. Les valeurs du facteur K sont obtenues auprès de l'INRGREF, Tunisie, lors d'un stage de perfectionnement au titre de l'année universitaire 2014 – 2015.

Type de sol	K (t ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	Surface en Km ²	Surface en %
Roche mère	0,2	53,6	1,1
Solontchak (sol salé)	0,099	6,8	0,1
Sols alluviaux	0,001	562,7	11,7
Sols calcaires	0,025	1912	39,8
Sols calcaires humifères	0,082	2151	44,8
Sols calciques	0,05	60,26	1,3
Sols insaturés	0,02	53,64	1,1
Total		4800	100

Tableau 30. Les types des sols du bassin de l'oued Mina

Chaque type de sol a été associé à une valeur du K (tableau 30). La carte de ce dernier est établie suite au calcul en se basant sur la méthode de reclassement à l'aide du logiciel de l'ArcGIS.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

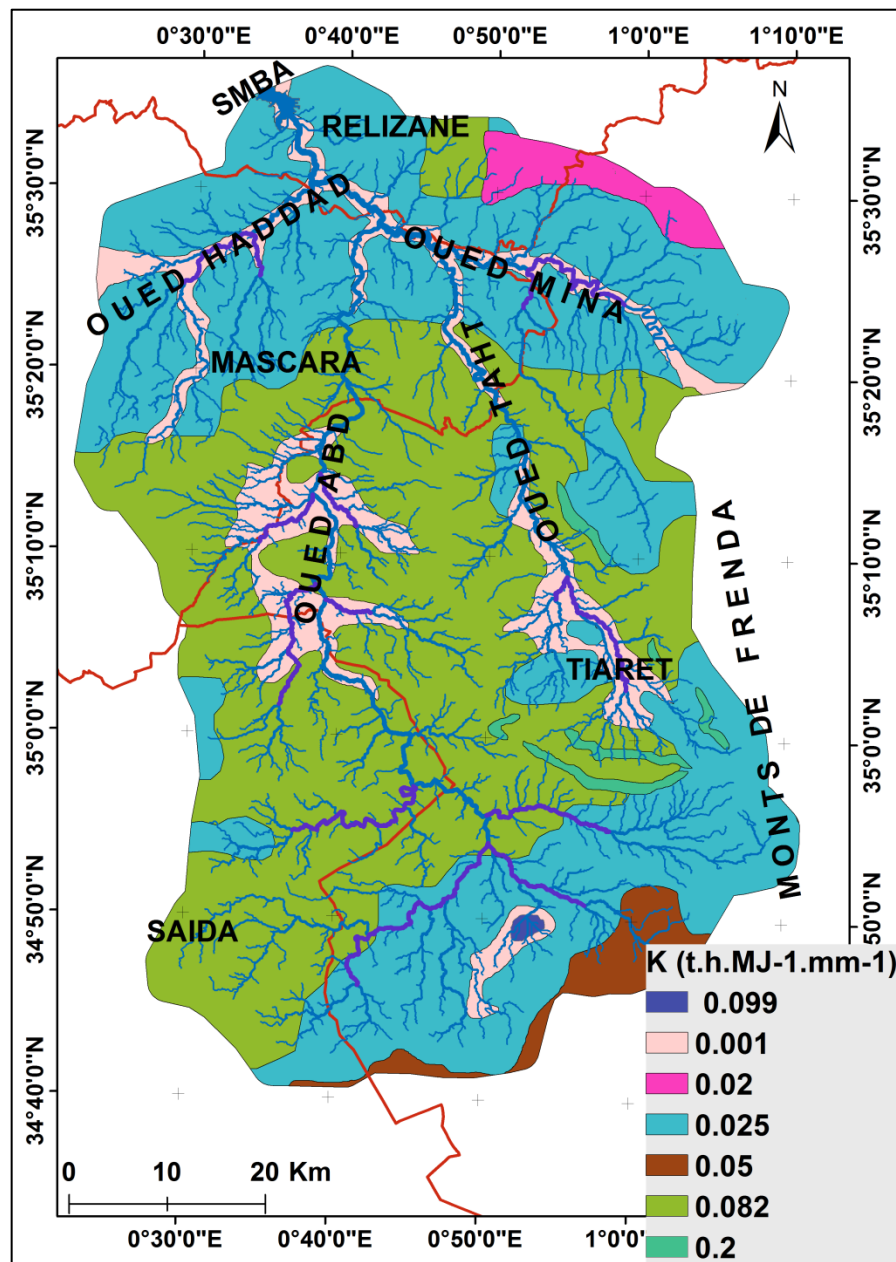


Figure 33. Carte d'érodibilité du sol du bassin de la Mina

D'après la figure 33 et selon la classification française proposée par Dumas (1964), on remarque que les sols du bassin de la Mina sont très peu érodibles à faiblement érodibles ($K < 0,1 \text{ t.h.Mj-1.mm-1}$). Cependant, ces valeurs ne concordent pas à celles trouvées dans le bassin versant de l'oued Mina à l'aide du nomogramme de Wischmeier *et al.* (1971) dans d'autres travaux de recherche. En effet, la présence des fragments de roches supérieurs à 2 millimètres entraînent une surestimation du taux d'érosion (Sadiki *et al.*, 2009). Il explique ce fait par le rôle de *mulch* (litière) que jouent ces fragments en interceptant les gouttes de pluie et inhibant l'effet « *splash* » et en s'opposant au ruissellement et diminuant son énergie.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

En 1998 des chercheurs de l'USDA ont mis au point une formule qui corrige le facteur K en tenant compte des proportions des éléments grossiers à la surface du sol, cette formule est:

$K_{\text{ajusté}} = K (0,983 - 0,0189 X + 0,0000973 X^2)$, où: X = pourcentage des éléments grossiers > à 2 millimètres.

4.2.1.3. Le facteur LS

Les facteurs de longueur de pentes (L) et l'indice de pentes (S) dans RUSLE reflètent l'effet de la topographie sur l'érosion hydrique. Selon les expériences de Wischmeier, le taux d'érosion augmente avec la longueur de pente. L'accumulation et l'accélération du ruissellement sur les plus longues pentes augmentent sa capacité au détachement et au transport des particules (Haan *et al.*, 1994).

La longueur de la pente peut être définie comme étant la distance du point d'origine du ruissellement jusqu'au point où la diminution du degré de la pente ; marque le début de la sédimentation. Elle est mesurée selon la projection horizontale et non d'une façon parallèle à la surface du sol (Wischmeier et Smith, 1978).

Le facteur topographique est estimé à partir du modèle numérique de terrain (Kinnel 2000 ; Boggs *et al.*, 2001; Van Remortel *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2002). Le calcul de LS nécessite des facteurs tels que l'accumulation de flux et l'inclinaison de la pente. Il a été calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur (Renard *et al.*, 1997). La combinaison de LS à partir du modèle numérique de terrain de la zone d'étude a été faite au moyen du kit « *Spatial Analyst* » et l'outil « *Hydrology* » suivant l'équation de Moore et Burch (1986), ainsi:

$$LS = (\text{flow accumulation} * \text{Cell size}/22,13)^{0,4} * (\sin \text{slope}/0,0896)^{1,3}.$$

Où *Cell size* est de 30 m.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

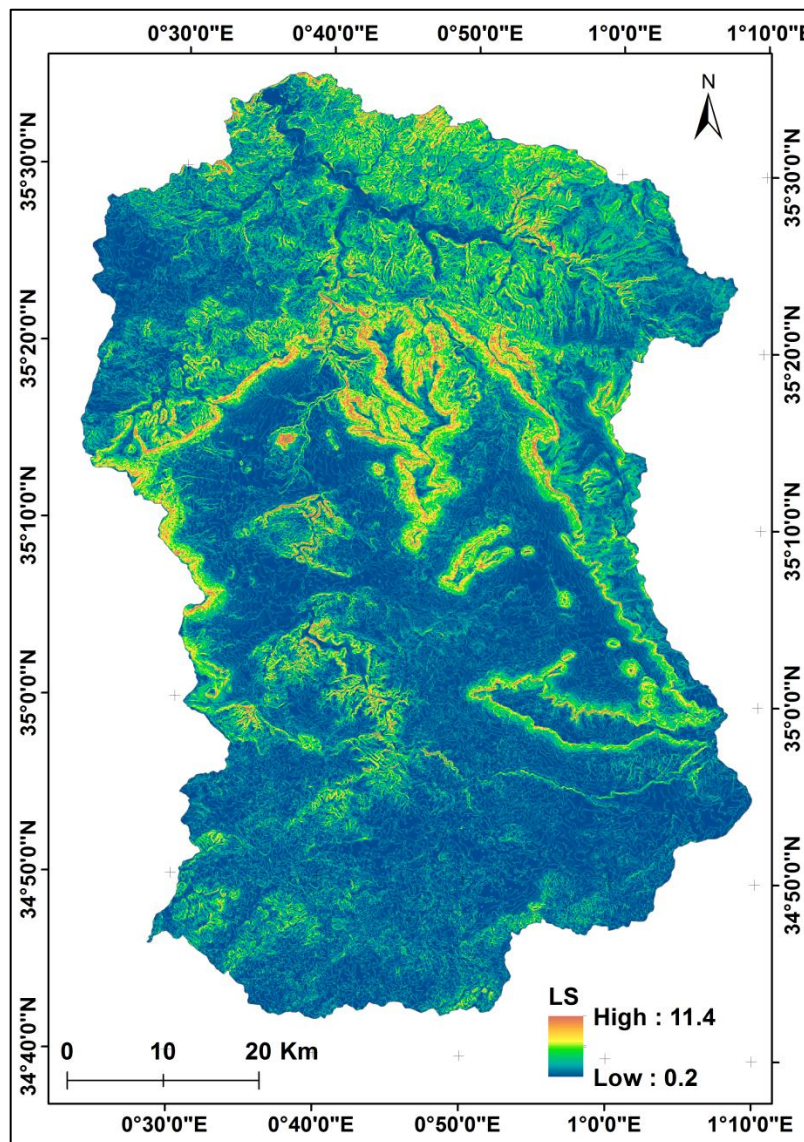


Figure 34. Carte de la topographie du bassin de l'oued Mina

D'après la figure 34, les valeurs du facteur LS dans le bassin versant de la Mina se situent entre 0,2 et 11,4 avec une moyenne et un écart type respectivement de l'ordre de 1,54 et 1,65. La majorité de la surface de la zone d'étude a une valeur LS inférieure à 2, avec certaines zones spécifiques montrant uniquement des valeurs supérieures à 10.

4.2.1.4. Le facteur C

Pour couvrir toute la région d'étude de la Mina, deux scènes multi spectrales de Landsat_8 acquises le 18 mars 2014 ont été utilisées. D'après Rouse et Haas (1973) ; Tucker (1979), l'indice NDVI a été calculé par la formule suivante:

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

$$NDVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R)}$$

Où ρ_{PIR} est la bande proche infrarouge et ρ_R est celle du rouge.

Quand la photosynthèse est active, la végétation présente une haute réflectance dans le spectre proche infrarouge (bande 5), en comparaison avec celui du rouge (bande 4); par conséquent, les valeurs de NDVI pour la photosynthèse active seront positives. Le NDVI extrait de la zone d'étude a des valeurs qui vont de - 0,19 à + 0,62.

Van der Knijff *et al.* (2000) et d'autres auteurs chercheurs à savoir ; Demirci et Karaburun (2012); Prasannakumar *et al.* (2012); Dimitrios *et al.*, (2013) ont trouvé une régression linéaire droite entre l'indice NDVI et les valeurs du facteur du couvert végétal (C) en prenant compte des paramètres α et β égaux respectivement, à 2 et 1.

$$C = \exp \left[-\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right]$$

Où α et β sont des paramètres adimensionnels qui déterminent la forme de la courbe relative au NDVI et le facteur C.

Gitas *et al.* (2009) ont également établi un diagramme expérimental mettant en relation les valeurs du facteur C en fonction du NDVI. La droite de régression trouvée est de type: $C = 0,855 - (1,462 * NDVI)$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 99,9$ (Fig. 35).

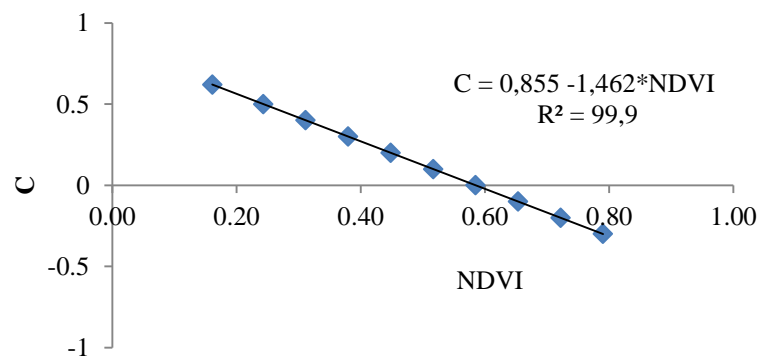


Figure 35. La régression linéaire du C en fonction du NDVI

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

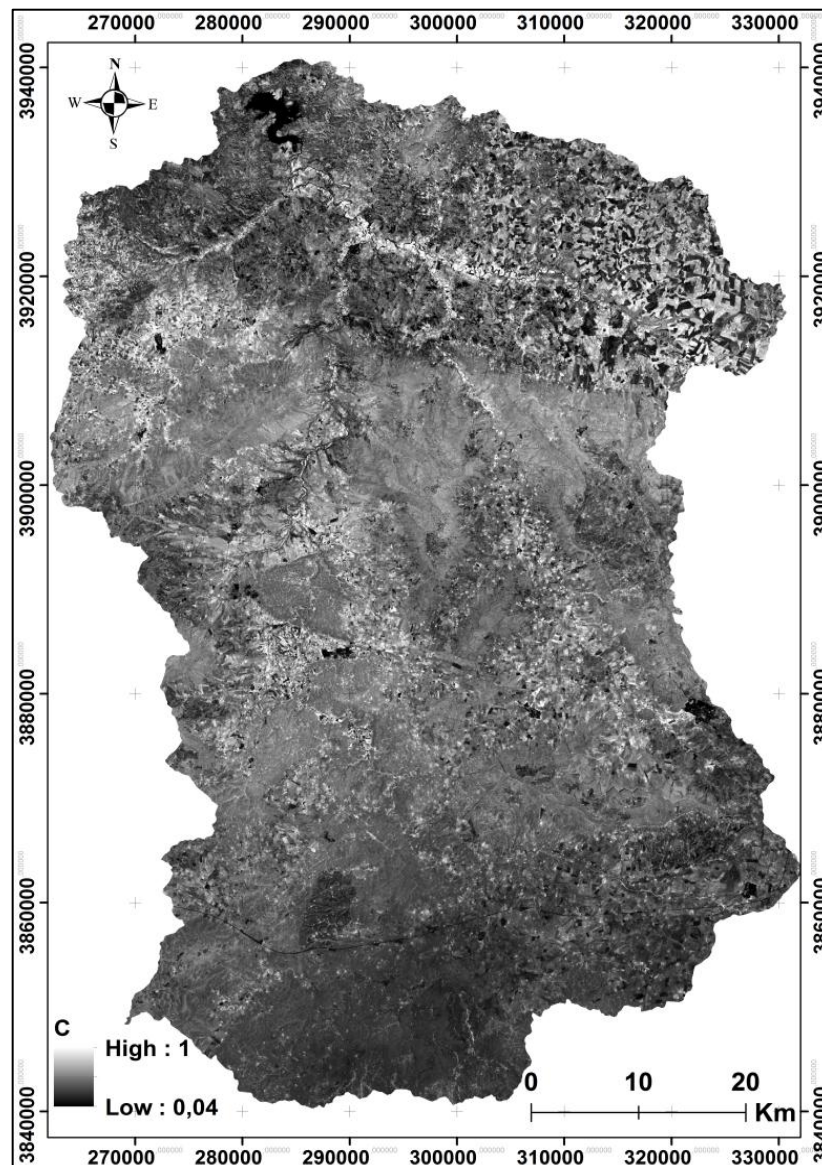


Figure 36. Carte du facteur C du bassin de l'oued Mina

Pour générer les valeurs de l'indice C (Fig. 36) sur l'ensemble de la zone d'étude, nous avons utilisé la droite de régression de la formule de Gitas *et al.* (2009) à l'aide du module « *Spatial Analysis* » de l'ArcGIS. Les valeurs trouvées de C vont de 0,04 à 1.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

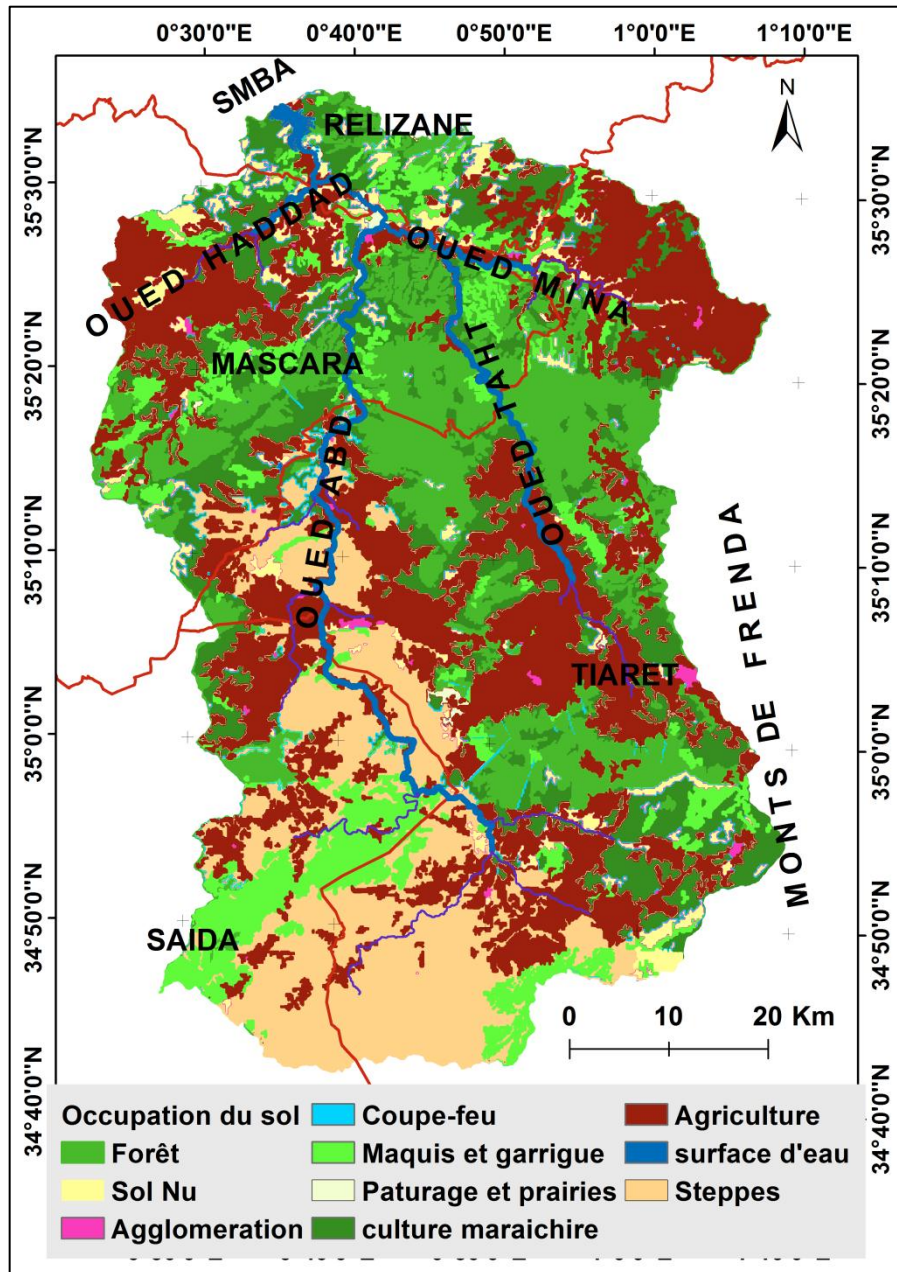


Figure 37. Carte d'occupation des sols du bassin de l'oued Mina

La carte de l'occupation du sol de la zone d'étude a été obtenue au moyen de la classification orientée objet. Cette dernière a été validée en utilisant des images de très haute résolution spatiale (THRS) de Google Earth^{Pro} et en se basant sur les valeurs du NDVI. Ensuite ces valeurs sont classées suivant le seuillage ci-dessous :

NDVI < -0,1 : eau.

-0,1 < NDVI < 0,15 : sol nu.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

0,15 < NDVI < 0,25 : végétation clairsemée.

0,25 < NDVI < 0,4 : végétation moyennement dense

NDVI > 0,4 : végétation dense

Ce seuillage est en accord avec celui obtenu par Toumi (2013) dans cette région.

D'après la figure 37, on remarque que le couvert végétal de la région d'étude offre une grande diversité spatiale qui est influencée par le modelé des terres et les écarts climatiques induits par la proximité aux hauts plateaux au Sud et aux plaines du Bas Chélif au Nord. Les zones agricoles occupent des superficies presque aussi importantes, soit 33,4 % du territoire. Elles concernent les plaines agricoles de la Mina, de Griss et quelques régions des plateaux de Saida et de Tiaret. Ce type de couvert végétal est suivi par les steppes et les pâturages y compris les sols nus qui se concentrent au Sud du bassin et qui totalisent environ 20,4% du bassin. Le couvert forestier qui occupe une superficie de 17,1% est concentré dans une région de pentes fortes au Nord et plus particulièrement au centre du bassin, de même qu'au Sud-est. Les formations de maquis/garrigue complètent le cortège des strates dominantes car elles totalisent environ 11% du bassin. Ces formations sont particulièrement imbriquées au matorral, quoiqu'un îlot plus uniforme se distingue dans la zone de steppes au Sud-ouest du bassin. Finalement, les cultures maraichères représentent 15% du territoire (tableau 32). Ces cultures se concentrent dans les vallées des oueds sur des terres à apport alluvionnaire et sur des collines à pentes faibles avec une lithologie des marnes brunes.

4.2.1.5. Le facteur P

Les pratiques antiérosives les plus recommandées et les plus répandues dans les régions semi-arides de l'Afrique du Nord, notamment, l'Algérie, le Maroc et la Tunisie sont les bandes alternées ou des terrasses (Photo 10), les cultures en courbes de niveau (Photo 11), les reboisements et les reboisements en banquettes (Photo 12), les haies vives (Photo 13), la plantation fruitière (Photo 14), les cordons de pierres suivant les courbes de niveau (Photo 15), le buttage et le billonnage en courbes de niveau et les seuils pour la correction torrentielle. Ces pratiques sont les plus efficaces dans la CES (Roose *et al.*, 1993).

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION



Photo 10. Technique de terrasses (ANBT, 2010)



Photo 11: Cultures maraichères suivant les CN (Auteur, 2012)



Photo 12. Reboisements en banquettes (Algérie)



Photo 13. Haie vive antiérosive (Algérie)



Photo 14. Plantation fruitière (Algérie)



Photo 15. Les cordons de pierres suivant les CN

Le facteur P chiffre les pratiques antiérosives par des valeurs qui vont de 1 pour les sols où il n'y a aucune pratique antiérosive et de 1/10 pour un sol en pente faible où l'on pratique

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

un billonnage cloisonné. Le labour en courbes de niveau oriente la rugosité du sol perpendiculairement à la pente de telle sorte à ralentir le ruissellement. Le facteur P diminue jusqu'à 0,5 pour des pentes de 1 à 8%. Il augmente progressivement et tend vers 1 pour des pentes supérieures à 25%. Le billonnage en courbes de niveau est deux fois plus efficace que le labour en courbes de niveau (Sadiki, 2004). Dans le bassin versant de l'oued Mina une surface de 23 855 ha a été aménagée en terrasse ($P = 0,35$).

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

4.2.2. Validation des résultats

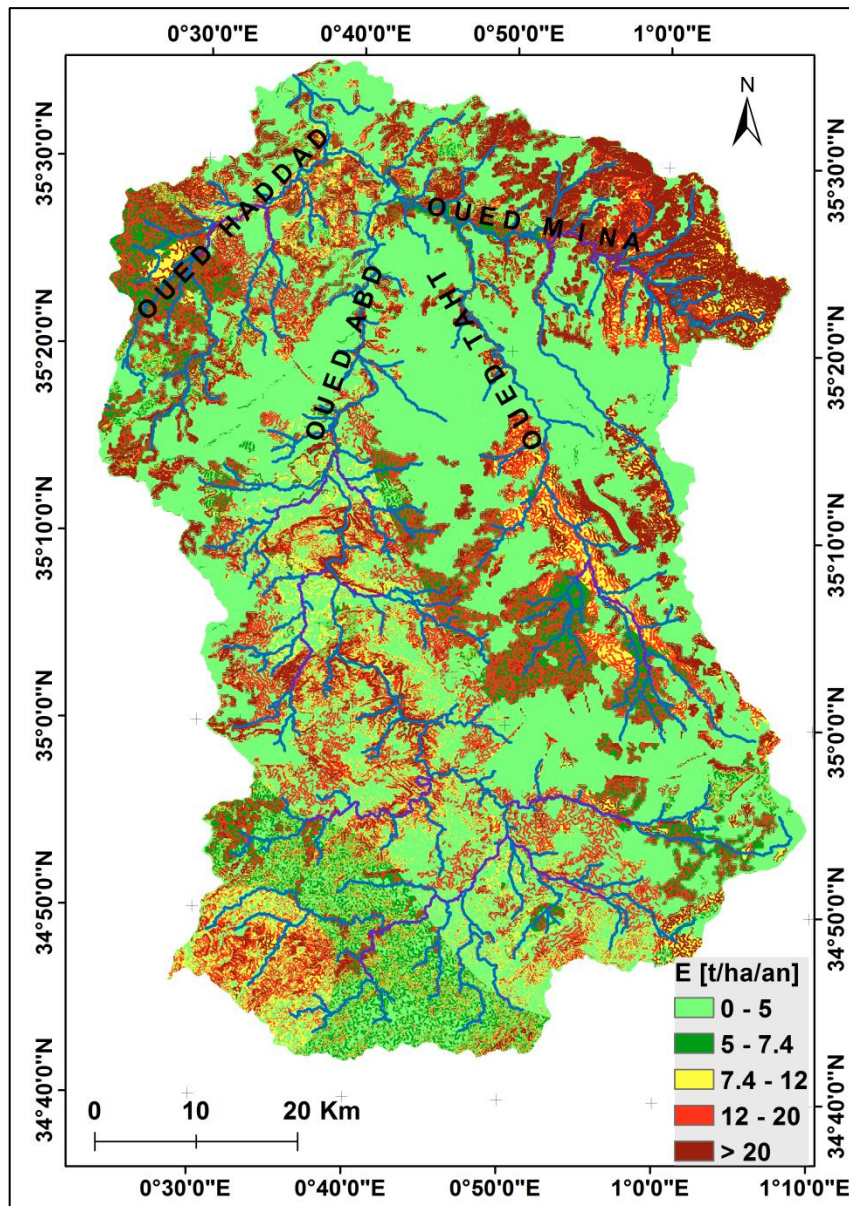


Figure 38. Carte des pertes en sol du bassin de l'oued Mina

La figure 38 représente la carte synthétique des pertes en sol du bassin versant de l'oued Mina. La combinaison de différentes cartes thématiques des facteurs érosifs avec leurs basées de données fut une subdivision de celles-ci en 1 315 parcelles homogènes avec une quantité totale annuelle des pertes de terres de l'ordre de 60 millions de tonnes. Ces pertes varient entre 0 t/ha/an et 521 t/ha/an, avec une moyenne annuelle de 11,2 t/ha et un écart type de 18,6. Spatialement, la carte résultante montre que le taux des pertes en sol varie d'un secteur à l'autre de la zone d'étude. En effet, les classes des pertes en sol faibles à très faibles se

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

localisent principalement au milieu de la zone d'étude. Bien que ce secteur est caractérisé par une topographie raide et une vulnérabilité du sol relativement importante. Nos résultats sont en accord avec ceux des travaux de Roose *et al.* (2012). Ces auteurs ont constaté qu'en Algérie, non seulement le ruissellement, mais aussi l'érosion, ne croisse pas systématiquement avec la topographie en particulier la pente. De plus, on remarque que le risque érosif dans ce secteur est généralement très faible enregistrant une moyenne de l'ordre de 3,5 t/ha/an (tableau 32). Ceci explique nettement que le facteur couvert végétal, en particulier celui forestier, joue un rôle de protecteur. En effet, Roose *et al.* (2012) montrent que le facteur C diminue le risque érosif jusqu'à 0,01 sous des cultures pérennes avec des plantes de couverture ou prairie et à 0,001 sous des forêts associées aux cultures paillées par rapport à une parcelle nue.

Les classes des pertes en sol élevées et dangereuses sont remarquées exclusivement dans la partie Nord et Nord-est de la zone d'étude. Ces régions sont subissées annuellement à une imbrication des facteurs d'ordre naturel et anthropique. La nature des sols et la formation lithologique superficielle issue de terrains essentiellement marneuse manifeste une grande fragilité à l'érosion hydrique. Cela est d'autant plus important que les terrains ont été quasi totalement dénudés et mis en culture. Kouri (2003) ; Achite et Meddi (2004) montrent que ces zones, qui font une partie importante du bassin de l'oued Mina (1000 Km²), sont fortement touchées par l'érosion hydrique.

4.2.2.1. Répartition des pertes en sol en fonction de leur tolérance à l'érosion

Comme nous l'avons noté, la carte des pertes en sol, résultante du bassin de la Mina (Fig. 38) montre que, le taux d'érosion diffère d'une zone à l'autre selon l'influence de différents facteurs érosifs. En Algérie, nous n'avons relevé dans nos recherches bibliographiques, aucune classification de perte en sol.

En se référant à la littérature, les pertes en sol dans le monde varient d'une région à une autre. En effet, aux Etats Unis et selon Pimentel *et al.* (1995), le seuil de tolérance des pertes de terres cultivées est compris entre 5 et 12 t/ha/an. En Asie, Prasannakumar *et al.* (2012) ont constaté que le seuil de tolérance dans le sous-bassin versant de Kelara (l'Inde) est inférieur à 1,5 t/ha/an. Par ailleurs, Kouli *et al.* (2009) considèrent que, toute perte en sol supérieure

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

à 1 t/ha/an est irréversible dans un laps de temps de 50 à 100 ans. Yang *et al.* (2003) ont constaté un taux de pertes en sol à l'échelle du globe avoisinant les 10,2 t/ha/an. En Europe, Panagos *et al.* (2015) ont déduit que, lorsque les pertes en sol dépassent un seuil de 5 t/ha/an sur des sols cultivés, ce dernier devient intolérable. Au Nord-ouest de la Turquie, les résultats obtenus dans le bassin versant de Buyukcekmece par Demirci et Karaburun (2012), montrent qu'un taux de pertes en sol inférieure à 1 t/ha/an est défini comme étant faible, alors qu'au-delà de 10 t/ha/an, l'érosion hydrique cause des dégâts préoccupants. Dans le bassin versant de l'Alaca en Turquie toujours, Imamoglu et Dengiz (2016) ont estimé que le taux de tolérance de l'érosion hydrique peut atteindre 12 t/ha/an. Sur la rive Sud du bassin méditerranéen, Bou Kheir *et al.* (2001) ont constaté que les seuils de tolérance sous un climat humide tempéré varient de 2,5 t/ha/an pour un sol superficiel à 12,5 t/ha/an pour un sol profond de texture équilibrée et moyennement perméable. Wischmeier et Smith (1978) ont montré que les sols peuvent supporter une perte allant jusqu'à 12 t/ha/an. Masson (1971) a constaté que les pertes moyennes en sol ne devront pas dépasser un seuil de 10 t/ha/an. Cette constatation est en accord avec certains travaux portant sur cet aspect dans le bassin méditerranéen (Demirci et Karaburun, 2012 ; Ozsoy *et al.*, 2012).

