



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : SCIENCES

DEPARTEMENT : BIOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Bouhali Hamza

Kaddouri Mebarka

DOMAINE : Sciences de la Nature et de la Vie

FILIERE : Ecologie et Environnement

OPTION : Ecologie Végétale Steppes et Oasis

Thème

Identification des zones à risque d'érosion hydrique au moyen du modèle *RUSLE* cas du bassin versant de l'oued Kramis, région de Mostaganem

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Soufi Ibtisam	MAA	Présidente
Rouighi Taher	MAA	Examinateur
Benchettouh Ahmed	MAA	Encadreur
Bounab Souhila	DOCTORANTE	Co-encadreur

Promotion : septembre - 2017

(Bouhali, Kaddouri).

Identification des zones à risque d'érosion hydrique au moyen du modèle *RUSLE* cas de l'oued Kramis, région de Mostaganem

Résumé

L'érosion hydrique est un phénomène complexe et largement répandu dans les régions semi-arides. Elle représente une grave menace tant pour les ressources naturelles (eau et sol) que pour les activités anthropiques. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail de recherche consiste à évaluer et cartographier l'érosion hydrique en utilisant l'approche *RUSLE/SIG*, le bassin versant de l'Oued Kramis région ouest d'Algérie. Ce bassin versant est caractérisé par une grande irrégularité dans les précipitations, une forte pente, une lithologie essentiellement marneuse et une couverture végétale très faible ce qui le rend très vulnérable à l'érosion. Le modèle *RUSLE* est la combinaison de cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisés pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. L'intégration des cartes thématiques des facteurs du modèle *RUSLE* dans le SIG, permet de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, une perte totale annuelle de 82 327 022,1 tonnes et une perte moyenne en sol de 27,3 t/ha/an. de classer par importance relative les zones pourvoyeuses des sédiments, et de quantifier les pertes en sol dans le bassin versant. Ainsi, pour parvenir à un équilibre écologique plus ou moins acceptable, il faut entreprendre les travaux d'aménagement antiérosifs consistant ou combinées des mesures techniques (correction des ravines), biologiques (reboisement).

Mots clés : Oued Kramis, Erosion hydrique, Evaluation, *RUSLE*, SIG.

تحديد المناطق المعرضة لخطر تآكل التربة بفعل المياه باستخدام نموذج *RUSLE* في واد كراميس منطقة مستغانم.

ملخص

يعد تآكل التربة بفعل المياه ظاهرة معقدة و واسعة الانتشار في المناطق شبه الجافة. وهو يمثل تهديدا خطيرا لكل من الموارد الطبيعية (المياه و التربة) و الأنشطة البشرية. و في هذا السياق، الهدف من هذا البحث رسم وتقييم خريطة تآكل التربة بفعل المياه باستخدام نموذج (*SIG/RUSLE*) في الحوض المائي في منطقة واد كراميس غرب الجزائر. ويتميز هذا الحوض المائي بعدم انتظام كبير في هطول الأمطار و منحدراته الحادة و التربة الطينية وقلت الغطاء النباتي مما يجعلها أكثر عرضة للتآكل بفعل المياه. نموذج *RUSLE* هو مزيج من خمسة عوامل التي تتحكم في تآكل المياه قد استخدمت بيانات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية لتقييم كل عامل من هذه العوامل على حدى ثم تم دمجهم في نظام المعلومات الجغرافية (*SIG*) يسمح بتحديد تأثير كل عامل في انجراف التربة، إجمالي الخسائر السنوية 82327022,1 طن و متوسط الخسائر 27.3 طن/هكتار/السنة، لتصنيفها حسب الأهمية النسبية للمناطق التي توفر الرواسب وكذلك لتحديد حجم خسارة التربة للمنطقة التي تم التحقيق فيها. وبالتالي لتحقيق توازن بيئي مقبول نوعا ما علينا أن ننفذ عمليات مضادة للتآكل في التركيب الذي توفره التقنية (تصحيح اتجاه السيول) البيولوجية (إعادة التشجير).

الكلمات المفتاحية: واد الكراميس، تقييم، الانجراف، *RUSLE*، *SIG*.

Identification of areas at risk of water erosion using the *RUSLE* model of the Wadi Kramis of the region Mostaganeme.

ABSTRACT

Water erosion is a complex and a largely wide spread phenomenon in the semi-arid regions. It represents a serious threat to both natural resources (water and soil) and human activities. In this context, the objective of this research, depends on the implementation of the *RUSLE/GIS* approach in order to map and assess water erosion using the *RUSLE/GIS* approach in the Wadi Kramis western region of Algeria. This watershed is characterized by a great irregularity in rainfall which is mainly generated during storm events. The region is also known for its steep slopes, a mainly lithology and a very low vegetation cover, which makes it more exposed and vulnerable to erosion. The *RUSLE* model is the combination of five factors that control water erosion. Data from multi-temporal remote sensing analysis and GIS are used to individually assess and map each factor. The integration of thematic maps for the *RUSLE* factors in the *GIS* is used to identify the impact of each factor on soil loss, annual total losses 82 327 022.1t the medium losses 27.3 t/ha/year as well as to rank the relative importance sediment-providing areas, and further to quantify the soil loss for the investigated region. Thus to achieve a more or less acceptable ecological balance, we have to undertake antierosive operations in the installation offered by technical (gullies correction) biological (reafforesting).

Keys words: Wadi Kramis, Water Erosion, Evaluation, *RUSLE*, *SIG*.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH EL KARIM et le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qui nous a donné durant toutes les années d'études.

*Recevez ici nos sincères remerciements pour la confiance, les conseils que vous nous avez accordés tout le long de ce travail. Merci pour votre encadrement, votre disponibilité et votre gentillesse monsieur **BENCHETTOUH AHMED**.*

Nous tenons à remercier mes dames et messieurs les membres de jury l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

*Nous remercions également Melle **BOUNAB SOUHILA***

Trouver ici l'expression de nos gratitude pour nous avoir accueillies au sein de vos laboratoires. Soyez assurées de nos profonds respects et de nos vives reconnaissances pour nous avoir fait bénéficier de vos expériences et de vos rigueurs scientifiques et professionnelles.

Nous remercions aussi les ingénieurs de laboratoire de pédologie (Département des sciences agronomiques, université Med Boudiaf, M'sila)

Nous profitons aussi de cet occasion pour adresser nos remerciements à nos parents pour leur sacrifices et à toutes les familles qui nous ont toujours encouragé et soutenu tout au long des années d'étude. Nous remercions en fin tous ceux qui n'ont pas été cités dans ces quelques lignes et qui ont contribué de près ou de loin par leur aide au bon déroulement de ce travail.

SOMMAIRE

Remerciement I

Sommaire II

Liste des tableaux V

Liste des figures VI

Liste des abréviations VII

Introduction générale1

Partie 1 Synthèses bibliographique sur l'érosion hydrique

Chapitre 1 : Concept et quantification de l'érosion hydrique

1.1 Introduction.....	3
1.2. Les facteurs de l'érosion hydrique dans le modèle <i>RUSLE</i>	3
1.2.1. Le climat.....	3
1.2.2. La lithologie.....	4
1.2.3. La topographie.....	5
1.2.4. Le couvert végétal.....	7
1.2.5. Techniques de Conservation de l'Eau et des Sols.....	8
1.3. Conséquences de l'érosion hydrique.....	10
1.4. Les forme de l'érosion hydrique.....	12
1.5. L'érosion hydrique processus et évaluation.....	12
1.5.1. Méthodes d'évaluation qualitative.....	13
a. Méthode de hiérarchisation.....	13
b. Cartes géomorphologiques.....	14
c. Simulation de pluie.....	15
1.5.2. Méthodes d'étude de l'aléa érosif dans le bassin versant Oued Kramis.....	15
1.5.2.1 Techniques de mesure au niveau du bassin versant.....	15
a. Parcelles expérimentales.....	15
b. Les mesures par repères.....	17
c. Techniques de traçage des sources des sédiments.....	17
1.5.2.2 Techniques de mesure au niveau de l'oued.....	18
a. Bathymétrie.....	19
b. Turbidimétrie.....	19
1.6 Conclusion.....	21

Chapitre 2 : Cadre physique de milieu d'étude

2.1 Introduction.....	22
2.2 Contexte géographique de la région d'étude.....	22
2.3 Les outils de délimitation du bassin versant.....	25
2.4 Paramètres physiographiques du bassin versant.....	26
2.4.1 Caractères physiographiques	26
2.4.2 Exposition des reliefs	27

2.4.3 Profil topographique du bassin versant	29
2.4.4 Hypsométrie de la zone d'étude	29
a. Les courbes de niveaux.....	29
b. Carte et courbe hypsométrique de la zone d'étude.....	30
2.4.5 Réseau hydrographique et localisation des ravinements.....	31
2.5 Paramètres climatiques.....	31
2.5.1 Les données utilisées.....	32
2.5.2 Caractéristiques des stations pluviométriques.....	32
2.5.3 Fiabilité des données climatiques utilisées (précipitations et températures).....	33
2.5.4 La station de référence.....	34
2.5.5 Pluies.....	35
2.5.6 Températures.....	37
2.5.7 Synthèse bioclimatique.....	38
a. Données climatiques mensuelles de la station de référence.....	38
b. Etage bioclimatique de la région d'étude.....	40
c. L'Indice d'érosivité des pluies de Desfontaines modifié (1968).....	41
2.6 Analyses socio-économiques.....	42
2.6.1 La population rurale du bassin versant de l'oued Kramis.....	43
2.6.2 Evolution de population rurale du secteur d'étude entre 1998 et 2016.....	43
2.6.3 Quelle relation y a-t-il entre l'érosion hydrique et la densité de population?.....	45
2.6 Conclusion.....	45

Partie 2 Matériel et méthode

Chapitre 3 : Méthodes d'études de l'aléa érosif dans le bassin versant de l'oued Kramis

3.1 Introduction.....	46
3.2 Généralités sur le modèle <i>USLE</i> et sa version révisée <i>RUSLE</i>	46
3.3 Le principe du modèle de <i>RUSLE</i>	47
3.4 Utilisation de <i>RUSLE</i> et ses objectifs dans le monde.....	48
3.5 Les facteurs du modèle <i>RUSLE</i>	49
3.5.1 Facteur de l'agressivité climatique R.....	49
3.5.2 L'érodibilité du sol K.....	50
3.5.3 La topographie LS.....	50
3.5.4 Le couvert végétal C.....	51
3.5.5 Les techniques antiérosives P.....	52
3.6 Conclusion.....	53

Partie 3 Résultat et discussions

Chapitre 4 : Évaluation pertes en sol par *RUSLE* et déposition intégrée dans le SIG

4.1 Introduction.....	54
4.2 Démarches d'estimation des pertes de sol au moyen de modèle <i>RUSLE</i>	55
4.2.1 L'érosivité des pluies: Facteur R.....	55
4.2.2 L'érodibilité du sol : Facteur K.....	58
4.2.3 La topographie : Facteur LS.....	60
4.2.4 L'occupation du sol : Facteur C.....	62
4.2.5 Les techniques antiérosives, Le facteur P.....	63
4.3 Résultats de la quantification des pertes en sol par le modèle <i>RUSLE</i>	63
4.4 Répartition des pertes en sol par rapport au seuil de tolérance.....	65

4.5 Répartition des pertes en sol par rapport à la moyenne.....	68
4.6 Comparaison avec les pertes en sols enregistrées dans d'autres bassins versants similaires à notre région d'étude.....	69
4.7 Les trois catégories de pertes en sol des régions traitées en priorité	70
4.8 Plan d'aménagement de protection.....	72
4.9 Conclusion.....	73
Conclusion générale	74
Références bibliographiques.....	76
Les annexes	
Annexe 1.....	92
Annexe 2.....	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques physiographiques du bassin versant de l'oued Kramis..	24
Tableau 2	Caractéristiques techniques du barrage de l'oued Kramis.....	27
Tableau 3	Les Surfaces des orientations des reliefs.....	28
Tableau 4	Caractéristiques des stations pluviométriques.....	32
Tableau 5	Pluviométrie moyenne interannuelle de la zone d'étude (1994-2016)....	34
Tableau 6	Les valeurs du coefficient d'abattement (Ki) (1994 - 2016).....	36
Tableau 7	Les températures moyennes et les précipitations mensuelles de la station de Sidi Mhamed Benali (1994 - 2016).....	38
Tableau 8	L'indice bioclimatique d'Emberger,L. (l'après Stewart, 1969).....	40
Tableau 9	L'indice de Desfontaines modifié (station de Sidi Mhamed Benali: 1994 - 2016).....	41
Tableau10	L'évolution de la population rurale du bassin versant de l'oued Kramis entre 1998 et 2016.....	43
Tableau11	Les valeurs de R prédictif avec les erreurs standardisées.....	56
Tableau12	Facteur K et caractéristiques analytiques des affleurements du bassin versant de l'oued Kramis.....	59
Tableau13	Distribution des valeurs du facteur K dans le bassin versant de l'oued Kramis.....	60
Tableau14	Distribution des valeurs du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Kramis.....	61
Tableau15	Répartition des classes des pertes de sol dans le bassin versant de l'oued Kramis.....	67
Tableau16	Taux moyen des pertes en sol calculé au moyen de <i>RUSLE</i> dans quelques bassins versants avoisinants et similaires au bassin versant de l'oued Kramis.....	69
Tableau17	Les pertes en sol par l'érosion spécifique dans quelques bassins versants du nord algérois.....	70
Tableau18	Les catégories de classification des pertes en sol et leurs surfaces.....	70
Tableau19	Coordonnées d'implantation des retenues collinaires et de l'ouvrage de capture de sédiments dans les oueds.....	73
Tableau20	Les classes de pente de la zone d'étude.....	92
Tableau21	La superficie des forêts existe.....	93

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Parcelles expérimentales et la station des mesures au niveau du bassin versant.....	16
Figure 2	La localisation géographique de la zone d'étude.....	23
Figure 3	Carte d'exposition des versants.....	28
Figure 4	Profil du cours d'eau principal du bassin versant de l'oued Kramis....	29
Figure 5	Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Kramis.....	29
Figure 6	Courbe hypsométrique de l'oued Kramis.....	30
Figure 7	Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Kramis.....	31
Figure 8	Surfaces d'influence des stations pluviométriques déterminées selon la méthode de Thiessen.....	33
Figure 9	Répartition spatiale de précipitations moyennes annuelles sur la zone d'étude.....	35
Figure 10	Quantité de précipitations (mm) en fonction des altitudes maximales (mètre).....	36
Figure 11	Répartition spatiale des températures moyennes annuelles sur la zone d'étude.....	37
Figure 12	Relation entre les températures moyennes annuelles (en °C) et l'altitude maximale des reliefs (en mètre).....	37
Figure 13	Diagramme Ombrothermique (station de Sidi M'hamed Benali (1994 – 2016).....	39
Figure 14	Climagramme d'Emberger de la station de Sidi M'hamed Benali (1994/2016).....	40
Figure 15	Évolution de la densité de population rurale entre 1998 et 2016.....	44
Figure 16	Organigramme méthodologique de l'intégration du modèle <i>RUSLE</i> dans le SIG.....	48
Figure 17	L'érosivité de pluie R dans la zone d'étude.....	57
Figure 18	Carte d'érodibilité du sol de la zone d'étude.....	60
Figure 19	Carte de la topographie LS de la zone d'étude.....	61
Figure 20	Les valeurs de <i>NDVI</i> de la zone d'étude d'une image satellite acquise le 05/05/2014.....	62
Figure 21	Les valeurs de C de la zone d'étude d'une image satellite acquise le 05/05/2014.....	63
Figure 22	Carte des pertes en sols du bassin versant de l'oued Kramis.....	64
Figure 23	Distribution des pertes en sol en fonction de surface par classe dans le bassin versant de l'oued Kramis.....	68
Figure 24	Distribution des pertes en sol par rapport à la moyenne.....	68
Figure 25	Les catégories de classification des pertes en sol.....	71
Figure 26	Analyse géostatistique des paramètres appliquant un contrôle de validation croisée sur le R-facteur estimé.....	92
Figure 27	Résultats de la validation croisée des données de précipitations annuelles par la méthode <i>Kriging/CoKriging</i>	92
Figure 28	Résultats de la validation croisée de températures moyennes annuelles par la méthode <i>Kriging/CoKriging</i>	93

LISTE DES ABREVIATIONS

ABREVIATIONS	SIGNIFICATIONS
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
ANBT	Agence nationale des Barrages et Transfère
AGNPS	Agricultural Non-Point Source
°C	Degré Celsius
Cm	Centimètre
DSA	Direction des Services Agricoles
<i>ETM+</i>	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus.</i>
<i>FAO</i>	<i>Food and Agriculture Organization</i>
h	Heure
ha	Hectare
Ham	Hauteur de pluie annuelle moyenne.
Mj	Mégajoules
m	Mètre
mm	millimètres
Mm3	Millions mètres cubes.
MNT	Modèle Numérique de Terrain.
MRE	Ministère des ressources en eaux
MADR	Ministère de l'Agriculture, et du Développement Rural
NDVI	Indice de Végétation Différence Normalisée
NFI	Indice Fournier Modifié
<i>NU</i>	<i>Nation Unies</i>
I ₃₀	Intensité maximale des pluies en 30 m
<i>RMS</i>	<i>Root Mean Square</i>
R _{am}	Agressivité annuelle moyenne
<i>RUSLE</i>	<i>Revised Universal soil loss equation</i>
SAT	Surface Agricole Totale
SAU	Surface Agricole Utile.
SHE	Système Hydrologique Européen
SIG	Système d'Information Géographique
SDR	Sédiments Distribution Ration
SYI	Sédiment Yield Index
<i>SWAT</i>	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
t	tonnes.
<i>TM</i>	<i>Thematic Mapper</i>
<i>UTM</i>	<i>Universal Transverse Mercator.</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'érosion résulte de la dégradation des couches superficielles de la couverture pédologique et du déplacement des matériaux la constituent. Elle résulte du détachement, sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, et, du transport des particules du sol de leur emplacement initial par l'eau (Antoni et *al.*, 2006). Ce phénomène dégrade la qualité des eaux, la fertilité des sols et réduit la capacité des réservoirs (Toumi, 2013). Toute perte du sol supérieure à 1 t / ha / an est considérée comme irréversible dans un laps de temps de 50 à 100 ans (Kouli et *al.*, 2009). Lorsque le montant de la perte en sol est examiné à travers le monde, on voit que de nombreux pays ont souffert de l'érosion des sols. Environ 90 % des terres cultivées aux États-Unis connaissent le phénomène des pertes en sol. Cette perte est estimée entre 5 et 12 t / ha / an (Pimentel et *al.*, 1995), tandis que la perte en sol moyenne mondiale des terres agricoles est de 6 t/ha/an (Wilkinson et McElroy, 2007). La zone méditerranéenne a la réputation d'être sujette à des risques érosifs très élevés (José et *al.* 2012). Au Maghreb, les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées (Jebari et *al.*, 2012).