Au Maroc dans des régions similaires à notre zone d'étude, Sadiki (2004) ; Yjjou *et al.* (2014) ont rapporté que les sols peuvent supporter une perte allant jusqu'à 7,4 t/ha/an en moyenne.

En Tunisie et selon les travaux de Jebari *et al.* (2012) menés sur le bassin versant de l'oued Jannet, un seuil de tolérance de 8 t/ha/an a été suggéré, au-dessus duquel, le niveau du risque érosif sera élevé.

Selon ces travaux qui ont été effectués à travers le monde et publiés dans le contexte de la quantification des pertes de terres par le modèle RUSLE, il apparait clairement que le seuil de tolérance varie d'une région à l'autre. Cette différence est liée au type de sol et sa pédogenèse. En effet, dans une région à un sol peu épais sous un climat à aridité estivale accentuée, la production de terre (pédogénèse) sera lente et par conséquent le seuil de tolérance le sera moins. C'est le cas par exemple des régions arides et semi arides méditerranéennes (Bou Kheir *et al.*, 2001).

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Compte tenu du but poursuivi visant à identifier les régions participantes à l'envasement du barrage Saada et celui de Kramis, nous avons donc adopté la classification américaine qui se base sur un seuil de tolérance 7,4 t/ha/an en moyenne tout en soutenant durablement un niveau élevé de production agricole et que si les pertes dépassent 20 t/ha/an elles peuvent devenir dangereuses. On note que, cette classification a été adoptée au Maroc, dans le bassin versant de l'oued Boussouab (Sadiki, 2004); région très similaire à notre région d'étude en termes de climat, du couvert végétal et du substrat sol.

Selon cette classification, les pertes en sol seront réparties en cinq catégories:

- ☞ Très faibles, lorsqu'elles ne dépassent pas 5 t/ha/an.
- ☞ Faibles, lorsqu'elles sont comprises entre 5 et 7,4 t/ha/an.
- ☞ Moyennes lorsqu'elles sont comprises entre 7,4 et 12 t /ha/an.
- ☞ Fortes lorsqu'elles ont des valeurs comprise entre 12 et 20 t/ha/an.
- ☞ Très forte et dangereuse lorsque les pertes dépassent 20 t/ha/an.

4.2.2.2. Les classes des pertes en sol dans la zone d'étude

Selon la carte des pertes en sol obtenue et suivant la classification décrite auparavant, la répartition des classes de perte en sol dans le bassin versant de l'oued Mina est représentée dans le tableau 31.

Risque érosif	Classe de perte en sol (t/ha/an)	Superficie (Km²)	Superficie (%)	Catégorie
Très Faible	0 – 5	1709,8	35,6	C
Faible	5 – 7,4	688,9	14,4	
Modéré	7,4 – 12	665,9	13,9	B
Elevé	12 – 20	903,7	18,8	A
Dangereux	> 20	831,7	17,3	

Tableau 31. Les classes des pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Mina

Les résultats des pertes en sol montrent qu'environ 50% de la zone d'étude est classée dans la catégorie C où les risque érosif faible à très faible (< 7,4 t / ha / an). 13,9% de la zone d'étude sont classés dans la catégorie B où les pertes en sol sont modérées (7,4 à 12 t/ha/an). 36,1% du territoire d'étude sont considérées comme des régions à risque élevé et dangereux

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

où les pertes dépassent un seuil de 20 t/ha/an. Le taux moyen de perte en sol estimé à 11,2 t/ha/an se situe dans la catégorie à risque érosif modéré.

4.2.2.3. Répartition des pertes en sol par rapport à la moyenne

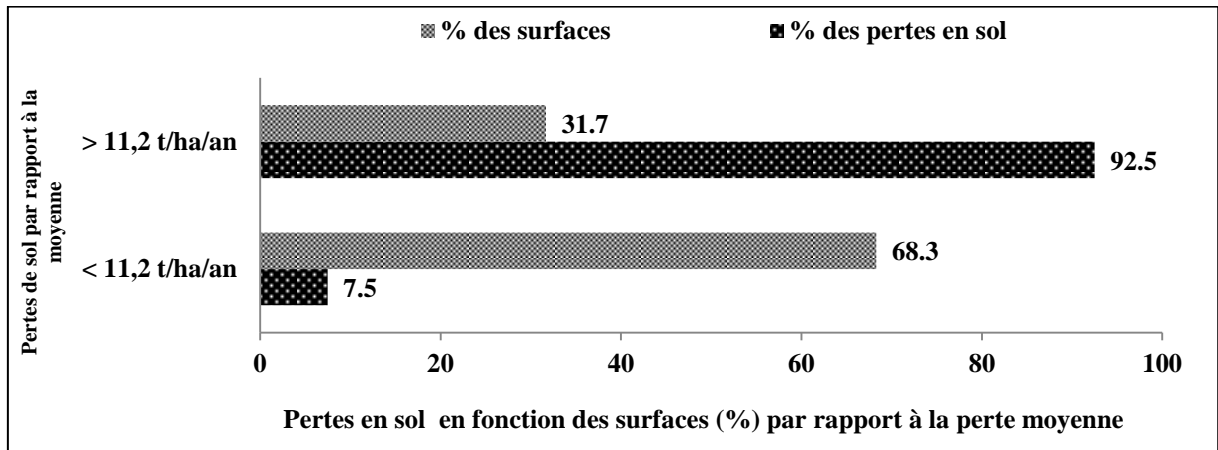


Figure 39. Distribution des pertes en sol par rapport à la moyenne dans le bassin de la Mina

La figure 39 met en évidence les points suivants :

- ✓ les secteurs où la perte en terre dépasse la moyenne (11,2 t/ha/an) ne représentent que 31,7% de la superficie bassin versant, leur contribution à la perte en terre globale est évaluée à 92,5%.
- ✓ les secteurs où la perte en terre est inférieure à la moyenne, occupent 68,3 % de la superficie du bassin, leur contribution ne représente que 7,5 % de la perte en terre globale.

4.2.3. Travaux de recherche réalisés sur le bassin versant de l'oued Mina

Avant de proposer tel aménagement, il est nécessaire de donner un aperçu bibliographique des travaux de recherche relatifs à l'érosion hydrique effectuée dans cette région d'intérêt.

Le bassin versant de l'oued Mina a fait l'objet de plusieurs études. Ces dernières ont été réalisées suite à l'aménagement du barrage Saada et aux préoccupations soulevées par l'ampleur du phénomène érosif et ses conséquences sur l'envasement du barrage et la dégradation de la fertilité des sols à partir des années quatre-vingt-dix.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Kouri *et al.* (1993) ont établi, à partir des paramètres classifiés, la carte de sensibilité des terres marneuses au ravinement dans la partie occidentale du bassin versant. Il en ressort une prédominance des terrains sensibles aux processus d'érosion linéaire de l'ordre de 57% du territoire. 25% des terres sont fortement et très fortement sensibles à l'incision se localisent pour l'essentiel sur la rive droite de l'oued Mina ainsi que dans le secteur aval de la rive gauche de l'oued Haddad. Tandis que, 18% de la surface du bassin sont fortement sensibles à la solifluxion.

En 1997, Kouri et ses collaborateurs ont constaté que les différentes textures marneuses évoluent par glissement de terrain et glissement pelliculaire et que d'autres variables du milieu déterminent l'érosion linéaire à savoir ; la pente, le couvert végétal et la morphologie des parois.

D'après Touaibia *et al.* (1999), l'érosion spécifique dans le bassin de l'oued Mina estimée par l'ANBT était en moyenne de l'ordre de 3,26 t/ha/an, alors que les pertes en sol estimées dans des micros bassins versants d'une surface de 1000 Km² situés dans la partie marneuse peuvent dépasser un taux de 16 t/ha/an.

En 2003, Touaibia et Achite, ont évalué les pertes en sol entre 0,5 t/ha/an et 36 t/ha/an sur l'ensemble du territoire du bassin versant. La plus grande part de cette perte a été enregistrée dans la zone marneuse avec un taux dépassant 20 t/ha/an. Cependant, Bouaichi et Touabia (2006) ont constaté que non seulement les zones marneuses participent à la production des sédiments mais la partie Sud du bassin de l'oued Mina peut également participer avec un apport important de sédiments déposés dans le lac du barrage Saada.

Parallèlement, en 2004, l'Etat algérien sous la tutelle du MADR a lancé un projet de coopération avec la GTZ afin de développer un schéma directeur d'utilisation des terres du bassin versant de l'oued Mina. Ceci rentre dans le cadre de la conservation des sols et de l'eau. En 2006, sous la tutelle du MRE en collaboration avec le bureau d'études Canadien (TECSULT) l'Etat algérien a lancé une étude pour identifier et préciser les mesures à entreprendre pour lutter adéquatement contre l'envasement des retenues situées dans l'Atlas tellien dont le bassin de l'oued Mina qui fait partie de ces régions. Les aménagements proposés ont été touchés uniquement les zones qui sont classées dans les priorités A et B situées dans la région marneuses. D'après cette étude, les experts ont montré que, si les

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

aménagements étaient faits adéquatement dans les délais, la durée de vie du barrage Saada serait augmentée deux fois plus que sans aménagements.

4.2.4. Proposition d'aménagements

Avant d'exécuter les travaux d'aménagement en fonction de l'utilisation des sols de notre zone d'étude, il est nécessaire tout d'abord de déterminer la perte moyenne de chaque classe ainsi que le degré du risque érosif.

Classe d'occupation des sols	Surface		R (Mj.mm/ha.h.an)	K (t.h/Mj.mm)	LS	C*	E Moy. (t/ha/an)	Risque érosif au seuil de 7,4 t/ha/an
	Km ²	%						
Forêt	821,0	17,1	864	0,144	2,7	0,01	3,5	Très faible
Agglomérations	64,7	1,3	902,8	0,023	1,6	0	0	nul
Agriculture	1601,2	33,4	743	0,039	0,9	0,65	16,1	Elevé
Coupe-feu	75,4	1,6	872	0,013	1,9	1	19,9	Elevé
Culture maraichère	718,4	15,0	844	0,203	1,8	0,018	5,5	Faible
Maquis et garrigue	532,6	11,1	889	0,034	1,8	0,25	12	Modéré
Pâturage	61,3	1,3	489	0,19	1,03	0,1	10,5	Modéré
Sol nu	150,0	3,1	565	0,032	1,7	1	29,8	Dangereux
Steppe	767,0	16,0	611	0,064	1,1	0,25	8,4	Modéré
Barrage	8,4	0,2	0	0	0	0	0	nul
Total / Moyenne	4800	100	523	0,0501	1,5	/	11,2	Modéré

C : Les données du facteur C sont obtenues auprès de l'INRGREF, Tunisie (2014)*

Tableau 32. Les pertes en sol en fonction des classes d'occupation des sols du bassin de l'oued Mina

Le tableau 32 montre la sensibilité des différents types d'occupation du sol vis-à-vis du risque érosif. En effet, les zones fortement végétalisées, représentées par des cultures maraichères et des forêts, sont associées à des pertes en sol faibles à très faibles, avec respectivement 5,5 t/ha/an et 3,5 t/ha/an ; Toutefois, celles plus élevées et dangereuses correspondent aux sols nus avec une moyenne de pertes en sol de l'ordre de 29,8 t/ha/an. Les sols à activité agricole, bien souvent protégés durant les grandes averses printanières, représentent le type de couvert végétal le plus sensible aux processus d'érosion avec une moyenne de pertes en sol de 16,1 t/ha/an. Ces derniers résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Alejandro et Omasa (2007). Ces auteurs ont montré que les champs cultivés peuvent contribuer de manière significative à la production des sédiments. Les formations à base de maquis/garrigue, de pâturage et de steppe produisent des valeurs de pertes en sol modérées avec des moyennes respectives de 12 t/ha/an, 10,5 t/ha/an et 8,4 t/ha/an. Ceci serait

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

dû à la déforestation, au surpâturage et aux feux de brousse qui tendent à substituer les formations primitives à des couverts secondaires de nature différente, tels que la savane herbeuse.

Les résultats d'évaluation des pertes en sol nous ont permis de déduire qu'une surface près de 2 400 Km² des versants de la zone d'étude (tableau 32) nécessitera des mesures d'intervention pour contrer l'érosion des sols. Toutefois, afin d'optimiser l'allocation des ressources destinées à la réduction à court terme de l'envasement du barrage Saada, nous proposons que seules des zones prioritaires reçoivent une attention particulière en matière de mesures antiérosives dont celles qui sont classées dans les deux catégories A et B où le risque d'érosion est modéré à dangereux (> 7,4 t/ha/an) (tableau 31).

Les sols nus et les coupe-feux couvrant respectivement 150 Km² et 75,4 Km², sont les principales occupations lithologiques, nécessiteront le plus d'interventions sur le bassin versant. Ces interventions sont principalement destinées à contrer le ravinement. Ces zones produisent une quantité importante de sédiments estimée annuellement à une moyenne de 29,8 t/ha et 19,9 t/ha respectivement (tableau 32). La stratégie de protection de ces terres consiste à installer des seuils de correction torrentielle, construire des drains et des exutoires sur des versants afin d'éviter les glissements de terrains à substrat marneux, implanter les cordons en pierres sèches et interdire leur exploitation par le bétail au cours de la période printanière durant laquelle les sols doivent être couverts.

Les zones à activité agricole contiguës au barrage Saada et qui viennent en deuxième degré de priorité, sont responsables d'une proportion importante de l'envasement de ce réservoir où les pertes en sol dépassent un seuil de 16,1 t/ha/an sur une surface de 1 601,2 Km², soit 33,4% du territoire d'étude. Les interventions antiérosives recommandées dans ces zones sont l'installation de l'arboriculture sur des terrasses construites suivant les courbes de niveaux, l'implantation d'haies vives, des cordons de pierres, des drains et d'exutoires le long des accès routiers ainsi que des seuils de correction torrentielle afin de réduire la vitesse du ruissellement. De plus, il est important de s'assurer que les agriculteurs adhèrent aux principes de protection des versants labourables en maîtrisant une bonne mécanisation qui consiste à travailler suivant les courbes de niveaux.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

L'association maquis et la garrigue, les pâturages à sols dégradés et les steppes sont les troisièmes types d'occupation du sol en termes de degré de priorité (Catégorie B) où le risque érosif compris entre 7,4 t/ha/an et 12 t/ha/an nécessitant des interventions antiérosives. Ces interventions suggérées sur une surface d'environ de 600 Km² regroupent l'implantation de seuils de la correction torrentielle dans les ravines, la plantation d'opuntia, la revégétalisation et la mise en place de bourrelets, de drains et d'exutoires.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

4.3. L'estimation des pertes en sol dans le bassin de l'oued Kramis

Comme nous l'avons noté auparavant que le modèle RUSLE est un modèle empirique basé sur les cinq facteurs influençant les processus érosifs.

Quant à l'AHP, il s'agit d'une méthode semi-qualitative décisionnelle multicritères qui implique une matrice basée sur la comparaison par paires des facteurs dans le même niveau hiérarchique (Jiang *et al.*, 2014). Ces derniers sont comparés l'un à l'autre pour obtenir leur l'impact vis-à-vis du phénomène étudié en l'exprimant en valeur numérique (Pradeep *et al.*, 2014). Elle est utilisée pour résoudre aux nombreux problèmes environnementaux requérant une prise de décision (Suakal *et al.*, 2013 ; Bagherzadeh *et al.*, 2013 ; Sar *et al.*, 2016 ; Zare *et al.*, 2017).

L'évaluation des pertes en sol par l'érosion hydrique par les deux approches a été obtenue par la combinaison des cartes thématiques avec leurs bases de données au moyen du logiciel de l'ArcGIS.

4.3.1. Le modèle RUSLE et ses facteurs

Le facteur R

Ce parametre a été estimé par le modèle de Diodato (2004, 2005). Ce dernier a été appliqué à onze stations se trouvant dans ou à proximité du bassin de l'oued Kramis pour une série d'observation de 22 ans pour la majorité des stations pluviométriques (1994 - 2016).

n°	Station	PCS		R (Mj.mm/ha.h.an)		erreurs standardisées
		Nord_Sahara_1959_ UTM_Zone_31N		Mesuré	Prédictif	
		X (dd)	Y (dd)			
1	Ain Merane	0,970	36,190	630,5	618,9	-1,33
2	Taougrite	0,933	36,242	619,3	621,6	0,28
3	Mazouna	0,900	36,110	611,8	619,6	0,94
4	SMBAli	0,848	36,138	609,4	602,5	-0,99
5	Dahra	0,848	36,232	604,4	607,8	0,36
6	Nekmaria	0,640	36,190	597,0	592,6	-0,52
7	Achaacha	0,650	36,270	596,6	597,3	0,07
8	Khadra	0,550	36,240	593,3	598,3	0,98
9	Benizentis	0,670	36,100	586,4	591,6	0,48
10	Mediouna	0,750	36,150	586,0	595,4	1,01
11	Dadas	0,550	36,230	598,7	593,6	-0,99

Tableau 33. L'érosivité des pluies du bassin de l'oued Kramis

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

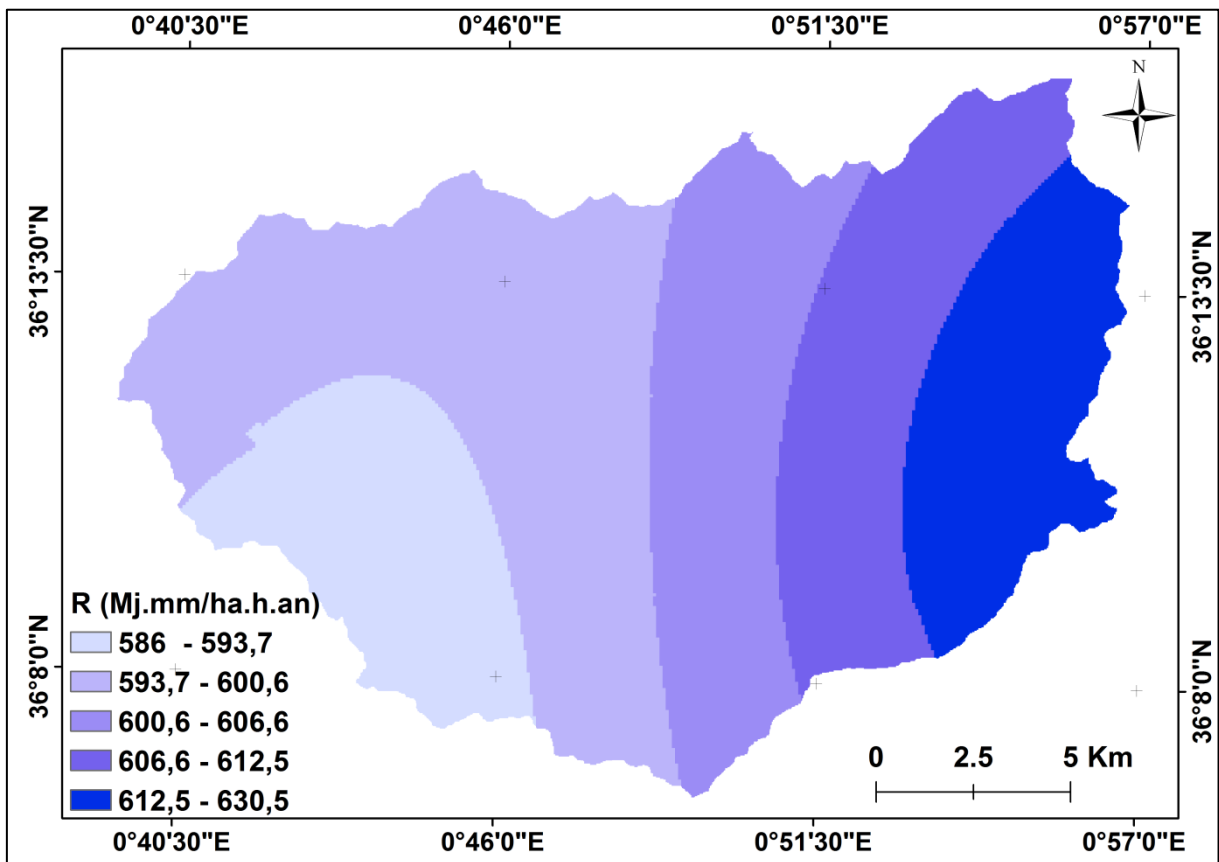


Figure 40. Répartition spatiale de l'érosivité des pluies dans le bassin de l'oued Kramis

D'après les valeurs figurant dans le tableau 33, on remarque que la valeur maximale de R a été enregistrée au niveau de la station d'Ain Merane (secteur Est) avec une valeur de 630,5 Mj.mm/ha.h.an, alors que la valeur minimale est observée au Sud-ouest de la zone au niveau de la station de Mediouna avec une valeur de 586 Mj.mm/ha.h.an.

D'après la figure 40, on remarque que les valeurs de l'érosivité des pluies mesurées sont relativement similaires en comparaison à celles trouvées dans d'autres bassins versants de la méditerranée, comme le cas de Calore en Italy (Diodato et Bellocchi, 2010), de Jannet en Tunisie (Jebari *et al.*, 2012), de Mustafakemalpasa en Turquie (Ozsoy *et al.*, 2012), de Yialias en Cyprus (Dimitrios *et al.*, 2013) et du Nord et du Nord-ouest algérois (Meddi *et al.*, 2016 ; Benchettouh *et al.*, 2017).

Le facteur K

Les formations géologiques de la chaîne du Tell oranais qui affleurent sur le bassin sont mises en place durant le crétacé supérieur avec une structure complexe constituée de marnes,

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

de calcaire et de grès calcaire. Les marnes contiennent des lentilles de sel et de gypse très solubles. Les fonds de vallée sont occupés par des alluvions pléistocènes. Le paysage du Tell reflète l'interaction entre orogénèse et érosion (Kouri, 1993). Ces formations sont relativement friables; les sols qui se développent dessus sont peu évolués. Il n'y a pas d'individualisation d'horizons. A cet effet, on observe rarement une tendance à la formation de vertisols sur une profondeur de 10 à 30 cm, dans les zones en pentes faibles.

Pour déterminer le facteur K dans le bassin de l'oued Kramis, un échantillonnage est effectué à la surface des altérites de différentes formations géologiques affleurant dans le bassin versant.

Plusieurs échantillons sur différent affleurements du même faciès (2 à 4 selon son extension) sur lesquels les mêmes analyses ont été pratiquées et la moyenne des valeurs de K trouvées est attribuée pour chaque faciès. Le facteur K a été calculé par la formule d'Ozsoy *et al.* (2012) citée ci-dessous. Ensuite chaque type de sol est associé à une valeur moyenne du facteur K.

Les valeurs de l'érodibilité du sol K ont été déterminées expérimentalement au laboratoire.

$$100K = 2,1M^{1.14} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3) / d$$

Où : M = (% sable fin + limon) (100 - % argile).

a = % matière organique.

b = code de la perméabilité.

c = code de la structure.

d = 7,59 pour avoir les valeurs de K en unité de Système International.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Ech.	Sable fin (50 -200 µm) %	Limon (2 µm - 50 µm) %	Argile (0 - 2 µm) %	MO %	b = Perméabili té	c = Structure	K [t.h.Mj- 1.mm-1]
Ech1	19,3	5,3	24,6	0,73	5	4	0,032
Ech2	4,2	70,6	25	0,73	6	4	0,077
Ech3	8	12	22	1,27	5	4	0,026
Ech4	8,1	27,1	63,2	2,4	4	4	0,021
Ech5	10,3	25,6	58,4	3,47	4	2	0,013
Ech6	10,7	31,5	49,8	0,53	4	4	0,032
Ech7	20,2	21,1	38	1,47	6	4	0,041
Ech8	22,7	23,7	45,7	2,13	6	3	0,035
Ech9	17,3	43	25	2,13	4	4	0,052
Ech10	15,7	59,6	21	0,80	4	4	0,074
Ech11	16,4	14,3	35,5	3,27	5	3	0,025
Ech12	7,8	30,7	20	3,67	4	4	0,034
Ech13	5	43,4	49,2	2,8	4	4	0,031
Ech14	13,3	37,5	37,2	0,8	6	4	0,049

Tableau 34. Résultats des analyses granulométriques des altérites du bassin de l'oued Kramis

Pour simplifier la lecture des résultats ainsi que leur croisement avec d'autres cartes thématiques représentant le modèle RUSLE, il était utile de regrouper les valeurs rapprochées de K dans 4 classes différentes réparties selon un gradient d'érodibilité croissant (tableau 35). Ensuite grâce au SIG, nous avons pu établir la répartition spatiale de ces classes sous forme d'une carte thématique (Fig. 41).

Classes de l'érodibilité du sol (t.h/Mj.mm)	Surfaces	
	Km ²	%
0 - 0,025	136,4	45,2
0,025 - 0,041	92,4	30,6
0,041 - 0,052	57,4	19
0,052 - 0,077	15,8	5,2
Total	302	100

Tableau 35. Les classes des valeurs du facteur K du bassin de l'oued Kramis

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

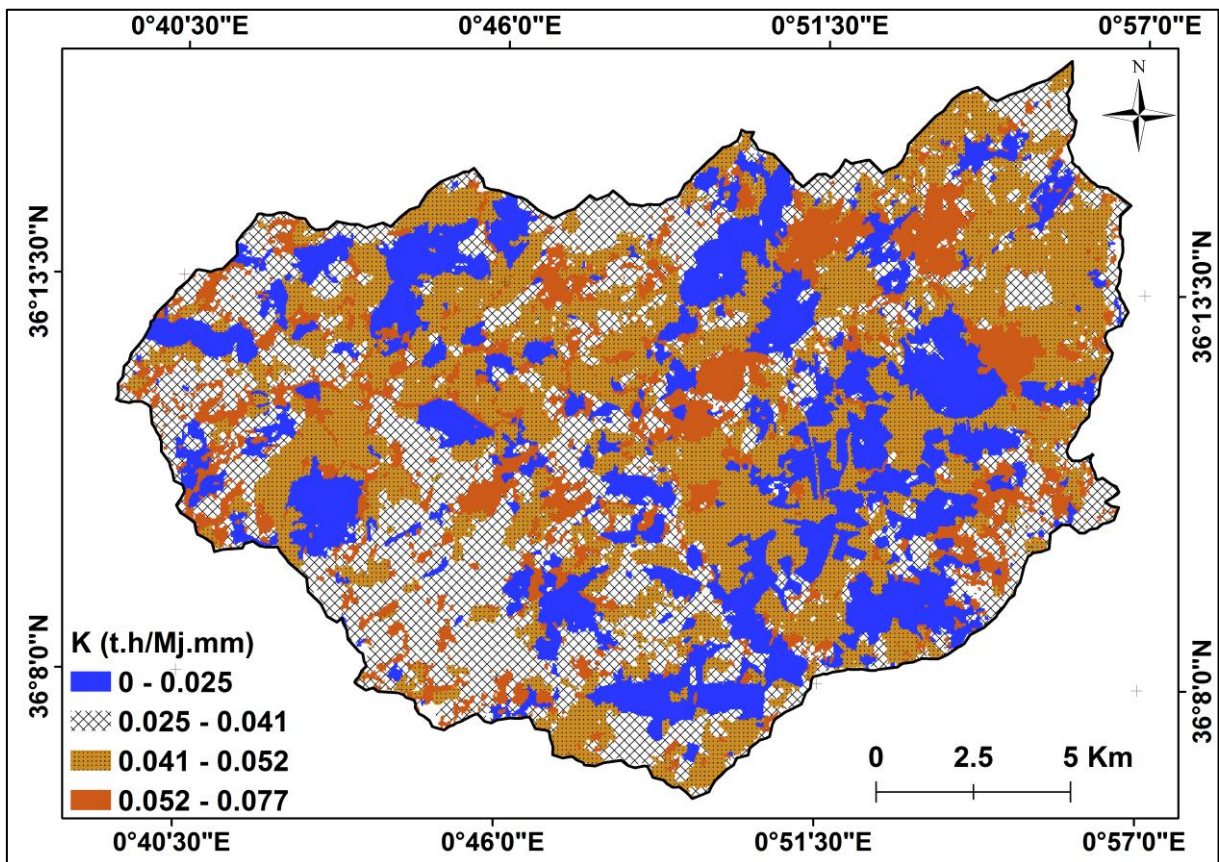


Figure 41. L'érodibilité des sols (K) du bassin de l'oued Kramis

En se référant au tableau 34 et selon la classification française proposée par Dumas (1964), les sols de notre zone d'étude sont très peu érodibles à faiblement érodibles ($K < 0,1$ t.h/Mj.mm). Ces résultats sont similaires à ceux trouvés dans des régions à climat semi-aride de la méditerranée (Roose *et al.*, 2012 ; Benchettouh *et al.*, 2017).

Type des sols	Surfaces	
	Km ²	%
Sol alluvionnaire	26,3	8,7
Marnes brunes	125,5	41,6
Terrain calcaire	39,6	13,1
Sol rouge	14,5	4,8
Sol rouge calcaire	26,8	8,9
Marnes bleue compacte	37,4	12,4
Marnes vertes	20,1	6,7
Marnes bleues armées de grés calcaires	9,8	3,3
Lac du barrage	1,7	0,6
Total	302	100

Tableau 36. Les types des sols du bassin de l'oued Kramis

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Le facteur LS

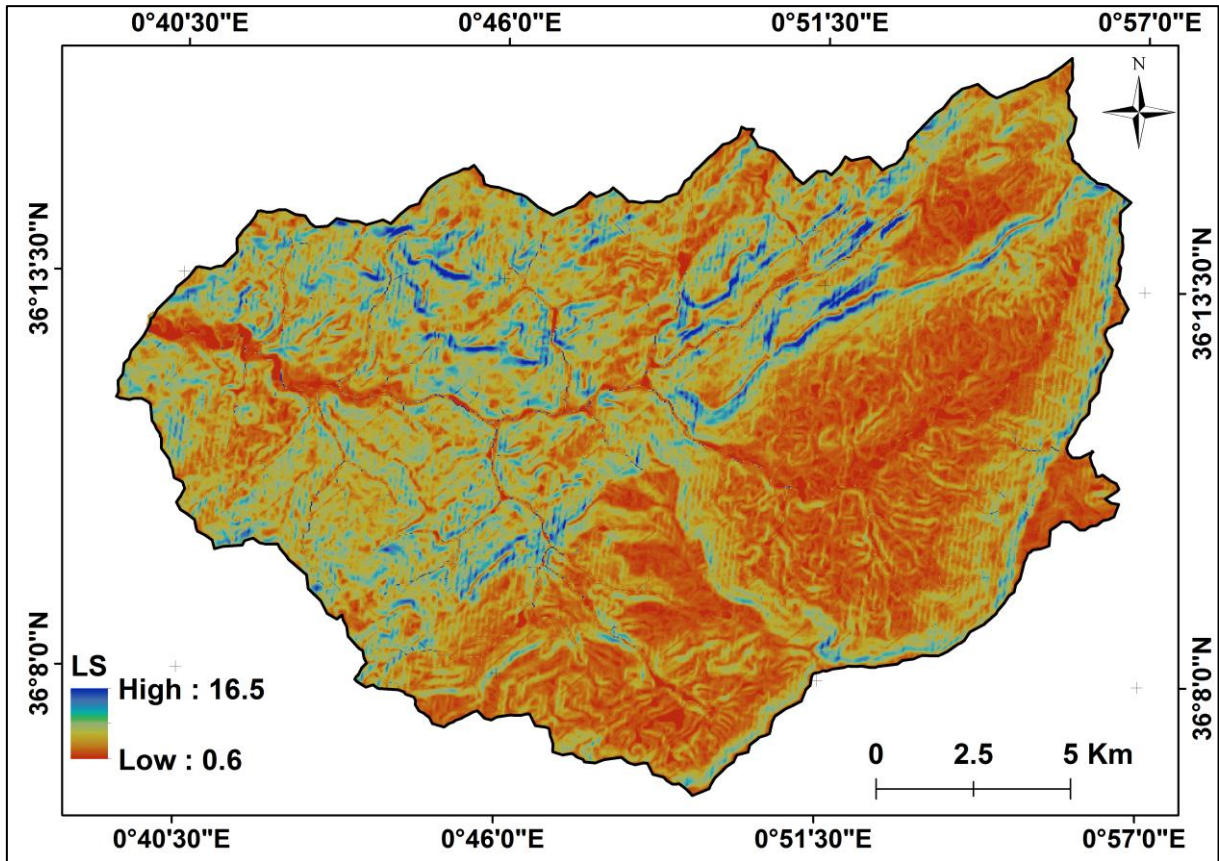


Figure 42. La topographie (LS) du bassin de l'oued Kramis

De la figure 42, on remarque que les valeurs du facteur LS varient de 0,6 à 16,5 enregistrant avec respectivement, une moyenne et un écart type de 2 et de 1,63. La majeure partie de la surface de la zone d'étude (51,8 %) correspond à une topographie dont ses valeurs sont inférieures à 2 (tableau 37).

Classes de LS	Surface	
	Km ²	%
0,605 - 1,05	16,3	5,4
1,06 - 2,03	140,0	46,4
2,04 - 3,18	104,7	34,7
3,19 - 5,3	37,9	12,6
5,31 - 16,5	3,0	1,0
Total	302	100

Tableau 37. Les classes de la topographie du bassin de l'oued Kramis

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Le facteur C

Pour étudier le couvert végétal dans la zone d'étude, une série d'images sur la même scène de Landsat_8 OLI acquise le 5 mai 2014 a été utilisée pour pouvoir couvrir toute la zone.

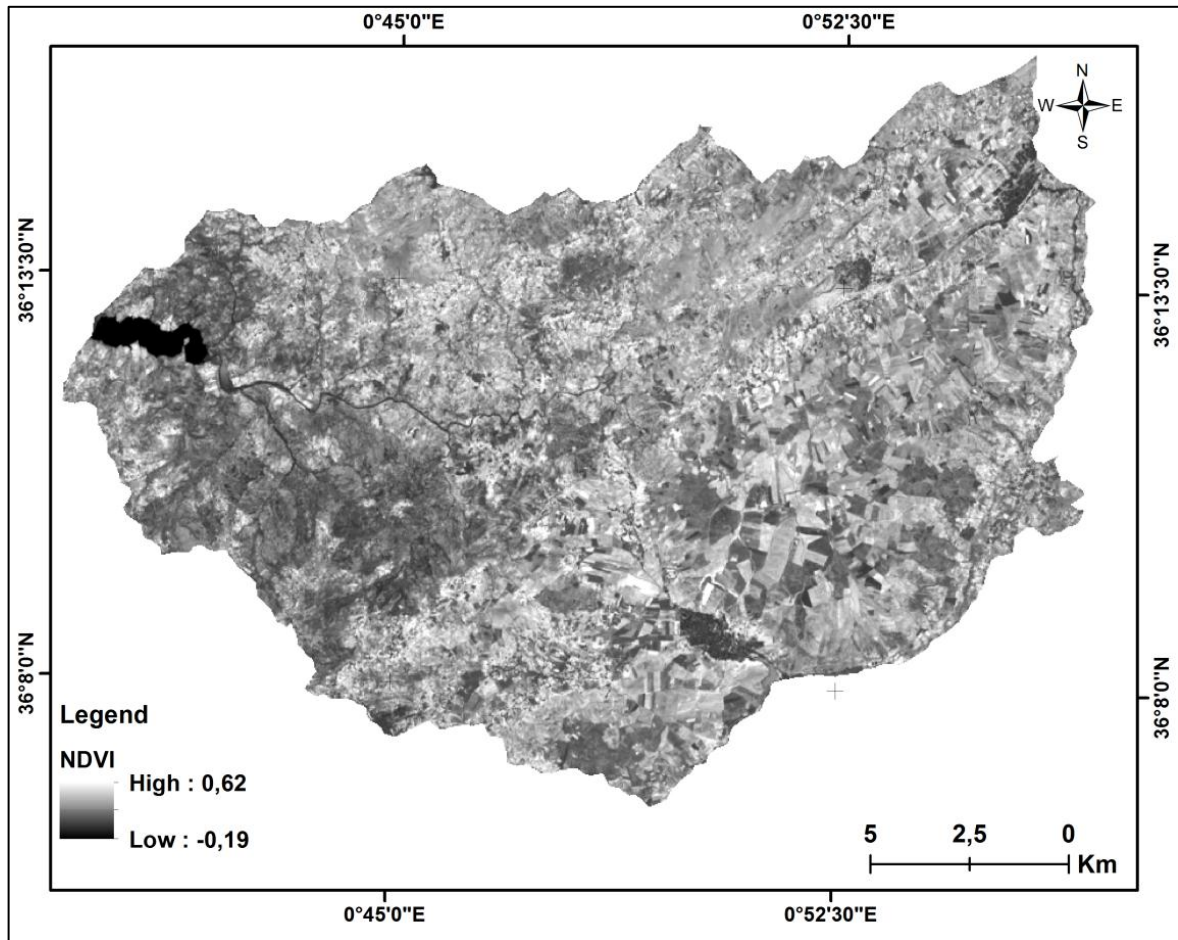


Figure 43. Carte du NDVI du bassin de l'oued Kramis

L'indice du NDVI a été calculé suivant la formule proposée par Tucker (1979). Ses valeurs vont de - 0,19 à + 0,62 (Fig. 43). Pour générer les valeurs de l'indice du couvert végétal sur l'ensemble de la zone d'étude, nous avons utilisé la formule proposée par Gitas *et al.* (2009). Les valeurs de C de la zone d'étude se situent entre 0,04 et 1 (Fig. 44).

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

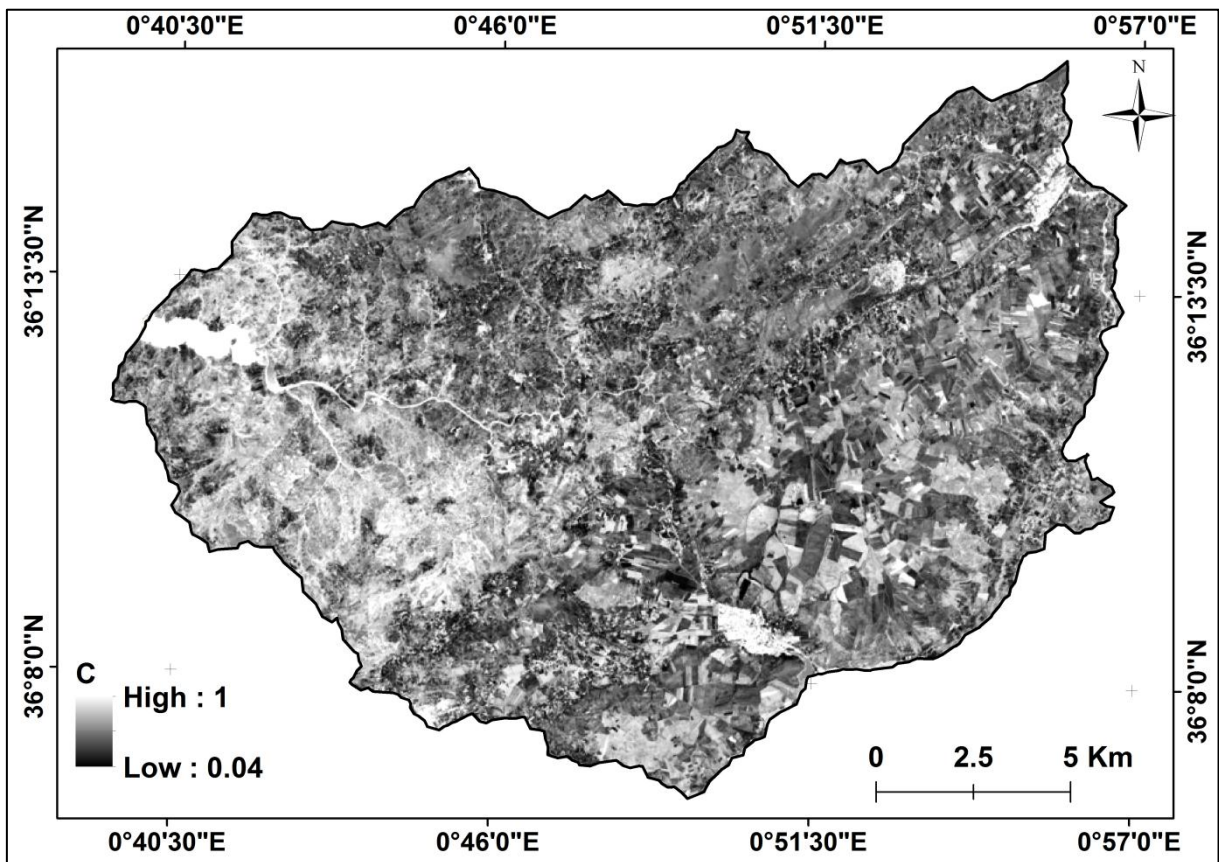


Figure 44. Carte du couvert végétal (C) du bassin de l'oued Kramis

Le facteur P

Sur toute la surface du bassin de l'oued Kramis, aucune technique antiérosive n'a été pratiquée dans le cadre de la lutte contre l'érosion hydrique, à l'exception de quelques aménagements de correction torrentielle sous forme des seuils en gabion.

En outre, la majeure partie de la zone d'étude est exploitée par les céréalicultures. Les labours sont rarement effectués parallèlement aux courbes de niveaux. Des reboisements de Pin d'Alep sont entrepris par des endroits à hauteur sur une surface de 2,5 % du bassin. Ainsi, pour ce facteur nous avons attribué le chiffre 1 sur l'ensemble de la zone d'étude.

4.3.2. La technique AHP (*Analytic Hierarchy Process*)

4.3.2.1. Les facteurs de l'AHP

Pour établir la table de la matrice de l'AHP, six facteurs géo-environnementaux influençant les pertes en sol seront examinés.

Pour les facteurs R, K, LS et C nous avons basé tout d'abord sur l'impact de chaque facteur indépendamment sur les pertes moyennes en sol (Fig. 51, 52, 53 et 54, respectivement). Ensuite une corrélation entre eux a été faite (tableau 38).

Variable	La matrice de corrélation (Pearson)				p-values				Description statistique			
	R	K	LS	C	R	K	LS	C	Min	Max	Moy.	Ecart-type
R	1	0,008	-0,495	-0,048	0	0,966	0,005	0,802	601,8	610,7	605,2	2,3
K		1	0,509	-0,885		0	0,004	< 0,0001	0,02	0,04	0,04	0,01
LS			1	-0,694			0	< 0,0001	1,04	2,48	1,93	0,30
C				1				0	0,51	0,89	0,56	0,07

The values in bold are different from 0 to a level of significance $\alpha = 0,05$

Tableau 38. Le résultat de l'indépendance des facteurs RUSLE (ACP)

Concernant le facteur de la densité de drainage (Dd), nous avons pris en considération la valeur de corrélation trouvée entre celle-ci (Km/Km²) et les pertes en sol (t/ha/an) (Fig. 45). On note que les valeurs de la densité de drainage sont extraites automatiquement par le modèle « *hydro-tools* » dans l'ArcGIS.

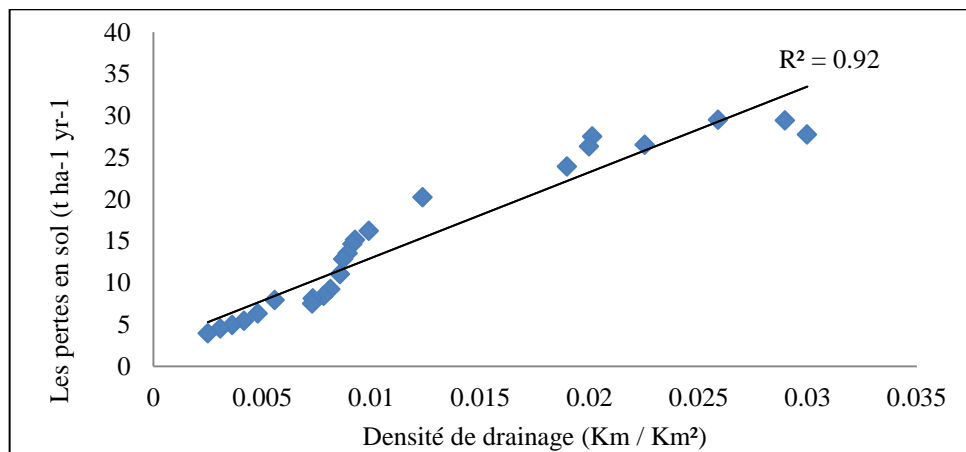


Figure 45. Evolution des pertes en sol en fonction la densité de drainage

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Incidentement, les résultats obtenus sont en concordance avec ceux trouvés par Finlayson et Montgomery (2003) ; Nekhay *et al.* (2009) ; Rahmati *et al.* (2017) et Pourghasemi *et al.* (2017), selon lesquels la densité de drainage (Dd) est considérée comme vulnérable au détachement des particules de sol par les eaux de crue.

Quant au facteur aspect des pentes (AS) et d'après la figure 46, on remarque que les expositions Sud présentent une valeur moyenne des pertes en sol relativement supérieure à celle enregistrée dans les autres expositions. Cette constatation a été soulevée par Poesen *et al.* (1998b) et Roose *et al.* (2012). Ces auteurs ont montré que les expositions des pentes ont parfois un rôle aussi déterminant dans les pertes en sol que la pente elle-même. En effet, dans les régions méditerranéennes, les expositions Sud sont généralement nues et soumises à une très forte érosion, alors que celles du Nord sont couvertes durant les évènements pluvieux qui coïncident généralement avec la saison printanière enregistrant des valeurs des pertes en sol modérées.

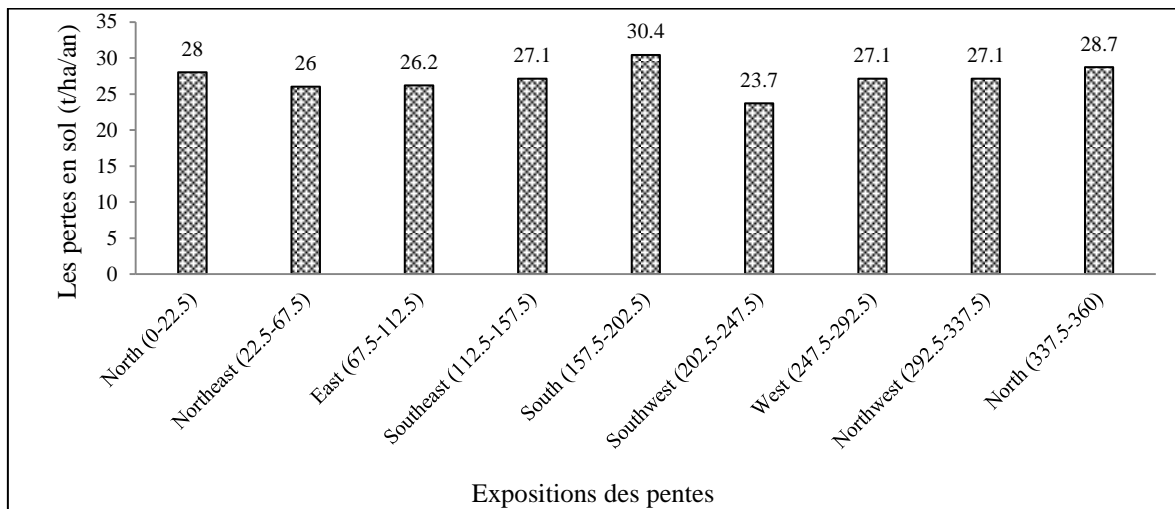


Figure 46. Les pertes moyennes en sol en fonction de l'exposition des pentes

A la lumière de ces éclaircissements est apparue la complexité de la valeur accordée à l'aspect des pentes (SA) pour construire la table de la matrice de l'AHP. De ce fait, nous avons attribué des valeurs du jugement arbitraires de **3** (faible importance) à **5** (importance forte ou déterminante) pour pouvoir les intégrer dans la matrice de l'AHP.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

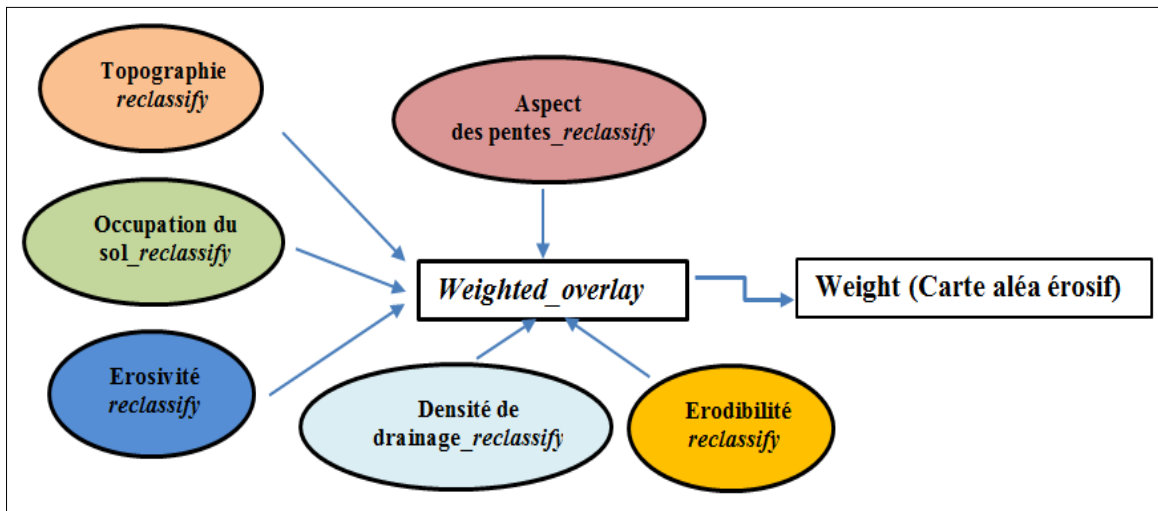


Figure 47. Schéma du Modèle *Builder* de l'AHP

De son côté, la production de la carte de la vulnérabilité du sol à l'érosion au moyen de la technique AHP a été obtenue à partir de la combinaison des facteurs précités. Le « *Model Builder* » du logiciel ArcGIS a été utilisé. Cet outil combine ces facteurs par le biais de la fonction « *Weighted Overlay* » (Fig. 47).

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

4.3.2.2. Validation des résultats

L'évaluation des pertes en sol a été obtenue tout d'abord selon le modèle RUSLE (Fig. 2), ensuite ces pertes ont été réévaluées par la technique AHP (Fig. 47) à l'aide de l'ArcGIS.

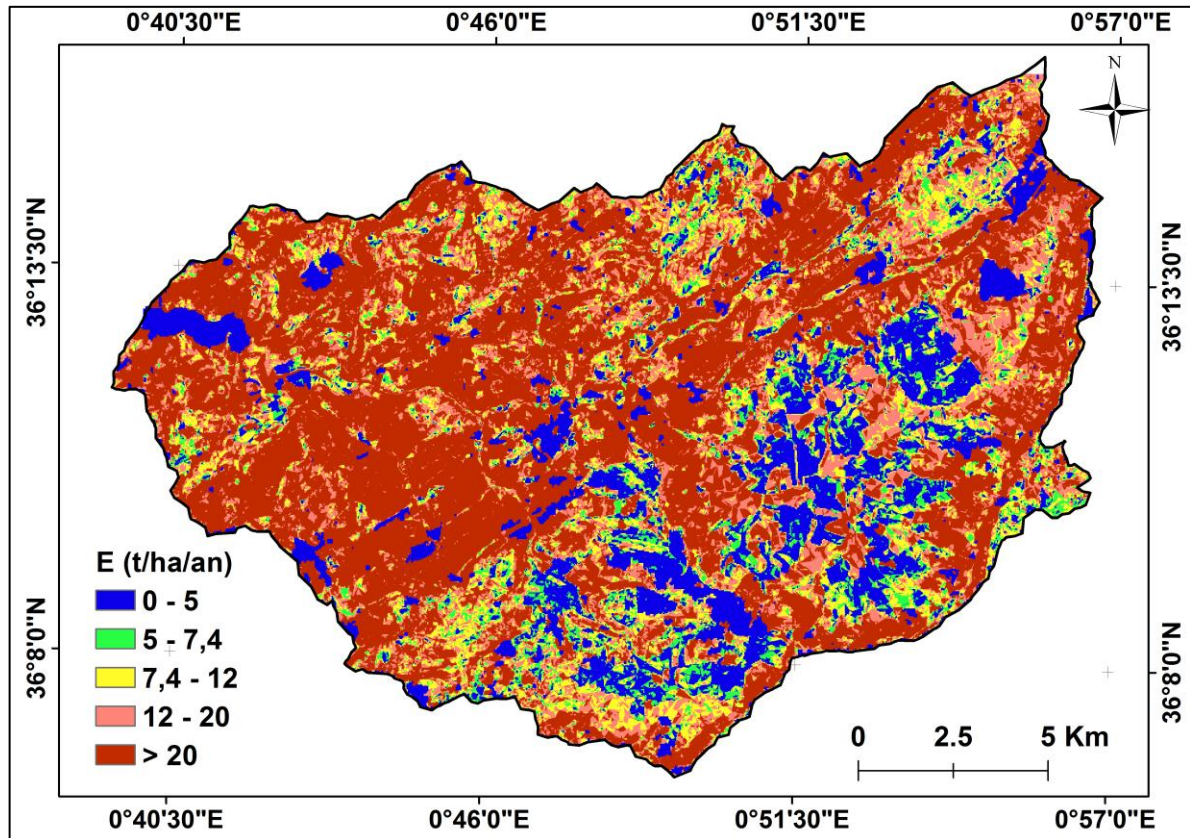


Figure 48. Carte des pertes en sol selon le modèle RUSLE du bassin de l'oued Kramis

4.3.2.2.1. Les classes des pertes en sol

La répartition des classes des pertes en sol est représentée sur la figure 48 et les proportions de chaque classe figurent dans le tableau 39.

Les pertes en sol	Classe (t/ha/an)	% des pertes en sol	Surface	
			Km ²	%
Très faibles	0 - 5	1,2	46,5	15,4
Faibles	5 - 7,4	1,5	18,6	6,2
Moyennes	7,4 - 12	4,5	37,2	12,3
Fortes	12 - 20	10,1	52,7	17,5
Dangereuses	> 20	82,7	147,0	48,7
Total			302	100

Tableau 39. Les classes des pertes en sol dans le bassin de l'oued Kramis (RUSLE)

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Le résultat obtenu découle d'une subdivision du bassin en 6 934 parcelles, dont chacune est caractérisée par des valeurs homogènes de différents facteurs influençant les pertes en sol. La perte moyenne pour l'ensemble du bassin versant est de 27,3 t/ha/an avec un écart type de 31,23. Celle totale annuelle du bassin de l'oued Kramis est de l'ordre de 82 millions de tonnes.

En se référant au bassin de la Mina d'une surface de 4 800 Km², le résultat des pertes en sol fut une subdivision de celui-ci en 1 315 parcelles homogènes (Benchettouh *et al.*, 2017). Cette forte homogénéité par rapport à celles de l'oued Kramis s'expliquerait principalement par les deux principaux facteurs à savoir ; la topographique (LS) et le couvert végétal (C). En effet, le bassin versant de l'oued Kamis présente des pentes raides avec une valeur moyenne de LS de 2 et un écart type de 1,3 contre respectivement une valeur de 1,54 et un écart type de 1,65 trouvés au niveau de la Mina. D'après la carte d'occupation des sols de celui-ci, nous avons remarqué que la surface couverte toute l'année (forêt, maquis et garrigue, steppe, agglomération et lac d'eau) et durant les grandes averses représente 60,3 % du territoire. Par contre, celle du bassin de Kramis ne représente qu'un taux de 8,9 % de sa surface totale.

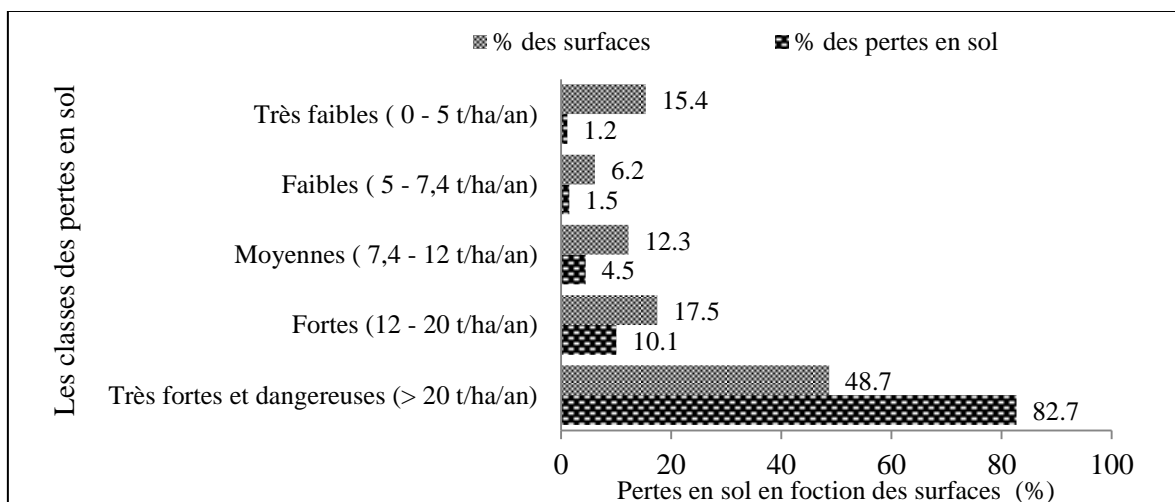


Figure 49. Distribution des pertes en sol en fonction des surfaces

La répartition spatiale du taux des pertes en sol (fig. 49) fait ressortir les points suivants:

☞ la perte en terre admissible (classe faible et très faible) ne couvre que 21,6 % de la surface du bassin.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

☞ la perte en terre intolérable (classe forte à très dangereuse) couvre 66,2 % de la surface du bassin.

☞ La moyenne des pertes en sol est de l'ordre de 27,3 t/ha/an. Cette valeur se situe dans la catégorie où les pertes en sol sont considérées comme dangereuses.

4.3.2.2. Répartition des pertes en sol par rapport à la moyenne

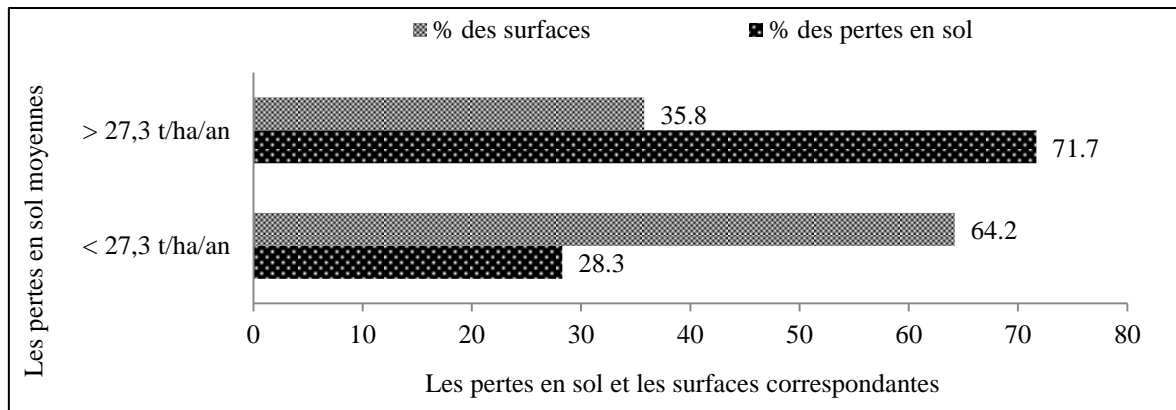


Figure 50. Distribution des pertes en sol par rapport à la moyenne dans le bassin de l'oued Kramis

La figure 50 montre que l'ensemble des unités qui perdent plus que la moyenne ne couvrent que 35,8 % du bassin mais elles contribuent par 71,7 % des pertes totales. Celles qui perdent moins que la moyenne occupent 64,2 % de la superficie et ne participent que par 28,3 % des pertes.

4.3.2.2.3. Comparaison des résultats de pertes en terre avec ceux obtenus dans d'autres bassins

Nom du bassin versant	Localité	Surface du bassin versant (Km ²)	Pertes en sol moyennes (t/ha/an)	Auteurs
Oum Er-Rbia	Maroc	1531	224	Yjjou <i>et al.</i> (2014)
N'FIS	Maroc	1707	115	Markhi <i>et al.</i> (2015)
Oued Boussouab	Maroc	252,2	53,4	Sediki (2004)
Aknoul	Maroc	2,6	40	Faleh (2004)
Batta	Tunisie	9,61	19,9	Kefi <i>et al.</i> (2011)
Oued Jennet	Tunisie	5,41	12	Jebari (2012)
Oued Mina	Algérie	4800	11,2	Benchettouh <i>et al.</i> (2017)
Oued Kramis	Algérie	302	27,3	Auteur (2018)

Tableau 40. Taux moyen des pertes en sol calculé au moyen de RUSLE dans quelques bassins similaires au bassin de l'oued Kramis

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

D'après le tableau 40, on remarque que les pertes moyennes de terre estimées par le modèle RUSLE au niveau du bassin de l'oued Kramis sont relativement élevées par rapport à celles trouvées en Algérie (Benchettouh *et al.*, 2017) et en Tunisie (Kefi *et al.*, 2011 ; Jebari, 2012) mais moins importantes que celles enregistrées au Maroc (Faleh, 2004 ; Sediki, 2004 ; Yjjou *et al.*, 2014 ; Markhi *et al.*, 2015).