En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active. L'érosion spécifique varie entre 20 et 40 t/ha/an (Morsli et *al.*, 2012). En outre, l'Algérie est un pays qui connaît un énorme déficit hydrique. Pour pallier à ce problème, l'Etat a mené une politique de grande hydraulique consistant en la création d'infrastructures telles que les barrages. Cependant, les ouvrages hydrauliques localisés dans le nord de l'Algérie (au nombre de 30 barrages), s'ensavent à un rythme rapide (MREE, 2015). Le potentiel hydraulique perd annuellement 30 millions de m³. La quantité de sédiments déposée dans les 75 barrages que détient l'Algérie est estimée à 650.10⁶ m³, soit un taux de comblement de 14,5 % en 2000 (Kouri et Gomer, 2010).

Dans la partie nord-ouest du pays, en particulier la région du Tell oranais, nous observons que le taux de sédimentation a évolué ces dernières années (Kouri et Gomer, 2010). Cette évolution est due au processus de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants où l'érosion touche environ 47 % de l'ensemble des terres. Dans ces régions montagneuses, l'érosion hydrique est un problème majeur. Son intensité varie d'une zone à l'autre, 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).

L'approche «*RUSLE/SIG*» adoptée pour ce travail considère le modèle de Wischmeier (*RUSLE: Revised Universal soil loss equation*) et l'outil cartographique SIG. Elle permet d'évaluer le potentiel des pertes en sol en tout point du bassin versant. Plus 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 de conservation des eaux et de sol (CES) existantes et réfléchir sur les possibilités d'aménagement (Renard et *al.*, 2011).

Le bassin versant de l'oued Kramis est confronté à un grave problème de la dégradation du sol, comme pratiquement toute la région du Tell oranais. L'érosion hydrique est plus forte dans cette région, en partie au fait que, les précipitations proviennent majoritairement de pluies d'orages, très intenses et qui ont un fort pouvoir érosif en début de la saison de pluies. Cela s'explique aussi par la présence d'un couvert végétal peu dense.

L'objectif général de cette recherche, est de présenter une méthode qui peut être utilisée pour évaluer l'aléa érosif dans les différents niveaux du système de paysage en utilisant l'équation universelle des pertes en sol révisé *RUSLE*. Cette approche est basée sur l'intégration des données issues du traitement d'images satellitaires du capteur «*Landsat*», et des données cartographiques dans SIG pour l'identification et la cartographie des zones à risques d'érosion.

Ce travail est structuré comme suit:

- Le premier chapitre, concept et quantification de l'érosion hydrique ;
- Le deuxième chapitre, caractères physiographiques et analyses bioclimatiques du milieu d'étude ;
- Le troisième chapitre, méthodes d'études de l'aléa érosif dans le bassin versant de l'oued Kramis;
- Le quatrième chapitre, évaluation de pertes en sol par le modèle *RUSLE* et déposition intégrée dans le SIG.

CHAPITRE 1 : CONCEPT ET QUANTIFICATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, sera exposés les concepts et les théories utilisés à l'étude de l'érosion hydrique, ainsi que, les méthodes d'évaluation des pertes en sol par l'érosion hydrique.

1.2. Les facteurs de l'érosion hydrique dans le modèle *RUSLE*

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, 1991). 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). L'érosivité des précipitations (le facteur R ou EI₃₀) (en Mj.mm/ha.h.an) dans le modèle *RUSLE* est définie comme étant une moyenne à long terme du produit de l'énergie cinétique.

Ce dernier, est responsable du détachement des particules du sol sous le choc des gouttes de pluie (E) multiplié par l'intensité maximale en 30 minutes des pluies (I₃₀) qui exprime l'effet du ruissellement. Le facteur R annuel est la somme des facteurs R calculée 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 satisfaisante (Sadiki et al., 2009).

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, 2012).

La majorité des auteurs qui ont utilisé le modèle *RUSLE* 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 (Dumas et Olivry, 2015).

D'après Lee et Heo (2011), l'indice de Fournier modifié (*MFI*) développé par Arnoldus (1977, 1980) pour le Maroc est le bon exemple de cette approche (Lahloui et al., 2015). Récemment, cet indice a été utilisé largement en Himalaya (Pandey et al., 2009), en Turquie (Demirci et Karaburun, 2012) et à l'Inde (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 par exemple de l'Italie (De paola et al., 2013), de l'Espagne et de l'Algérie (Meddi et al., 2016).

1.2.2. La lithologie

L'érodibilité du sol désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion (Ben Slimane, 2013). Elle est fonction des propriétés physico-chimiques du sol (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 (Poesen & Govers, 1994).

Heusch (1986) et Demmak (1982) ont constaté qu'il existe une corrélation étroite entre la lithologie et l'intensité du ruissellement.

Les sols méditerranéens ne sont pas plus fragiles que les sols tropicaux (Roose, 1991), mais ils ont tendance à se dégrader rapidement dès qu'on les dénude et qu'on les prive d'un apport régulier de litière. Les sols rouges fersiallitiques, les sols bruns calcaires, les rendzines noires et les vertisols gris qui composent la majorité des versants méditerranéens sont assez résistants à l'érosion hydrique.

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 altérites argilo-sableuses (granite) ou à altérites limoneuses (schistes) occupant 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 ($K = 0,001$ à $0,01$ t. ha/Mj.mm), mais ils sont sensibles aux glissements du terrain 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) (Roose et al., 2012). Par contre, les sols rouges fersiallitiques méditerranéens lessivés sont généralement

assez fragiles ($K = 0,20 \text{ t. ha/Mj.mm}$), car pauvres en matières organiques, les vertisols sodiques des plaines arides sont très sensibles à la battance des pluies ($K > 0,40 \text{ t. ha/Mj.mm}$). La présence de sels ou de gypse au sein des marnes fragilise les terrains tandis que le fer, le calcaire et les cailloux les consolident. Mais cette résistance est temporaire et relative (Roose et *al.*, 2012).

Cette fragilité de terres méditerranéennes à l'érosion est aggravée par la déforestation, la mauvaise conduite agricole sur des versants à pente raides et le faible taux de matière organique (généralement $< 2\%$) conjointement aux températures estivales très élevées. Ces conditions accélèrent la minéralisation rapide des matières organiques du sol 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).

Bou Kheir et *al.*, (2001), dans une étude intitulée érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens (une revue bibliographique) ont constaté que les seuils de tolérance de l'érosion sous un climat humide tempéré varient entre $2,5 \text{ t/ha/an}$ pour un sol superficiel et de $12,5 \text{ t/ha/an}$ pour un sol profond de texture équilibrée et moyennement perméable. Mais 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 étant urbanisées.

1.2.3. La topographie

Si l'érosivité des pluies et la lithologie du sol jouent un rôle important, les effets de la topographie jouent aussi un rôle crucial et complexe dans l'érosion hydrique. Il est bien entendu que plus la pente est raide, plus la quantité d'eau ruisselée ainsi que sa force érosive seront importantes (Bouguerra et Bouanani, 2016).

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 du sol (Huete et *al.*, 1994).

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) dans le modèle *RUSLE* a été calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur (Renard et *al.*, 1998). 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. C'est donc un paramètre très complexe. 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 la perte des sols (Cooke et *al.*, 2006).

En revanche, Roose et *al.*, (2012), ont observé que la position topographique des versants est parfois plus importante que la pente elle-même. En effet, Poesen et *al.* (1998) ont abouti au fait que, les versants des montagnes méditerranéennes exposés au sud sont généralement dénudés et surjetant à une érosion très élevée.

Sur les pentes concaves, les pertes des terres sont moins intenses (FAO, 1976), tandis que, sur des pentes convexes, les pertes sont plus grandes (Roose, 1998). Sur sol paillé, l'énergie des pluies et celle du ruissellement sont dissipées même sur fortes pentes. Tout d'abord, par le frottement avec les résidus. Ainsi, les pertes en terre restent très modestes (Sadeghi et *al.*, 2015). Réduisant de ce fait, le taux de ruissellement et les pertes de sol dans différents environnements, tels que, les régions agricoles; les prairies et les sites boisés (Prats et *al.*, 2014). En second lieu, il réduit l'énergie et la vitesse d'écoulement des eaux de surface en augmentant la rugosité du sol (Jordán et *al.*, 2010).

Un cas a été signalé par Heusch (1970), sur une colline marneuse du Maroc où les eaux s'infiltrent sur les versants par les fissures des vertisols, se concentrent en bas de pente et créent des ravines remontantes. De même, en Côte d'Ivoire, Valentin et *al.*, (1987), ont montré que les sommets des collines sont couverts de sols ferralitiques gravillonnaires rouges très stables, tandis que sur les versants ferrugineux tropicaux plus fragiles naissent des ravines discontinues, et que dans les bas-fonds hydromorphes se développent de grosses ravines remontantes.

1.2.4. Le couvert végétal

Le couvert végétal est après la topographie le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols. Dans le modèle *RUSLE*, l'effet du couvert végétal est incorporé au facteur d'aménagement du couvert (Bouguerra et Bouanani, 2016). Il est défini comme un ratio de la perte des terres sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport à une perte correspondantes sur un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978).

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 l'intensité du couvert et des techniques culturales. Ainsi, l'indice du couvert végétal diminue jusqu'à 0,01 sous cultures pérennes avec plantes de couverture ou prairie et 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 par exemple, Laouina (1992), a observé que lorsque le sol est couvert de matorral dense, d'herbes rases, de cystes ou de rocaïlle, l'érosion ne dépasse pas 0,2 à 2 t/ha/an, mais dès que le sol est labouré, l'érosion peut s'élever à plus de 20 t/ha/an sur des pentes de 20 % en année à fortes pluies. 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, soit 54 % du territoire, ce qui témoigne de la forte érosion dépassant les seuils de tolérance 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 d'érosion hydrique est plus élevé lorsque les sols sont occupés par des cultures de type sarclé peu couvrantes ou des plantes pastorales dégradées, suivies des cultures de type non sarclé, plus couvrantes, puis des prairies et des forêts denses où le risque est minimal. Dans la même région d'étude, Baron (2008) a confirmé que les sols couverts en permanence sur de faibles pentes, le risque reste très faible quel que soit l'érosivité des pluies.

En outre, le paillage améliore efficacement la capacité d'infiltration des eaux et augmente le taux de rétention de l'eau dans le sol (Wang et *al.*, 2016).

En fait, 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 suite diminue les risques d'érosion (Mulumba et Lal, 2008).

1.2.5. Techniques de conservation de l'eau et des sols

Des techniques agricoles effectuées dans quelques pays du Sahel par la population rurale locale (Mali, Nigeria et Soudan) montrent que l'influence de ces techniques n'est pas négligeable sur les longs glacis de pentes inférieures à 3 %. En effet, le labour et surtout le billonnage cloisonné en courbes de niveau améliorent le stock d'eau du sol et les rendements des cultures (Roose, 2012).

Charreau et Nicou (1971), 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), ont observé sur des sols ferrugineux sableux à argilo-sableux soumis au semis direct dédié à une rotation coton/maïs intensive, une réduction notable de l'érosion (y compris de la charge en suspension) et du ruissellement.

En Europe, les travaux antiérosifs réduisent le risque d'érosion des sols à un taux inférieur de 3%. Les haies végétales 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, en particulier 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 anthropiques (Roose et *al.*, 2008).

Ces activités:

- ✓ Le surpâturage;
- ✓ La mauvaise conduite des travaux agricoles;
- ✓ La déforestation, les incendies et le défrichement ont augmenté au cours de dernier siècle, en particulier du fait de la croissance démographique: 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 oranais 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 pour lutter adéquatement contre l'envasement des retenues, préserver leur capacité utile et assurer la disponibilité future de l'eau sur les bassins versants situés dans cette partie du pays.

Les aménagements ainsi proposés peuvent être scindés en deux catégories: (i) une première catégorie représente les aménagements biologiques qui intègrent le reboisement et la revégétalisation des terres nues, le recouvrement continu des sols soit par les cultures en bandes alternées soit par l'utilisation des plantations pérennes, et l'installation des haies pour délimiter et protéger les parcelles contre l'érosion; (ii) une seconde catégorie comporte 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, la construction des banquettes, des terrasses, des seuils de torrencialité (TECSULT, 2006).

Ces aménagements semblent très intéressants et peuvent entretenir le volume utile du réservoir des barrages plus de la moitié que sans la mise en place des interventions antiérosives, comme par exemple le cas du barrage Sidi Mhamed Benaouda et celui de Gargar (TECSULT, 2006).

Le facteur de pratique antiérosive P dans le modèle *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 différentes pratiques de conservation adoptées dans différents contextes environnementaux (Renard et al., 1998). Les valeurs typiques vont d'environ 0,1 pour sous cultures en billonnage cloisonné suivie de 0,75 pour le labour en courbe de niveau à 1 où il n'y a pas de pratiques antiérosives (Roose, 1978).

Dans le modèle *RUSLE*, ces valeurs sont obtenues à partir d'études de parcelle et souvent appliquées aux petits bassins versants. Lufafa et al., (2003) ont suggéré une approche alternative pour une approximation du factor P en se basant sur des équations empiriques

dont la méthode de Wener d'où $P = 0,2 + 0,3\theta$, tel que θ est le degré de la pente en %. Cependant, étant donné qu'il est difficile de quantifier l'impact des différentes pratiques antiérosives appliquées dans de très grandes régions en particulier les terrassement et le labour suivant les courbes de niveaux (Panagos et al., 2015).

Notre étude n'utilise pas de telles équations comme le gradient de pente est déjà intégré dans le facteur topographique LS.

1.3. Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion des sols est l'un des problèmes environnementaux les plus préoccupants dans le monde aujourd'hui. Chaque année, 75 billion de tonnes de sol sont enlevées à cause de l'érosion due en grande partie à des terres agricoles et environ 20 millions d'hectares de ces terres sont déjà perdues (Pandey et al., 2009). Avec ce processus, non seulement la productivité agricole, mais aussi le volume utile en eau des barrages est réduite dans les bassins hydrographiques. Parmi les autres problèmes causés par l'érosion des sols figurent le risque pour la sécurité alimentaire, l'augmentation de la probabilité d'inondation dans les plaines inondables, la réduction de la qualité de l'eau et la perte de la biodiversité aquatique dans les rivières et les lacs par la pollution, l'eutrophisation, la turbidité et le déclin de la beauté des paysages esthétiques (Wang et al., 2009).

Ce phénomène naturel est très élevé en Amérique, en Asie, en Europe et en Afrique.

En Amérique, l'érosion hydrique touche 14.3 % du territoire d'Amérique du Sud et 26 % de l'Amérique centrale (Nations Unies, 2002).

En Asie, dans les régions tropicales humides, les agriculteurs pratiquent généralement des cultures de subsistance sur des terres en pente en utilisant des techniques très érosives, ce qui donne un taux moyen de perte de sol de 138 t/ha/an (Sfeir-Younis, 1986).

En Iran, le taux annuel des pertes de sol a été estimée à 2.5 milliards dont environ 94% des terres arables et des parcours permanent sont envoies de dégradation (Masoudi et al., 2006).

En Chine où la population est très nombreuse, l'érosion affecte 40 % du territoire, soit 3.6 millions de km² de terres dont 1.61 millions de km² spécifiquement liés à l'érosion hydrique, laquelle provoque annuellement des pertes en terres de l'ordre de 4.52 milliards de tonne. Si l'érosion des sols se poursuit à ce rythme dans ce pays, la production céréalière y sera réduite de 40 % en 50 ans, conjointement à un important accroissement

démographique qui rend justement le problème particulièrement aigu (Agence de presse Xinghua, 2008).