On observe également que dans la rive Sud de la méditerranée les pertes en sols augmentent progressivement de l'Ouest vers l'Est. En effet, les bassins du Maroc subissent une perte de sol extrêmement importante ; c'est le cas de l'oued Oum Er-Rbia, région Ouest du Maroc, avec une valeur de 224 t/ha/an. Tandis que, les bassins versants de la Tunisie ont des valeurs des pertes en terres presque similaires (variant entre 19,9 t/ha/an et 12 t/ha/an) aux bassins versants de l'Algérie en particulier celui de la Mina où les pertes moyennes annuelles sont de l'ordre de 11,2 t/ha.

A l'échelle locale, cette variabilité spatiale des pertes de terres a été également soulevée par Bourabah (2011) et Achite *et al.* (2006) au Nord algérois sur les grands bassins versants qui le constituent (tableau 41).

Nom du bassin versant	Localisation		Surface du bassin versant (Km ²)	Pertes en sol moyennes (t/ha/an)
	X (dd)	Y (dd)		
Tafna	-1,42	34,88	5 260	3,01 - 4,06
Côtiers Oranais	-0,81	35,51	4 591	9,38
Isser	3,42	36,36	4 165	39,90
Côtiers Algérois	1,90	36,44	8 069	15,57 - 93,97
Chott Hodna	4,67	35,26	25 840	1,64 - 51,53
Côtiers Constantinois	8,25	36,65	3 215	2,52 - 103,75

Tableau 41. Variabilité spatiale des pertes en sol dans quelques bassins au Nord algérois

Toutefois, Yjjou *et al.* (2014) ont constaté qu'une pente forte, une érodibilité du sol élevée et un couvert végétal faible témoignent de l'importance du phénomène de l'érosion hydrique au niveau d'un bassin donné.

4.3.2.2.4. Influence des facteurs de RUSLE sur les pertes en sol

Pour identifier les régions sources de sédiments et afin de mettre en place des aménagements appropriés de chaque zone, nous avons pris en considération tous les seuils représentant les classes des pertes en sol cités précédemment pour pouvoir diviser notre zone d'étude en secteurs traités en termes de priorité selon le degré d'aléa érosif.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Néanmoins, cette étude ne sera abordable qu'après l'évaluation de l'influence de chaque facteur de RUSLE sur les pertes en sol.

Pour chaque facteur il a été tout d'abord élaboré un tableau de valeurs réparties en classe, où les pertes moyennes de terre sont indiquées pour chacune, de même que les surfaces correspondantes en pourcentage et les proportions de pertes par rapport aux pertes totales. Ensuite, des histogrammes schématiques mettent en évidence les variations des pertes moyennes en fonction des classes de chaque facteur érosif et où le coefficient de détermination R^2 a été discuté dans chaque cas.

L'effet du facteur R

R (Mj.mm/ha.h.an)	586 - 593,7	593,7 - 600,6	600,6 - 606,6	606,6 - 612,5	612,5 - 630,5
Pertes moyennes (t/ha/an)	44,7	28,7	23,8	20,0	19,2
Surface (ha)	4 586,9	10 154,6	3 039,4	5 093,0	7 326,0
% Surface/Bassin	15,2	33,6	10,1	16,7	24,5
% Pertes	20,8	37,9	8,8	15,4	17,1

Tableau 42. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction de classes de l'érosivité des pluies

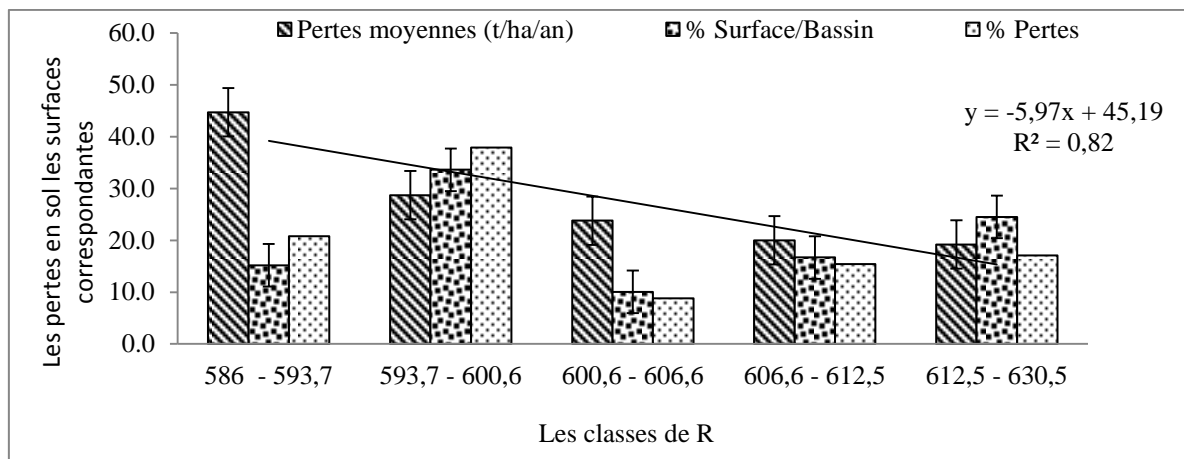


Figure 51. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction de l'érosivité des pluies

Comme l'agressivité des pluies est l'un des facteurs importants de l'érosion, l'évolution des valeurs de l'agressivité climatique R dans le bassin versant de l'oued Kramis ne présentent aucun impact sur les pertes moyennes en sol. Or, la relation trouvée ne suit pas le schéma tracé par Wischmeier et Smith (1978). Toutefois, on note que nos résultats sont similaires à ceux au Maroc par Sadiki (2004) dans la région du bassin de l'oued Boussouab.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

Plusieurs raisons peuvent expliquer ces résultats:

(i) Nous estimons que l'écart entre les valeurs extrêmes de R est faible, avec un écart a été estimé d'une valeur de l'ordre de 44,5 Mj.mm/h.ha.an.

(ii) Par ailleurs, l'éloignement des stations d'enregistrement des précipitations et l'extrapolation de leurs données aux différentes zones du bassin, alors que les précipitations peuvent parfois tomber sous forme d'averses localisées ravinant seulement une partie de la zone sans qu'elles ne soient totalement enregistrées par aucune station.

(iii) De plus, le principe de traçage des courbes d'iso-érosivité (méthode de Thiessen) ne reflète pas la réalité de la répartition des précipitations. En effet, elle ne tient pas compte de l'effet des reliefs et des expositions des versants entre les stations de mesure. Ce qui peut causer une sous-estimation de R.

(iv) Enfin, on ne peut négliger ou écarter l'importance que peuvent avoir les interactions entre les différents facteurs qui causent l'érosion.

L'effet du facteur K

K (t.h/Mj.mm)	0 - 0,025	0,025 - 0,041	0,041 - 0,052	0,052 - 0,077
Pertes moyennes (t/ha/an)	7,6	23,0	27,0	51,5
Surface (ha)	8 659,4	7 198,5	9 827,9	4 513,4
% Surface/Bassin	28,7	23,8	32,5	15,0
% Pertes	9,1	23,3	37,0	30,6

Tableau 43. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction de l'érodibilité du sol

D'après le tableau 43 on remarque que les pertes moyennes en sol évoluent dans le même sens que les valeurs des classes du facteur K. Cette observation a été également enregistrée pour les pourcentages des pertes en fonction des surfaces à l'exception de la dernière classe où le pourcentage des pertes diminue avec leurs surfaces. Cependant, cette atténuation ne perturbe pas la tendance générale de l'évolution des pertes moyennes en fonction des valeurs de l'érodibilité du sol.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

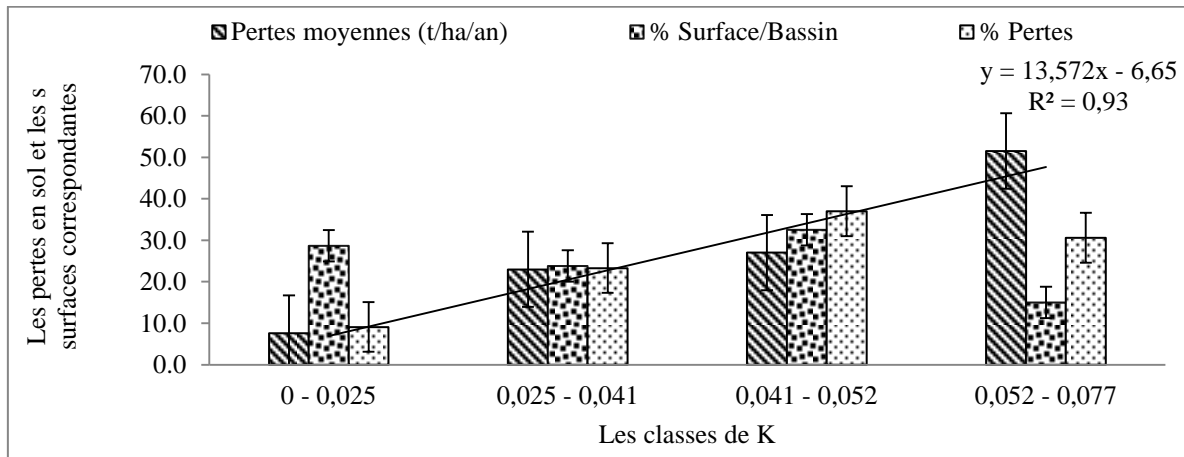


Figure 52. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction de l'érodibilité

La figure 52 montre que l'érodibilité du sol présente une forte corrélation avec les pertes moyennes en sol ($R^2 = 0,93$). Alors, le plus frappant dans l'effet du facteur K, est l'évolution très nette des proportions de pertes en sol par rapport aux pertes totales en fonction des valeurs de K. De plus, la variation des surfaces n'a pas caché l'influence de ce facteur sur les pertes. On peut donc déduire que le facteur K est un paramètre décisif dans l'aléa érosif, bien que les altérites des sols prélevées dans notre zone d'étude présentent une faible érodibilité ($K < 0,1 \text{ t.h/Mj.mm}$).

L'effet du facteur LS

LS	0,6 - 1,05	1,05 - 2,03	2,03 - 3,2	3,2 - 5,30	5,30 - 16,5
Pertes moyennes (t/ha/an)	4,0	9,2	14,9	23,2	85,1
Surface (ha)	10 969,07	9 426,5	7 046,6	2 553,7	203,3
% Surface/Bassin	36,3	31,2	23,3	8,5	0,7
% Pertes	14,1	27,7	33,6	19,0	5,6

Tableau 44. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction de la topographie

Le tableau 44 montre que la variation des pertes en sol moyennes va dans le même sens que celle du facteur LS.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

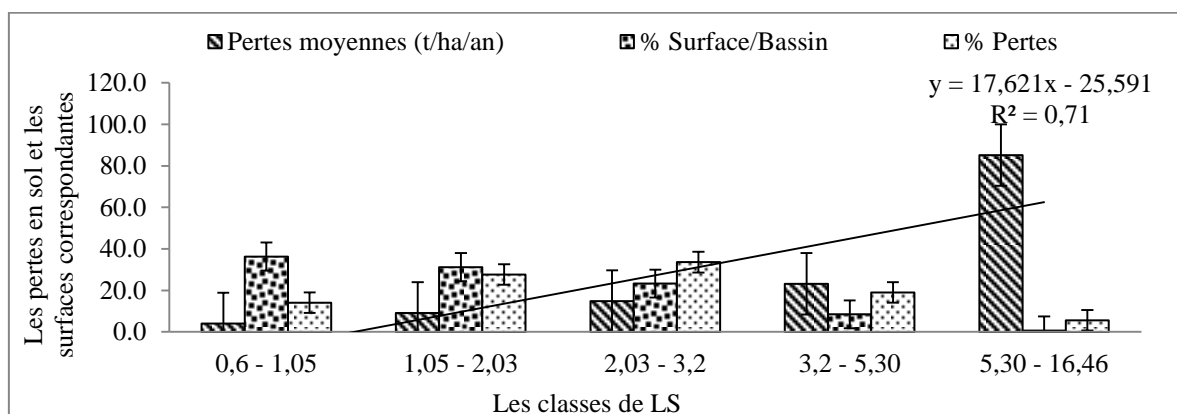


Figure 53. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction de la topographie

Graphiquement (Fig. 53), la combinaison de la pente avec sa longueur selon la formule de Wischmeier présente une assez forte corrélation avec les pertes moyennes en sol ($R^2 = 0,71$).

L'effet du facteur C

C	0 - 0,253	0,253 - 0,358	0,358 - 0,453	0,453 - 0,642	0,642 - 0,742	> 0,742
Pertes moyennes (t/ha/an)	10,6	15,8	23,0	32,7	39,4	42,5
Surface (ha)	2 804,3	5 392,1	6 018,1	9 938,6	3 838,4	2 207,9
% Surface/Bassin	9,3	17,9	19,9	32,9	12,7	7,3
% Pertes	3,6	10,4	16,8	39,5	18,4	11,3

Tableau 45. Répartition des pertes moyennes en sol en fonction du couvert végétal

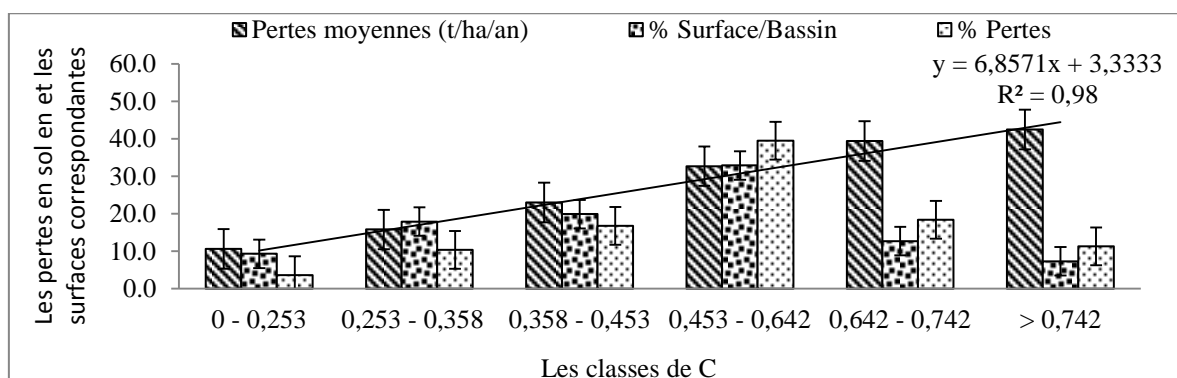


Figure 54. Évolution des pertes moyennes en sol en fonction du couvert végétal

D'une manière générale, le degré de protection des sols par le couvert végétal se traduit au niveau des pertes en sol moyennes qui enregistrent une variation proportionnelle à la

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

variation des classes de valeurs de C. Ainsi, le couvert végétal présente une très forte corrélation avec les pertes en sol moyennes ($R^2 = 0,98$) sur toute la surface de la zone d'étude.

4.3.2.2.5. Les pertes en sol au niveau des SBV de Kramis

Le découpage de la zone d'étude en sous-bassins versants hydrologiques a été effectué par le modèle « *hydrology* » intégré dans le logiciel de l'ArcGIS. Le résultat de ce découpage est représenté par la figure 55.

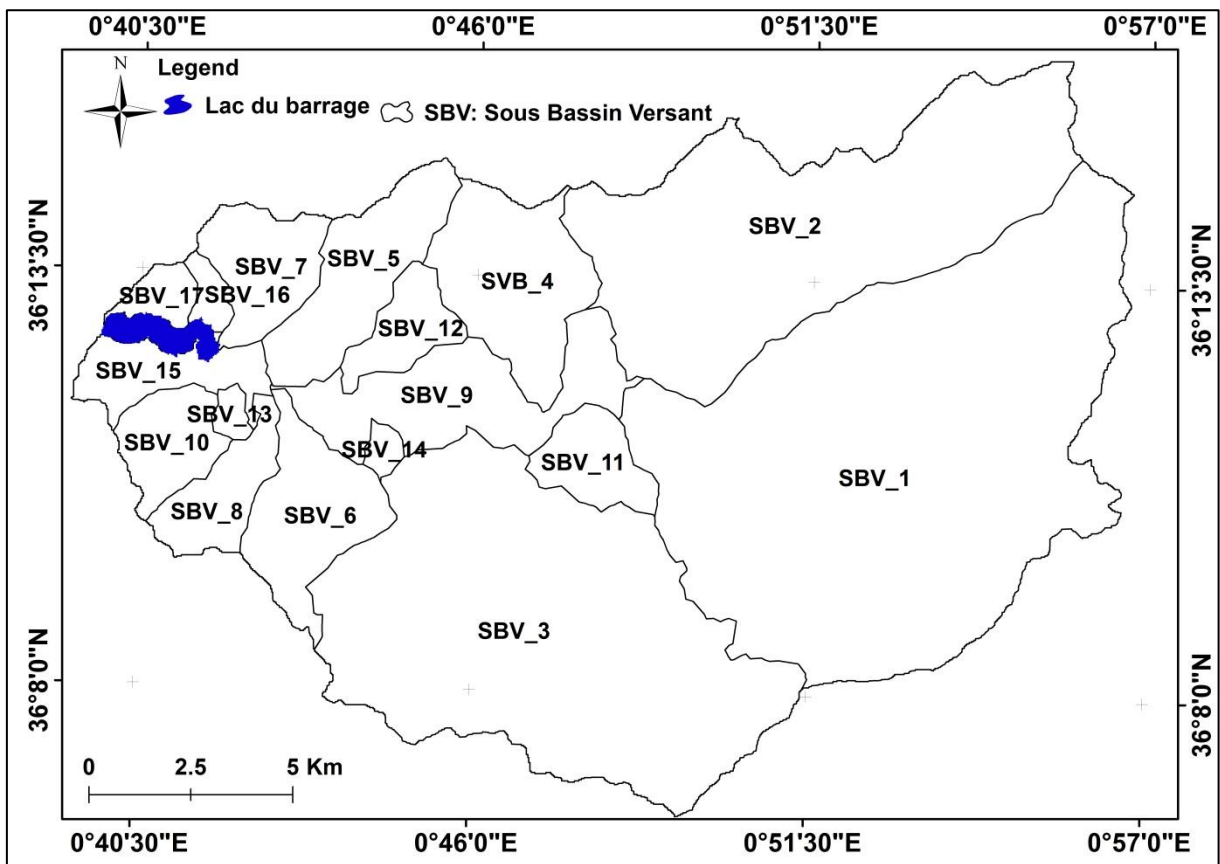


Figure 55. Carte de localisation des SBV de l'oued Kramis

Les pertes moyennes et leurs écart types dans chaque sous bassin, la valeur moyenne de chaque facteur influençant les pertes en sol ainsi que leurs surfaces correspondantes sont mentionnés dans le tableau 46.

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

SBV	X (dd)	Y (dd)	Surface		R (Mj.mm/ha.h.an)	K (t.h/Mj.mm)	LS	C	E Moy, (t/ha/an)	E écart-type (t/ha/an)
			(Km ²)	%						
SBV 1	0,876	36,191	93,3	30,9	616,9	0,041	1,56	0,51	21,7	24,8
SBV 2	0,860	36,233	50,5	16,7	608,4	0,043	2,19	0,49	26,9	29,6
SBV 3	0,790	36,146	65	21,5	596,4	0,039	1,79	0,56	26,4	30,5
SBV 4	0,776	36,218	13,9	4,6	596,1	0,044	2,62	0,46	32,0	27,9
SBV 5	0,735	36,222	11,1	3,7	594,6	0,039	2,78	0,52	32,6	38,5
SBV 6	0,725	36,168	10,7	3,5	591,0	0,039	2,48	0,69	40,6	30,2
SBV 7	0,708	36,221	7,4	2,5	594,7	0,036	2,66	0,61	36,4	36,9
SBV 8	0,696	36,177	5,8	1,9	591,0	0,048	2,43	0,67	46,4	36,0
SBV 9	0,762	36,198	14,8	4,9	594,6	0,047	2,46	0,53	38,0	42,1
SBV 10	0,685	36,182	5,7	1,9	594,1	0,042	2,12	0,58	30,6	27,9
SBV 11	0,799	36,182	5,3	1,8	598,8	0,032	2,01	0,54	26,8	32,1
SBV 12	0,747	36,210	4,6	1,5	594,5	0,046	2,99	0,51	42,4	46,2
SBV 13	0,701	36,191	1	0,3	593,2	0,033	1,45	0,73	21,2	21,0
SBV 14	0,742	36,183	1	0,3	591,0	0,045	2,4	0,68	41,8	16,1
SBV 15	0,684	36,197	6,1	2,0	594,8	0,040	2,21	0,62	32,2	28,4
SBV 16	0,693	36,217	2	0,7	594,7	0,036	2,83	0,77	50,7	60,4
SBV 17	0,677	36,216	2,1	0,7	594,7	0,047	2,89	0,63	51,8	52,7
Barrage	0,680	36,209	1,7	0,6	/	/	/	/	/	/

On note que, la moyenne des pertes en sol ne représente pas la moyenne des valeurs des facteurs influençant les pertes en sol correspondantes. Cependant, ceci correspond à la taille des unités homogènes des pertes en sol dans la région d'étude (ces données sont relatives à l'année 2016)

Tableau 46. Les pertes moyennes en sol des SBV de l'oued Kramis

D'après le tableau 46 et la figure 55, on remarque que, les sous-bassins versants situés à proximité du barrage (SBV4, SBV5, SBV6, SBV7, SBV8, SBV9, SBV10, SBV12, SBV14, SBV15, SBV16 et SBV17) présentent des pertes moyennes en sol supérieures à la moyenne générale (27,3 t/ha/an) enregistrée au niveau du bassin de notre zone d'étude. Toutefois, certains sous bassins atteignent presque le double de cette moyenne. C'est le cas, des SBV6 et SBV8 qui se situent dans la rive Sud de la zone d'étude avec des valeurs respectives de 40,6 t/ha/an et 46,4 t/ha/an, ainsi que les SBV16 et SBV17 qui enregistrent respectivement des valeurs de 50,7 t/ha/an et 51,8 t/ha/an. Ces derniers se localisent juste en amont du barrage. Cela s'explique par le fait que ces régions se caractérisent par un substrat marneux dénudé sur des versants généralement raides avec des reliefs contrastés. Cette constatation est également enregistrée dans la zone marneuse du bassin versant de l'oued Mina où les pertes moyennes en sol sont de l'ordre de 19 t/ha/an (Benchettouh *et al.*, 2017). Ce qui rejoint les conclusions de Kouri (1993) ; Achite et Meddi (2004).

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

4.3.2.3. Réévaluation des pertes en sol par la méthode d'AHP

Comme nous l'avons signalé que l'application du modèle RUSLE à lui seul dans les pertes en sol l'expose à certaines limites. Car, il ne s'applique qu'à l'érosion due à des facteurs bien définis et les quantités de pertes estimées n'incluent pas celles dues à d'autres facteurs qui semblent avoir un impact non négligeable sur ce phénomène. De ce fait, six paramètres géo-environnementaux influençant le processus érosifs seront analysés par la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP – *Analytic Hierarchy Process*).

L'échelle de comparaison binaire pour chaque facteur dans la matrice AHP a été attribuée à la base du test de l'impact variables-pertes en sol.

Facteur	LS	C	Dd	K	R	SA	Poids normalisés	Cohérence	CA
LS	1	3	9	9	3	5	0,433	7%	0,90
C	1/3	1	5	7	3	3	0,244		1,22
Dd	1/9	1/5	1	3	1/3	1/3	0,053		1,12
K	1/9	1/7	1/3	1	1/5	1/3	0,031		0,86
R	1/3	1/3	3	5	1	3	0,152		1,19
SA	1/5	1/3	3	3	1/3	1	0,089		1,12
								$\lambda_{max} =$	6,4
								CI =	0,08
								RC =	0,07

Tableau 47. Matrice de comparaison par pair des facteurs d'AHP

n	1	2	3	4	5	6
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24

Tableau 48. Valeurs de CA pour n = 6

A partir de la matrice réalisée deux à deux pour les facteurs LS, C, Dd, K, R et AS (tableau 47), nous avons calculé le poids normalisé de chaque facteur. Eigen value ainsi que le ratio de cohérence RC sont également calculés selon l'équation de Saaty (1977) dont les valeurs respectives obtenues sont de l'ordre de 0,08 et 0,07.

Selon les jugements apportés au niveau de la matrice de comparaison, on révèle les constatations suivantes: le facteur topographique (LS) contribue le plus dans les pertes en sol avec un pourcentage du poids normalisé de 43,3%. Il est suivi respectivement par le paramètre du couvert végétal (C) avec 24,4 %, l'agressivité climatique (R) avec 15,2, l'aspect des pentes (AS) avec 8,9 %, de la densité de drainage (Dd) avec 5,3 % et en dernier l'érodibilité du sol (K) avec un taux de 3,1 %. Les données des pertes en sol obtenues par la

CHAPITRE IV

EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

technique AHP ont été calculées selon l'équation ci-dessous en procédant par la somme linéaire pondérée dans le logiciel de l'ArcGIS.

$$AHP = 100*[0,433*LS + 0,244*C + 0,152*R + 0,089*AP + 0,053*Dd + 0,031*K]$$

Les deux tables attributaires relatives aux cartes de sensibilité des sols obtenues par le modèle RUSLE et celle par la technique AHP ont été soustraites l'une de l'autre dans un environnement SIG. La carte résultante de vulnérabilité au risque d'érosion a été reclassée en cinq catégories de sévérité de l'érosion séparées en : très faible, faible, modérée, élevée et dangereuse.

Classes de sévérité des pertes en sol		Modèle RUSLE		La technique AHP		Différence entre RUSLE et AHP	
		Surfaces (en Km ² et en %)					
		Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Très faible	0 – 5	46,51	15,4	10,43	3,5	36,08	11,9
Faible	5 – 7.4	18,72	6,2	21,42	7,1	2,70	0,9
Modérée	7.4 – 12	37,15	12,3	20,17	6,7	16,98	5,6
Elevée	12 – 20	52,85	17,5	74,32	24,6	21,47	7,1
Dangereuse	> 20	146,77	48,6	175,66	58,2	28,89	9,6
Total		302	100	302	100	106,11	35,1

Tableau 49. Classes de sévérité des pertes en sol par l'approche RUSLE/AHP

De la lecture du tableau 49 (colonnes 4 et 6), on déduit que la sévérité à l'érosion des sols révélée par la technique AHP présente également une variabilité spatiale des pertes en sol d'une zone à l'autre. En effet, un taux de 10,6 % de la surface totale est considérée comme ayant une faible à très faible susceptibilité à l'érosion du sol contre un pourcentage de 21,6 % estimé par le modèle RUSLE. Seulement 6,7 % de la surface totale est soumise au risque modéré contre 12,3 %. Cependant, les risques élevés et ceux dangereux se manifestent sur des surfaces plus importantes avec 24,6 % et 58,2 % contre respectivement, 17,5 % et 48,6 % évaluées par le modèle RUSLE. Ce qui consolide nos résultats et montrent qu'il existe une similitude considérable entre les deux méthodes dans l'estimation des pertes de sol. On note une différence entre les deux méthodes (RUSLE et AHP) sur près de 35% de la superficie de la zone, tandis que 75 % de la zone appartiennent à la même classe du risque érosif.

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

4.4. Conclusion

Le model RUSLE adopté dans ce travail est actuellement, à notre connaissance, le seul approche empirique pour cartographier de manière quantitative et qualitative l'érosion hydrique dans une unité hydrologique bien déterminée à savoir le bassin versant. En effet, l'intégration des cartes thématiques avec leurs bases de données des facteurs RUSLE dans un environnement SIG nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

☞ Les pertes en sol annuelles dans le bassin versant de la Mina sont de 60 millions de tonnes réparties sur 1 315 parcelles homogènes avec une moyenne de 11,2 t/ha/an. Tandis que celles de l'oued Kramis sont de l'ordre de 82 millions de tonnes réparties sur 6 934 parcelles homogènes fournissant une perte moyenne de 27,3 t/ ha. Cette moyenne correspond à une érosion sévère non supportable sur un substrat marneux soumis à un climat agressif aux pluies rares et irrégulières.

☞ Cette méthode de quantification met en évidence les secteurs sources de sédiments. En effet, près de 36% de la surface du bassin versant de l'oued Mina est classée dans les secteurs dont les pertes en sol sont élevées et dangereuses, alors que celles dans l'oued Kramis sont estimées sur une surface de 66,2%.

☞ Les facteurs érosifs les plus influents sur les pertes en terre dans cette région marneuse en particulier le bassin de l'oued Kramis sont par ordre d'importance, le couvert végétal ($R^2 = 0,98$), l'érodibilité des sols ($R^2 = 0,93$) et la topographie ($R^2 = 0,71$) avec une corrélation significative au seuil de 0,05.

Cependant, l'application du modèle RUSLE à lui seul dans les pertes en sol l'expose à certaines limites. Ceci car, il ne s'applique qu'à l'érosion due à des facteurs bien définis et les quantités de pertes estimées n'incluent pas celles dues à d'autres facteurs qui semblent avoir un impact non négligeable sur ce phénomène (l'exposition des pentes, la densité de drainage...etc). En plus des quatre variables déterminantes, utilisées pour l'évaluation des zones sujettes à l'érosion critique selon le modèle RUSLE, d'autres variables telles que la densité de drainage et l'inclinaison des pentes rendent le terrain plus vulnérable à l'érosion. Ces variables ont été incluses dans la technique AHP, faisant d'elle une des techniques complémentaires fortes intéressantes, avec sa flexibilité d'impliquer d'autres facteurs

CHAPITRE IV
EVALUATION DE L'ALEA EROSIF PAR LE MODELE RUSLE ET
L'APPROCHERUSLE/AHP DANS UN ENRIRONNEMENT SIG ET TELEDETECTION

contribuant aux risques érosifs. Celle-ci a été construite sur la base de résultats des analyses de test de correction de l'impact variables-pertes en sol.

Ainsi, les résultats obtenus donnent un indice de cohérence de 0,07. Lequel indice montre que, tous les facteurs analysés ont une forte cohésion avec le taux du risque érosif. En outre, ces résultats révèlent que les facteurs de l'AHP tels que, la topographique, le couvert végétal, l'agressivité climatique, l'inclinaison des pentes, la densité de drainage et l'érodibilité du sol ont respectivement les impacts sur les pertes en sol suivants: 43,3%, 24,4%, 15,2, 8,9%, 5,3%, 3,1 %. De plus, le résultat de la soustraction de la carte AHP de celle du modèle RUSLE, indique que près de 75 % de la zone d'étude appartient à la même classe de sévérité du risque érosif dans les deux méthodologies.

A la lumière de nos résultats, l'utilisation de l'approche RUSLE/AHP dans un environnement SIG, présente de nombreux avantages, notamment ceux relatifs au grand nombre de constats. En effet, elle permet de gérer rationnellement une quantité considérable de données quantitatives et qualitatives relatives aux différents facteurs érosifs, de démêler leur interdépendance par les croisements successifs des cartes thématiques et d'établir une carte synthétique du degré d'érosion ainsi que la vulnérabilité des différentes zones.

Bien que la validité des pertes en sol soit discutable, cette méthode apporte une aide aux acteurs pour:

- (i) Planifier des interventions contre l'érosion.

Simuler des scénarios d'évolution de la région d'étude en fonction de l'évolution de l'utilisation des terres et des techniques antiérosives préconisées.

CHAPITRE V

**PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT
ANTI-EROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE
L'OUED KRAMIS**

5.1. Introduction

L'eau est la source de la vie et le vecteur le plus important pour entreprendre et entretenir un développement durable. La gestion des ressources en eau est d'une des propriétés des pouvoirs publics, en particulier dans le Tell oranais. Cependant, le changement climatique, l'épuisement des ressources hydriques, la demande croissante en eau, la salinité des terres agricoles et la diminution du niveau des barrages par leurs envasements, risquent d'aggraver la situation de stress hydrique dans ces régions montagneuses.

Les résultats d'évaluation des pertes en sol sur l'ensemble de notre région d'intérêt nous ont permis de constater que l'aléa érosif résulte de la conjonction de plusieurs facteurs du milieu: agressivité des pluies, érodibilité des sols, raideur du relief, faiblesse du couvert végétal et pratiques agricoles inappropriées. Sous ces conditions, les particules du sol qui rejoignent les oueds contribuent de manière rapide à l'envasement du barrage Kramis.

La lutte contre l'érosion hydrique impose l'utilisation de méthodes et de moyens performants dans un environnement SIG. C'est dans cette optique que s'intègre notre travail permettant de disposer et de cartographier, de la manière la plus optimale possible, l'information relative à la sensibilité des sols au phénomène érosif.

L'objectif de ce chapitre consiste en une réflexion relative à une approche d'aménagement intégré et durable de l'espace, qui tient compte des potentialités agropastorales. Par ailleurs, la prospection de terrain et la réalisation d'une enquête auprès des paysans ainsi que des autorités locales nous ont permis d'avoir une bonne compréhension de la situation, et par conséquent de mettre en application des techniques antiérosives appropriées, robustes, moins coûteuses et durables.

5.2. Rappel concernant le diagnostic et l'identification des problèmes majeurs de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant de l'oued Kramis

La capacité initiale en eau du réservoir du barrage Kramis était de 45,4 hm³ en 2004. Après 10 ans, les mesures bathymétriques effectuées au niveau du lac du barrage montrent que cette capacité a diminué à 41,4 hm³, c'est-à-dire un rabattement d'environ 8% de son volume initial dû à l'envasement.

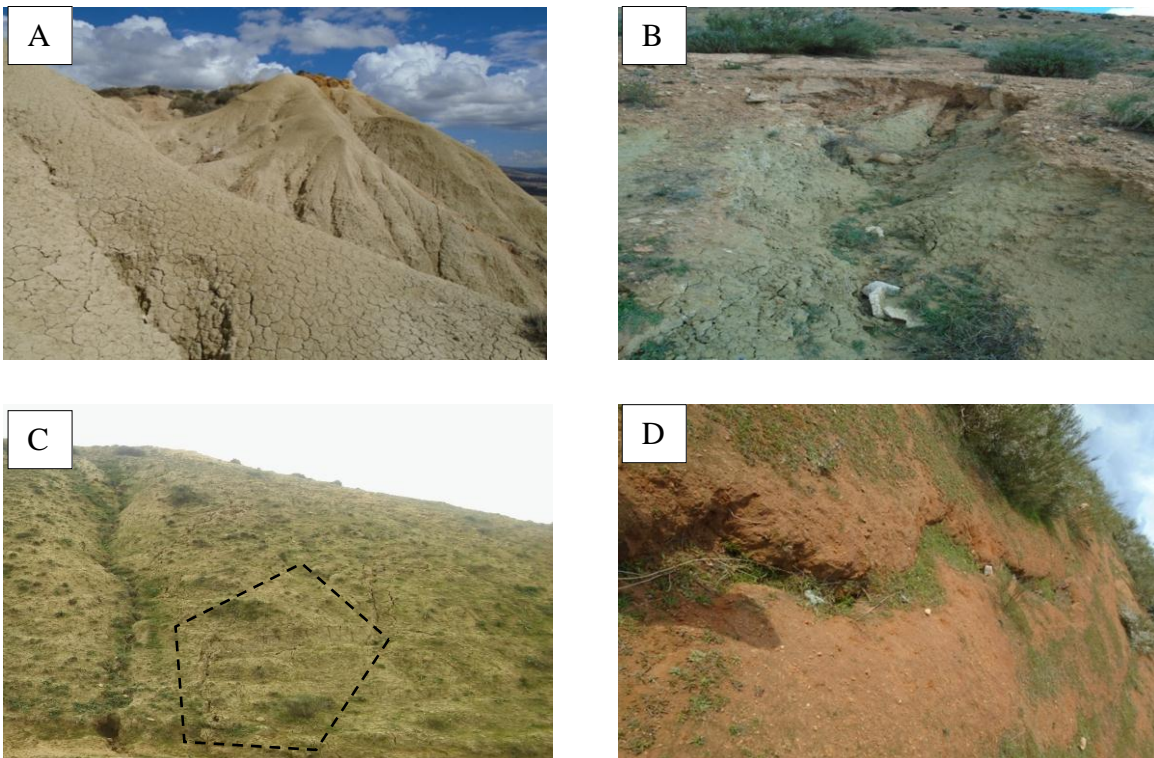


Photo 16. Quelques aspects de dégradation du sol (A): dessiccation des terres marneuse, (B): éboulement, (C): glissement, (D): ravins (*Auteur, 2017*)

Il couvre une superficie de 302 Km². Les principaux types d'occupation du sol sont: les céréalicultures (33,1%), la jachère (11,5%) et les parcours naturels (30,8%) (tableau 34). Selon les statistiques de 2016, la densité de la population rurale moyenne est de l'ordre de 38 hab/Km². Cette densité est répartie sur sept communes des wilayas de Mostaganem, Relizane et Chlef. Dès la mise en service du barrage la densité de la population rurale a connu une augmentation avec une croissance remarquable dans la partie avale du bassin; elle est de l'ordre de 58 hab/Km² pour Achaacha et 39 hab/Km² pour Nekmaria.

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE
L'OUED KRAMIS

Les résultats de l'évaluation du risque d'érosion hydrique, ainsi que les sorties de prospection sur terrain nous ont permis de dégager une bonne compréhension sur la situation environnementale désastreuse au niveau de cette zone marneuse. En effet, le phénomène d'érosion sous toutes ses formes: en ravin; glissement de terrain; laminaire; en rigole; sapements des berges; coulée de boue, ... etc., est à l'origine de l'envasement du barrage. En plus, les activités agricoles inappropriées ont aggravées ce phénomène.

Les conséquences environnementales dans cette région quasiment marneuse ne se limitent pas uniquement à l'envasement de la retenue du barrage, selon la communauté rurale locale, ce phénomène contribue également à la perte de la couche superficielle du sol la plus fertile et à la dégradation de la qualité des eaux de surface en favorisant la remontée des sels.

Par ailleurs, les sédiments qui rejoignent les oueds et ensuite se déposent dans les retenues d'eau contribuent, d'une part, à rehausser le lit des cours d'eau entraînant un risque plus élevé d'inondation et, d'autre part, à augmenter la turbidité des eaux ce qui affecte davantage les terres agricoles situées en aval. L'inondation du 27 Janvier 2017 en a été une des conséquences.

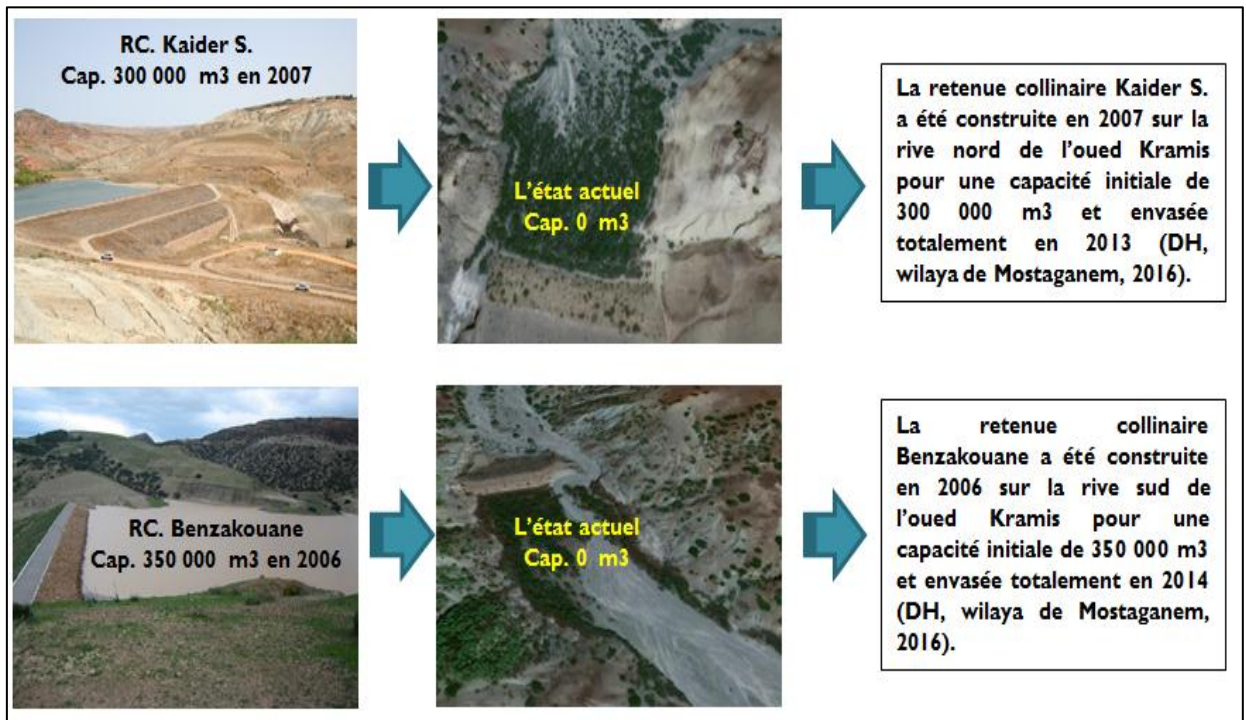


Figure 56. L'état de deux retenues collinaires Benzakouane et Kaider

CHAPITRE V

PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

Lors de nos prospections sur terrain, il a été observé deux retenues collinaires; l'une située dans la rive Sud nommée Benzakouane et l'autre Kaider située dans la rive Nord de l'oued Kramis (Fig. 56).

Ces ouvrages ont été installés respectivement durant 2006 et 2007 pour une capacité de rétention de 350 000 m³ et 300 000 m³ à l'aval des sous-bassins versants notés SBV7 et SBV6 avec une superficie de l'ordre de 7,4 Km² et 10,7 Km². Les ouvrages en question ont été totalement envasés en 2014 et en 2013.

Si rien n'est fait pour atténuer les processus érosifs avec ce rythme, le barrage de Kramis sera totalement envasé d'ici 2080.

5.3. Proposition d'une stratégie d'intervention pour la protection du bassin versant

Malgré les actions entreprises ces dernières décennies dans le milieu rural par les pouvoirs publics dans le cadre de la lutte antiérosive et en dépit des moyens considérables mis à la disposition de la CES, les paysans – qui sont le principal acteur de réussite de cette politique – n'arrivent pas à adhérer à cette démarche. Cette réticence serait due au manque de sensibilisation de ces agriculteurs et à l'absence des programmes d'accompagnement sectoriels spécifiques à chaque utilisation des terres.

Aujourd'hui la gestion de CES dans des régions à potentialité agricole se trouve confrontée à de nouveaux défis tels que le changement climatique et les conséquences des activités anthropiques. Les acteurs publics ou privés locaux, dans le domaine hydro-agricole, doivent impliquer tous acquis matériel et scientifiques pour mieux gérer les travaux d'aménagement dans l'ensemble de la zone d'intérêt.

Pour ce faire, il s'agit d'un plan d'actions de protection qui sera déroulé au niveau des versants, des vallées et des collines mais aussi du réseau hydrographique.

Les différentes phases de ces aménagements se résument dans les étapes suivantes:

✓ la première étape consiste à l'identification et l'implication des parties prenantes; il inclut entre autres les différents secteurs Etatiques locaux de trois wilayas (Mostaganem,

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE
L'OUED KRAMIS

Relizane et Chlef) tels que les forêts, la DSA, l'hydraulique, les bureaux d'études spécialisés, ainsi que la société civile et les associations actives dans ce domaine.

✓ la deuxième étape consiste à déterminer et lister en concertation les acquis de recherche à valoriser. Ceci à travers l'organisation d'ateliers régionaux pour les parties prenantes et par l'élaboration des enquêtes auprès des agriculteurs.

✓ la troisième étape est liée à la caractérisation des zones d'études selon les variantes; physiques, agricoles, hydrologique et socioéconomiques pour des fins cartographiques.

✓ la quatrième étape considère la dissémination des acquis par des fiches techniques et leurs d'usage, l'octroi des subventions agricoles aux agriculteurs, les démonstrations à travers des journées champs libre et des campagnes de sensibilisation auprès du grand public.

✓ la cinquième étape est en relation avec la durabilité de savoir-faire scientifique et technique suite à la création de plateforme de partage, de collaboration et de suivi. L'organisation des sessions de formation, la participation aux évènements locaux, régionaux et nationaux pour les agriculteurs est indispensable.

Dans cette étude de doctorat, nous essayerons de proposer un plan de protection en s'impliquant tous acquis matériel et scientifique de la région d'étude.

Compte tenu du but poursuivi visant à identifier les régions dégradées et celles participantes à l'envasement du barrage, une grille d'évaluation a été adoptée en prenant en considération les seuils de classification cités dans le tableau 39, afin de pouvoir diviser la zone d'étude selon le degré du risque érosif. La classification des pertes en sol a fait ressortir trois catégories (Fig. 57).

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIÉROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE
L'OUED KRAMIS

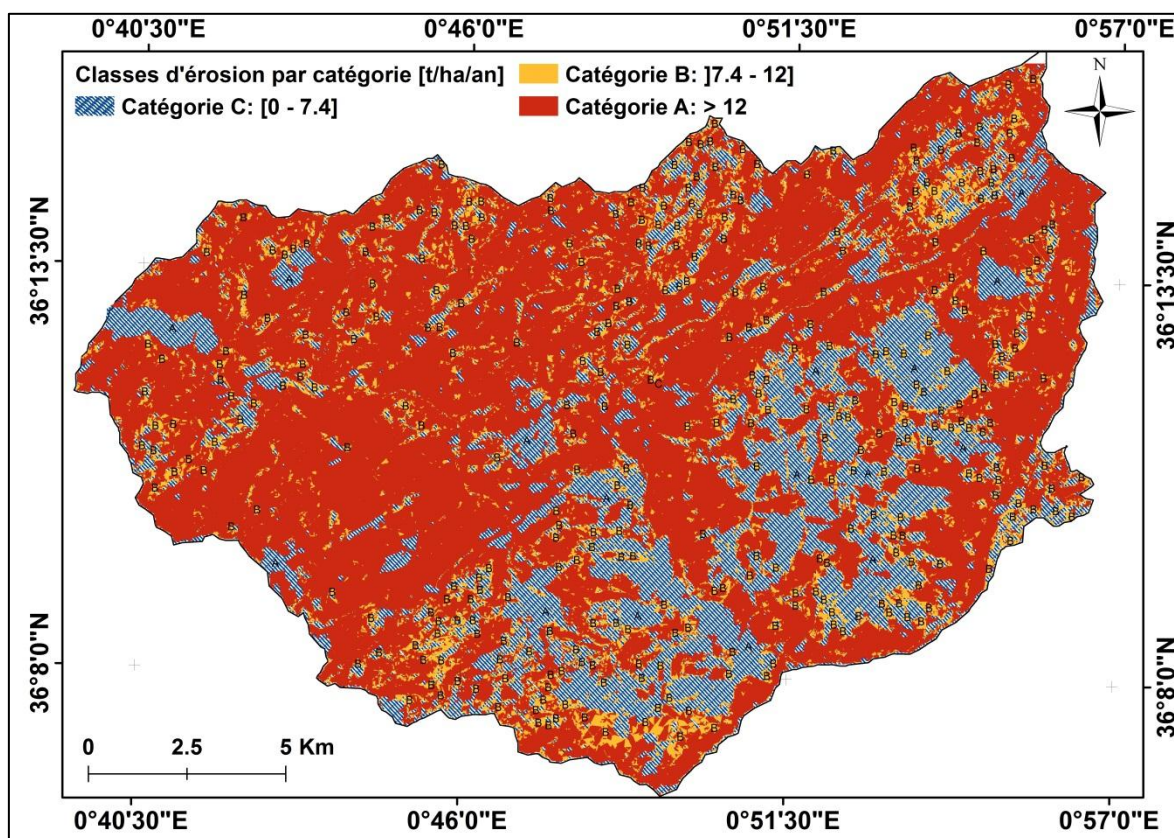


Figure 57. Les trois catégories des pertes en sol

Risque érosif	Classe des catégories (t/ha/an)	Superficie		Catégorie
		(Km ²)	(%)	
Tolérable	0 – 7,4	65,1	21,6	C
Moyen	7,4 – 12	37,2	12,3	B
Elevé et dangereux	> 12	199,7	66,1	A
		302	100	

Tableau 50. Les catégories des pertes en sol

D'après le tableau 50, les résultats des pertes en sol évaluées par le modèle RUSLE ont permis de révéler qu'environ 12 % de cette surface représente une perte en sol moyenne. Tandis que 66 % de la surface de la zone d'étude sont sujets à une perte en sol élevée et dangereuse.

Les actions antiérosives en vue de la réduction des apports sédimentaires au niveau du réservoir du barrage concerneront uniquement les régions prioritaires A et B.

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE
L'OUED KRAMIS

Les zones C ne sera pas considérée comme prioritaire en raison d'une part, de la perte en terre tolérable et d'autre part, de l'éloignement de ces zones par rapport au lac du barrage.

Dans la catégorie A, on remarque que la majeure partie se localise dans le secteur Nord-ouest de la zone d'étude. Les valeurs très élevées des pertes en sol sont dues, d'une part, aux valeurs relativement importantes du facteur topographique LS (supérieures à 3,2) et d'autre part, au faible couvert végétal. Ce dernier s'avère donc, jouer un rôle protecteur contre l'érosion hydrique. Selon leur nature physiographique, ces secteurs nécessiteront des interventions antiérosives sur une surface totale de 199,7 Km², soit environ 66 % de la zone d'étudié.

Dans la catégorie B, une surface totale de 37,2 Km² (12,3 %) du secteur étudié a été qualifiée comme une zone à risque moyen. Cette catégorie soumise également à l'effet de la topographie, qui varie entre 0,6 et 1,05, juxtaposée aux valeurs de la vulnérabilité du sol (K) plus ou moins importantes.

Type d'aménagement	Pertes en sol (t/ha/an)		Auteurs/pays
	Avant aménagement	Après aménagement	
- Labour en courbes de niveau.	1	0,75	Roose <i>et al.</i> (2012) (Maghreb)
- Murettes construites sur des pentes > 12% avec des cultures intensives, cordons de pierres sèches sur des pentes < 12 %	1	0,02	Albergel <i>et al.</i> (2004) ; Bergaoui <i>et al.</i> (2008) (Tunisie)
- Les parcours bien protégés.	1	0,0903	
- Les cordons de pierres sèches dans un parcours libre.	1	0,38	Panagos <i>et al.</i> (2015) (Europe)
- Les techniques de rebisement et de réhabilitation	1	0,003	Panagos <i>et al.</i> (2015) (Europe)
- Seuils de correction torrentielle	1	0,4	GTZ (2006) (Algérie)

Tableau 51. L'effet de quelques aménagements antiérosifs sur les pertes en sol

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

Classes d'occupation du sol	Surface d'occupation du sol dans le BV (Km ²)	surface d'occupation du sol dans les zones prioritaires (Km ²)	Perte moyenne avant aménagement (t/ha/an)	Type d'aménagement	Surface d'occupation du sol traitée selon chaque technique antiérosive (Km ²)	Délais de réalisation des aménagements antiérosifs	Pertes en sol (t/ha/an) après aménagement
Lac du Barrage	1,7	0,0	0,0	Pas d'aménagement	0,0	0,0	0,0
Surfaces bâties	4,7	0,0	0,0	Pas d'aménagement	0,0	0,0	0,0
Jachère	34,6	28,7	27,7	Protection des parcours	28,7	Après 4 ans	2,50
Parcours	92,9	77,9	39,1	Protection des parcours	77,9	Après 4 ans	3,53
Terres agricoles	99,9	69,7	24,9	En respectant les courbes de niveau	69,7	Après une année	18,66
Reboisement (Pin d'Alep)	7,7	6,5	37,6	Réhabilitation	6,5	Un peu plus de 6 ans	0,04
Forêt	1,3	1,2	35,4	Réhabilitation	1,2	Un peu plus de 3 ans	0,04
Matorral	2	1,8	47,8	Réhabilitation	1,8	4 mois	0,05
Terrains calcaires	47,6	41,3	39,5	Reboisement	31,8	Un peu plus de 7 ans	0,04
				Retenues collinaires	7 Retenues collinaires + 1 Ouvrage de captage	Un peu plus de 3 ans	/
				Seuils de correction torrentielle	5,5	Un peu plus de 6 ans	/
Terrains incultes	9,7	9,7	44,5	Murettes végétalisées	1,8	6 années	1,20
				Reboisement	2,4	Un peu plus de 7 ans	0,17
Total	302	237	82 327 022 t/an				

Tableau 52. Les pertes en sol (t/ha/an) produisent avant et après la mise en place de différentes techniques d'aménagement dans les zones prioritaires

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIÉROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DEL'OUED
KRAMIS

Comme nous l'avons noté et dans le but d'optimiser l'allocation des ressources destinées à la réduction à court et à moyen terme de l'envasement du réservoir, nous suggérons que seules les zones prioritaires A et B reçoivent une attention particulière en matière de mesures antiérosives. A cet effet, un total de 237 Km² de la surface des versants produisent un taux de pertes en sol de 97,3 %, nécessiteront des mesures antiérosives adéquates.

Les parcours (y compris les jachères) et les zones à vocation agricole couvrant respectivement 106,6 Km² et 69,7 Km² (tableau 52), sont les principaux types d'occupation du sol, nécessitant le plus d'interventions sur le bassin. Ces interventions sont principalement destinées à contrer le ravinement et l'érosion de surface. Ces zones sont soumises aux activités humaines à savoir le surpâturage qui provoque le piétinement du sol durant la saison estivale. Celle-ci est aussi caractérisée par une dessiccation des marnes. La saison automnale à caractère torrentiel provoque un rejaillissement important des particules du sol. Ces terres produisent une quantité importante de sédiments estimée à une moyenne de 39,1 t/ha pour les parcours, 27,7 t/ha pour les jachères et 24,9 t/ha pour les terres agricoles. La stratégie de protection des parcours et des jachères consiste à les mettre en défens au cours des périodes qui s'étalent entre Avril et Mai et Août à Septembre, cette action permettra d'assurer une couverture des sols, mais aussi facilitera la régénération des espèces pastorales. Sur un autre registre, il est important de s'assurer que les agriculteurs adhèrent aux principes de protection des versants en utilisant les bonnes pratiques agricoles qui consistent à mettre en place de cordons des pierres sèches si nécessaire. Les terres labourables doivent être travaillées suivant les courbes de niveaux immédiatement après humectation, c'est-à-dire, au début de la saison automnale. Donc, cette rugosité des terres agricoles assure la dissipation de l'énergie de ruissellement.

L'approche participative nécessitera des actions de sensibilisation, de vulgarisation et d'appui technique et matériel auprès des populations riveraines en vue de gagner leur adhésion pour la réussite des actions programmées.

La réhabilitation des terres aptes à recevoir des techniques de reboisement viennent en deuxième position sur une surface de près de 45,5 Km² (terres calcaires, terrains incultes et matorrals dégradés). Une fois le reboisement réussit; cette technique biologique doit être

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DEL'OUED
KRAMIS

accompagnée de plantes de couverture afin d'assurer une bonne protection de la couverture pédologique.

Des terres incultes d'une surface de 9,7 Km² viennent en troisième position. La plantation d'arbres fruitiers rustiques (olivier, amandier...) sur une surface de 2,4 Km². Une série de murettes revégétalisées sur une surface de 1,8 Km² est également indispensable afin de contrer toutes formes d'érosion. Cette série sera construite dans les rives du détroit de la partie aval du SBV1. Sur ces mêmes versants d'une surface de 5,5 Km², la mise en place de seuils de corrections torrentielles est recommandée (tableau 52).

En se référant au tableau 50, nous constatons que la production annuelle des sédiments a atteint une quantité de 82 327 022 tonnes dont un taux de 0,7 %⁶ de ces sédiments s'achemine directement dans le lac du barrage, soit une quantité annuelle de 576 290 tonnes d'envasement. Le reste peut s'entreposer et parvenir au réservoir sur une période de plusieurs années. Ainsi, nous suggérons des interventions regroupées sous le vocable « ouvrages spéciaux de protection » qui permettront de capter ces sédiments en leur créant des zones de dépôt avoisinantes les terres agricoles des vallées à faible pente.

Ces ouvrages englobent des retenues collinaires et un ouvrage de capture de sédiments dans les oueds. Les ouvrages spéciaux de protection incluent également des interventions contre l'érosion des berges et des abords routiers. Selon Roose (1991), ces types d'érosion produisent des quantités dépassant 10 000 fois celles provoquées par l'érosion diffuse.

Les coordonnées géographiques d'implantation des retenues collinaires et de l'ouvrage de capture des sédiments sont mentionnées dans le tableau 53:

Retenues et ouvrage de capture de sédiments	Longitude/Latitude (WGS84)	
Retenue collinaire 1	X = 0.703°	Y = 36.209°
Retenue collinaire 2	X = 0.711°	Y = 36.208°
Retenue collinaire 3	X = 0.727°	Y = 36.207°
Retenue collinaire 4	X = 0.733°	Y = 36.200°
Retenue collinaire 5	X = 0.765°	Y = 36.187°
Retenue collinaire 6	X = 0.719°	Y = 36.187°
Retenue collinaire 7	X = 0.710°	Y = 36.193°
Ouvrage de capture des sédiments	X = 0.737°	Y = 36.196°

Tableau 53. Sites d'implantation des retenues collinaires et de l'ouvrage de capture de sédiments dans les oueds

⁶ Soit 400 000 m³ de terres x 1,5 = 600 000 t, d'après TECSULT, 2006

5.4. Chronologie et efficience de chaque technique d'aménagement

L'impact des interventions antiérosives sur les pertes en sol n'apparaît qu'au fil du temps. En effet, les interventions mécaniques sont plus au moins effectives dès leur mise en place, tandis que les interventions biologiques nécessiteront quelques années avant d'avoir un impact sur l'érosion (tableau 52).

Le labour dans le sens des courbes de niveau, a pour effet la réduction de la production de sédiments dès la première année, tandis que la protection des parcours sera étalée sur quatre années pour une plus grande efficacité.

La réalisation des murettes nécessite un effort particulier dont l'effet antiérosif, sur une surface de 1,8 Km², ne se percevoir qu'après six années.

Les travaux de reboisement se poursuivront sur une période d'un peu plus de 7 ans à un rythme de 4,4 Km² annuellement. Néanmoins, ces aménagements à base d'essences conifères en association avec des plantes de couverture ne donnent leur impact qu'après 10 à 15 ans de leur implantation. Soulignons toutefois, que ce taux de réalisation provient du rythme prévu pour des travaux similaires de reboisement dans le cas du traitement du bassin versant de Beni Haroun (TECSULT, 2006). A cet effet, un délai de 12 années, en moyenne pour notre zone d'étude, a été retenu. L'impact de cette technique sur la réduction des pertes en sol sera effectif selon la chronologie suivante:

☞ le reboisement des terres calcaires, terrains incultes et matorral dégradé sur une surface de 45,5 Km² ne donne son impact qu'après les dix-neuf années.

☞ les matorrals dégradés ne donnent leur impact antiérosif sur une surface de 1,8 Km² qu'après la treizième année.

☞ la réhabilitation des reboisements troués à base de Pin d'Alep sur une surface de 6,5 Km² ne sera effective qu'à partir de la quatorzième année.

☞ la réhabilitation des forêts dégradées sur une surface de 1,2 Km² ne peut donner son impact érosif qu'à partir de la deuxième année.

Roose *et al.* (2000) ont déduit qu'un taux moyen annuel d'érosion de 200 t/ha a été retenu afin d'estimer l'effet des mesures antiérosives sur le taux moyen d'érosion généré par les ravines. Un taux de captage arbitraire de 60% a été utilisé pour les seuils de corrections

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DEL'OUED
KRAMIS

torrentielles (TECSULT, 2006). Si le réseau des ravins traités dans les zones prioritaires s'étale sur une longueur de 313,4 Km, la distance entre les seuils «X» sera calculée sur la base de la formule: $X = Y/S$, où Y représente la hauteur de ravin (m) et S la pente (m/m). Pour cela, 6 521 ouvrages de seuils de correction torrentielle seront réalisés. Les seuils sont réalisés à un rythme d'environ 1 050 ouvrages par année. Pour faciliter l'estimation des apports solides captés par ceux-ci, il est considéré que l'impact de leur mise en valeur ne sera effectif qu'après l'implantation de l'ensemble de ces ouvrages c'est-à-dire à partir de la sixième année.

L'ouvrage de capture de sédiments dans l'oued sera réalisé sur une durée de quatre années. Les retenues collinaires au nombre de sept qui contrôlent les sédiments issues des sous-bassins versants: SBV7, SBV8, SBV10, SBV13, SBV15, SBV16 et SBV17 (Fig. 55) ne donnent leur impact antiérosif qu'après quatre années de leur mise en place avec un rythme de deux retenues par année en moyenne. Ces ouvrages hydrauliques ont un taux de capture estimé à 90%. Ce taux de captage est inspiré des travaux similaires effectués au niveau de deux bassins versants à savoir la Mina et Gargar qui font partie du Tell oranais. Cependant, dans ces deux régions un travail similaire montre que la durée de la mise en service de ce type d'ouvrages (retenues collinaires et ouvrages de capture des sédiments) ne dépasse pas en général dix années. De plus, les mesures de terrain dans notre zone d'étude sur deux retenues collinaires à savoir, Benzakouane et Kaider montrent que la mise en service de ces deux retenues ne dépasse pas huit années. C'est pourquoi un délai de 10 années a été retenu pour l'estimation de l'effet de ces ouvrages sur la diminution des pertes en sol.

5.5. Evaluation des apports solides atteignant le réservoir après chaque aménagement

Les formules d'évaluation des apports solides atteignant le barrage sont comme suit:

✓ Evaluation de la quantité des sédiments produits après aménagement est effectuée par la formule suivante: Pertes totales pour l'année « i » = (Pertes totales des zones prioritaires) – (Pertes totales avant aménagement de l'année « i » - Pertes totales après aménagement de l'année « i »);

CHAPITRE V

PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DEL'OUED KRAMIS

✓ Les apports solides atteignant le réservoir au cours de l'année « i » sont donc obtenus par la formule suivante: $AS (t/an) = \text{Pertes totales pour l'année « i »} \times 0,7$ (TUCSULT, 2006).