En Europe, l'érosion hydrique est l'un des processus de dégradation des terres les plus importants dans les pays Européens. Il a également été signalé que les pays du sud sont les plus exposés au risque érosif, avec des taux élevés 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 (1987); quelque des terres sont exposées à une érosion grave ou très sévère dont elle active dans 59% des terres agricoles, 54% des terres forestières et 64% des parcours (Imamoglu et Dengiz, 2016).

En outre, la sédimentation entraîne des impacts environnementaux spectaculaires sur la qualité de l'eau et l'habitat aquatique (Akay et al., 2008).

Selon GDREC (2008), plus de 345 millions de tonnes de sédiments pénètrent les lacs, les barrages et les mers par an (Yuksel et al., 2008).

En Afrique subsaharienne, L'érosion des sols est généralement considérée comme la menace la plus sévère à la productivité de la terre, créant des impacts négatifs sur la production agricole, l'infrastructure et la qualité de l'eau (Obalum et al., 2012).

L'érosion dans ces pays a entraîné une réduction des rendements de 2 à 40% et que si la tendance actuelle se maintient, la réduction du rendement d'ici 2020 pourrait être de 16.5%. (Lal ,1995).Ce phénomène est caractéristique plus particulièrement des pays du Maghreb dont les potentialités en eau et en sol sont gravement menacées (Khanchoul et al., 2012).

Au Maroc par exemple, 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 ha de terres agricoles et une diminution progressive et inquiétante de la fertilité des sols, et par conséquence leur productivité (Khali Issa et al., 2016). Avec ces pertes, non seulement la fertilité des sols, mais aussi le volume utile en eau des barrages est réduite. Le Haut commissariat des eaux et des forêts du Maroc (2008), chiffre d'un envasement 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 importante perte concernant les eaux permettant l'irrigation de 10000 ha/an et la détérioration de la qualité de l'eau potable mobilisée.

En Algérie, 45 % des terres fertiles ont été endommagées par l'érosion. L'érosion spécifique annuelle moyenne varie entre 136 t/km² et 7200 t/km² (Achite et al., 2007). Environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion active (Morsli et al., 2002). En plus aux pertes de la fertilité des sols agricoles, le phénomène de l'envasement touche 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).

L'Algérie serait 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 à 1000 m³ par habitant et par an (Touati, 2010). En 1962, la disponibilité annuelle en eau théorique par habitant était de 1500 m³, ce qui plaçait le pays dans une situation confortable, elle n'était plus que de 500 m³ en 1999 (CNES, 2000) à comparer avec les 3600 m³ du Français (Cerdan, 2001), les 950 m³ du Marocain (Benmansour, 2006), les 925 m³ de l'Egyptien (Ahmadi, 2006) et les 490 m³ du Tunisien (Soti, 2003). Elle ne sera plus que de 430 m³ en 2020 et 300 m³ en 2050.

1.4. Les formes de l'érosion hydrique

Le phénomène de l'érosion hydrique se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes 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 généralement quatre grandes classes de formes d'érosion: en nappe, en rigoles, en ravins et en talus (Roose, 1994).

1.5. L'érosion hydrique processus et évaluation

Les processus intenses de l'érosion hydrique sont très répandus dans la région méditerranéenne. L'érosion diffuse «*sheet erosion*» et en rigoles «*interrill erosion*», l'érosion linéaire «*rill erosion*» l'érosion ravinaire «*gully erosion*» et l'érosion de berges «*bank erosion*» sont les formes les plus connues dans les zones semi-arides et subhumides (Rawat, 2013).

L'estimation des pertes en sol par l'érosion hydrique a été abordée aux Etats-Unis dès les années 1920, dix ans plus tard, cette technique a évolué rapidement un peu partout dans le monde (Römken, 2010).

L'objectif de ce chapitre est tout d'abord d'exposer les facteurs influençant l'érosion hydrique. Ensuite nous présenterons les modèles de quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique en choisissant le plus largement utilisé dans la région méditerranéenne. Enfin à travers une synthèse bibliographique, nous essayerons de présenter quelques résultats obtenus en t/ha/an par l'application du modèle universel *RUSLE* (*Revised Universal Soil Loss Equation*) intégré dans un environnement SIG à travers le monde et en Algérie.

1.5.1. Méthodes d'évaluation qualitative

a. Méthode de hiérarchisation

Cette méthode permet d'hiérarchiser la surface d'un bassin versant en unités différenciées selon leur vulnérabilité à l'érosion et de déterminer les zones les plus fragiles potentiellement pourvoyeuses des sédiments (Sadiki, 2005). Elle se base sur des cartes thématiques, chacune correspond à un facteur influençant l'érosion. Les valeurs de chaque facteur érosif sont affectées en différentes classes selon l'ordre d'importance sur l'érosion.

La superposition des cartes thématiques avec leur bases de données dans un environnement SIG et selon le modèle empirique adopté aboutit à une carte synthétique d'érosion potentielle dans laquelle les zones où coïncident les degrés d'influence élevés des différents facteurs (total élevé des valeurs) correspondent aux zones les plus vulnérables à l'érosion et vis versa. Par exemple 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, 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 les phénomènes érosifs est définie; une déclivité de 0 à 10 % représente une sensibilité à l'érosion faible, 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 suivant leur vulnérabilité a été définie: faible, moyenne et forte est effectué pour chaque classe de pente.

En fin, un regroupement des valeurs du couvert végétal en trois classes qui déterminent le degré de protection de l'occupation du sol dans le processus érosifs a été obtenu: couverture peu protectrice, protectrice, et très protectrice. Dans la carte résultante après la superposition de ces cartes thématiques, les résultats de ces combinaisons, 27 au total, donnent chacun une valeur qualitative de sensibilité à l'érosion hydrique (Pascal dumas, 2010).

Au Maroc dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Sadiki et *al.*, (2004) ont intégré des cartes thématiques de différents facteurs d'USLE dans le SIG qui a permis de hiérarchiser les différentes zones du bassin versant, en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion, de déterminer le taux d'érosion par le ruissellement en nappe et d'établir les facteurs décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont, par ordre d'importance, la pente, l'érodibilité des sols et la couverture végétale. Pour que les résultats de cette méthode soient fiables, il est nécessaire de collecter une grande base de données sur l'ensemble de la région d'intérêt. Cependant, la subdivision des cartes thématiques en même nombre de classes est aussi un inconvénient car elle ne tient pas en compte les interdépendances des facteurs. L'influence de chaque facteur ne peut être réduite à une suite de chiffres entiers, elle peut être logarithmiques ou exponentielles ou même irrégulière (Sadiki, 2005).

b. Cartes géomorphologiques

Les phénomènes de ruissellement et d'érosion hydrique des sols sur les versants résultent de la situation aggravante et de l'action conjuguée des facteurs géomorphologiques telle que la pente, les formes et les expositions de reliefs et de la géologie du terrain. La géomorphologie vise à caractériser, inventorier et classer de manière systématique les facteurs géomorphologiques précités et leurs relations avec les facteurs bioclimatiques. L'étude de l'érosion dans une région donnée s'appuie sur le recueil, le traitement et l'analyse spatiale de ces facteurs (Sadiki, 2005). L'érosion hydrique occupe une place importante dans les recherches menées par les géologues qui par leurs études des formes des reliefs à différents niveaux permettent une estimation qualitative de l'érosion actuelle et ancienne (Sadiki, 2005).

c. Simulation de pluie

Cette technique de mesure permettant d'examiner le comportement textural du sol dans le temps (durant l'expérience) des points de vue de l'infiltration et du ruissellement en fonction de la quantité et de l'intensité des pluies. On répète l'expérience en fonction de différentes variables du terrain telle que: la pente, le couvert végétal, le type du sol, l'humidité initiale... etc.. Selon le simulateur utilisé, la surface impliquée peut être de un à plusieurs mètres carrés et la hauteur de chute des gouttes de quelques décimètres à quelques mètres (Sadiki, 2005).

1.5.2. Méthodes d'étude de l'aléa érosif dans un bassin versant

La quantification de l'érosion hydrique a été le sujet d'un grand nombre d'étude à travers le monde (Zhang et *al.*, 2017). Selon les objectifs recherchés, la complexité des processus érosifs (Mohamadi et Kavian, 2015) et les conséquences parfois non prédictives de ce phénomène, des approches et des techniques diverses ont été adoptés pour quantifier les matériaux meubles arrachées par l'érosion.

Selon Sadiki (2005), des mesures de différents type et à différents stades du processus de l'érosion ont été effectuées:

- au moment de percussions des gouttes des pluies ;
- au cours de flux des sédiments ;
- après la sédimentation fluviale au niveau des barrages et des lacs.

Selon Sabir (1986), les approches de la quantification de l'érosion peuvent être regroupées en trois niveaux différents, ainsi:

- étude au niveau du versant ;
- étude du transit des matières solides transportées au niveau d'une section en travers du cours d'eau ;
- étude de l'envasement (accumulation des sédiments) des retenues, des barrages et des lacs à l'aval d'un bassin versant.

1.5.2.1. Techniques de mesure au niveau des versants

a. Parcelles expérimentales

C'est la méthode la plus utilisée et la plus fiable, mais elle est relativement coûteuse et délicate. Elle consiste en une parcelle de terrain de dimensions variables (quelques mètres

carrés à quelques centaines de mètres carrés), limitée sur tous ses côtés, afin d'éviter les interférences avec le reste du versant et de ne recueillir que l'eau de la parcelle d'intérêt.

Elle est munie d'un bassin de réception pour recueillir les eaux de ruissellement chargées de sédiments. Les mesures des débits solides et liquides se font d'une façon régulière avec une fréquence plus élevée lors des événements pluvieux importants. Des analyses de masse volumique, de granulométrie sont effectuées sur les sédiments recueillis.



Source : Mohamadi et Kavian, 2015.

Figure 1. Parcelles expérimentales et la station des mesures au niveau du bassin versant.

La technique des parcelles expérimentales a permis à Wischmeier et Smith (1965) d'aboutir à l'équation universelle des pertes de sol (Sadiki, 2005). 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 technique a une tendance d'étudier l'érosion à grande échelle.

Dans la région méditerranéenne et sur 10 ans d'observation, Roose et al., (1993), ont présenté une synthèse des mesures du ruissellement, d'érosion en nappe et de production de biomasse sur un réseau de 50 parcelles (de 100 m² de chacune) réparties dans quatre régions montagneuses (pentes de 10 à 45 %) recevant annuellement 300 à 650 mm de pluie. Ces auteurs furent comparés les comportements de l'érosion sur trois systèmes

d'utilisation des terres différentes: jachères nues, terres cultivées (blé, fève, vigne, fourrages, verger, parcours) et terres à système amélioré (fertilisation, rotation céréales-légumineuses, cultures associées au verger, enrichissement des parcours). Leurs résultats montrent que le ruissellement a été très modeste tant en milieu cultivé que naturel malgré des versants très raides (pentes de 10 à 45 %).

b. 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 de dimension donnée et préalablement délimitée pour éviter l'influence du voisinage. A partir de cette évolution topographique et par une double intégration, sur la largeur et la longueur, on peut déterminer le volume de sédiments emporté par l'érosion.

On peut utiliser soit un maillage de piquets ou perches graduées dont 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 et Hoorelbeck, 1984).

C. Techniques de traçage des sources des sédiments

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

Cette méthode de mesure a été abordée aux USA à partir des années 1970 (Ritchie & McHenry, 1990), puis a été utilisée un peu partout dans le monde (He et Walling, 1997; Benmansour et al., 2006; Li et al., 2010; Walling et al., 2011; Yang et al., 2011; Wilkinson et al., 2015) et en particulier dans les régions méditerranéennes à savoir, le Maroc (Benmansour et al., 2002; Damnati et al., 2004; Sadiki, 2005; Benmansour et al., 2013), la Tunisie (Ben Slimane et al., 2013), l'Algérie (Toumi, 2013). Les éléments radioactifs 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 radionucléides ont prouvé leur efficacité pour estimer les sources des sédiments au sein du bassin versant et en déduire les processus dominants tel que, 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 (Ben Slimane *et al.*, 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 (Benmansour *et al.*, 2013).

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 érodés ni inondés). Le site de référence doit être plat, et ne subir aucune activité agricole dès l'année 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 2cm 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).

1.5.2.2 Techniques de mesure au niveau de l'oued

L'étude des processus d'érosion a fait appel, durant les 3 dernières décennies, à une panoplie de techniques de quantification de l'érosion: parcelles expérimentales (citée précédemment), turbidimétrie (débit solide), bathymétrie méthode de traçage des sources des sédiments au moyen des éléments radionucléides et des techniques de quantification et de prédiction de l'érosion hydrique en se basant sur des modèles empiriques.

a. Bathymétrie

Une 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, la bathymétrie de 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 des bassins 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 (Moukhchane, 2002).

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

b. 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 ravinatoire n'est pas active, l'érosion en nappe est la principale source de sédiments (Benkadja et *al.*, 2012).

Achite et Maddi (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.

Différentes modèles empiriques ont été développées à travers le monde pour calculer les quantités transitant en sédiments. Pandey et *al.*, (2016), dans une étude intitulée les modèles physiques de l'érosion par sédiments ont exposé tous les modèles utilisés à travers

le monde. On cite entre autres: *SWAT (Soil Water Assessment Tool)* (Rostamian et al., 2008; Setegn et al., 2009), *WEPP (Water Erosion Prediction Project)* (Pandey et al., 2009) *AGNPS (Agricultural Non-point Source Model)* (Jianchang et al., 2008; Cho et al., 2008), *ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)* (Ahmadi et al., 2006) et *SHETRAN (Systeme Hydrologique European-TRANsport)* (Figueiredo et Bathurst, 2007). Leur applicabilité en fonction de l'espace (ponctuel ou globale) de l'échelle (parcelle ou bassin versant), du temps (continu ou pour un événement précis) et de l'estimation de l'érosion diffuse ou concentrée ainsi que, de leur potentiel d'intégration avec les SIG donne des meilleurs résultats (Pandey et al., 2016).

Un certain nombre d'algorithmes ou d'équations empiriques ont été utilisés pour l'érosion du sol et la modélisation de la production des sédiments soit sur les versants des collines soit au niveau des cours d'eau sont ainsi (Pandey et al., 2016).

Au niveau des versants:(Modèle: *ANSWERS*), (Modèle: *SWAT + ANSWERS*), (Modèle: *SWAT et MUSLE*), (Modèle: *WEPP, AGNPS, ANSWERS*),

Au niveau des cours d'eau: (Modèle: *SWAT*).

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 (Achite et Ouillon 2007, Bencheikha et al., 2008).

D'autres chercheurs ont utilisé d'autres approches pour estimer la quantité en sédiments à l'échelle du bassin. Par exemple, Shoa et al., (2013), ont utilisé le modèle de ratio de distribution de sédiments (*SDR = Sediment Distribution Ratio*) dans l'environnement SIG pour estimer la quantité des sédiments des grands bassins en fonction des processus de distribution des sédiments 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*) élaboré pour examiner l'utilisation des terres en Inde.

Le *SYI* 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 tels que, le type de roches exposées à l'intérieur du bassin et leur degré de fracturation. (Abd-El Monsef, 2015).

Arekhi et al., (2012), ont appliqué l'équation universelle modifiée de perte de sol (*MUSLE*) dans la prévision de la production des sédiments dans le bassin versant de Kengir (Iran) en remplaçant le facteur d'érosivité des pluies R dans l'équation de *RUSLE* par le modèle de puissance: $11.8 (Q.qp)^{0.56}$ tel que, Q et qp est le volume de ruissellement consécutif à l'averse (m^3) et le débit de pointe (m^3/s) respectivement.

En Algérie, Vogt et Gomer (1992), ont modélisé la concentration moyenne des sédiments en suspension à l'échelle de la crue pour l'oued Mina. En 2000, ces auteurs ont raffiné leur 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, les auteurs ont démontré l'efficacité du modèle. Toutefois, le modèle nécessite une foule de données qui ne sont pas toujours disponibles.

1.9. Conclusion

De ce fait, le premier chapitre de notre travail, consiste à donner un aperçu sur l'érosion hydriques et leur conséquences ; sur les différents domaines, et outre nous avons parlé sur le modèle *RUSLE* et en fin, nous avons cité quelques techniques d'évaluation de l'érosion hydriques.

CHAPITRE 2 : Cadre physique de milieu d'étude

2.1. Introduction

On appelle bassin versant l'ensemble constitué par ce réseau et les surfaces qui potentiellement contribuent à l'alimentation de ce réseau, par ruissellement de surface des eaux d'origine météorique (Renard, 2011). Le bassin versant est le cadre général de toute étude d'hydrauliques (Rostamian, 2008). La connaissance des caractères topophysographiques d'un bassin versant est une étape indispensable à toute étude relative à l'environnement. Le développement des techniques modernes d'acquisition de mise en disposition d'information digitale par le biais du modèle numérique de terrain (MNT) et des données satellitaires multi-dates a rendu possible la caractérisation physiographique et bioclimatique d'un bassin versant. Ces informations servent de plus en plus à la description des caractéristiques du milieu et à la cartographie numérique.