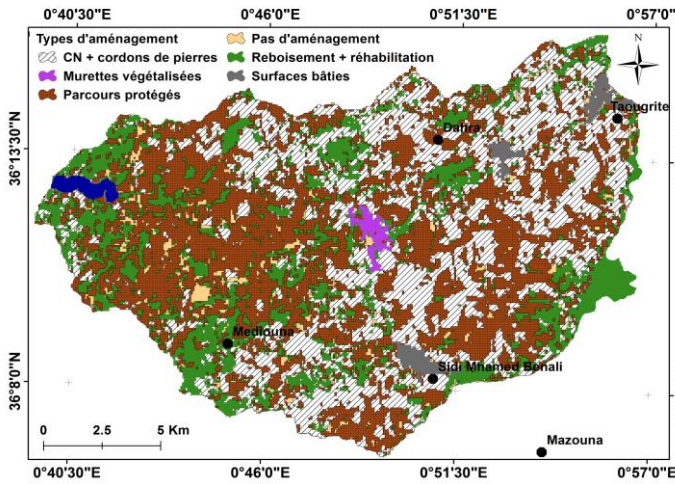


Figure 58. Les différents types d'aménagements au niveau du BV de l'oued Kramis

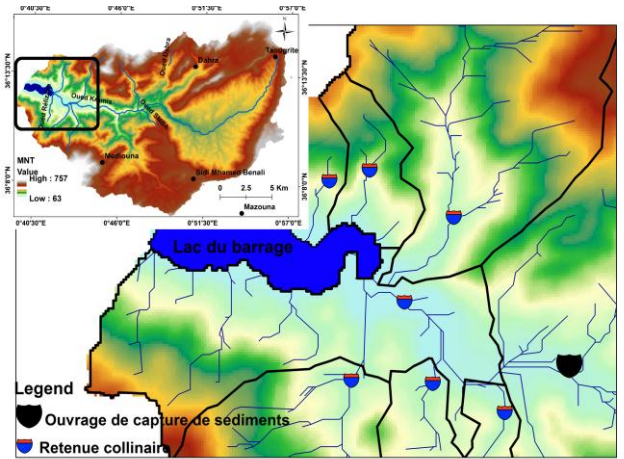


Figure 59. Sites d'implantation des retenues collinaires et de l'ouvrage de sédimentation

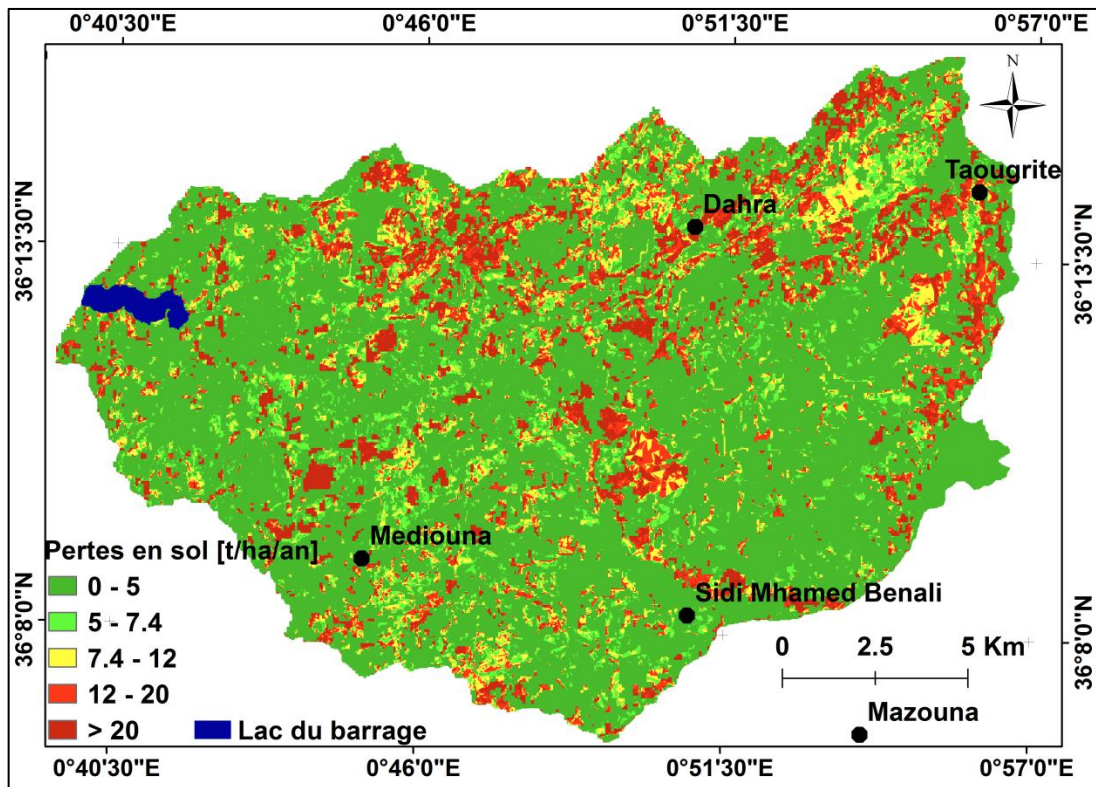


Figure 60. Les classes des pertes en sol après aménagement

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DEL'OUED
KRAMIS

La figure 61 représente la carte de répartition des pertes en sol du bassin de l'oued Kramis après tout aménagement recommandés. Elle fut une subdivision de celui-cien 17 905 parcelles homogènes avec une quantité totale annuelle des pertes de terres de l'ordre de 20 millions de tonnes fournit de l'ensemble de la zone d'étude. Ces pertes varient entre 0 t/ha/an et 733,5 t/ha/an, avec une moyenne annuelle de 6,9 t/ha et un écart type de 13,8.

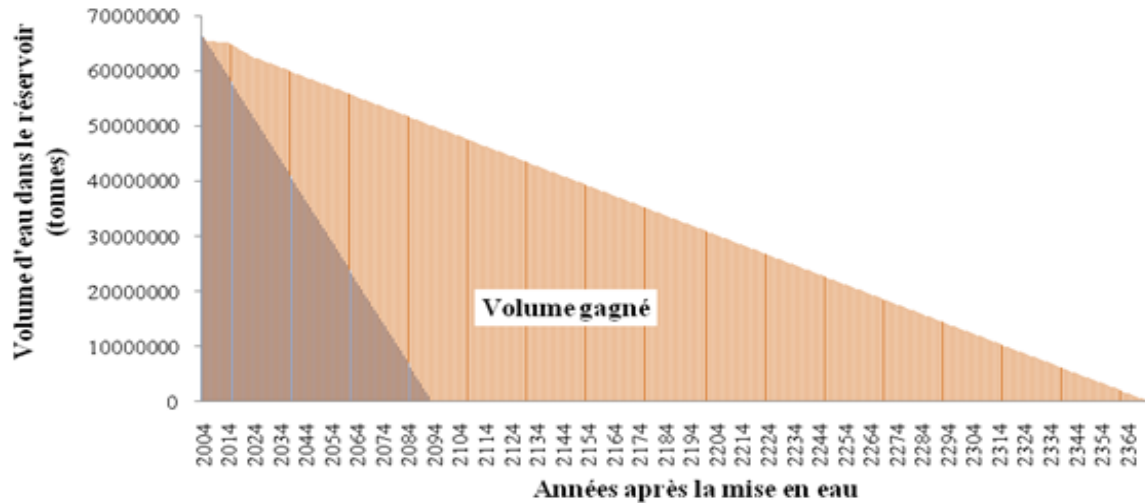


Figure 61. Prévision du volume utile du réservoir du barrage avec et sans interventions antiérosives

La figure 61, montre que l'impact des techniques antiérosives sur la production des sédiments dans les zones prioritaires, sont nettement positifs. Si ces techniques sont appliquées de manière judicieuse, la proportion des sédiments dans ces zones sera diminuée d'un peu plus de 80 millions de t/an à 18 millions t/an. Ainsi, avec l'utilisation des techniques antiérosives, l'exploitation du barrage en eau peut durer plus que 400 ans au lieu des 80 ans habituels.

La mise en place des techniques antiérosives sur toutes les zones prioritaires, devrait être suivie de la construction de deux barrages d'eau à l'aval des SBV2 et SBV3 (Fig. 61). Ces deux barrages pourraient couvrir les besoins en eau d'irrigation et des ménages des communes de Taugrite et Dahra dans la rive Nord, Mediouna et Sidi Mhamed Benali dans la rive Sud du bassin versant ainsi que leurs régions éparses.

CHAPITRE V
PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT ANTIEROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DEL'OUED
KRAMIS

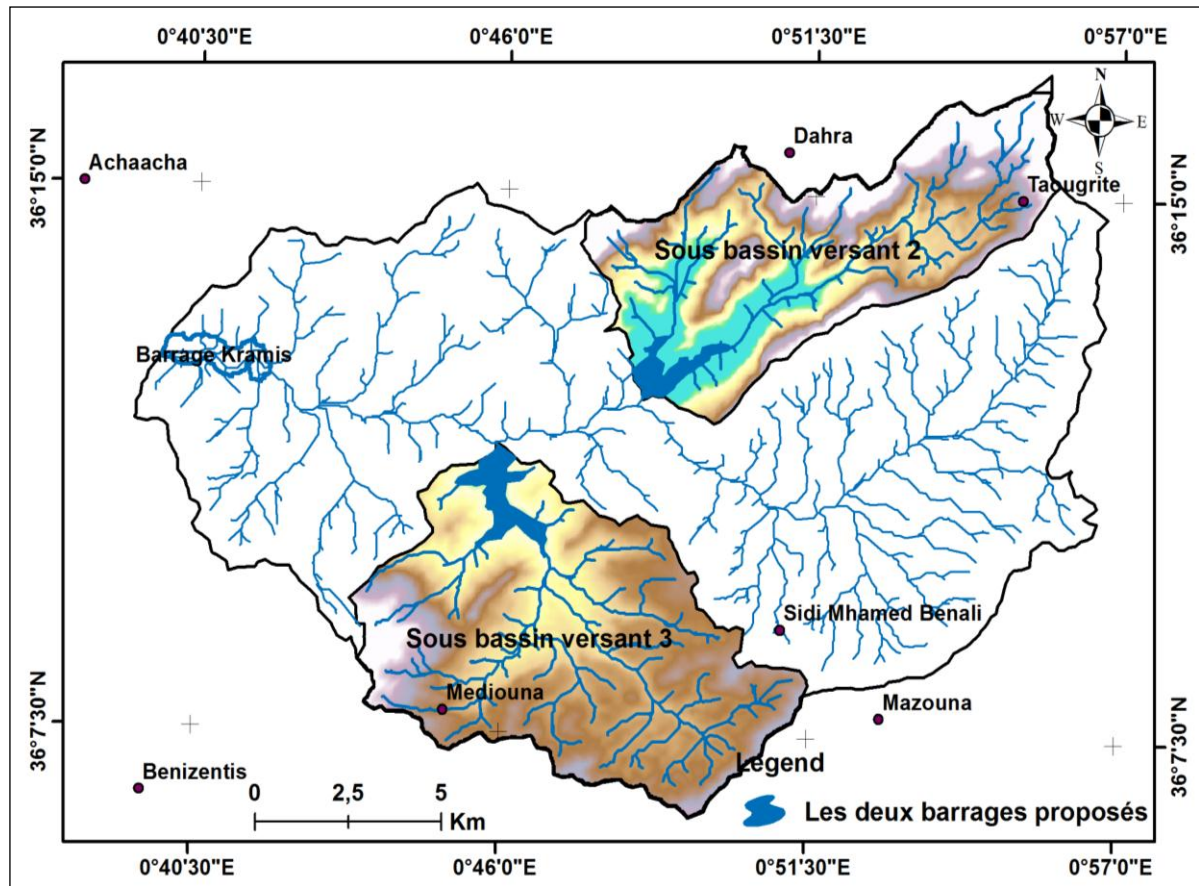


Figure 62. Sites d'implantation de deux nouvelles retenues collinaires sur SBS2 et SBV3

Plusieurs raisons ont déterminé le choix de ces deux sites, à savoir:

☞ La majorité de la population (67 %) du bassin versant est située dans le secteur inclue les SBV1, SBV2 et SBV3.

☞ Les techniques antiérosives effectuées dans ces régions sont des techniques biologiques assurant une durabilité permettant une réduction considérable des pertes en sol au fil du temps.

☞ Les activités agricoles dans ces zones sont essentiellement des cultures irriguées, c'est pourquoi l'installation de ces deux retenues sera indispensable.

5.6. Conclusion

La stratégie d'intervention proposée permettra de réduire l'envasement du lac du barrage Kramis. Cette stratégie regroupe deux types de techniques antiérosives qui ont été adaptées aux caractéristiques bio-physiographiques de notre zone d'intérêt. Les techniques mécaniques consistent en l'élaboration d'un plan d'aménagement de protection à court terme qui a pour objectif de limiter l'érosion des sols par le biais d'actions orientées à la réduction de la vitesse de ruissellement en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol et de dissiper l'énergie cinétique des gouttes des pluies.

Un ouvrage de capture de sédiments installé sur l'oued principal pour contrôler la turbidité des sédiments issus de dix sous-bassins versants constituant la majeure partie de notre zone d'étude. Sept retenues collinaires seront implantées pour retenir les sédiments provenant de sept sous-bassins versants situés dans la partie avale et une série d'ouvrages de seuils de correction torrentielle sur une surface de 5,5 Km² sera aménagée. Les techniques biologiques seront appliquées sur une surface près de 45,5 Km², et comporteront des reboisements de versants, la réhabilitation des matorrals et des forêts dégradées. Le plan d'action de protection comportera également des techniques combinées telles que, les murettes revégétalisées sur une superficie de 1,8 Km².

La mise en place de toutes ces techniques antiérosives, devrait être suivie par une proposition de la construction de deux retenues d'eau. Ces ouvrages hydrauliques serviront à l'approvisionnement en eau potable et d'irrigation au profit des ménages des communes de Taougrite, Dahra, Mediouna et Sidi Mhamed Benali.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans la présente étude, on a utilisé l'approche de prédiction de l'érosion hydrique RUSLE/AHP au moyen des outils spatiaux à savoir le SIG et la télédétection et cela afin d'évaluer le risque érosif et de cartographier les régions potentiellement productrices de sédiments. Les deux bassins versants de la Mina et de Kramis qui font partie du Tell oranais, sont caractérisés par une irrégularité spatiotemporelle des pluies, un écart thermique assez élevé, une forte pente, une lithologie marneuse détériorée et une couverture végétale faible et inappropriée, ce qui les rend très vulnérables à l'érosion hydrique sous toutes ses formes. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG ont été utilisés pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement.

L'approche RUSLE/GIS adoptée pour ce travail est actuellement le seul moyen pour cartographier l'érosion hydrique dans un bassin versant. En effet, elle permet d'évaluer le potentiel des pertes en sol en tout point (pixel) de cette unité hydrologique. Mieux encore, elle donne l'opportunité de comparer les diverses actions ou facteurs sur lesquels il faut agir pour limiter le phénomène de l'érosion hydrique. Cette approche donne l'avantage de visualiser le territoire, gérer les pratiques CES existantes et réfléchir sur les possibilités d'aménagement.

Le modèle RUSLE définit la perte en sol comme étant le résultat de l'interaction de cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique à savoir: l'érosivité des pluies (R), la vulnérabilité du sol à l'érosion (K), la longueur et l'inclinaison de la pente (LS) et l'utilisation du sol (C et P). Le résultat obtenu des pertes en sol du bassin de l'oued Kramis d'une superficie de 302 Km² après sa subdivision en 6 934 parcelles a été annuellement de plus de 82 millions de tonnes, soit une moyenne de 27,3 t/ha. La répartition spatiale de ces pertes par rapport au seuil de tolérance, qui est de 7,4 t/ha/an, montre que seulement 21,6 % de la surface du bassin ont subi une perte tolérable, tandis que 12,3 % appartiennent à la classe des pertes moyennes et 66,2% aux pertes fortes et dangereuses. Un travail similaire a été mené sur le bassin de la Mina d'une superficie de 4 800 Km², après sa division en 1 315 parcelles, montre que les pertes en sol ont été de l'ordre de 60 millions de tonnes, soit une moyenne de 11,2 t/ha/an. Comparativement au bassin de l'oued Kramis, celui de la Mina présente une plus forte homogénéité entre ses parcelles en termes de pertes en sol. Cette homogénéité s'expliquerait principalement par les deux principaux facteurs influençant les pertes en sol à savoir; la topographie (LS) et le couvert végétal (C). En effet, le bassin de l'oued Kamis est caractérisé par une topographie (LS) raide enregistrant une valeur de 2 et un écart type de 1,3 contre une valeur de 1,5 et un écart type de 1,7 calculés au niveau de la Mina. Concernant le couvert

CONCLUSION GENERALE

végétal, 60,3% de la surface de la Mina était couverte durant toute l'année voir même durant les grandes averses, contre uniquement 9% de la surface couverte pour l'oued Kramis.

Au niveau du bassin de l'oued Kramis, le calcul de R par le modèle $R_{Med}REM$ a donné des valeurs variant entre 630,5 Mj.mm/ha.h.an enregistrées au niveau de la station d'Ain Merane dans le secteur Est et 586 Mj.mm/ha.h.an au niveau de la station Mediouna dans le secteur Ouest. L'analyse statistique a révélé une corrélation faible entre les pertes moyennes en sol et les valeurs de l'érosivité des pluies. Cette faible corrélation serait due au faible écart entre les valeurs extrêmes (44,5 Mj.mm/h.ha.an) ainsi qu'à l'éloignement des stations d'enregistrement des précipitations. Cependant, le facteur K présente une forte corrélation avec les pertes moyennes en sol ($R^2 = 0,93$). On peut donc déduire que ce facteur est un paramètre décisif dans l'aléa érosif, bien que les altérites prélevées des sols de la zone d'étude présentent une faible érodibilité généralement inférieure à 0,1 t.h/Mj.mm. Le facteur LS présente également une influence très nette sur les pertes moyennes en sol enregistrant un coefficient de détermination assez important ($R^2 = 0,71$). Pareillement, le degré de protection du couvert végétal est fortement corrélé avec les pertes moyennes en sol ($R^2 = 0,98$).

Cependant, l'application du modèle RUSLE à lui seul dans l'estimation des pertes en sol présente certaines limites. Ce modèle ne s'applique qu'à l'érosion due à certains facteurs sans la prise en compte des autres paramètres, telles que l'exposition des pentes et la densité de drainage. En plus des quatre variables déterminantes, utilisées pour l'évaluation des zones sujettes à l'érosion critique selon le modèle RUSLE, d'autres variables tels que la densité de drainage et l'aspect des pentes rendent le terrain plus vulnérable à l'érosion. Ces facteurs ont été inclus dans la technique AHP, faisant d'elle une des techniques complémentaires fortes intéressantes, avec la possibilité d'impliquer d'autres paramètres contribuant aux risques érosifs. Celle-ci a été construite sur la base des résultats des analyses du test de corrélation de l'impact variables-pertes en sol.

L'utilisation de la technique AHP a permis d'obtenir un indice de cohérence de 0,07, ce qui indique que les facteurs analysés ont une forte cohésion avec le taux du risque érosif. En outre, ces résultats révèlent que les facteurs de l'AHP tels que, LS, C, R, AP, Dd et K présentent un impact sur les pertes en sol avec des valeurs respectives de: 43,3%, 24,4%, 15,2, 8,9%, 5,3%, 3,1 %. De plus, le résultat de la soustraction de la carte résultante de la technique AHP de celle du modèle RUSLE, indique que près de 75 % de la zone d'étude appartient à la même classe de sévérité du risque érosif dans les deux méthodologies.

CONCLUSION GENERALE

A la lumière de ces résultats, l'utilisation de l'approche RUSLE/AHP dans un environnement SIG, présente de nombreux avantages, notamment ceux relatifs au grand nombre de constats. En effet, elle permet de gérer rationnellement une quantité considérable de données quantitatives et qualitatives relatives aux différents facteurs érosifs, de démêler leur interdépendance par les croisements successifs des cartes thématiques et d'établir une carte synthétique du degré d'érosion et de vulnérabilité des différentes zones.

Bien que la validité des pertes en sol soit discutable, cette méthode apporte une aide aux acteurs pour:

- (ii) Planifier des interventions contre l'érosion;
- (iii) Simuler des scénarios d'évolution de la région d'étude en fonction de l'évolution de l'utilisation des terres et des techniques antiérosives préconisées.

L'étude de l'impact des techniques antiérosives sur la production des sédiments dans le bassin de l'oued Kramis a montré des résultats positifs sur la réduction de production des sédiments dans les zones prioritaires. Si ces techniques sont appliquées de manière judicieuse, la proportion des sédiments dans ces zones sera diminuée annuellement de 80 à 18 millions de tonnes. Ainsi, la durée d'exploitation du barrage passerait de 79 ans au quatre siècles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abd El Monsef, H. (2015). New approach for qualitative sediment yield assessment of ungauged drainage basins. *Arab J Geosci.* 8:5561–5577. [Doi :10.1007/s12517-014-1642-1](https://doi.org/10.1007/s12517-014-1642-1).
- Abdelbaki, A., Abdelbaki, C., Ouldache, E., Semmar H. (2009). Mise en place d'un système d'information géographique pour l'élaboration d'un plan d'aménagement de protection anti-érosive. Cas du sous-bassin versant de l'oued Bouguedfine, wilaya de Chlef, Algérie. *Revue Nature et Technologie.* n° 01. Pp: 24 à 32.
- Abdellaoui, B., Merzouk, A., Aberkan, M., Albergel, J. (2002). Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Rev Sci Eau* 15(4):737–748
- Abrahams, A. D., Parsons, A. J. (1991). Resistance to overland flow on desert pavement and its implications for sediment transport modeling, *Water Resour. Res.*, 27(8), 1826–1836.
- Achbun, A., Mansour, M., Layelmam, M., Smiej, M.F. (2013). Etude comparative de la classification orientée objet d'une image spot5 pour la cartographie de l'occupation du sol via eCognition 9. *GEO OBSERVATEUR*, 2011, 13 p.
- Achite, M., Maddi, M. (2004). Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*; 15 (4) : 367-73.
- Achite, M., Ouillon, S. (2007).Suspended sediment transport in a semiarid watershed, river Abd, Algeria (1973–1995).*J hydrol* 343:187–202.
- Achite, M., Touaibia, B., Ouillon, S. (2006).Erosion hydrique en Algérie du Nord: Ampleur, Conséquences & Perspectives. 14th International Soil Conservation Organization Conference. *Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments.*Marrakech, Morocco, May 14-19, (ISCO).
- Ahmadi, S.H., Amin, S., Reza, K.A., Mirzamostafa, N. (2006). Simulating watershed outlet sediment concentration using the ANSWERS model by applying two sediment transport capacity equations.*Biosyst. Eng.* 94 (4), 615–626.
- Aiello, A., Adamo, M., Canora, F. (2015). Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy. *Catena* 131, 174–185. [Doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.003).
- Akay, A.E., Erdas, O., Reis, M., Yuksel, A. (2008). Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques. *Building and Environment*, 43 (5), 687-695.
- Akay, A.E., Sessions, J. (2005). Applying the Decision Support System, TRACER, to Forest Road Design. *Western Journal of Applied Forestry*, 20 (3), 184-191.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aké, G.É., Kouadio, B.H., Adja, M.G., Ettien, J.B., Effebi, K.R., Biémi, J. (2012). Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Volume 6 : Varia. Pp. 1-42.
- Albergel, J., Nasri, S., Boufaroua, M., Droubi, A., Merzouk, A. (2004). Petits barrages et lacs collinaires, aménagements originaux de conservation des eaux et de protection des infrastructures aval : exemples des petits barrages en Afrique du Nord et au Proche-Orient Volume 15, numéro 1.
- Alejandro M. et Omasa, K. (2007). Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 62 (2007) 309–324
- Allain El Mansouri, B. (2001). L'eau et la ville au Maroc, Rabah-Salé et sa périphérie. Editions l'Harmattan. 256 p.
- Al-Zitawi, F. (2006). Using RUSLE in Prediction of Soil Loss for Selected Sites in North and North West of Jordan. MS Thesis, Jordan University of Science and Technology, Irbid.
- Anache, J.A.A., Wendland, E.C, Oliveira, P.T.S., Flanaganb, D.C., Nearing M.A. (2017). Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *Catena* 152, 29–39. [Doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003](https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003).
- Antoni, V., Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Zaidi, N., Laroche, B., Barthès, S., Daroussin, J., Arrouays, D. (2006). Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux, étude et Gestion des Sols, Volume 13, 3, pages 201 à 222.
- Arekhi, S., Niazi, Y., Kalteh, A. M. (2012). Soil erosion and sediment yield modeling using RS and GIS techniques: a case study, Iran. *Arab J Geosci* 5:285–296.
- Arnoldus, H.M.J. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin* 34:39–51.
- Arnoldus, H.M.J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: De Boodt M, Gabriels D (eds) *Assessment of erosion*. Wiley, Chichester, pp 127–132 at a regional scale using GIS. *Ekológia (Bratislava)* 21, 404–422.
- Asselman, N. E. M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *J hydrol* 234:228–248.
- Ayeb, H. (2004). L'Etat égyptien entre menace de crise hydraulique et pauvreté paysanne: les risques d'une gestion libérale de l'eau » *Revue Territoires en Mutation*, n°12, pp 201-221.
- B.N.E.D.E.R. (National Office of Studies for Rural Development) (2004). <http://www.bneder.dz>.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baba Hamed, K. et Bouanani, A. (2016). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques: Cas du bassin versant de la Tafna (Nord-ouest algérien). *Geo-Eco-Trop.*, 40, 4 : 277-286
- Babonneau N., Delacourt C., Cancouët R., Sisavath E., Bachèlery P., Mazuel A., Jorry S.J., Deschamps A., Ammann J. Villeneuve N. (2013). Direct sediment transfer from land to deep-sea: Insights into shallow multibeam bathymetry at La Réunion Island. *Marine Geology* 346 (2013) 47–57
- Bagherzadeh, A., Daneshvar, M.R.M. (2013). Mapping of landslide hazard zonation using GIS at Golestan watershed, northeast of Iran. *Arab J Geosci.*, 6:3377–3388. [Doi. 10.1007/s12517-012-0583-9](https://doi.org/10.1007/s12517-012-0583-9)
- Bagnouls, F., Gaussen, H. (1955). Saison sèche et indice xéothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse* 83: Pp. 193-239.
- Balasubramani, K., Veena, M., Kumaraswamy, K., Saravanabavan, V. (2015). Estimation of soil erosion in a semi-arid watershed of Tamil Nadu (India) using revised universal soil loss equation (rusle) model through GIS.Model. *Earth Syst. Environ.*, 1:10. [Doi 10.1007/s40808-015-0015-4](https://doi.org/10.1007/s40808-015-0015-4).
- Baron, S. (2008). Caractérisation de l'érosion hydrique sur le bassin versant de rouffach (haut-rhin, alsace) et conséquences sur le bassin d'orage associé. Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES. 101 p.
- Bathurst, J.C., O'Connell, P.E. (1992). Future of distributed modelling: The System Hydrologique Europeen. *Hydrological Processes*, Chichester, n°. 6, pp. 265-277.
- Beatriz, S., Ranieri, L., Lier, Q. J., Sparovek, G., & Flanagan, D. C. (2002). Erosion database interface (EDI): A computer program for georeferenced application of erosion prediction models. *Computer & Geoscience*, 28(5), 661–668.
- Belkalem, A. (2017). Evaluation des risques d'érosion hydrique cas du bassin versant de l'Oued Kramis (Algérie). Mémoire de fin d'étude de Master, Gestion conservatoire des eaux, des sols et de l'environnement, université Mostaganem, 68 Pages
- Bencheikha, L., Gueddari, M., Saadaoui, M. (2008). Modélisation des écoulements de surface et du transport solide du bassin versant Jannet (région de Maktar, Tunisie). *Sécheresse* 19(3):155–162.
- Benchettouh, A., Kouri, L., Jebari, S. (2017). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arab J Geosci.*, 10:79. [Doi 10.1007/s12517-017-2875-6](https://doi.org/10.1007/s12517-017-2875-6).
- Benhachem, I. (2017). Approche cartographique des aménagements antiérosifs cas : du bassin versant de l'Oued Kramis (Algérie). Mémoire de fin d'étude de Master, Gestion

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

conservatoire des eaux, des sols et de l'environnement, université Mostaganem, 53 Pages

- Benkadja, R. (2008). Analyse des apports solides en suspension à l'échelle d'un bassin en zone semi-aride : cas du bassin versant du K'sob (M'Sila Algérie). 3rd Int. Conf. on the Geology of the Tethys, South Valley University.
- Benkadja, R., Hattab, A., Mahdaoui, N., Zehar, C. (2013). Assessment of soil losses and siltation of the K'sob hydrological system (semiarid area—East Algeria). *Arab J Geosci* (2013) 6:3959–3968. [Doi 10.1007/s12517-012-0653-z](https://doi.org/10.1007/s12517-012-0653-z).
- Benmansour, M., Duchemin, M., Nouria, A., Gallichand, J. (2006a). Emploi des radioéléments, de la modélisation et des mesures aux champs pour l'étude de l'érosion hydrique en milieu agricole (Maroc-Canada). Rapport (2006), Convention P2-2092RR621. Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), 25 pp.
- Benmansour, M., Ibn Majah, M., Marah, H., Marfak, T., Walling, D.E. (2002). Use of the ^{137}Cs technique in soil erosion in Morocco e case study of the Zitouna basin in the north. In: International Symposium on Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrients, Water and Soil Management. IAEA Publication, pp. 308e315. IAEA e CSP-11/C.
- Benmansour, M., Mabit, L., Nouria A., Moussadek, R. Bouksirate, H., Duchemin, M., Benkdad, A. (2013). Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb . *Journal of Environmental Radioactivity* 115, 97-106. [Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.013).
- Benslimane, A. (2013). Rôle de l'érosion ravinatoire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon. Thèse de Doctorat du Centre International d'études supérieures en Sciences Agronomiques, Montpellier SupAgro. 209 P.
- Bentekhici, N. (2006). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie). Conférence francophone ESRI - 11 et 12 octobre-Issy-les-Moulineaux
- Bergaoui, M., El Faleh, J., Hendaoui, A. (2008). Impact de l'aménagement des terres de culture par les cuvettes individuelles sur l'humidité et la fertilité des sols (Tunisie centrale). In : *Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*, É. Roose, J. Albergel, G. De Noni, A. Laouina et M. Sabir Edit., Édit. Auf-Ird-Enfi, Paris, p. 80-85.
- Bertol, I., Schick, J., Bandeira, D.H., Paz-Ferreiro, J., Vázquez E.V. (2016). Multifractal and joint multifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil. *Geoderma*. [Doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.008](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.008).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bewket, W., Teferi, E. (2009). Assessment of soil erosion hazard and prioritization for treatment at the watershed level: case study in the Chemoga watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Land Degrad Dev.* [Doi:10.1002/ldr.944](https://doi.org/10.1002/ldr.944)
- Bhaskaran, S., Paramananda, S., Ramnarayan, M. (2010). Per-pixel and object-oriented classification methods for mapping urban features using Ikonos satellite data. *Applied Geography* 30, 650–665.
- Boli, B.Z., Roose, E., Bep, A., Ziem, B., Sanon, K., Waechter, F. (1993). Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux : recherche de systèmes de culture intensifs et durables en région soudanienne du Nord-Cameroun (Mbissiri, 1991-1992). In : Spécial érosion: réhabilitation des sols et GCES. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie, 28 (2), 309-325. ISSN 0029-7259
- Boli, Z., Roose, E., Bep, A., Ziem, B., Sanon, K., Waechter, F. (1992). Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux au Nord-Cameroun (Mbissiri). *CahOrstomSérPédol* 1993; 28 : 309-26.
- Bonn, F., Rochon, G. (1992). Précis Télédétection, Volume 1: Principes et méthodes, Presses de l'Université du Québec, Québec, pp. 485.
- Borrelli, P., Panagos, P., Märker, M., Modugno, S., Schütt, B. (2016). Assessment of the impacts of clear-cutting on soil loss by water erosion in Italian forests: First comprehensive monitoring and modelling approach. Catena. [Doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.017](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.017).
- Bou Kheir, R., Girard, M.-C.I., Khawlie, M. et Abadallah, C. (2001). Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique. *Etude et gestion des sols*, volume, 8,4, 2001, Pp. 231-245.
- Bouchetata, A. et Bouchetata, T. (2006). Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique. *Sécheresse*; 17 (3) : 415-24
- Bouguerra, S., Bouanani, A. (2016). Cartographie qualitative de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique: Cas du bassin versant oued Boukiou (nord-ouest de l'Algérie). *Étude et Gestion des Sols*, Volume 23, Pp: 91-100.
- Boukerzaza, H. (1993). Croissance démographique et problème alimentaire en Algérie. L'exemple des céréales. In: *Revue du monde musulman et de la Méditerranée*, n°68-69, 1993. Etats modernes, nationalismes et islamismes. pp. 255-263.
- Boukerzaza, H. (1993). Croissance démographique et problème alimentaire en Algérie: l'exemple des céréales. *REMMM: Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée*, n. 68-69, p. 255-263.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bourabah, M.A. (2011). Valorisation des sediments de dragage du barrage bakhadda. Memoire de Magister en Genie civil, Option : Geotechnique et environneme, Universite Aboubakr Belkaid - Tlemcen – Faculte de Technologie. 129 P.
- Browning, G.M., Parish, C.L., Glass, J.A. (1947). A method for determining the ise and limitation of rotation and consevation practices in control of soil erosion in Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* n° 48, pp. 249-264.
- Burch, G.J., Moore, I.D. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation.*Soil Sci Soc Am J.* 50, 1294–1298.
- CEHQ (2008). Guide pour l'évaluation de la capacité de retenue par bathymétrie, 25 Pages
- C.N.E.S. (2000). Conseil National Economique et Social.
- Cai, T., Li, Q., Yu, M., Lu, G., Cheng, L., Wei, X. (2012). Investigation into the impacts of landuse change on sediment yield characteristics in the upper Huaihe River basin, China. *Phys. Chem. Earth* 53, 1–9.
- Cardona, E.U. (2016). Télédétection et épidémiologie en zone urbaine : de l'extraction de bâtiments `a partir d'images satellite à très haute résolution a l'estimation de taux d'incidence. Géographie. Université de Franche-Comté, 2012. Français. NNT: 2012BESA1015.
- Cerdà, A. (1998). Effect of climate on surface flow along a climatological gradient in Israel.A field rainfall simulation approach. *Journal of Arid Environments* 38, 145-159.
- Charreau, C., Nicou, R. (1971). L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche Ouest Africaine. *Agron Trop*; 26, 9 : 903-78.
- Chen, F., Yang, S., Yin, K., Chan, P. (2017). Challenges to quantitative applications of Landsat observations for the urban thermal environment. *Journal of environmental sciences*.[Doi.org/10.1016/j.jes.2017.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.02.009)
- Cheng, H. D., Jiang, X. H., Wang, J. (2001). Color image segmentation: advances and prospects, *Pattern Recognition* 34:2259-2281.
- Cho, J., Park, S., Im, S. (2008). Evaluation of Agricultural Nonpoint Source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation.*Agric. Water Manag.* 95 (4), 400–408.
- Chowdary, V.M., Kar, S., Adiga, S. (2004). Modelling of non-point source pollution in a watershed using remote sensing and GIS. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 32 (1), 59–73.
- Cook, H.F., Valdes, G.S.B., Lee, H.C. (2006). Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under Zea mays L. *Soil & Tillage Research* 91, 227-235.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cooke, R., Warren, A., Goudie, A. (1993). *Desert Geomorphology*. UCL Press, London, 526 p.
- Cote, M. (1981). *Mutations rurales en Algérie. Le cas des hautes plaines de l'Est*. O.P.U., Alger, 163 p.
- D'Souza, V.P.C., Morgan, R.P.C. (1976). A laboratory study of the effect of slope steepness and curvature on soil erosion. *Agr. Eng. Res*, 21: 21-31.
- Damnati, B., Ibrahim, S., Radakovitch, O. (2004). Utilisation du ¹³⁷Cs pour l'estimation des taux d'érosion dans un bassin versant du nord du Maroc. *Sécheresse* 15 (2), 195-199.
- De Paola, F., Ducci, D., Giugni, M. (2013). Desertification and erosion sensitivity. A case study in southern Italy: the Tusciano River catchment. *Environ. Earth Sci.* 70, 2179–2190.
- De Ploey, J. (1989). *A Soil Erosion Map for Western Europe*. Catena Verlag.
- Demirci A., Karaburun, A. (2012). Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: a case study in the Buyukcekmece Lake watershed, northwest Turkey. *J. Environ Earth Sci.* 66:903–913.
- Dey, V., Zhang, Y., Zhong, M. (2010). A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective, *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS* (Wagner W., Székely, B., eds.), Vienne, pp. 31-42.
- Dhruvanarayana, V.V., Rambabu, (1983). Estimation of soil loss in India. *J Irrig Drain Eng* 109(4):419–433.
- Diallo, D. (1992). *Érosion des sols en zone soudanienne du Sud Mali (BV de Djitiko)*. Thèse doctorat, université de Grenoble I, Géographie physique, 202 p.
- Dimitrios, D. A., Diofantos, G.H., Athos, A. (2013). Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of “Yialias” in Cyprus. *J. Atmos. Res.* 131, 108–124.
- Diodato, N. (2004). Estimating Rusle's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *J. Hydrol Earth Syst Sci.* 8, 103–107.
- Diodato, N. (2005). Geostatistical uncertainty modelling for the environmental hazard assessment during single erosive rainstorm events. *Environ. Monit. Assess.* 105, 25–42.
- Diodato, N., Bellocchi, G. (2010). MedREM, a rainfall erosivity model for the Mediterranean region. *J. Hydrol.* 387, 119–127.
- Doneus, M., Doneus, N., Briese, C., Pregesbauer, M., Gottfried, M., Verhoeven, G. (2012). Airborne Laser Bathymetry – detecting and recording submerged archaeological sites from the air. *Journal of Archaeological Science*, [Doi: 10.1016/j.jas.2012.12.021](https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.021).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Dongerren P V, Plant N., Cohen A., Roelvink D., (2008). Beach Wizard: Nearshore bathymetry estimation through assimilation of model computations and remote observations. *Coastal Engineering* 55, 1016–1027
- Douaoui, A., Hartani, T., Lake, M. (2008). La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff: acquis et perspectives. *Economies d'eau en Systemes Irrigues au Maghreb*. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc. <cirad-00271021>.
- Douaoui, A.E, Nicolas, H., Walter, C. (2006). Detecting salinity hazard within a semi-arid context by means of combining soil and remote – sensing data. *Geoderma*, 134: 217-230.
- Dumas, J. (1964). Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques O.R.S.T.O.M. Tunis, sér. Pédologie, 3, Pp. 307-333.
- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (E.P.F.L.) (2003). Estimation à l'aide de MapInfo de la pluviométrie moyenne interannuelle selon différentes méthodes-Application au bassin versant de la Broye à Payerne (VD, Suisse). Exercice n° HG 0302- Corrigé, 6 p.
- Ecuyer, R. (2003). Application de top model à différents bassins versants. Rapport de stage de recherche préparé au sein du Laboratoire de Mécanismes de Transferts en Géologie (UMR 5563 CNRS-OMP-UPS-IRD), 33 p.
- Ed-Daoudi, S. et Bouloumou, Y. (2012). Hydro morphologie du bassin versant d'Issil et crues de l'oued en amont de Marrakech. Mémoire pour obtenir le titre de Licence Es-Sciences et Technique Eau et environnement. Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.
- El Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Tribak, A., Ab-harour, M. (2008). Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG idrisi au nord-est du Maroc. *Téledétection*, Editions scientifiques GB, 8 (3), pp.193-201.
- El Jihad, M.I. (2010). Les difficultés de gestion des ressources « naturelles » et de développement rural dans un milieu anthropisé : l'expérience du Projet Oued Srou (Maroc central), *Norois*, 3, 216, 25-45.
- El-bouqdaoui, K., Ezzine, H., Zahraoui, M., Rouchdi, M., Badraoui, M. (2006). Evaluation du risque potentiel d'érosion dans le bassin versant de l'oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Secheresse* 17 (3):425–431.
- Emberger, L. (1930). La végétation de la région méditerranéenne: essai d'une classification des groupements végétaux. *Rev. Gen. Bot.* 42: 641-662, Pp. 705-721.
- Emberger, L. (1955). Une classification biogéographique des climats. *Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sci. Serv. Bot. Montpellier.* 7: Pp. 3-43.
- Eslamian, S., Ghasemizadeh, M., Biabanaki, M., Talebizadeh, M. (2010). A principal component regression method for estimating low flow index. *Water Resources Management* 24 (11) ; 2553-2566

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- F.A.O. (2017). Les sols sont en danger, mais la dégradation n'est pas irréversible. Site web: <http://www.fao.org/news/story/fr/item/357221/icode>. Consulté le, 27/01/2017.
- Faleh, A. (2004). Quantification qualitative et quantitative et modélisation mathématique de l'érosion hydrique dans les bassins versant d'Aknoul et Merkat (Prérief central et oriental). Thèse d'Etat, Faculté des Lettres et des Sciences humaines d'Oujda, 372 p.
- Fang, L., Hain, C., Zhan, X., Anderson, M. (2016). An Inter-comparison of Soil Moisture Data Products from Satellite remote sensing and a land surface model International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 48.
- Fernández, C., Vega, José, A. (2016). Evaluation of RUSLE and PESERA models for predicting soil erosion losses in the first year after wildfire in NW Spain. *Geoderma* 273, 64–72. [Doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.016](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.016).
- Fernández, C., Vega, J. A. (2014). Efficacy of bark strands and straw mulching after wildfire in NW Spain: Effects on erosion control and vegetation recovery. *Ecological Engineering* 63, 50-57.
- Fernández, C., Vega, J.A., Jiménez, E., Vieira, D.C.S., Merino, A., Ferreiro, A., Fonturbel, T. (2012). Seeding and mulching + seeding effects on post-fire runoff, soil erosion and species diversity in Galicia (NW Spain). *Land Degrad. Develop.* 23, 150-156.
- Figueiredo, E.E.D.E., Bathurst, J.C. (2007). Runoff and sediment yield predictions in a semiarid region of Brazil using SHETRAN. *IAHS Publ.* 309, 258–266.
- Filippo, O.P., De Bonis, S.G. (2006). Soil erosion prediction at the basin scale using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a catchment of Sicily (southern Italy). *Environ Geol.* 50, 1129–1140.
- Flanders, D., Hall-Beyer, M., Pereverzoff, J. (2003). Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction, *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(4):441–452.
- Foster, G.R. (2004). User's Reference Guide. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). National Sedimentation Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, Washington, DC, USA, p. 418.
- Fu, B.J., Zhao W.W., Chen L.D., Zhang Q.J., Lu Y.H., Gulinck H., Poesen J. (2005). Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the loess plateau of China. *Land Degrad. Dev.* 16, 73–85.
- Furusho, C., Y. (2010). Etude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant périurbain: la Chézine. *Hydrologie.dumas-00473150*.
- G.D.R.E.C. (2008). General Directorate of Reforestation and Erosion Control, <http://www.agm.gov.tr>, visited on January 8th.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ganasri, B.P., Ramesh, H. (2015). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 1-9. [Doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007).
- Gançarski, P., Wemmert, G. (2005). Collaborative multi-strategy classification: application to per-pixel analysis of images. In *Proceedings of the 6th international workshop on Multimedia data mining: mining integrated media and complex data*, Volume 6, pp. 595–608.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Sampériz, P., Moreno, A. (2013). Glacial and fluvial deposits in the aragón valley, central-western pyrenees: chronology of the pyrenean late pleistocene glaciers. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* © Swedish Society for Anthropology and Geography. [Doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x).
- Gay, A., Cerdan, O., Mardhel, V., Desmet, M. (2016). Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *J Soils Sediments*, 16:280–293.
- Gholami, L., Sadeghi, S.H.R., Homae, M. (2013). Straw mulching effect on splash erosion, runoff and sediment yield from eroded plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 268–278.
- Gitas, I.Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos, G.N., Karydas, C.G. (2009). Multi-temporal soil erosion risk assessment in n. Chalkidiki using a modified usle raster model. *EARSeL eProceedings* 8, 1/2009. pp 40-53.
- Gomer, D. (1994). *Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen*. Thèse de Doctorat. Université de Wasserbau (en Allemand) Karlsruhe. Allemagne. 207 p.
- Goor, F. (2005). *L'érosion hydrique des sols dans la région wallonne, les sols et l'environnement terrestre*, <http://environnement.wallonie.be>.
- Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J., Lantier, J.P. (1990). A long-flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surf. Process. Landforms*, 15: 313-328.
- Grauso, S., Diodato, N., Verrubbi, V. (2010). Calibrating a rainfall erosivity assessment model at regional scale in Mediterranean area. *Environ Earth Sci*, 60:1597–1606. [DOI 10.1007/s12665-009-0294-z](https://doi.org/10.1007/s12665-009-0294-z).
- GTZ (1996). *L'aménagement des zones Marneuses dans les bassins-Versants des Montagnes de l'Atlas Tellien Semi-Aride*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- Guijarro, M. et Pajares, G. (2009). On combining classifiers through a fuzzy multi-criteria decision making approach: Applied to natural textured images. *Expert Systems with Application* 39, 7262–7269.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Guindon, B. (1997). Computer-Based aerial image understanding: A review and assessment of its application to planimetric information extraction from very high resolution satellite images, *Canadian Journal of remote Sensing* 23(1):38-47.
- Haan, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C. (1994). *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Academic Press, San Diego, California.
- Hadir, S. (2010). Modélisation du ruissellement et de l'érosion par le modèle STREAM dans le bassin versant de l'Oued Saboun. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II – B.P. 6202 – Instituts, 10101 Rabat. 7p.
- Hajji, O., Abidi, S, Hermassi, T., Habaieb, H., Raouf, M.M. (2015). Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'envasement des lacs collinaires de la Tunisie centrale. *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324 Vol. 10 No. 4, pp. 1251-1266.
- Haregeweyn, N. Tsunekawa, A., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, D.T., Fenta, A.A., Nyssen, J. Adgo, E. (2017). Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. *Science of the Total Environment* 574, 95–108. [Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.019](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.019).
- Haregeweyn, N., Yohannes, F. (2003). Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99 (1), 201–212.
- Hay, G. J., Castilla, G. (2006). Object-based image analysis: strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT), ISPRS 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Salzburg.
- He, Q., Walling, D.E. (1996). Interpreting particle size effects in the adsorption of ¹³⁷Cs and unsupported ²¹⁰Pb by mineral soils and sediments. *J Environ Radioact* 30:117–137.
- He, Q., Walling, D.E. (1997). The distribution of fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes* 48 (5), 677-690.
- Hentati, A., Kawamura, A., Amaguchi, H., Iseri, Y. (2010). Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. *Geomorphology*. Volume 122, Issues 1–2, 1, Pages 56-64. [Doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.013](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.013).
- Herbreteau, V. (2003). Evaluation de la sensibilité à l'érosion des zones viticoles. Influence des pratiques culturales (exemple du Fronsadais). Mémoire ENITA, Bordeaux, 71 p.
- Hereher, M.E., Shehta, E. A., (2017). Lithologic mapping of Aja granitic batholiths, Ha'il, Saudi Arabia, using remote sensing. *Arab J Geosci*, 10:313. [Doi10.1007/s12517-017-3101-2](https://doi.org/10.1007/s12517-017-3101-2).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Heusch, B. (1970). L'érosion de PréRif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du PréRif occidental. *Annales de recherche forestière au Maroc*. Numéro spécial étude sur l'érosion; 12. Rabat, 9- 176 p.
- Heusch, B. (1970). L'érosion du pré-Rif (Maroc). *Ann. Rech Forestières Maroc*, 12 1-176.
- Huisman, N. L. H., Karthikeyan, K. G., Lamba, J., Thompson A. M., Peaslee G.(2013). Quantification of seasonal sediment and phosphorus transport dynamics in an agricultural watershed using radiometric fingerprinting techniques. *J Soils Sediments* (2013) 13:1724–1734.Doi 10.1007/s11368-013-0769-0.
- Imamoglu, A., Dengiz, O. (2016). Determination of soil erosion risk using RUSLE model and soil organic carbon loss in Alaca catchment (Central Black Sea region, Turkey). *Rend. Fis. Acc. Lincei*. Doi: 10.1007/s12210-016-0556-0.
- Jagalingam, P., Akshaya, B.J., Hegde, A. V. (2015). Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Satellite Imagery. 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC). *Procedia Engineering* 116, 560 – 566.
- Jah, M.K., Paudel, R.C. (2010). Erosion Predictions by Empirical Models in a Mountainous Watershed. *Journal of Spatial Hydrology*, vol. 10, n° .1, 14 p.
- Jaiswal, R. K., Ghosh, N. C., Galkate, R. V., Thomas, T. (2015). Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) for watershed Prioritization. *Aquatic Procedia* 4: 1553 – 1560. Doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.201.
- Jebari, S. (2009). Water Erosion Modeling using Fractal Rainfall Disaggregation – A Study in Semiarid Tunisia. PhD Thesis, Rep. 1047, Dept. of Water Resour. Engng., Lund Univ, pp. 1–140.
- Jebari, S., Berndtsson, R., Olsson, J., Bahri, A. (2012). Soil erosion estimation based on rainfall disaggregation. *J. Hydrol.* 436–437, 102–110.
- Jia, J., Yang, N., Zhang, C., Yue, A., Yang, J., Zhu, D. (2013). Object-oriented feature selection of high spatial resolution images using an improved Relief algorithm. *Mathematical and Computer Modelling* 58, 619–626.
- Jianchang, L., Luoping, Z., Yuzhen, Z., Huasheng, H., Hongbing, D. (2008). Validation of an agricultural non-point source (AGNPS) pollution model for a catchment in the Jiulong River watershed, *China. J. Environ. Sci.* 20 (5), 599–606.
- Jiang, C., Yilong, Z., Zongyu, C., Zhenlong, N. (2014). Improving assessment of groundwater sustainability with analytic hierarchy process and information entropy method: a case study of the Hohhot Plain, China. *Environ Earth Sci.* Doi 10.1007/s12665-014-3583-0
- Jordán, A., Zavala L.M., Gil, J. (2010). Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81, 77-85.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- José, L., Garcia, R., Martin, C., Gimenez, S. (2012). Methodology for estimating the topographic factor LS of RUSLE3D and USPED using GIS. *Geomorphology*, 175–176, pp 98–106.
- Kanwar, J.S. (1982). Managing soil resources to meet the challenge to mankind. Presidential address of 12th Int. Congress of Soil Science, New Delhi, India. 8-16 February 1982. Plenary Session paper, pp. 1-32.
- Kassouk, Z., Thouret, J.C., Gupta, A., Solikhin, A., Liew, S.C. (2014). Object-oriented classification of a high-spatial resolution SPOT5 image for mapping geology and landforms of active volcanoes: Semeru case study, Indonesia.
- Keesstra, S., Pereira, P., Novara, A., Brevik, E.C., Azorin-Molina, C., Parras- Alcántara, L., Jordán, A., Cerdà, A. (2016). Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Science of the Total Environment* 551-552, 357-366.
- Kefi, M., Yoshino, K., Setiawan, Y., Zayani, K., Boufaroua, M. (2011). Assessment of the effects of vegetation on soil erosion risk by water: a case of study of the Batta watershed in Tunisia. *Environ Earth Sci.*, 64:707–719. [Doi 10.1007/s12665-010-0891-x](https://doi.org/10.1007/s12665-010-0891-x).
- Khali Issa, L., Ben Hamman, K. L., Raissouni, A., El Arrim, A. (2016). Quantitative Mapping of Soil Erosion Risk Using GIS/USLE Approach at the Kalaya Watershed (North Western Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (8), 2778-2795.
- Khanchoul, K., Altschul, R., Assassi, F. (2012). Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. *Arab J Geosci* 2:257–271.
- Kinnell, P.I.A. (2000). AGNPS-UM: applying the USLE-M within the agricultural non-point source pollution model. *Environmental Modelling and Software* 15, 331–341.
- Kinnell, P.I.A. (2016). A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. *Catena* 145 (2016) 257–265. [Doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.013](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.013).
- Kouli, M., Soupios, P., Vallianatos, F. (2009). Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *J. Environ. Geol.* 57, 483–497.
- Kouri, L. (1993). L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina. Etude des processus et type de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 237 p.
- Kouri, L., Gomer, D. (2010). Analyse des processus de ravinement et détermination de la sensibilité des terrains marneux dans le Tell oranais (Algérie), *Sécheresse*, Volume 21, Numéro 4. Pp:257- 65.
- Laabdi, M. (1979). Production de sédiments et perte en Cléments fertilisants par rosion dans le bassin versant de Tlata. Mé de 3èmec cycle, Institut AV Ha II, Rabat, Maroc: 28 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Lafren, M., et Flanagan, D.C. (2013). The development of U.S. Soil erosion prediction and modeling. *International Soil and Water Conservation Research*, Vol 1, No 2, pp. 1-11.
- Lahloui, H., Hassan, R.H., Hilali, A., Lahssini, S., Loubna, K. L. (2015). Potential Erosion Risk Calculation Using Remote Sensing and GIS in Oued El Maleh Watershed, Morocco. *J. Geographic Information System*, 7, 128-139.
- Lai, R. (1981). Soil erosion problems on alfisols Western Nigeria. *Geoderma*; 25 : 215-30.
- Lal, R. (1995). Erosion-crop productivity relationships for soils of Africa. *Soil Sci Soc Am J* 59(3):661-667.
- Laliberte, A. S., Rango, A., Havstad, K. M., Paris, J. F., Beck, R. F., McNeely, R., Gonzalez, A. L. (2004). Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico, *Remote Sensing of Environment* 93:198-210.
- Lang, S., Jekel, T., Hölbling, D., Schöpfer, E., Prinz, T., Kloyber, E., Blaschke, T. (2006). Where the grass is greener - mapping of urban green structures according to relative importance in the eyes of the citizens, *First Workshop of the EARSeL - Special Interest Group on Urban Remote Sensing*, Berlin.
- Laouina, A. (1990). Recherches actuelles sur les processus d'érosion au Maroc. *Bulletin Réseau Erosion*, 12, p. 292-299.
- Laouina, A. (1992). Recherches actuelles sur l'érosion au Maroc. *Bull Réseau Erosion*; 12 : 292-9.
- Le Bissonnais, Y. (2008). *L'érosion des sols: Processus, résultats expérimentaux, modélisation et cartographie*, 51p.
- Le Bissonnais, Y., Thorette, J. et Daroussin, J. (2002). *L'érosion hydrique des sols en France*, IFEN- INRA, 106 p.
- Lee, J.H., Heo, J.H. (2011). Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *J.Hydrol.* 409, 30-48.
- Legrain, M. (2002). *Dictionnaire encyclopédique*. Ed. Larousse, France, pp.325, 1119, 1253.
- Li, M., Yao, W., Li, Z., Liu, P., Shen, Z. (2010). Effects of landforms on the erosion rate in a small watershed by the ¹³⁷Cs tracing method. *Journal of Environmental Radioactivity* 101 (5), 380-384.
- Lin, C.Y., Lin, W.T., Chou, W.C. (2002). Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil Till. Res.* 68, 143-152.
- Liu, Y., Zheng, F.B. (2017). Object-oriented and multi-scale target classification and recognition based on hierarchical ensemble learning. *Computers and Electrical Engineering*, 1-17. [Doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.12.026](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.12.026).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Lopez, C. (1976). Guia para l'elaboracion d'estudios del medio fisico. Cap XII riesgos derivados de los procesos naturales. Ministerio de medio ambiente. Secretaria general tecnica. pp549-590.
- Ludwing, B., Auzet, A.V., Boiffin, J., King, D., Chadoeuf, J. (1996). Etat de surface, structure hydrographique et érosion en rigole des bassins versants cultivés du Nord de la France. *Revue d'Etude et Gestion des Sols*, Vol. 3, N°1 ; Pp. 53-70.
- Lufafa, A., Tenywa, M.M., Isabirye, M., Majaliwa, M.J.G., Woomeer, P.L. (2003). Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model. *Agricultural Systems* 76, 883–894.
- Mabit, L., Benmansour, M., Walling, D.E. (2008). Comparative advantages and limitations of fallout radionuclides (^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be) to assess soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity* 99 (12), 1799-1807.
- Mahé, G., AlKarkouri, J., Benabdelfadel, H., Bensafia, D., Brou, T., Chaker, M., Chikhaoui, M., Coupleux, S., Crouzevialle, R., Dieulin, C., Emran, A., Ezzaouini, M., Goussot, E., Hallouz, F., Khomsi, K., Laouina, A., Machouri, N., Maleval, V., Meddi, M., Nging, M., Planchon, O., Remini, B., Saadi, H., Sfa, M., Sinan, M., Snoussi, M., Taibi, S., Toumi, S., Tra Bi, A. (2013). Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: *Considering hydrological change in reservoir planning and management* (Schumann, A. *et al.*, Eds.) IAHS Publ. 362, 115-123.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis* (New York: Wiley).
- Markhi, A., Laftouhi, N., Soulaïmani, A., Fnguire, F. (2015). Quantification et evaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un sig application dans le bassin versant N'fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc). *European Scientific Journal*. Edition vol.11, No.29 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
- Marques Da Silva, R., Montenegro, M. G. L., Santos, C. A. G. (2012). Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub- atchments: a case study of Tapacura´ catchment. *Nat Hazards*, 62:953–970. [Doi10.1007/s11069-012-0128-2](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0128-2)
- Martin, A. (2010). Le conflit dans la théorie des fonctions de croyance. In 10ème journées Francophones : Extraction et Gestion des Connaissances.
- Masson, J.M. (1971). L'érosion des sols par l'eau en climat Méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ. Thèse de Docteur-Ingénieur, USTL Montpellier.
- Masson, M. et T. Denœux (2004). Clustering interval-valued proximity data using belief functions. *Pattern Recognition Clustering interval-valued proximity data using belief functions* 25, 163–17

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Masson, M. et T. Dencœux (2011). Ensemble clustering in the belief functions framework. *International Journal of Approximate Reasoning* 52, 92–109
- Mazour, M. et Roose, E. (2002). Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du nord-ouest de l'Algérie *Bull Réseau Erosion*; 21 ·320-30.
- McHenry, J.R. (1968). Use of tracer technique in soil erosion research. *Trans. ASAE* 11 : 619-625.
- Meddi, M. Toumi, S. Assani, A.A. (2016). Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arab J Geosci*, 9:282. [Doi10.1007/s12517-015-2303-8](https://doi.org/10.1007/s12517-015-2303-8)
- Ministère de l'Agriculture, des Forêts et des Villages (1987). General management planning of turkey (soil conservation main plan).
- Ministère des Ressources en Eau (2015). <http://www.algerie360.com/algerie/l'algerie-se-met-hors-de-danger-par-94-barrages-et-des-ressources-hydriques-considerables-apres-le-petrole-restera-l'eau/>
- Moehansyah, H., Shwari, B.L., Armstrong, J. (2004). Field evaluation of selected soil erosion models for catchment Management in Indonesia. *Biosyst. Eng.* 88 (4), 491–506.
- Mohamadi, M.A., Kavian, A. (2015). Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. *International Soil and Water Conservation Research*. 273–281. [Doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.10.001).
- Mohammed, H., Yohannes, F., Zeleke, G. (2004). Validation of agricultural non-point source (AGNPS) pollution model in Kori watershed, SouthWollo, Ethiopia. *Int.J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 6 (2), 97–109.
- Mondal, S., Singh, R.P., Mason, E.R., Huerta-Espino, J., Autrique, E., Joshi, A.K. (2016). Grain yield, adaptation and progress in breeding for early-maturing and heat-tolerant wheat lines in South Asia. *Field Crops Research* Volume 192, Pages 78-85. [Doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.017](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.017).
- Montgomery, D.R. (2007a). *Dirt: The Erosion of Civilizations*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Moraes, J.F.L., Donzeli, P.L., Lombardi, Neto., F., Melo, A.R., Negreiros, I.P. (2000). Land planning for sustainable development in watersheds using Geographical Information System. *Int Arch Photogramm Remote Sens* 33(3):895–900
- Morgan M., Alexis G. (2013). État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. IPAMED (Institut de Prospective Economique du monde Méditerranéen). 27 page