Afin de mettre en relief le comportement hydrologique de l'aléa érosif dans le bassin versant de l'oued Kramis vis-à-vis à ses caractéristiques physiographiques, une étude préliminaire de connaissance du terrain sera indispensable pour modéliser ces caractéristiques. Le présent chapitre consiste à réaliser des cartes thématiques à l'aide des données satellites (MNT et images satellites) intégrées dans un environnement SIG, pour étudier les caractéristiques physiographiques (carte de localisation de la zone d'étude, carte hypsométrique, carte des pentes et des expositions, carte hydrographique, carte lithologique, ... etc) et bioclimatiques (carte d'occupation des sols, cartes des isohyètes, cartes isothermiques ... etc) du bassin versant de l'oued Kramis.

2.2. Contexte géographique 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 versant de Côtiers Algérois. D'une superficie de 302 km² et d'une forme allongée ($K_G = 1.7$), le bassin versant de l'oued Kramis est encadré par le massif montagneux du Dahra au nord, et par les monts de Taougrite et Chaabnia à l'est. Au sud, il est limité par les monts nord de la plaine de Chélif.

Oued Kramis se situe entre les latitudes nord de $36^{\circ} 16' 00''$ et $36^{\circ} 6' 30''$ et les longitudes est de $0^{\circ} 39' 30''$ et $0^{\circ} 56' 30''$ (Projected Coordinate System: Nord_Sahara_1959_UTM_Zone_31N) (Cf. Figure 2).

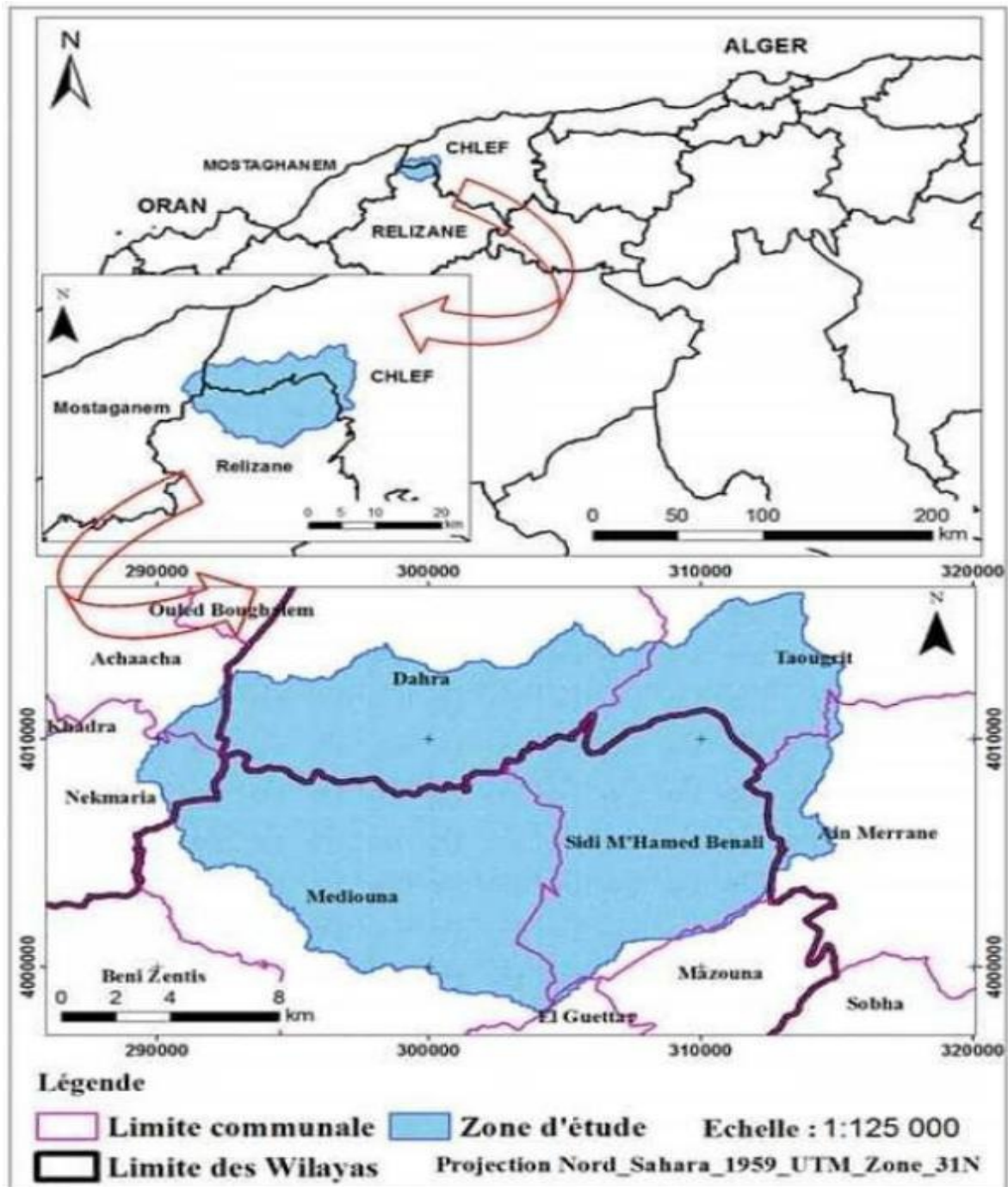


Figure 2. La localisation géographique de la zone d'étude.

L'altitude, variant entre 757 m et 63 m, décroît de l'est vers l'ouest avec une élévation moyenne de 380 m (Cf. Tableau 1). Le relief est très contrasté, constitue de plateaux entaillés et de versants raides, seuls 44.6 % (Cf. Tableau 1) de la surface sont occupées par des plaines d'une activité agricole importante. Les majeures parties de ces plaines sont limitées au nord par les monts de Taougrite, les monts de Chaabnia à l'est, et ceux d'Ain Merane au sud et les monts de Sidi Mhamed Benali à l'ouest (Cf. Figure 2).

Le cours d'eau de l'oued Kramis prend sa source dans les monts de Chaabnia à l'est pour confluer avec la plaine d'Achaacha au nord après un parcours de 32.5 km. Vu son importance socioéconomique, le bassin versant de l'oued Kramis, est dotée en aval d'un barrage d'eau d'une capacité de 45.4 Millions m³. Ce barrage a été mis en service en 2004 qu'il doit répondre aux besoins d'approvisionnement en eau potable à une population totale de 73289 habitants appartient aux villes situées en aval dont: Nekmaria, Khadra et Ouled Boughanem, Achaacha, ainsi aux besoins agricoles par le développement de l'irrigation sur un périmètre de 4300 hectares situés dans la plaine amont de celle-ci.

Tableau 1. Caractéristiques physiographiques du bassin versant de l'oued Kramis.

Superficie du bassin versant (Km²)	302
Périmètre du bassin versant (Km)	103.3
Le plus long talweg (Km)	32.5
Indice de compacité de Gravelius (KG)	1.7
Longueur du rectangle équivalent (L)	46.2
Largeur du rectangle équivalent (l)	6.5
Altitude max (m)	757
Altitude min (m)	63
Élévation moyenne (m)	380
Altitude à 5% de la superficie du bassin (m)	624
Altitude à 95% de la superficie du bassin (m)	157
Indice de pente global (Ig)	10.1
Dénivelée spécifique (Ds)	175.5
Densité de drainage (Dd) (Km/Km²)	3.7

Source : ANBT ; 2017

2.3. Les outils de délimitation du bassin versant

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

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

Les images *TM* (*Thematic Mapper*) ayant une résolution spatiale 30 mètres fournissent des informations spectrales dans sept bandes spectrales dont, le visible (*VIS*), proches infrarouges (*NIR*), courtes ondes infrarouges (*SWIR*) et infrarouges thermiques (*TIR*). En 1999, un nouveau capteur *Landsat; Thematic Mapper amélioré plus (ETM+)*, était en service pour surveiller les ressources de la Terre.

L'ETM+ a des bandes thermiques supplémentaires sur l'ancien capteur *TM*. Récemment, un nouveau capteur *Landsat* a été installé depuis 2013 avec des améliorations supplémentaires au-dessus de la précédente série *Landsat*, en particulier dans le nombre et la résolution spatiale des bandes thermiques (Prats, et *al.*, 2014). Pourtant, le nouveau capteur, c'est-à-dire *Landsat-8* ou le capteur terrestre opérationnel (*OLI*), fournit des images dans la même résolution spatiale (30 m) pour les autres bandes spectrales (*VIS*, *NIR* et *SWIR*) à partir des capteurs précédents (Sultan, M. et *al.*, 1987).

Dans notre étude une scène multi spectrales (7 canaux d'une couverture nuageuse nulle; *could cover = 0*) *Landsat_5 Thematic Mapper (TM)* de *Path_197/Row_035 (Landsat Scene Identifier: LT51970352006295MPS00)* acquise le 22/10/2006 après deux ans de la mise en service de barrage de l'oued Kramis a été utilisée comme outil pour pouvoir positionner le point aval du bassin versant (la digue du barrage). Ces images sont fournies par le site <http://earthexplorer.usgs.gov/>, au format *Geotif*. Le modèle numérique d'élévation en format *SRTM* Version 3 (*Shuttle Radar Topography Mission*), de 36° latitude et de 00° longitude obtenu sur le site: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>. a été utilisé comme source de donnée numérique pour la création d'un model numérique de terrain MNT. Toutes ces données sont intégrées et analysées dans un environnement SIG pour cartographier les caractères physiographiques et bioclimatiques du milieu d'étude.

2.4. Paramètres physiographiques du bassin versant

Les données numériques d'élévation obtenues sont introduites et analysées au moyen du *kit spatial analyst tools* intégré dans l'ArgGIS 10.2 afin de délimiter le bassin versant et ses sous bassins drainés par les différents cours d'eau existants. Deux principaux modèles: *hydrology* et *conditional* existants dans le *kit: Spatial analyst tools* ont été utilisés avec ses applications: *fill, flow direction, flow accumulation* et *con*.

Ces différentes étapes sont effectuées en premier lieu pour déterminer le réseau hydrographique qui draine l'ensemble du bassin versant. Ensuite les deux applications *Stream Ordre* et *Stream to feature* dans le modèle *hydrology* ont été utilisées.

En fin, le bassin versant et ses sous bassins sont délimités en fixant l'exutoire des oueds qui drainent le bassin versant de notre région d'intérêt en appliquant l'outil *Watershed*.

Outre les applications citées ci-dessus, le *kit: Spatial analyst tools* génère automatiquement autres données complémentaires semblent indispensables dans notre études. Les couches obtenues selon les caractéristiques physiographiques voulus sont des données superposables dans le SIG pixel par pixel.

Le réseau hydrographique est un paramètre clé dans l'étude physiographique d'un bassin versant. A cet effet, le MNT de la région d'intérêt a été intégré dans l'environnement SIG (ArcGIS 10.2) en utilisant des outils du modèle *hydrology*.

2.4.1. Caractères physiographiques

Le relief dans une étude environnemental un paramètre essentiel. Il détermine en grande partie l'effet interdépendant des facteurs climatiques et leur influence sur l'occupation des sols au sein d'une région bien définie. Ainsi, c'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin versant (El Hmaidi et *al.*, 2014).

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont résumés dans le tableau 2 il englobe les principales caractéristiques physiographiques du bassin versant de l'oued Kramis.

Tableau 2. Caractéristiques techniques du barrage de l'oued Kramis.

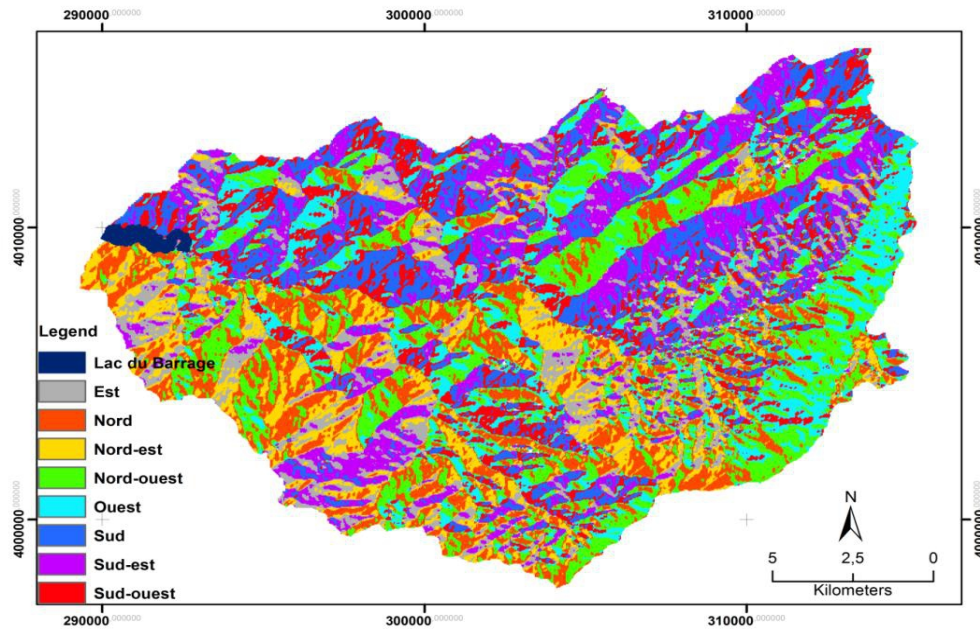
Type	Zone en terre avec noyau d'étanchéité en argile
Début et fin des travaux	Aout 2001 au mars 2004
Le volume de la retenue	45.4 hm ³
Surface de la retenue	2.76 hm ²
Plus hautes eaux	111.10 m.s.n.m
Cote du niveau normal de la retenue	108 m.s.n.m
Cote de la crête	112.5 m.s.n.m
Hauteur max du barrage	55 m
Largeur du couronnement	6.5 m
longueur du couronnement	630 m
Pente amont	1/3
Pente aval	1/2.5
Apport moyen annuel	30.4 hm ³
Envasement annuel	400 000 m ³ /an
Volume régularisé	25.37 hm ³
Volume mort	12 hm ³
Pluviométrie	437 mm/an
Evaporation max	1633 mm/an
Surface du bassin versant	302 Km ²

Source : ANBT, 2017.

2.4.2. Les expositions des reliefs

Tout phénomène naturel dans une région donnée, varie d'un secteur à un autre. Comme nous l'avons dit, cette variabilité spatiale est liée beaucoup plus au facteur relief. Le relief des marnes tertiaires du Tell oranais est très morcelé. Les profondes entailles en V sont généralement plus raides en exposition Sud qu'en exposition Nord (Gomer, 1994). Cette asymétrie est due à des différences de pédogénèse, de météorisation et d'ablation selon l'exposition (Olivry, 1984).

L'influence de l'orientation des versants est déterminée par l'intermédiaire des facteurs tels que la durée d'ensoleillement, l'état hydrique du sol et la direction des vents (notamment ceux qui sont dominants). Huit classes sont considérées (Nord, Nord-est, Est, Sud-est, Sud, Sud-ouest, Ouest et Nord-ouest).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 3. Carte d'exposition des versants.

La carte d'exposition des versants (Cf. Figure 3) élaborée en intégrant le MNT 30 de la zone d'étude dans un environnement SIG (ArcGIS 10.2) traité sous l'outil *surface/aspect* dans le kit: *Spatial analyst tools* permet de déterminer l'orientation des versants avec leurs pourcentages. Ainsi, l'exposition des reliefs est dominée principalement par l'orientation Nord-ouest (15.6 % de la surface de la zone d'étude) (Cf. Tableau 3).

Tableau 3. Les surfaces des orientations des reliefs.

Les orientations des reliefs	Surface	
	Km ²	%
Nord	41.6	13.8
Nord-est	30.3	10.0
Est	27.6	9.1
Sud-est	41.7	13.8
Sud	42.2	14.0
Sud-ouest	33.8	11.2
Ouest	37.5	12.4
Nord-ouest	47.2	15.6
Total	302	100

Source : L'Auteur, 2017.

2.4.3. Profil topographique du bassin versant

A l'aide du logiciel *Global Mapper v.11*, le profil topographique de l'oued Kramis a été extrait à partir du MNT 30 de la zone d'étude (Cf. figure 4). A 63 m d'altitude se situe le barrage de notre zone d'étude sur l'oued Kramis qui rejoint le long de son parcours quelques affluents secondaires drainant les différents sous bassins versants de la zone d'étude (Cf. figure4). A 32.5 km de parcours entre un point d'altitude de 757 m situé sur les monts de Taougrite, de l'oued Kramis et ses affluents alimentent le barrage situé en aval du bassin versant.

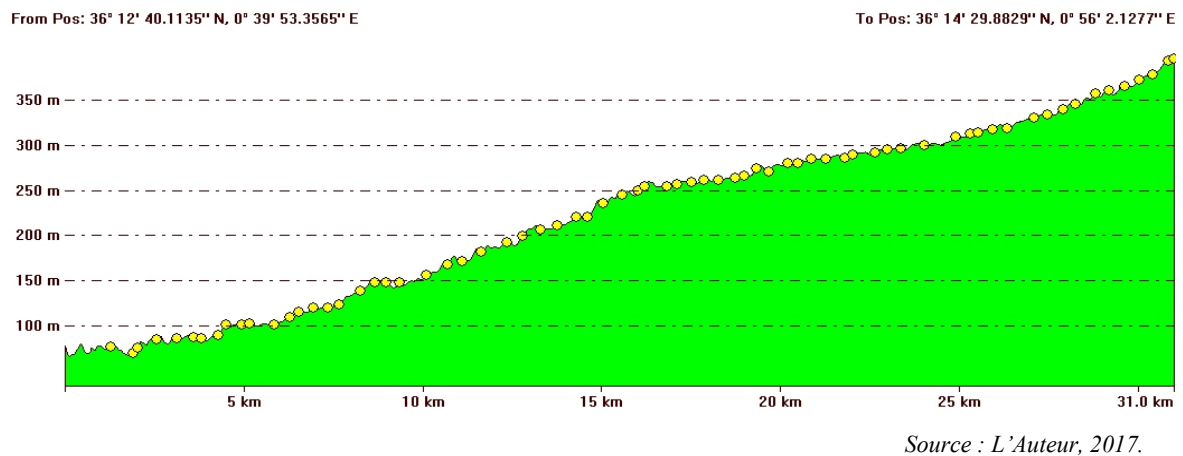


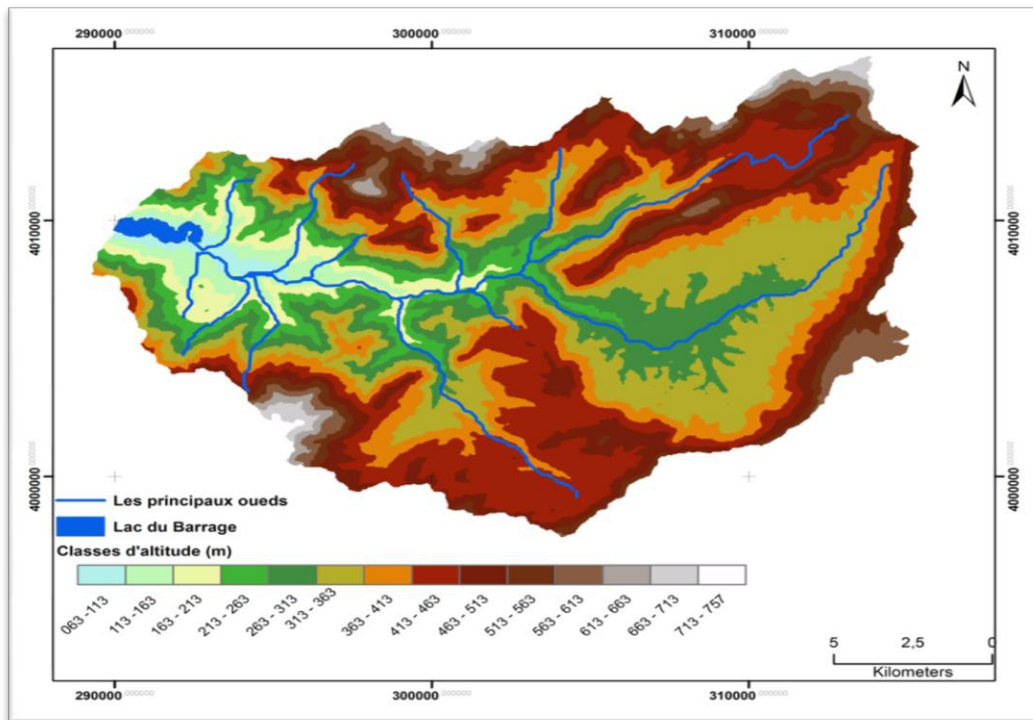
Figure 4. Profil du cours d'eau principal du bassin versant de l'oued Kramis.

2.4.4. Hypsométrie de la zone d'étude

a. Les courbes de niveaux

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 niveaux de notre zone d'étude ont été extraites à partir du MNT 30 intégré dans le logiciel ArcGIS 10.2 au moyen de l'outil surface dans le kit: *Spatial analyst tools*.

D'après la figure 5, on déduit que, le secteur sud-est et celui se localise sur les vallées de l'oued du bassin versant en particulier le secteur ouest sont caractérisés par des courbes de niveaux bien écartés, tandis que, les secteurs qui se trouvent sur les extrémités nord et sud du bassin versant sont caractérisées par des courbes de niveaux bien serrés ce qui explique que ces régions présentent des pentes raides.



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 5. Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Kramis.

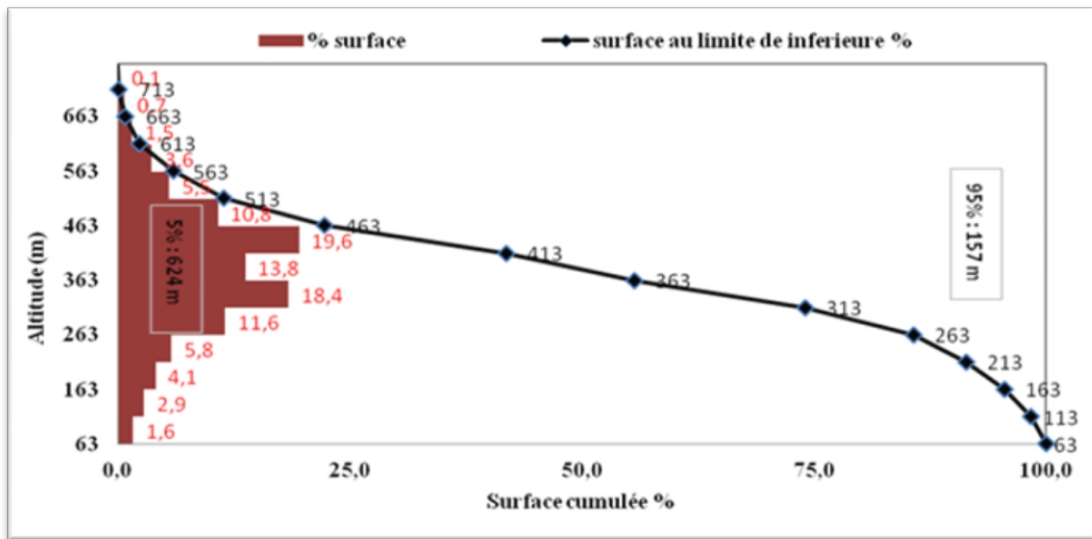
b. Carte et courbe hypsométrique de la zone d'étude

La figure 6 représente la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Kramis et les tranches d'altitude (de 50 mètres) en fonction de leurs surfaces.

La dénivelée maximale des terres, de même que celle des terres à 5% et 95% d'altitude, reflète la présence d'un massif montagneux car elles atteignent plus de 624 m et 157 m respectivement.

De ce fait, la majorité du Nord-est (Taougrite, Dahra) et du sud (Sidi Mhamed Benali et Mediuona) de la région d'étude est caractérisée par des reliefs relativement accidentés couvrant une surface de 49.6% de la zone d'intérêt.

En amont, les terres sont caractérisées par des reliefs plats qui représentent en majeure partie des vallées à activité agricole importante. Dans la partie aval du bassin versant de l'oued Kramis, les versants qui la constituent présentent des pentes douces mais avec certaine aspérité des reliefs (Cf. Tableau 20, Annexe 2).

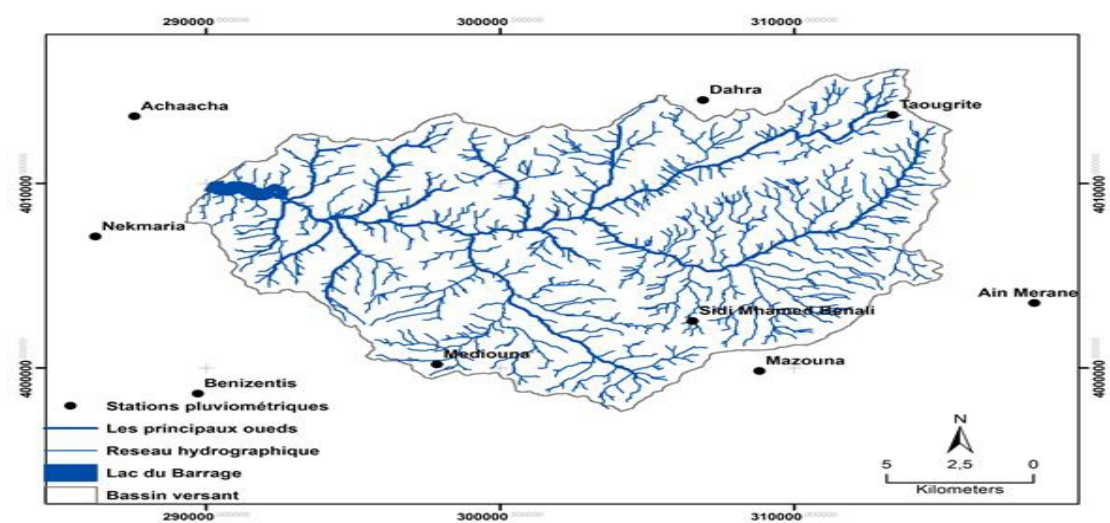


Source : L'Auteur, 2017.

Figure 6. Courbe hypsométrique de l'oued Kramis.

2.4.5. Réseau hydrographique et localisation des ravinements

La figure 7 met en évidence la forte densité du réseau hydrographique accroissant la torrentialité et par voie de conséquence les risques d'érosion linéaire.



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 7. Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Kramis.

2.5. Paramètres climatiques

Les données ponctuelles des précipitations et des températures moyennes mensuelles de la zone d'étude sont tout d'abord traitées dans une page Excel avec leurs coordonnées géographiques en utilisant la projection: *Projected Coordinate System:*

Nord_Sahara_1959_UTM_Zone_31. Ensuite ces données sont introduites dans l’ArcGIS 10.2. L’outil *Geostatistical analyst tools* a été utilisée afin d’extrapoler ces données qui ont été déjà calculées selon des formules empiriques adoptées en élaborant des cartes thématiques qui nous permettent d’interpréter la variabilité spatiale de l’effet de ces facteurs climatiques fondamentaux sur le territoire de notre zone d’étude.

2.5.1. Les données utilisées

Les données pluviométriques ont été obtenues à partir du site Web: <http://tn.freemeteo.com/letemps/historique/historique-otidien/?gid=2492205&date=2015-05-06&station=13004&language=french&country=algeria>; pour les onze stations (Taougrite, Mazouna, Sidi Mhamed Benali, Dahra, Ain Merane, Nekmaria, Achaacha, Khadra, Benizentis, Mediouna et Dadas) de la zone d’étude. Ces données sont complétées en cas des lacunes par des données obtenues auprès des services concernées tel que l’ANRH, les DSA, les Directions des forêts ...etc.

2.5.2. Caractéristiques des stations pluviométriques

Les stations pluviométriques sont réparties spatialement comme suit: 03 stations localisées au sein de la zone d’étude et 08 autres sont situées hors de la zone d’étude. Leurs caractéristiques sont données dans le (Cf.Tableau4).

Tableau 4. Caractéristiques des stations pluviométriques.

n°	Station	<i>Projected Coordinate System: Nord_Sahara_1959_UTM_Zone_31N</i>						
		X (dd)	Y (dd)	Altitude (m)	Localisation	Période de mesure	P (mm)	T (°C)
1	Taougrite	0.92	36.25	530	(+)	22	453.6	18.1
2	Mazouna	0.88	36.13	454	(-)	22	449.7	19.4
3	Sidi Mhamed Benali	0.85	36.15	381	(+)	22	417.5	26.2
4	Dahra	0.85	36.26	489	(-)	22	427.6	17.2
5	Ain Merane	0.98	36.16	497	(-)	22	451.9	20.5
6	Nekmaria	0.62	36.19	308	(-)	22	410.2	19.5
7	Achaacha	0.64	36.25	236	(-)	22	431.8	19.7
8	Khadra	0.58	36.25	151	(-)	22	406.5	18.4
9	Benizentis	0.66	36.11	421	(-)	22	395.7	21.2
10	Mediouna	0.75	36.13	463	(+)	22	440.2	20.9
11	Dadas	0.55	36.23	154	(-)	10	340.0	17.5

(+) : se localise au sein de la zone d’étude

(-) se localise hors zone d’étude

2.5.3. Fiabilité des données climatiques utilisées (précipitations et températures)

Avant d'entamer l'étude d'analyse climatique sur notre région d'étude ce qui concerne les deux facteurs climatiques, températures et précipitations, il est très intéressant tout d'abord de vérifier leur fiabilité des données observées durant 22 ans dans les 11 stations météorologiques.

Après l'application et le teste de différentes techniques de *prediction géospatial* au moyen du logiciel de l'ArcGIS 10.2, la méthode *Ordinary Kriging/CoKriging* et de type *Ordinary* et *predict* a été choisi 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 ($RMS = \text{Root-Mean-Square Standardized}$). 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 (Cf. Annexe, 1).

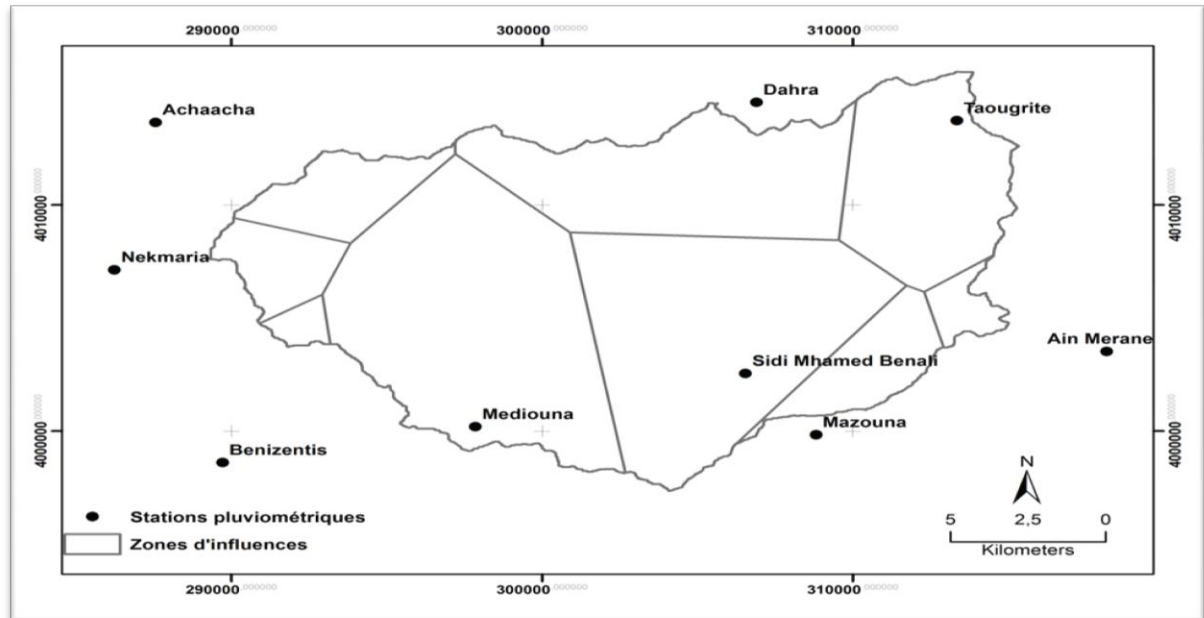
En générale, le meilleur modèle est celui qui a la moyenne d'erreur plus proche de zéro (colonne 6 = *Standardized Error*, Cf. Annexe 1) ainsi que une petite erreur de prédiction de racine carrée moyenne (RMS).

En effet, la figure 27 et figure 28 annexe 1, montrent que l'erreur de prédiction de racine carrée moyennes (RMS) des données de précipitations et de températures moyennes mensuelles validées par la méthode *Ordinary Kriging/CoKriging* a donné des petites valeurs 0,87 et 0.93 respectivement.

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, mais nous devons toujours avoir à l'esprit que cette valeur dépend de l'échelle des données utilisées.

2.5.4. La station de référence

Pour déterminer la pluviométrie interannuelle de la zone d'étude, la méthode des polygones de Thiessen (2003), a été utilisée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2. (Cf. Figure 8)



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 8. Surfaces d'influence des stations pluviométriques déterminées selon la méthode de Thiessen.

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

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

Où:

n : le nombre de stations pluviométriques ;

S_i : surface d'influence de chaque station pluviométrique (km^2) ;

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

S : surface totale de la zone d'étude (Km^2) ;

Les résultats sont figurés dans le tableau 5.

Tableau 5. Pluviométrie moyenne interannuelle de la zone d'étude (1994 - 2016).

Station Pluviométrique	Surface		Pi (mm)	Si.Pi	P moyennes (mm)
	Km ²	%			
Achaacha	15.2	5.0	431.8	6568	417.8
Nekmaria	11.4	3.8	410.2	4684	
Mediouna	84.4	28.0	440.2	32607	
Sidi Mhamed Benali	75.3	24.9	417.5	31454	
Mazouna	15.5	5.1	449.7	6970	
Ain Merane	5.2	1.7	451.9	2359	
Taougrite	40.3	13,4	453.6	18295	
Dahra	51.6	17.1	427.6	22068	
Benizentis	3.0	1.0	395.7	1187	
Total	302	100	/	126194	

Source: Auteur, 2017.