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Morsli, B., Habi, M., Mazour, M., Hamoudi, A., Halitim, A. (2012). Erosion et ruissellement en montagnes méditerranéennes d'Algérie du Nord: analyse des facteurs conditionnels sous pluies naturelles et artificielles. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 1:33-40.
- Moukhchane, M. (1999). Contribution à l'étude de l'érosion hydrique dans le Rif occidental. Applications des méthodes expérimentales du ^{137}Cs et de la susceptibilité magnétique aux bassins versants Nakhla, El Hachef et Smir. Thèse D'état. Université Abdelmalek Essaadi, Tétouan, Maroc: 260 p.
- Mulumba, L.N., Lal, R. (2008). Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 98, 106-111.
- Musgrave, G.W. (1947). The quantitative evaluation of factors in water erosion: A first approximation. *J. Soil Water Conserv.* N°2, pp. 133-138.
- Muto, A., Peters L.E., Gohl K., Sasgen I., Alley R. B., Anandakrishnan S., Riverman K.L. (2016). Subglacial bathymetry and sediment distribution beneath Pine Island Glacier ice shelf modeled using aerogravity and in situ geophysical data: New results. *Earth and Planetary Science Letters* 433 : 63–75
- Mwango, S.B., Msanya, B.M., Mtakwa, P.W., Kimaro, D.N., Deckers, J., Poesen, J. (2016). Effectiveness of mulching under miraba in controlling soil erosion, fertility restoration and crop yield in the Usambara mountains, Tanzania. *Land Degradation & Development* 27: 1266-1275. [DOI: 10.1002/ldr.2332](https://doi.org/10.1002/ldr.2332).
- Neistch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W. (2002). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, U.S. Department of Agriculture Agricultural Research Service, 808 East Blackland Road, Temple, En ligne] URL : [http:// www.brc.tamus.edu/swat](http://www.brc.tamus.edu/swat).
- Nekhay, O., Arriaza, M., Boerboom, L. (2009). Evaluation of soil erosion risk using analytic network process and GIS: a case study from Spanish mountain olive plantations. *J. Environ. Manage.* 90, 3091–3104.
- Obalum, S.E., Buri, M.M., Nwite, J.C., Watanabe Y, Hermansah, Igwe, C.A., Wakatsuki, T. (2012). Soil degradation-induced decline in productivity of sub-Saharan African soils: the prospects of looking downwards the lowlands with the sawah ecotechnology. *Appl Environ Soil Sci.* [Doi:10.1155/2012/673926](https://doi.org/10.1155/2012/673926)
- Ochoa, P.A., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J.I., Ruíz-Sinoga, J.D., Cerdà, A. (2016). Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena* 140, 31–42. [Doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.011).
- Oeurng, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M. (2011). Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *J. Hydrol.* 401 (3), 145–153.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Olivry, J.C. (1984). Mesure et évaluation de l'érosion et des transports solides sur bassins versants des terres noires de la région de PACA. Compte rendu des travaux réalisés·ORSTOM.
- Onyando, J.O., Kisoyan, P., Chemelil, M.C. (2005). Estimation of potential soil erosion for River Perkerra catchment in Kenya. *Water Resour Manag* 19:133–143
- Ouechtati, S., Baldassare, G. (2011). Evaluation du transport solide et de l'envasement dans le bassin versant de Siliana (tunisie): cas des barrages Siliana et Lakhmess. *Bull Eng Geol Environ* 70(4):709–722
- Ozsoy, G., Aksoy, E., Sabri Dirim, M., Tumsavas, Z. (2012). Determination of soil erosion risk in the Mustafakemalpasa River basin, Turkey, using the revised universal soil loss equation, geographic information system, and remote sensing. *J Environ Manag* 50:679–694
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., Montanarella L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy* 48, 38–5. [Doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021).
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Van der Zanden, E. H., Poesen, J., Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environnemental science et policy* 51: 23 – 34. [Doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012).
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Sci. Total Environ.* 479–480, pp 189–200.
- Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C., Billib, M. (2008). Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model. *J. Hydrol.* 348 (3), 305–319.
- Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C., Billib, M., (2009c). Application of the WEPP model for prioritization and evaluation of best management practices in an Indian watershed. *Hydrol. Process.* 23 (21), 2997–3005.
- Pandey, A., Himanshua, S. K., Mishra S.K., Singh, V. P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena* 147: 595–620. [Doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002)
- Pandey, A., Mathur, A., Mishra, S.K., Mal, B.C. (2009). Soil erosion modeling of a Himalayan watershed using RS and GIS. *Environ Earth Sci* (2009) 59:399–410. [DOI 10.1007/s12665-009-0038-0](https://doi.org/10.1007/s12665-009-0038-0)
- Park, S., Oh, C., Jeon S., Jung, H., Choi C. (2011). Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the revised universal soil loss equation [Doi:10.1016/j.jhydrol.2011.01.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.004).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Pascal, D., Olivier C. (2015). Influence de la susceptibilité à l'érosion hydrique des bassins-versants sur l'évolution du rivage: exemples dans le sud de la Nouvelle-Calédonie, pp 269-278.
- Pattanaik, A., Sahu, K., Bhutiayani, M. R. (2015). Estimation of Shallow Water Bathymetry using IRS-Multispectral Imagery of Odisha Coast, India. International conference on water resources, coastal and ocean engineering (ICWRCOE). Aquatic Procedia 4, 173 – 181. [Doi: 10.1016/j.aapro.2015.02.024](https://doi.org/10.1016/j.aapro.2015.02.024)
- Pham, T.T.H., He, D. Ch. (2015). Classification orientée objet d'une image quickbird de la ville de Hanoi (Viêtnam): étude empirique des paramètres de segmentation. Télédétection, Editions scientifiques GB, 2013, 11 (2), pp.287-305.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, K., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267, 1117–1123.
- Platt, R. V., Rapoza, L. (2008). An evaluation of an object-oriented paradigm for land use/land cover classification, *Professional Geographer* 60:87-100.
- Poesen, J., Govers, G. (1990). Gully erosion in the Loam belt of Belgium: typology and control measures. In: J. Boardman, I.D.L. Foster and J.A. Dearing (Editors), *Soil Erosion on Agricultural Land*. Wiley, pp. 513-530.
- Poesen, J.W., Van Wesemael, B., Bunte, K., Benet, A.S. (1998). Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: a case-study from southeast Spain *Geomorphology*, 23 (2–4) (1998), pp. 323-335.
- Pradeep, G. S., Ninu Krishnan, M. V., Vijith, H. (2015). Identification of critical soil erosion prone areas and annual average soil loss in an upland agricultural watershed of Western Ghats, using analytical hierarchy process (AHP) and RUSLE techniques. *Arab J Geosci*. [Doi 10.1007/s12517-014-1460-5](https://doi.org/10.1007/s12517-014-1460-5)
- Pradhan, B., Chaudhari, A., Adinarayana, J., Buchroithner, M.F. (2012). Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia. *Environ Monit Assess*, 184:715–727. [Doi 10.1007/s10661-011-1996-8](https://doi.org/10.1007/s10661-011-1996-8)
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., Geetha, N. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *GEOSCIENCE FRONTIERS* 3(2) 209-215. [Doi:10.1016/j.gsf.2011.11.003](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003).
- Prats, S.A., dos Santons Martins, M.A., Malvar, M.C., Ben-Hur, M., Keizer, J.J. (2014). Polyacrylamide application versus forest residue mulching for reducing post-fire runoff and soil erosion. *Science of the Total Environment* 468, 464-474.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Profea, J., Höflea, B., Hämmerlea, F.M., Steinbacherc, F. (2016). Characterizing tufa barrages in relation to channel bed morphology in a small karstic river by airborne LiDAR topobathymetry. *Proceedings of the Geologists' Association* 127, 664–675. [Doi.org/10.1016/j.pgeola.2016.10.004](https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2016.10.004).
- Prosdocimi, M., Cerdà, A., Tarolli, P. (2016b). Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena* 141, 1-21.
- Prosdocimi, M., Jordán, A., Tarolli, P., Keesstra, S., Novara, A., Cerdà, A. (2016a). The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. *Science of the Total Environment* 547, 323-330.
- Prudent, Y. et Ennaji A. (2004). Clustering incrémental pour un apprentissage distribué : vers un système évolutif et robuste. In *In Conférence CAP, Volume 3287*, pp. 446–453.
- Raclot, D., Albergel, J. (2006). Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment. *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C* 31 (17), 1038–1047.
- Rawat, K.S, Tripathi, V.K, Mishra, A.K. (2013). Sediment yield index mapping and prioritization of Madia subwatershed, Sagar District of Madhya Pradesh (India). *Arab J Geosci*. [Doi:10.1007/s12517-013-1007-1](https://doi.org/10.1007/s12517-013-1007-1)
- Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du nord. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin, pp. 27-46
- Remini, B. (2012). La problématique de l'eau en Algérie du nord. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 27-46.
- Remini, W., Remini, B. (2003). La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 02, Juin 2003, pp. 45-54.
- Remini, B. A., Raclot D. & Evrard O., Sanaa M., Lefèvre I., Ahmadi M., Tounsi M. Rumpel C., Ben Mammou A., Le Bissonnais Y. (2013). Fingerprinting sediment sources in the outlet reservoir of a hilly cultivated catchment in Tunisia. *J Soils Sediments* (2013) 13:801–815. [Doi 10.1007/s11368-012-0642-6](https://doi.org/10.1007/s11368-012-0642-6).
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook No. 703. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC, USA (404 pp.).
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P. (1991). RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil & Water Conservation* 46, 30–33.
- Renard, K.G., Yoder, D.C., Lightle, D.T., Dabney, S.M. (2011). Universal soil loss equation/revised universal soil loss equation. In: Morgan, R.P.C., Nearing, M.A. (Eds.),

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Handbook of Erosion Modeling. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, England, pp. 137–167.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R. (1990). Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *J. Environ. Qual.* 19 : 215-233.
- RIVM (2000). Technical report on soil degradation. RIVM report 481505018, Bilthoven.
- Robichaud, P.R., Lewis, S.A., Wagenbrenner, J.W., Ashmun, L.E., Brown, R.E. (2013a). Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation. Part I: Effectiveness at reducing hillslope erosion rates. *Catena* 105, 75-92.
- Robichaud, P.R., Wagenbrenner, J.W., Lewis, S.A., Ashmun, L.E., Brown, R.E., Wohlgemuth, P.M. (2013b). Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation. Part II: Effectiveness in reducing runoff and sediment yields from small catchments. *Catena* 105, 93-111.
- Robu, E., Giovani, C. (2009). Gamma-ray self-attenuation corrections in environmental samples. *Romanian Reports in Physics* 61 (2), 295-300.
- Römken, M.J.M., (2010). Erosion and sedimentation research in agricultural watersheds in the USA: From past to present and beyond. United States Department of Agriculture.
- Roose, E. (1977). Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest: vingt années de mesures. In *Trav. et Dot. ORSTOM Paris*, no 78; 108 p.
- Roose, E. (1992). Diversité des stratégies de conservation de l'eau et des sols. In Le Floch E., Grouzis M., Cornet A., Bille J.C. éds «L'aridité, une contrainte au développement». Orstom, Montpellier collection Didactiques: 481-506
- Roose, E., Albergel J., De Noni G., Sabir M., Laouina A. (2008). Efficacité de la GCES en milieu semi-aride, AUF, EAC et IRD éditeurs, Paris: 425 p.
- Roose, E., Arabi, M., Brahmia, K., Chebani, R., Mazour, M., Morsli, B. (1993). Recherche sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol.* Vol. 28, 2: 289-307.
- Roose, E., Sabir, M., Arabi, M., Morsli, B., Mazour, M. (2012). Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo.* Volume 6. P. 43-69.
- Roose, E.J. et Lelong, F. (1976). Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Etudes sur petites parcelles expérimentales de sol. *Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique* (2), Vol. xviii, fasc. 4, 365-374, Paris.
- Roose, É. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *FAO Soils Bulletin*, vol. 70, Rome, 420 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S.F., Heidarpour, M., Jalalian, A., Abbaspour, K.C. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrol. Sci. J.* 53 (5), 977–988.
- Rouse, JW, Haas, RH, Schell, JA, Deering, DW and Harlan, JC, (1974). Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Services Sciences*, 1 : 83-98.
- Saaty, T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J Math Psychol* 15(3):234–281. [Doi:10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York
- Sabir, M. (1986). L'érosion hydrique et sa quantification. Mémoire de DEA ressources en eau et aménagement. 183 p.
- Sadeghi, S.H.R., Gholami, L., Homae, M., Khaledi Darvishan, A. (2015a). Reducing sediment concentration and soil loss using organic and inorganic amendments at plot scale. *Soil Earth* 6: 445-455.
- Sadeghi, S.H.R., Sharifi, M. E., Khaledi D. A. (2016). Effects of subsequent rainfall events on runoff and soil erosion components from small plots treated by vinasse. *Catena* 138, 1–12. [Doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.007).
- Sadiki, A. (2004). Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Maroc nord oriental : application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope ¹³⁷Cs et de la susceptibilité magnétique. Thèse Doctorat d'Etat. Université Mohamed Premier, Oujda, 320 p.
- Sadiki, A., Bouhlassa, S., Auajjar, J., Faleh A., Macaire, J.J. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, n°26, p. 69-79.
- Sadiki, A., Faleh, A., Zêzere, J.L. et Mastass, H. (2009). Quantification de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'Oued Sahla Rif central Maroc. *Cahiers géographiques - N°6/2009*. Pp. 59-70.
- Sadiki, A., Mesrar, H., Faleh, A., Chaaouan, J. (2012). Modelisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique: cas du bassin versant de l'oued larbaa, Maroc. *ISSN: 0213-1781, Papeles de Geografía*, 55-56, pp. 179-188.
- Sar, N., Khan, A., Chatterjee, S., Das, A., Mipun, B.S. (2016). Coupling of analytical hierarchy process and frequency ratio based spatial prediction of soil erosion susceptibility in Keleghai river basin, India. *International Soil and Water Conservation Research*. [Doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.09.004](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.09.004)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Sauvage, Ch. (1963). Etages bioclimatiques. Notice et carte au 1 /200 0000 ème. Atlas du Maroc Sect. II. P I. 6b. Comité Géographie Maroc. Rabat.
- Saygın, S.D., Ozcan, A.U., Basaran, M., Timur, O.B., Dolarslan, M., Yılman, F. E. Erpul, G. (2014). The combined RUSLE/SDR approach integrated with GIS and geostatistics to estimate annual sediment flux rates in the semi-arid catchment, Turkey. *Environ Earth Sci* : 71:1605–1618. [Doi 10.1007/s12665-013-2565-y](https://doi.org/10.1007/s12665-013-2565-y)
- Seklaoui, O.O. (2016). Valorisation des sédiments du barrage d'El merdja : sidi abed étude technoéconomique. Thèse de doctorat en génie civil structure et matériaux. Univ. Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algerie). 138 P.
- Setegn, S.G., Srinivasan, R., Dargahi, B., Melesse, A.M. (2009). Spatial delineation of soil erosion vulnerability in the Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrol. Process.* 23 (26), 3738–3750.
- Shiferaw, Y., Alemu, A., Girma, A., Getahun, A., Kassa, A., Gashaw, A., Alemu, A., Teklu, T., Gelaw, B. (2011). Assessment of knowledge, attitude and risk behaviors towards HIV/AIDS and other sexual transmitted infection among preparatory students of Gondar town, north west Ethiopia. 21;4:505. Doi: 10.1186/1756-0500-4-505.
- Shoa, Z.T., Nateghi, S., Nohegar, H., Amiri, F., Pradhan, B. (2013). Sediment yield assessment at basin scale using geospatial technique. *Arab J Geosci.* [Doi:10.1007/s12517-013-1002-6](https://doi.org/10.1007/s12517-013-1002-6)
- Simanton, J.R., Toy, T.J. (1994). The relation between surface rock-fragment cover and semiarid hillslope profile morphology. *Catena* 23, 213– 225.
- Singh, V.P., Frevert, D.K. (2006). *Watershed Models*. Taylor and Fransis, CRC Press, Boca Raton.
- Singh, J., Huerta, Espino, R. Sharma, A.K. Joshi, R.M. (2007). Trethowan High yielding spring bread wheat germplasm for irrigated agro-ecosystems. *Euphytica*, 157, pp. 351-363.
- Smith, D.D. (1941). Interprétation of soil conservation data field use. *Agric. Eng.* N° 22, pp. 173-175.
- Smith, D.D. et Whitt, D.M. (1947). Estimating soil losses from areas of claypan soil. *Soil Sci. Soc. Am.* N°12, pp. 485-490.
- Soti, V. (2003). Apport de la télédétection spatiale à la gestion intégrée du lagon de Saint-Gilles/La Saline à l'île de la Réunion. Un exemple d'application: cartographie et suivi des zones susceptibles à l'érosion des sols entre 1995 et 2002 par intégration de données Spot. Montpellier : SILAT, Mémoire de Master, 39 p.
- Souadi, Y. (2011). L'érosion hydrique au maghreb étude d'un cas: le bassin" versant de l'oued barbara (tunisie septentrionale). Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en géographie. Université du Québec à Montréal. 143 P.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Sougnez, N., Van Wesemael, B., Vanacker, V. (2011). Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *Catena* 84, 1–11.
- Soutter, M., Mermoud, A., Musy, A. (2007). *Ingénierie des eaux et des sols* ». Ecole Polytechnique Fédérale (Suisse).
- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (2011). <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/input>
- Stewart, P. (1969). Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique. *Bull Soc Hist Nat Afri Nord*; 59 : Pp. 23-36.
- Sthiannopkao, S., Takizawa, S., Homewong, J., Wirojanagud, W. (2007). Soil erosion and its impacts on water treatment in the northeastern provinces of Thailand. *Environ Int* 33:706–711
- Storey, J., Basterretxea, I., Salaman, G. (2014). Managing and resisting degeneration in employee-owned businesses: A comparative study of two large retailers in Spain and the United Kingdom. Volume: 21 issues: 5, page (s): 626-644. [Doi.org/10.1177/1350508414537624](https://doi.org/10.1177/1350508414537624).
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology", *Transactions of the American Geophysical Union* 38 (6): 913–920, doi: 10.1029/tr038i006p00913.
- Sung, C. Y. (2012). Evaluating the efficacy of a local tree protection policy using LiDAR remote sensing data, *Landscape and Urban Planning* 104(1):19-25.
- Tanyas, H., Kolat, C., Suzen, M. L. (2015). A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya Dam. *Journal of Hydrology* 528, 584–598
- Taylor, A., Blake, W. H., Miranda, J., Keith-Roach (2014). Estimating Be-7 association with soil particle size fractions for erosion and deposition modelling. *J Soils Sediments*, 14:1886–1893. DOI 10.1007/s11368-014-0955-8
- TECSULT (2006). Etude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'avant-projet détaillé (lots n° 1 à 4) et des bassins versants des barrages en exploitation (lots n° 5 et 6). Phase III. Mesures de protection antiérosive lot n° 5 : Barrages Gargar et S.M. Benaouda. Version définitive, 122 p.
- Thibault, S. (2011). Barycentre d'un réseau fractal, lag-time et temps de concentration. hal.archives-ouvertes.fr/hal-00655526.
- Thornthwaite C. (1946). Approach towards rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38 (1) Pp. 55-94.
- Torri, D., Borselli, L., Guzzetti, F., Calzolari, M.C., Bazzoffi, P., Ungaro, F., Bartolini, D., Salvador, S.M.P. (2006). Italy. In: Boardman, J., Poesen, J. (Eds.), *Soil Erosion in Europe*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom, pp. 245–261.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Touaibia, B. (2000). Erosion-Transport Solide-Envasement de barrage.Cas du bassin versant de l'Oued Mina - Wilaya de Relizane. Thèse de doctorat d'Etat, Institut Nationale Agronomique, Alger, 200 p.
- Touaibia, B., Gomer, D., Aïdaoui, A. et Achite, M. (2001). Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi-aride, de l'Algérie du Nord. *Journal des sciences hydrologiques* 46 (1), Pp. 41-53.
- Touati, B. (2010). Les barrages et la politique hydraulique en Algérie: état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. Thèse de Doctorat d'Etat en Aménagement du Territoire. 384 P.
- Toumi, S. (2013). Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Mina. Thèse de Doctorat Es-Sciences. L'école nationale supérieure d'hydraulique, Algérie, 175 p.
- Truchot, C. (2006). La politique de l'eau en France et ses perspectives d'évolution. Rencontre internationale sur la gestion intégrée des ressources en eau, 18-19 mars 2006, ABHCSM Constantine.
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remotesensing of environment*, 8: 127-150
- Urszula, M.K. et Switek, T. (2009). Combined unsupervised-supervised classification method. In *Proceedings of the 13th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems: Part II, Volume 13*, pp. 861–868
- USDA (United States Department of Agriculture) (1998). Keys to soil taxonomy, 8^{ème} edition.
- USGS (United States Geological Survey) (2014). <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- Valentin C. Fritsch, Planchon O. 1987. Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique de savane. In: « Land developmenl management of acid soils", IBSRAM, Proceeding 4, Bangkok, 67-81
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (2000). Soil Erosion Risk Assessment in Europe. EUR 19044 EN, European Soil Bureau, Space Application Institute. JRC, Ispra, Italy.p. 34.
- Van Remortel, R.D., Hamilton, M.E., Hickey, R.J. (2001). Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography* 30, 27–35.
- Walling, D.E., He, Q., Appleby, P.G. (2002). Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations. In: Zapata, F. (Ed.), *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 111e164 (Chapter 7).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Walling, D.E., Zhang, Y., He, Q. (2011). Models for deriving estimates of erosion and deposition rates from fallout radionuclide (Cesium-137, excess lead-210, and beryllium-7) measurements and the development of userfriendly software for model implementation. In: *Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality*. IAEA-TECDOC-1665, pp. 11-33.
- Wang, G., Hapuarachchi, P., Ishidaira, H., Kiem, A.S., Takeuchi, K. (2009). Estimation of soil erosion and sediment yield during individual rainstorms at catchment scale. *Water Resour Manag* 23:1447–1465
- Wang, G., Wentz, S., Gertner, G.Z., Anderson, A. (2002). Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images. *Int J Remote Sens* 23(18):3649–3667.
- Wang, J., Huang, J., Zhao, X., Wu, P., Horwath, W.R., Li, H., Jing, Z., Chen, X. (2016). Simulated study on effects of ground managements on soil water and available nutrients in jujube orchards. *Land Degradation & Development* 27, 35-42. [Doi: 10.1002/ldr.2334](https://doi.org/10.1002/ldr.2334).
- Wang, X., Shang, S., Yang, W., Clary, C.R., Yang, D. (2010). Simulation of land use–soil interactive effects on water and sediment yields at watershed scale. *Ecol. Eng.* 36 (3), 328–344.
- Wemmert, C., Gañçarski, P. (2002). A multi-view voting method to combine unsupervised classifications. In *Proceedings of the 2nd IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications*, Volume 2, pp. 447–453
- Wilkinson, S. N., Olley, J. M., Furuichi, T., Burton, J., Kinsey-Henderson, A.E. (2015). Sediment source tracing with stratified sampling and weightings based on spatial gradients in soil erosion. *J Soils Sediments*. [Doi 10.1007/s11368-015-1134-2](https://doi.org/10.1007/s11368-015-1134-2)
- Wischmeier, W.H. et Smith, D.D. (1965). Prediction rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: a guide for selection of practices for soil and water conservation. *U.S.D.A. Agric. Handbook*, 282 p.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. *USDA Agriculture Handbook*, vol. 537. GPO, Washington DC.
- Wischmeier W.H., Johnson C.B. et Cross B.V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil and Water Conservation* 26(5): Pp. 189-192.
- Xin, Z., Yu, X., Li, Q., Lu, X.X. (2010). Spatiotemporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956–2008. *Reg. Environ. Change* 11 (1), 149–159.
- Xu, A., Krzyzak, L., Suen, C.Y. (1992). Methods of combining multiple classifiers and their applications to handwriting recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 22, 418–435

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Xu, L., Xu, X., Meng, X. (2012). Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China. *Catena* 100: 74–82. [Doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.012](https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.012).
- Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., Musiak, K. (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes* 17 (14), 2913–2928.
- Yang, Y. H., Yan, B. X., Zhu, H. (2011). Estimating soil erosion in Northeast China using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb. *Pedosphere*. 21(6): 706–711.
- Yjjou, M. (2009). Modélisation de l'érosion hydrique via le SIG et l'équation universelle de perte en sol au niveau du bassin versant d'Oum Er-Rbia, Mémoire de Master en sciences des sols et environnement, Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès, 104p.
- Yjjou, M., Bouabid, R., El Hmaidi, A. and Essahlaoui, A. (2012a). Modélisation de l'érosion hydrique via le SIG et l'équation universelle de perte en sol au niveau du bassin versant d'Oum Er-Rbia, International conference of GIS-Users, Taza GIS-days, Fès, Proceeding Book, 433-435.
- Yjjou, M., Bouabid, R., El Hmaidi, A., Essahlaoui, A., El Abassi, M. (2014). Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*. Volume .3.Issue.8.Pages: 83-91.
- Yuksel, A., Gundogan, R., Akay, A.E. (2008). Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaraş, Turkey. *Sensors*, 8, 4851-4865; [Doi: 10.3390/s8084851](https://doi.org/10.3390/s8084851)
- Zabaleta, A., Meaurio, M., Ruiz, E., Antigüedad, I. (2014). Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, northern Spain. *J. Environ. Qual.* 43 (1), 235–245
- Zare, M., Panagopoulos, T., Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy* 67, 558–572. doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.028
- Zhang, H., Yang, Q., Li, R. Liu, Q., Moore, D., He, P. Ritsema, C. J., Geissen, V. (2013). Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences* 52, 177–188.
- Zhang, S., Fana, W., Li, Y., Yi, Y. (2017). The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Science of the Total Environment* 574: 34–45. [Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.024](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.024).
- Zhang, S., Liu, Y., Wang, T. (2014). Howland use change contributes to reducing soil erosion in the Jialing River basin, China. *Agric. Water Manag.* 133, 65–73.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Zhang, W., Zhou, J., Feng, G., Weindorf, D. C., Hu, G., Sheng, J. (2015). Characteristics of water erosion and conservation practice in arid regions of central Asia: Xinjiang province, China as an example. *International soil and water conservation research*.2095-6339, 30061-7. [Doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.06.002)
- Zhang, Y. J.(2006). Chapter 1: An overview of image and video segmentation in the last 40 years, in *Advances in image and video segmentation*. IRM Press, Hershey, PA, pp. 1-15.
- Zhang, Y.J. (1997). Evaluation and comparison of different segmentation algorithms, *Pattern Recognition Letters* 18:963-974.
- Zhao, G., Klik, A., Mu, X., Wang, F., Gao, P., Sun, W. (2015). Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China. *Geomorphology* 241, 343–352. [Doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.020](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.020)
- Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., Nieminen, J. (2008).Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena* 75: 319–325.[Doi:10.1016/j.catena.2008.07.010](https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010).
- Zhou, W., Troy, A. (2008). An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level, *International Journal of Remote Sensing* 11(10):3119-3135.
- Zingg, A. W. (1940). Degree and length of land slop as it affects soil loss in runoff. *Agric. Eng.*, N°21, pp. 59-64.
- Zouagui, A., Benmansour, M., Amenzou, N., Nouira, A. Sabir, Benjelloun, M.H., Marah H., Benkadad, A. (2012).Application de la technique de ^{137}Cs à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Moulay Bouchta, Rif occidental, Maroc. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 1:53-58
- Zupanc, V., Mabit, L. (2010). Nuclear techniques support to assess erosion and sedimentation process: a preliminary step in investigating the use of ^{137}Cs as soil tracer in Slovenia. *Dela* 33, 21-36.

VALORISATION DE LA THESE

COMMUNICATIONS INTERNATIONALES

- [1] **BENCHETTOUH A., KOURI L.** (2012) Etude des risques d'érosion hydrique du sol au moyen du système d'information géographique (SIG) cas de la zone marneuse du bassin versant de l'oued Mina Algérie. Séminaire International sur le thème: Erosion éolienne et lutte contre l'ensablement du 12 et 13 Novembre. Université Amar Thélidji Laghouat.
- [2] **BENCHETTOUH A. JEBARI S., KOURI L.** (2018) Soil erosion risk mapping using RUSLE/AHP technique in the watershed of wadi Kramis, western region of Algeria : 3rd International Conference on Integrated Environmental Management for Sustainable Development. May 02 – 05, 2018 Sousse – Tunisia.
- [3] **BENCHETTOUH A. JEBARI S., KOURI L., MAAMAR KOUADRI K.** (2018). Spatial assesement of soil risk mapping using RUSLE/AHP and SIG techniques case : western Algeria region. Colloque international sur la vulnérabilité des sols Méditerranéens à l'érosion hydrique : l'Etat des connaissances et mesures d'adaptation face au changement global, le 20.11.2018, IAV Hassane II, Maroc.
- [4] **KOURI L., BENCHETTOUH A. MAAMAR KOUADRI K., NEGGAZ F.Z.** (2018). Cartographie des risques d'érosion hydrique dans les zones marneuses du Tell oranais. Colloque international sur la vulnérabilité des sols Méditerranéens à l'érosion hydrique : l'Etat des connaissances et mesures d'adaptation face au changement global, le 20.11.2018, IAV Hassane II, Maroc.
- [5] **MAAMAR KOUADRI K., KOURI L., BENCHETTOUH A., NEGGAZ F.Z.** (2018). Quelques facteurs de dégradation des sols sur l'érosion hydrique dans le Tell oranais (Algérie). Colloque international sur la vulnérabilité des sols Méditerranéens à l'érosion hydrique : l'Etat des connaissances et mesures d'adaptation face au changement global, le 20.11.2018, IAV Hassane II, Maroc.
- [6] **BENCHETTOUH A., KOURI L., JEBARI S., MAAMAR KOUADRI K.** (2018). Soil erosion risk mapping using RUSLE/AHP approach in semi-arid regions using the RUSLE / AHP in GIS environment, case of western region of algeria. The 4th International Conference on Agriculture, Food Security and Biotechnology November 12 – 13, 2018, Rabat, Kingdom of Morocco.
- [7] **OUSMANA H., ELHMAIDI A., ESSAHLAOUI A., ELOUALI A., BENCHETTOUH A., BOUFALA M.** (2018). Prediction and moddiling soil water erosion risk using RSULE approach, RS, and SIG techniques : A case study og oued Zgane Watershed middel Atlas, Morocco. La 4^{eme} edition du colloque intenational des utilisateurs des SIG sous le thème : SIG au service du développement Territorial (4th SIG-USERS- 2018), du 20 au 21 Décembre 2018 à Meknès (Maroc).

- [8] **K. M. KOUADRI, L. KOURI, A. MIHOUBI, Y. CHEBOUTI, A. BENCHETTOUH. (2018).** Application de l'approche Télédétection/SIG/USLE pour étudier l'érosion hydrique au niveau d'un bassin versant à l'échelle du Tell oranais (Algérie). La 4^{ème} édition du colloque international des utilisateurs des SIG sous le thème : SIG au service du développement Territorial (4th SIG-USERS- 2018), du 20 au 21 Décembre 2018 à Meknès (Maroc).

COMMUNICATIONS NATIONALES

- [1] **NEGGAZ, F.Z.; KOURI, L., BENCHETTOUH, A. ET KOUADRI KADDOUR, M. (2012)** Application du modèle RUSLE et du Système Information Géographique SIG pour l'évaluation de sensibilité des sols à l'érosion hydrique cas de la zone marneuse du bassin versant de l'oued Mina.. Séminaire National sur le thème : III^{ème} Journées Scientifiques de la Faculté de la Nature et de la Vie 11 et 12 Avril. Université d'Abdel Hamid Ibn Badis- Mostaganem.
- [2] **KOUADRI KADDOUR, M., KOURI, L, NEGGAZ, F.Z.; KOURI, L. ET BENCHETTOUH, A.** (2012) Cartographie des risques d'érosion hydrique dans le Tell Oranais : III^{ème} Journées Scientifiques de la Faculté de la Nature et de la Vie 11 et 12 Avril 2012. Université d'Abdel Hamid Ibn Badis- Mostaganem.
- [3] **BENCHETTOUH, A.; KOURI, L.** Etude des risques d'érosion hydrique du sol au moyen du système d'information géographique (SIG) cas de la zone marneuse du bassin versant de l'oued Mina Algérie. Séminaire National sur le thème : IV^{ème} Journées Scientifiques de la Faculté de la Nature et de la Vie 09 et 10 Avril 2013. Université d'Abdel Hamid Ben Badis- Mostaganem.
- [4] **KOUADRI KADDOUR, M., KOURI, L, NEGGAZ, F.Z.; KOURI, L. ET BENCHETTOUH, A.** Cartographie des risques d'érosion hydrique dans le Tell Oranais. Séminaire National sur le thème: IV^{ème} Journées Scientifiques de la Faculté de la Nature et de la Vie 09 et 10 Avril 2013. Université d'Abdel Hamid Ibn Badis- Mostaganem.
- [5] **BENCHETTOUH, A., JEBARI S., KOURI, L. MAAMAR KOUADRI K., (2018)** Soil erosion risk mapping using RUSLE/SIG technique and conservation practices suggested, case : wasteren region of algeria. La premiere journée nationale agropastorale, le 19 Décembre 2018, Université Ziane Achour Djelfa (Algerie).