On note que les deux stations Khadra et Dadas n'ont aucune influence sur la zone d'étude en ce qui concerne la méthode de Thiessen, ceci explique leur éloignement au bassin versant.

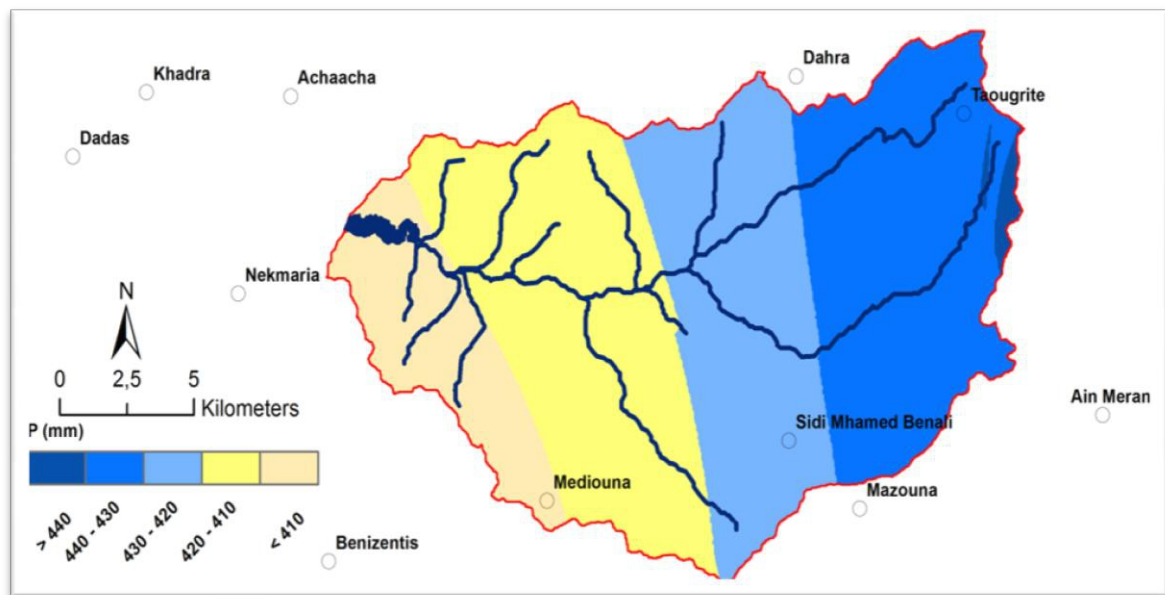
Le choix de la station de Sidi Mhamed Benali comme étant une station de référence de notre région d'étude repose sur les constatations suivantes:

Les précipitations moyennes interannuelles de cette station de 417.5 mm/an sont proches aux précipitations moyennes interannuelles de l'ensemble des stations de la zone d'étude qui ont une valeur de 417.8 mm/an avec un écart de précipitations, entre ces deux valeurs de 0.3 mm, ça d'une part, sa localisation au sein de la zone d'étude d'autre part.

2.5.5. Pluies

Les précipitations sont définies comme: «formes variées sous lesquelles l'eau solide ou liquide contenue dans l'atmosphère se dépose à la surface du globe (pluie, brouillard, neige, grêle, rosée» (Kouri, L., 1993).

L'extrapolation des précipitations de onze stations sur l'ensemble de la zone d'étude a été réalisée au moyen de l'ArcGIS 10.2, en utilisant l'outil *Geostatistical analysis Kriging/CoKriging*, (Cf. Figure 9).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 9. Répartition spatiale de précipitations moyennes annuelles sur la zone d'étude.

Parallèlement à la représentation graphique de la répartition des précipitations dans la zone d'étude, le coefficient d'abattement a été également utilisé. Ce coefficient permet de sélectionner la station pluvieuse de celle qui l'est moins. Sa valeur représente le rapport entre la pluie moyenne ponctuelle P_i d'une station de la zone d'étude et la pluie moyenne.

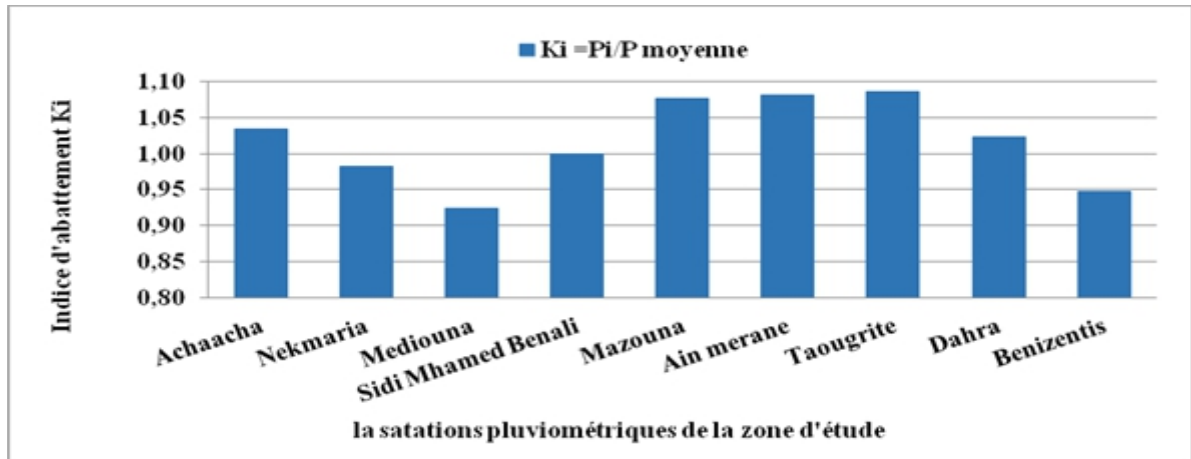
P_{moyenne} enregistrée sur l'ensemble de cette zone (Cf. Tableau 6).

Tableau 6. Les valeurs du coefficient d'abattement (K_i) (1994 - 2016).

Stations	Mediouna	Taougrite	Ain Merane	Mazouna	Achaacha	Dahra	SM BA	Nekmaria	Benizentis
K_i	1.1	1,09	1,08	1,08	1,03	1,02	1,00	0,98	0,95

Source : L'Auteur, 2017.

La relation de la variabilité spatiale entre les quantités des pluies moyennes interannuelles (en mm) et les facteurs physiographiques du milieu est expliquée en fonction de l'altitude maximale (Cf. Figure 10).



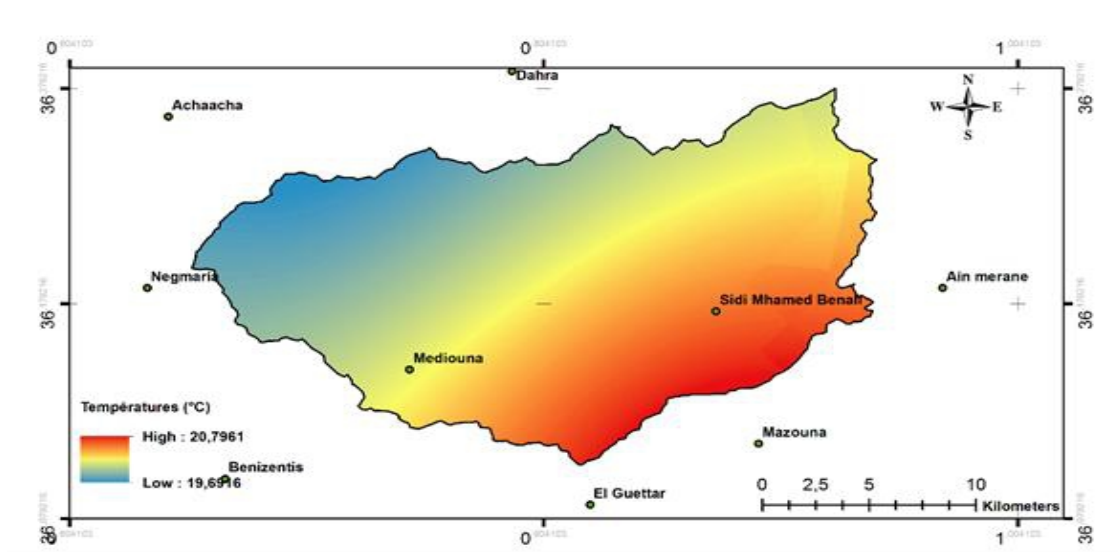
Source : L'Auteur, 2017.

Figure 10. Quantité de précipitations (mm) en fonction des altitudes maximales (mètre).

Selon la figure 10, on constate que les chutes des pluies augmentent proportionnellement avec l'altitude maximale des reliefs, des stations de mesure. Le coefficient de détermination R^2 de cette évolution montre une bonne corrélation, entre les quantités des pluies d'une part et la hauteur des reliefs, d'autre part, avec une valeur de 0,57.

2.5.6. Températures

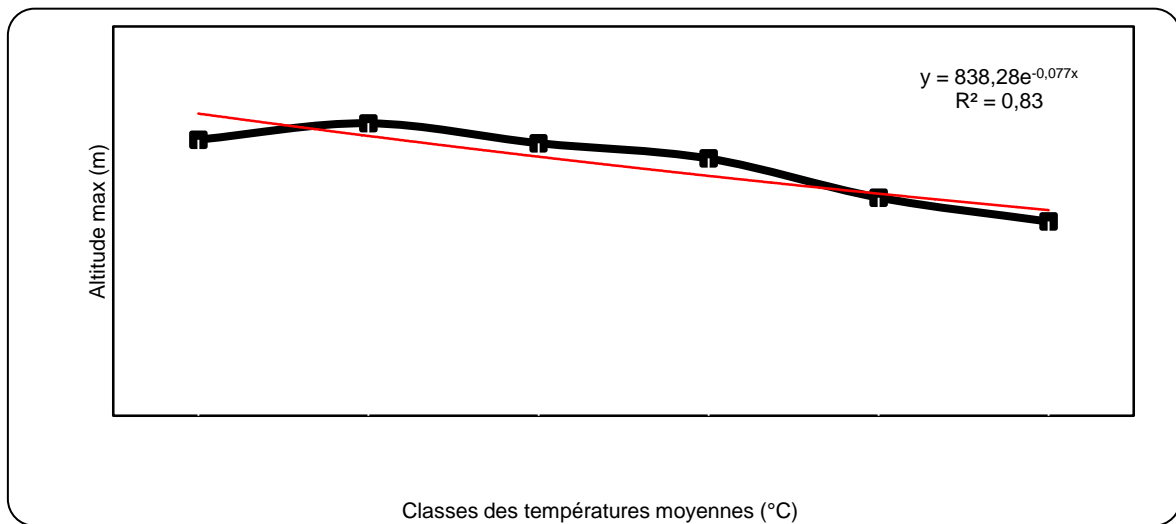
L'outil *Geostatistical analysis Kriging/CoKriging* dans un environnement SIG (l'ArcGIS 10.2) a été utilisé pour pouvoir interpréter l'effet de la température sur les types des marnes du secteur d'étude. Le résultat de cette extrapolation a été illustré dans la figure 11.



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 11. Répartition spatiale des températures moyennes annuelles sur la zone d'étude.

On constate que les températures moyennes annuelles diminuent proportionnellement avec l'augmentation des altitudes maximales des reliefs des stations de mesure. Le coefficient de détermination R^2 d'une valeur de 0.83 montre une bonne corrélation, entre les températures moyennes annuelles et l'effet des altitudes des reliefs (Cf. Figure 12).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 12. Relation entre les températures moyennes annuelles (en °C) et l'altitude maximale des reliefs.

En se référant à la figure 12, on observe que, comme les précipitations, les températures moyennes annuelles présentent aussi un gradient d'un secteur à l'autre. Le secteur sud a enregistré des valeurs relativement élevées par rapport à celui situé au nord de la zone d'étude.

Cette variabilité spatiale des températures se traduit par certaines conditions écologiques dont l'altitude des reliefs comme nous avons signalé ainsi que l'exposition des versants aux vents du sud continentaux. En effet, les monts de Sidi Mhamed Benali et ceux de Mazouna qui représentent le dos sud de cette région sont exposés immédiatement aux vents provenant des plaines de l'oued Mina.

2.5.7. Synthés bioclimatique

a. Données climatiques mensuelles de la station de référence

En se référant à Bagnouls et Gaussen (1955), 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). Selon cette règle, et d'après la figure 13, la période de sécheresse de notre zone d'étude s'étale sur 7 mois (Avril à Octobre).

Tableau 7. Les températures moyennes et les précipitations mensuelles de la station de Sidi Mhamed Benali (1994 - 2016).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar	Avri l	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	11.5	12	14	15.6	20	25	27.6	27.7	19.1
Moy (°C)	31.9	29.2	22.5	17.1	16.6	17.8	20.8	24.7	28.2	33.6	36.1	35.7	26.2
(M-m)* (°C)	14.3	14.5	11	9.2	10.2	11.6	13.5	18.1	16.4	17.2	17	15.9	14.1

* : écart entre la valeur maximale et minimale

Source: l'Auteur, 2017.

D'après la figure 13 et le tableau 7, on déduit que le mois de Février est le mois le plus humide avec un cumul pluviométrique mensuel moyen de 84 mm/an, alors que le mois du Juillet ne registre qu'une valeur de 1.3 mm/an.

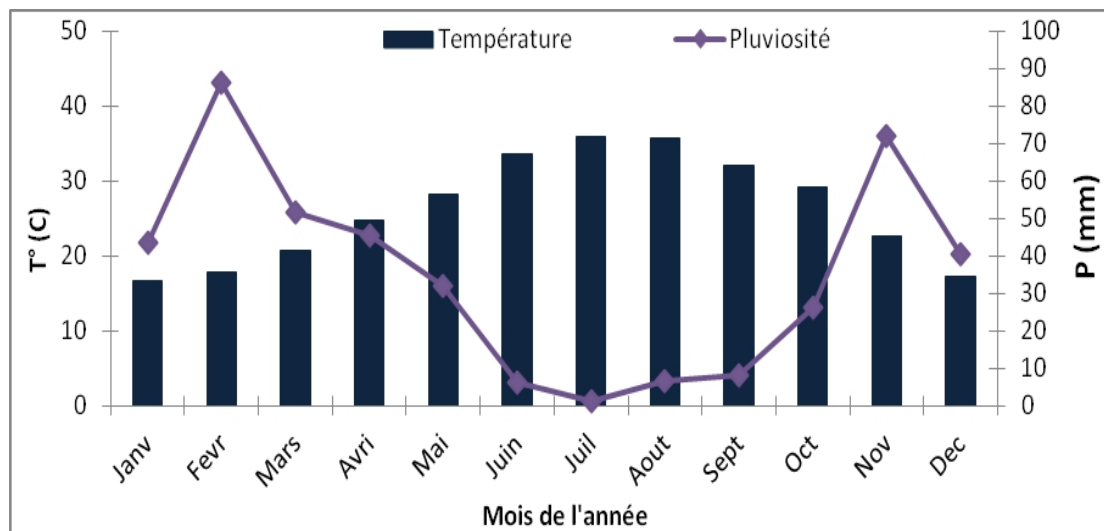


Figure 13. Diagramme Ombrothermique (station de Sidi M'hamed Benali (1994 – 2016).

Les températures moyennes mensuelles sont maximales au cours de la période du mois d'Avril à Octobre (saison chaude), et atteint leur maximum pendant le mois du Juillet avec une valeur de 44.6 °C. Les températures moyennes mensuelles sont minimales au cours de la période du mois de Novembre à Mars (saison froide) et atteint une valeur de 11.5 °C pendant le mois de Janvier.

b. Etage bioclimatique de la région d'étude

La synthèse bioclimatique est une étape indispensable à tout projet relatif à l'environnement. Elle s'est faite à partir des travaux d'Emberger (1930, 1955); Bagnouls et Gaussen (1953); Thornthwaite (1946) et Sauvage (1963), pour ne citer que ces auteurs.

➤ Le quotient pluviothermique Q_2

L'emploi du quotient pluviothermique (Q_2) est spécifique au climat méditerranéen. Il a été utilisé avec succès en Afrique du nord et en France méditerranéenne. En effet, ce quotient permet d'apprécier l'aridité des régions méditerranéennes. Les valeurs du Q_2 étant d'autant plus basses quand le climat est plus sec. Cet indice est calculé par la formule de (Sauvage, 1963).

$$Q_2 = 1000. P / (M-m) [(M+m)/2]$$

Où:

P: précipitations moyennes annuelles (mm) ;

M: température moyenne des maxima du mois le plus chaud (°K) ;

m: température moyenne des minima du mois le plus froid (°K).

Cet auteur a mis au point un zonage du bioclimat méditerranéen du plus sec vers le plus humide en combinant les données climatologiques et celles de la végétation. On distingue plus souvent les étages bioclimatiques : saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide. Chaque étage comprend une stratification verticale.

Ce coefficient a été modifié par Stewart (1969), la formule obtenue est la suivante :

$$Q_2 = 3,43. P / (M-m)$$

Q_2 : Le quotient pluviométrique d'Emberger ;

P : Pluviométrie annuelle en (mm) ;

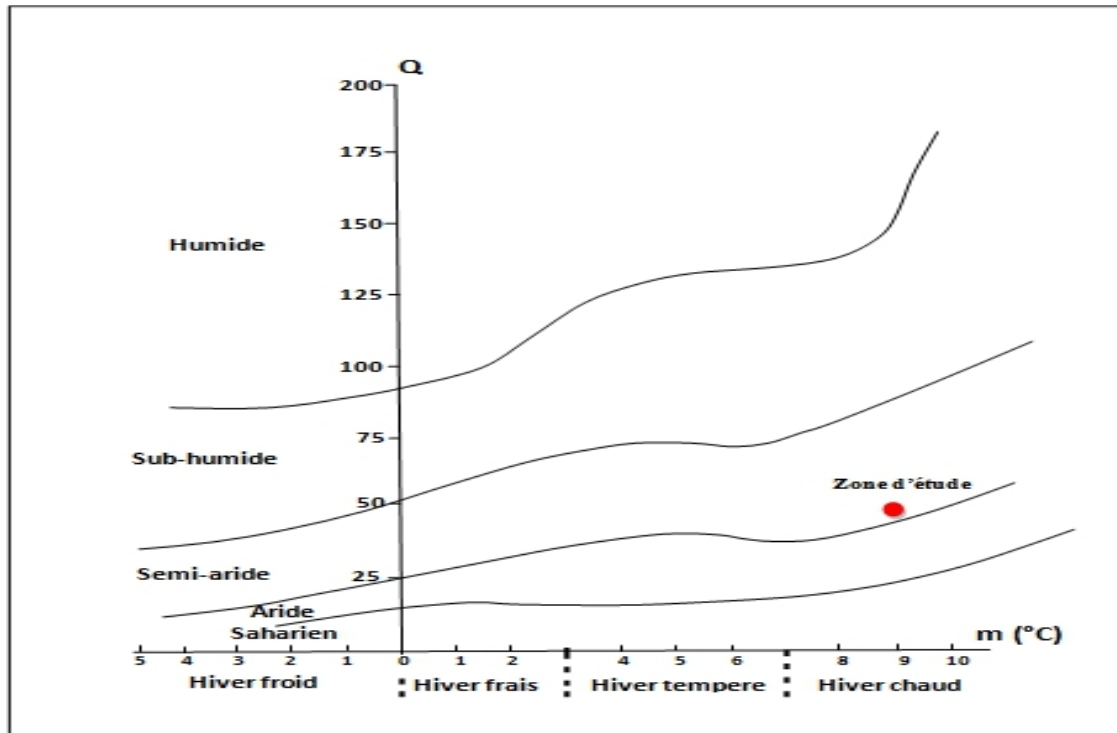
M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en (°C) ;

m : Moyennes des minima du mois le plus froid en (°C).

Tableau 8.L'indice bioclimatique d'Emberger,L. (d'après Stewart, 1969).

Station	P (mm)	M °K	m °K	Q_2
Sidi Mhamed Benali	417.5	317.6	285	44

En se référant au Climagramme pluviométrique d'Emberger, la station de Sidi Mhamed Benali est caractérisée par $Q_2 = 44$ et $m = 11.5$ °C (Cf.Figure 14).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 14. Climagramme d'Emberger de la station de Sidi M'hamed Benali (1994/2016).

La valeur de Q_2 portée sur le climagramme en tenant compte de m , classe la station de Sidi M'hamed Benali de la zone d'étude dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver chaud.

c. 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:

$$ID = b \cdot c$$

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.

Les résultats de mesure des débits liquides et solides pendant quatre années successives effectuées dans le bassin versant de l'oued Mina, montrant que, toutes les pluies journalières ≥ 20 mm provoquent un ruissellement et un transport solide en suspension mesuré à l'exutoire des petits bassins versants de cette région marneuse (Kouri, 1993).

C'est pourquoi nous avons retenu un seuil de 20 mm de pluie pendant 24 heures pour calculer cet indice.

Tableau 9. L'indice de Desfontaines modifié (station de Sidi Mhamed Benali: 1994 - 2016).

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

Source: l'Auteur, 2017.

Au cours de l'année il y a un régime saisonnier très variable avec une saison automnale pluvieuse qui s'étend de Novembre à Décembre et celle printanière de Février à Mai enregistrant des maximums à la fin de ce dernier (ID = 2.34), (Cf. Tableau 9), et une saison sèche (Juin, Juillet, Août, Septembre et Octobre) durant laquelle les précipitations ne représentent que 11.6 % de cumul annuel.

Les précipitations de la saison printanière généralement apportent une quantité considérable des sédiments à l'aval du bassin versant. Vu leurs torrencialité après une longue période humide qui s'étale sur 7 mois environ (de Novembre à Mai), ces précipitations provoquent les sapements des berges au niveau des oueds et des grands ravins et favorisent les glissements des terres argileuses qui constituent la majeure partie de notre zone d'étude (63.9 % de la zone d'étude).

2.6. Analyses socio-économiques

L'érosion accélérée et le ruissellement excessif dans le monde rural sont liés à un certain mode de développement déséquilibrant le paysage; défrichage 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 FAO (2013), certains auteurs prétendent que 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 se grippent.

2.6.1. La population rurale du bassin versant de l'oued Kramis

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 Mostaganem représentent une surface de 3.5% de la superficie totale du bassin versant, suivie les communes de la Wilaya de Chlef qui occupe 36.5% du secteur d'étude.

Les communes de la Wilaya de Rélizane viennent en troisièmes position en termes de surface dans le bassin versant avec un taux de 60 %. La population rurale totale de la région d'étude est estimée à 17330 habitants en 2016. Ces données ont été obtenues auprès des services concernés (DSA, direction des forêts, services communales... etc.) pour la période qui s'étale entre 1998 et 2016.

2.6.2. Evolution de population rurale du secteur d'étude entre 1998 et 2016

D'après le tableau 10 et la figure 15, on constate que la population rurale diminue considérablement durant la période qui s'étale entre 1998 et 2004 (exode rurale) pour les septes (07) communes du bassin versant.

Après l'année 2004, et avec l'effort considérable fourni par l'Etat Algérien pour le développement du secteur agricole par la création et l'accompagnement technique et financier des agriculteurs, on remarque l'accroissement en matière de création de l'emploi (Cf. Tableau 10) Ce dernier a augmenté remarquablement dans les communes qui se localisent autour du périmètre d'irrigation située à l'aval du barrage de l'oued Kramis (Périmètre d'irrigation d'Achaacha).

En effet, le secteur agricole a mis en place en 2000 une stratégie opérationnelle élargie, au domaine rural à la faveur de nouvelles attributions.

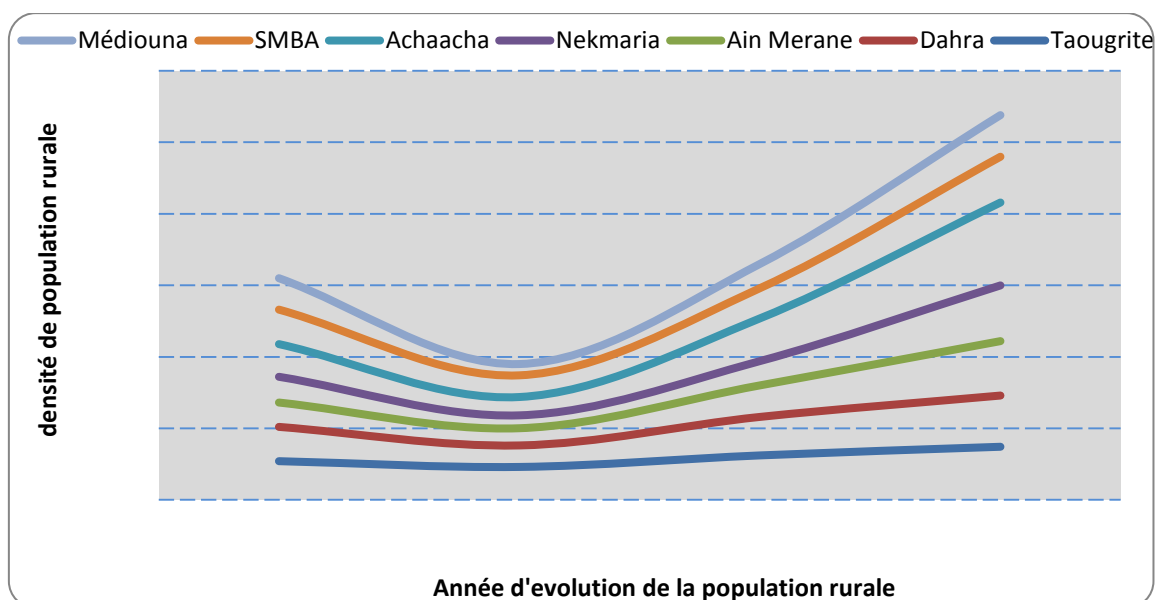
Cette stratégie appelée Plan National de Développement Agricole et Rural, a pour mission la réhabilitation des espaces ruraux et la stabilisation des populations rurales par l'amélioration de la sécurité alimentaire des ménages et le soutien au retour des populations ayant fui leurs localités pour des raisons économiques et sécuritaires.

Tableau 10. L'évolution de la population rurale du bassin versant de l'oued Kramis entre 1998 et 2016.

Code	Les communes et leurs surfaces au sein de la zone d'étude en Km ²		Wilaya	La densité de la population rurale du bassin versant de l'oued Kramis (Hab/Km ²)			
				1998	2004	2008	2016
206	Taougrite	35.82	Chlef	27	23	31	37
217	Dahra	63.9	Chlef	24	15	27	36
232	Ain Merane	10.6	Chlef	17	12	22	38
2715	Nekmaria	8.04	Mostaganem	18	9	17	39
2717	Achaacha	3.06	Mostaganem	23	13	30	58
4808	Sidi M'hamed Benali	80.2	Rélizane	24	15	21	32
4809	Médiouna	102.4	Rélizane	22	8	17	29
Moyenne				22	14	24	38

Source : l'Auteur, 2017.

D'après le responsable du périmètre irrigué d'Achaacha de la Wilaya de Mostaghanem, ce périmètre agricole est subi durant ces dernières années une utilisation intense dans le secteur agricole ce qui explique clairement l'augmentation du nombre des agriculteurs dans la commune de Nekmaria, 17 Hab/Km² en 2008 à 39 Hab /Km² en 2016 et aussi pour la commune de Achaacha qui à son tour enregistré une augmentation de 30 Hab/Km² en 2008 à 58 Hab/ Km² en 2016 (Cf. Figure15).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 15. Évolution de la densité de population rurale entre 1998 et 2016.

2.6.3. Quelle relation y a-t-il entre l'érosion hydrique et la densité de population?

Dans les zones tropicales plus humides, à deux saisons culturales ou sur des sols plus riches, volcaniques, comme à Java, on ne parle de forte densité qu'au-delà de 250 à 750 Hab/km². Les cas du Rwanda et du Burundi sont flagrants; malgré des sols très acides et des pentes raides dépassant 30 à 80 % (FAO, 2013).

En zone soudano-sahélienne, dès que la population dépasse 20 à 40 Hab/km², le temps de jachère diminue et devient inefficace. On peut donc penser que le milieu se dégrade avec la densité de population jusqu'à atteindre certains seuils. Au-delà desquels les paysans sont contraints de changer de système de production (Roose, Dugué et Rodriguez, 1992).

2.7. Conclusion

Au terme de cette étude, soulève les points suivant :

Les reliefs de la zone d'étude présentent une légère asymétrie, cette dernière est due à des différences de pédogénèse, de météorisation et d'ablation selon l'exposition. L'hypsométrie avec des tranches d'altitude de 50 m, nous donne une altitude moyenne de 380 mètres.

Le climat est de type semi-aride (417.8 mm/an) dont l'écart thermique atteint parfois 33.1 °C entre Juillet et Janvier et où les pluies sont rares et irrégulières (84 mm/an pendant le mois de Février et 1.3 mm/an durant le mois du Juillet). L'étude de la répartition spatiale des données pluviométriques montre que, les secteurs Est et Sud-est sont les plus arrosés que ceux situés au Nord-ouest.

Face à ces conditions climatiques défavorables qui règnent dans la région d'étude; l'installation du barrage de l'oued Kramis et sa mise en service a donné une nouvelle vision encourageante aux agriculteurs de la région d'étude qui s'est expliquée par la croissance flagrante de la population rurale entre 2004 (année de mise en service du barrage) et 2016 autour du périmètre d'Achaacha créée en aval de la zone d'intérêt.

CHAPITRE 3 : METHODES D'ETUDES DE L'ALEA EROSIF DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED KRAMIS

3.1. Introduction

L'application du modèle universel des pertes en sol dans la zone d'étude nécessite le calcul des différents facteurs de l'équation universelle sur toute la superficie en les représentant sous forme de cartes thématiques (l'agressivité climatique R, l'érodibilité des sols K, l'inclinaison et la longueur de pente LS, le couvert végétal C et les pratiques Antiérosives P). L'intégration de ces cartes dans le Système d'Information Géographique SIG ; permet de les superposer et d'évaluer le taux d'érosion en appliquant la formule de Wischmeier et Smith (1978).

3.2. Généralités sur le modèle *USLE* et sa version révisée *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) et Cerdan (2001), décrivent l'évolution des études sur les modélisations mathématiques pour la prédiction de l'érosion. Le développement des 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 de sol (Laflen, 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 de terre pour des sols argileux sur différentes pentes et pour une large gamme de systèmes de culture a introduit le facteur "précipitations"

En 1948, Smith et Whitt ont proposé une équation «rationnel» d'estimation de l'érosion, mais sur des sols argileux et sous certaines conditions (Sadiki, 2004). L'équation universelle de perte de terre, *USLE* proprement dite, été développée aux Etats Unis au Centre National du Ruissellement et de Calcul de Perte en Sol (*National Runoff and Soil Loss Data Center*) établi en 1954 par l'administration des Sciences et l'éducation (*Science and Education Administration*).

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. 20 ans plus tard, c'est-à-dire en 1978, une version plus complète de cette formule a été développée et publiée par ces deux auteurs.

En 1997, Renard et ses collaborateurs ont proposé le modèle *RUSLE* qui a la même formule que l'*USLE* de Wischmeier et Smith (1978), mais, plusieurs améliorations sont réalisées 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.

3.3. Le principe du modèle de *RUSLE*

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, il est exprimé en Mj.mm /ha.h ;

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

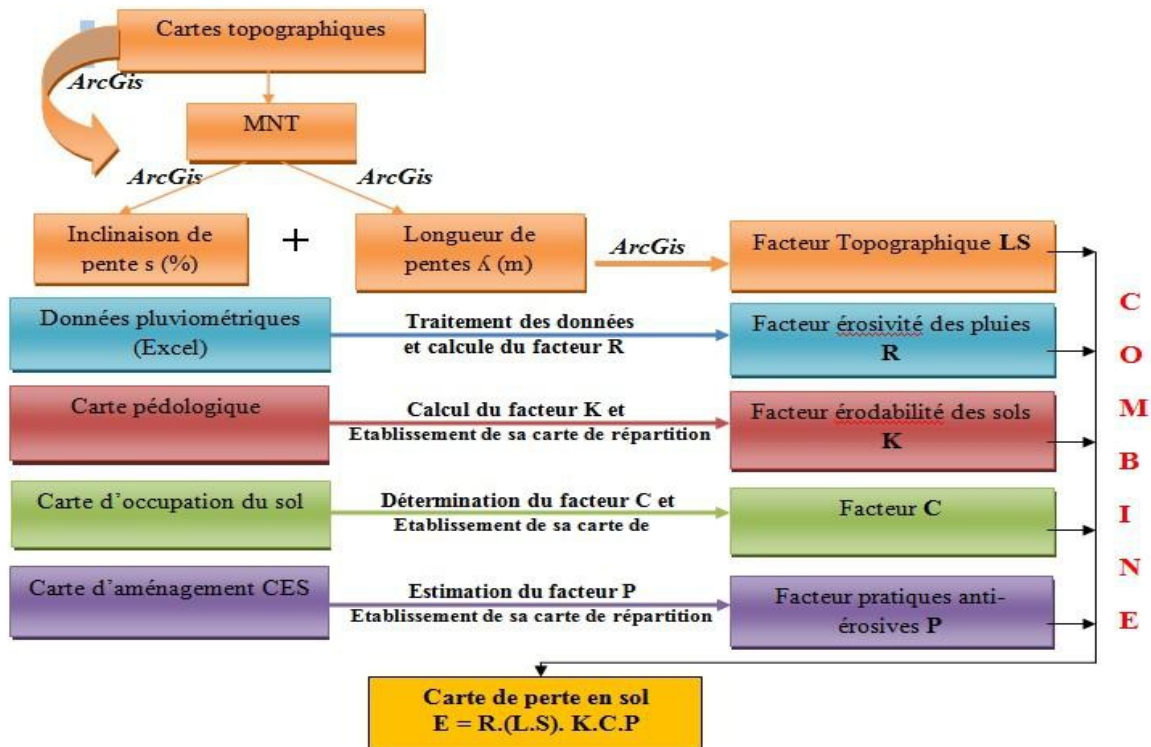
LS; est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (*S* en %) et la longueur de pente (*L* en m) ;

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.

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 la perte de sol tend vers 0.

Le modèle de chaque facteur a été mis en évidence dans des conditions pour les quelles 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.

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 (Cf. Figure 16).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 16. Organigramme méthodologique de l'intégration du modèle *RUSLE* dans le SIG.

3.4. Utilisation de *RUSLE* et ses objectifs dans le monde

Selon Sadiki (2004), l'équation universelle de perte de terre *RUSLE* a été utilisée un peu partout dans le monde avec le développement de Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les possibilités de la cartographie et du calcul rapide qu'ils offrent.

L'approche «*RUSLE/SIG*» adoptée pour ce travail considère le modèle de Wischmeier (*RUSLE: Revised Universal soil loss equation*) et l'outil cartographique SIG. Elle permet d'évaluer le potentiel des pertes en sol en tout point du bassin versant. Plus 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 (Renard et al., 2011).

Certains auteurs ont utilisé l'équation seule pour quantifier l'érosion, on site autre auteures: Kouli et *al.*, (2009); Grauso et *al.*, (2010); et Benchettouh et *al.*, (2017). D'autres ont adapté *RUSLE* comme une approche combinée avec le transport solide dans les bassins, comme par exemple; Arekhi et *al.*, (2012); Abd-El Monsef (2015).

3.5. Les facteurs du modèle *RUSLE*

3.5.1. Facteur de l'agressivité climatique : R

L'érosivité des précipitations (le facteur R ou EI30) (en Mj.mm/ha.h.an) dans le modèle *RUSLE* est définie comme une moyenne à long terme du produit de l'énergie cinétique. Ce dernier, est responsable du détachement des particules du sol sous le choc des gouttes de pluie (E) 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 satisfaisante (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* 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; Pascal et Olivry, 2015). D'après Lee et Heo (2011), l'indice de Fournier modifié (*MFI*) développé par Arnoldus (1977, 1980) pour le Maroc est le bon exemple de cette approche (Lahlou et *al.*, 2015). Récemment, cet indice a été utilisé largement en Himalaya (Pandey et *al.*, 2009), en Turquie (Ozsoy et *al.*, 2012; Demirci et Karaburun, 2012) et à l'Inde (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 par exemple de l'Italie (Diodato, 2004; De Paola *et al.*, 2013), de l'Espagne (Jordán, 2010) 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 est basé sur le concept de Diodato (2004, 2005), et exprimé comme suit:

$$\mathbf{R}_{\text{MedREM}} = \mathbf{b}_0 \cdot \mathbf{P} \cdot \sqrt{\mathbf{d}} (\alpha + \mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{L}) \text{ (Mj.mm/ha.h.an).}$$

Où:

$$\mathbf{b}_0 = 0,117 \text{ en Mj ha}^{-1} \text{ h}^{-1};$$

$$\mathbf{b}_1 = -0,015 (\mathbf{d}^{0,5} \text{ mm}^{-0,50-1});$$

$\alpha = 2,00$ et $L =$ latitude de la station météorologique d'étude exprimée en degré décimal (d'après le Modèle de $\mathbf{R}_{\text{MedREM}}$);

P et d sont respectivement les précipitations moyennes annuelles et celles journalières maximales par année en mm.

3.5.2. L'érodibilité de sol K

Le facteur K est une mesure empirique d'érodibilité de sol affectée par les propriétés intrinsèques du sol (Fu *et al.*, 2005). Le facteur K 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, et il est en grande partie déterminé par le type de sol (Renard *et al.*, 1997).

3.5.3. La topographie LS

Les facteurs de L et S dans le modèle *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. L'accumulation et l'accélération du ruissellement sur les plus longues

pentent augmentent sa capacité au détachement et au transport des particules (Haan et *al.*, 1994).

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).

Le facteur LS est estimée à partir d'un MNT (Wang et *al.*, 2002). Le calcul de LS nécessite des facteurs tels que l'accumulation de flux et l'inclinaison de la pente.

3.5.4. Le couvert végétal C

Le couvert végétal (C) est après la topographie le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols. Dans le modèle *RUSLE*, l'effet du couvert végétal est incorporé au facteur d'aménagement du couvert (El Garouani et *al.*, 2009). Il est défini comme un ratio de la perte en sol sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport à la perte en sol correspondante sur un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978).

Le facteur C, est calculé 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 des valeurs de *NDVI* pour l'évaluation de la perte de sol avec *RUSLE* (Wang 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 le *NDVI* dérivé des images de télédétection. 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).

3.5.5. Les techniques antiérosives P

Le facteur P explique les différentes techniques agricoles et agroforesteries 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- telles que, le labour suivant les courbes de niveau, la culture des bandes, le terrassement et 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).

Le facteur P 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, 2012). Un réseau des banquettes d'infiltration sur des pentes inférieures à 6% associée à un fruitier tel que l'olivier par exemple, diminue l'effet érosif de 1 t/ha à 0.0227 t/ha (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 à 0.02 t/ha. Lorsque la pente du terrain est douce (< 12%), il est nettement préférable d'utiliser la technique des cordons de pierres sèches. L'installation de cordons de pierres sur les versants raides et la mise en place de seuils dans les ravines suppriment le ruissellement des petites averses, augmentent la pluie d'imbibition, étalent les crues et réduisent les débits de pointe et donc les transports solides qui envasent les barrages (Panagos et *al.*, 2015). Les parcours bien protégés sont également plus efficaces que les cordons de pierres sèches dans un parcours libre. Ils diminuent les pertes en sol de 1 t/ha à 0.0903 t/ha (Panagos et *al.*, 2015).

3.6. Conclusion

L'intégration de modèle *RUSLE* et sa flexibilité dans les outils spatiaux dont le SIG et de la télédétection rend facilement l'évaluation des pertes en sol. En effet, l'utilisation de *RUSLE* dans le but d'évaluer les pertes en sol à l'échelle des bassins versants a donné des résultats encourageants et intéressants, amenant à une suggestion des différentes techniques anti-érosions ainsi que leur pertinence selon les caractéristiques du bassin versant étudié. Cette méthode apporte une aide aux décideurs et aux aménagistes pour planifier des interventions de manière rapide et fiable contre l'érosion hydrique.

La collection des données se concernent uniquement sur les cinq facteurs naturels qui le constituent, influençant l'érosion hydrique, tels que, les précipitations, la lithologie, la topographie, le couvert végétale ainsi que les techniques de la gestion dans un bassin versant.

CHAPITRE 4 : EVALUATION DE PERTES EN SOL PAR LE MODELE RUSLE ET DEPOSITION INTEGREE DANS LE SIG

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 patrimoines. Cette connaissance peut contribuer au développement du détail des directives pour le choix de la commande pratique mieux adaptée aux besoins particuliers de chaque emplacement (Filippo, 2006).

En raison du coût élevé des techniques adéquates de conservation des zones à intérêt socioéconomique et ses objectifs de production de plus en plus croissantes telles que l'augmentation de la population, le développement des infrastructures et la dégradation des terres productives, il est indispensable de viser les solutions et les ressources dans les zones à haut risque, plutôt que de les répartir équitablement entre le paysage (Shiferaw, 2011).

Différents scénarios de gestion et de planification de l'utilisation des terres peuvent alors être mises en œuvre pour faire face aux divers problèmes environnementaux. Ces tentatives doivent prendre en considération les conditions physiographiques, climatiques, biophysiques et socio-économiques du milieu en question.

En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active. L'érosion spécifique varie entre 20 et 40 t/ha/an, comme nous l'avons signalé dans l'introduction de notre étude. En plus, l'Algérie est un pays qui connaît un énorme déficit hydrique. Pour pallier à ce problème, l'Etat a mené une politique de grande hydraulique consistant en la création d'infrastructures telles que les barrages. Cependant, les ouvrages hydrauliques localisés dans le nord de l'Algérie (au nombre de 30 barrages), s'ensavent à un rythme rapide (MREE, 2015).

Le barrage de l'oued Kramis qui a été mise en service en 2004 et dont la capacité est de 45.4 Millions m³ est menacé par l'ensablement de par son emplacement. Il se situe à l'extrême ouest du grand bassin versant de côtier algérois. Cet ouvrage hydraulique est soumis à un taux d'ensablement très avancé avec un volume annuel de sédiments atteint 400 000 m³, selon des mesures bathymétriques effectuées en 2014 au niveau du lac de barrage.

En 2017 et suite d'une crue importante enregistrée amenant à un déversement au niveau de la digue du barrage, une expertise française de réhabilitation de réaménagement au niveau de cette dernière a été effectuée. Face à cette situation désastreuse, et vu son intérêt socioéconomique qui le joue dans une région à vocation agricole, le barrage du bassin versant de l'oued Kramis a eu une nouvelle révision au niveau son infrastructure par l'Etat Algérien et son partenaire Italien (ANBT, 2017).

Le but de ce travail consiste à intégrer les modèles d'évaluation de l'érosion (*RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation*) afin de localiser les zones prioritaires pour d'éventuelles interventions d'aménagement hydro-agricoles et de conduite culturale dans une région méditerranéenne qui est particulièrement encline aux procédés d'érosion. La prise en considération des mesures relatives à la campagne bathymétrique (2014) effectuées au niveau du lac de barrage du bassin versant de l'oued Kramis sera fort utile pour appliquer le modèle *RUSLE* au moyen des outils spatiaux tel que le Système d'Information Géographique (SIG) et la Télédétection.

RUSLE est un modèle prédictif basé sur des formules empiriques relatives aux cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique tels que, l'érosivité de pluie, la vulnérabilité du sol, la topographie du terrain, le couvert végétal, et les techniques antiérosives. (Prasannakumar et al., 2012). L'évaluation des pertes en sol par l'érosion hydrique a été obtenue par la combinaison des cartes thématiques avec leurs bases de données relatives aux facteurs de l'équation universelle *RUSLE* au moyen de *l'analyt tool* du logiciel ArcGIS 10.2.

4.2. Démarches d'estimation des pertes en sol au moyen de modèle *RUSLE*

4.2.1. L'érosivité des pluies: Facteur R

Le facteur R est estimé par le modèle de Diodato (2004, 2005). Ce modèle empirique est exprimé comme suit: $R_{MedREM} = b_0 \cdot P \cdot \sqrt{d} (\alpha + b_1 \cdot L)$ (Mj.mm/ha.h.an).

Cette formule a été appliquée à onze stations se trouvant dans ou à proximité du bassin versant de l'oued Kramis pour une série d'observation de 22 ans (1994-2016), Le facteur R pour chacune des stations a été estimé (Cf. Tableau 11).

Tableau 11. Les valeurs de R prédictif avec les erreurs standardisées.

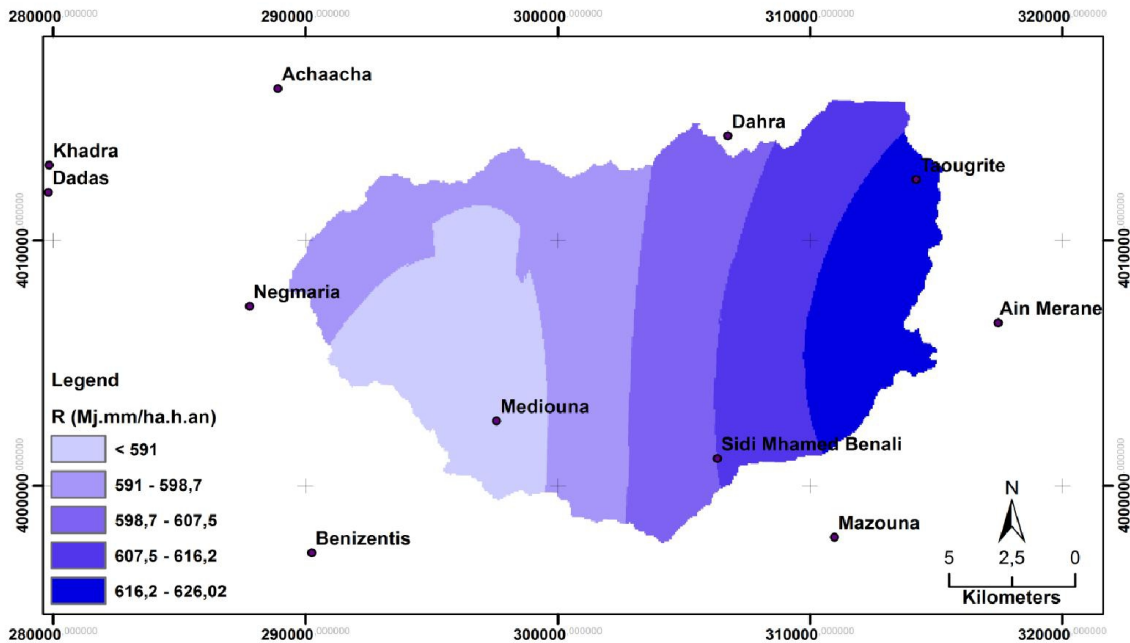
n°	Station	PCS : Nord_Sahara_1959_ UTM_Zone_31N		R (Mj.mm/ha.h.an)		erreurs standardisées
		Longitude X (dd)	Latitude Y (dd)	Observé	Prédictif	
1	Ain Merane	0,970	36,190	630,5	618,9	-1,33
2	Taougrite	0,933	36,242	619,3	621,6	0,28
3	Mazouna	0,900	36,110	611,8	619,6	0,94
4	SMBA	0,848	36,138	609,4	602,5	-0,99
5	Dahra	0,848	36,232	604,4	607,8	0,36
6	Negmaria	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

Source : L'Auteur, 2017.

D'après les valeurs figurées dans le tableau 11 ainsi que la figure 17, on note 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 celle minimale a été observée au Sud-ouest de la zone d'étude chez les stations de Mediouna et Benizentis (586 Mj.mm/ha.h.an) et (586.4 Mj.mm/ha.h.an) respectivement.

L'extrapolation d'érosivité des pluies sur l'ensemble de la zone d'étude a été réalisée au moyen de l'ArcGIS 10.2, en utilisant l'outil *Geostatistical analysis Kriging/Cokriging*.

Les valeurs de R mesurées au niveau de notre zone d'étude sont relativement similaires à celles trouvées dans d'autres bassins versants de la méditerranée, comme par exemple, le bassin versant de Calore en Italy (Diodato et Bellocchi, 2009), le bassin versant de l'oued Jannet en Tunisie (Jebari et al., 2012), le bassin versant de Mustafa kemalpasa en Turquie (Ozsoy et al., 2012), et sur le nord algérois (Meddi et al., 2016).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 17. L'érosivité de pluie R dans la zone d'étude.

Afin de vérifier la fiabilité des valeurs de facteur R, l'érosivité des pluies calculée, a été interpolée avec géostatistique au moyen du logiciel de l'ArcGIS 10.2.

Après l'application et le teste 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 de meilleurs résultats de la validation croisée et de la racine carrée de la moyenne des erreurs (*RMS*), (Cf. Figure 26 Annexe 1).

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

En générale, le meilleur modèle est celui qui à la moyenne la plus proche de zéro et la plus petite erreur de prédiction de racine carrée moyenne (*RMS*).

Si les erreurs de prédiction ne sont pas biaisées, l'erreur de prédiction moyenne devrait être proche de zéro, mais nous devons toujours avoir à l'esprit que cette valeur dépend de l'échelle des données utilisées (Kouli et *al.*, 2009).

4.2.2 .L'érodibilité du sol: Facteur K

Les formations géologiques de la chaîne du Tell oranais qui affleurent sur le bassin s'est mis en place depuis le crétacé supérieur avec une structure complexe constituée de marnes, 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).

La majorité de ces formations est donc relativement friables mais les sols qui se développent dessus sont peu évolués. Il n'y a pas d'individualisation d'horizons.

Les seules différences qu'on observe entre les substrats et leurs altérites sont une densité plus faible et un ameublissement plus prononcé. On observe rarement une tendance à la formation de vertisols sur 10 à 30 cm de profondeur dans les zones en pente faible.

Pour déterminer le facteur K dans le bassin versant, l'échantillonnage a été effectué à la surface des altérites des différentes formations géologiques affleurant dans le bassin versant.

Nous avons prélevé plusieurs échantillons sur plusieurs affleurements du même faciès (2 à 4 selon son extension) sur lesquels les mêmes analyses ont été pratiquées. Nous avons attribué pour chaque faciès la moyenne des valeurs de K trouvés.

Nous avons calculé le facteur K par sa formule qui a été utilisée largement en méditerranée ; Les résultats sont mentionnés dans le tableau 12.

Les valeurs de l'érodibilité du sol K sont déterminées expérimentalement au laboratoire en se basant sur la formule de Wischmeier et Smith (1978).

$$100K = 2,1M^{1,14} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5(c - 3) / d$$

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.

Tableau 12.Facteur K et caractéristiques analytiques des affleurements du bassin versant de l'oued Kramis.

Echantillons	Sable fin (50 -200µm)	Limon (2 µm - 50 µm)	Argile (0 - 2 µm)	MO %	b= Perméabilité	c= Structure	K (t.h/Mj.mm)
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	14.4	11.3	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

Source : (Analyses effectuées au Laboratoire des sciences du sol, Université Mohamed Boudhief M'sila, Algérie).

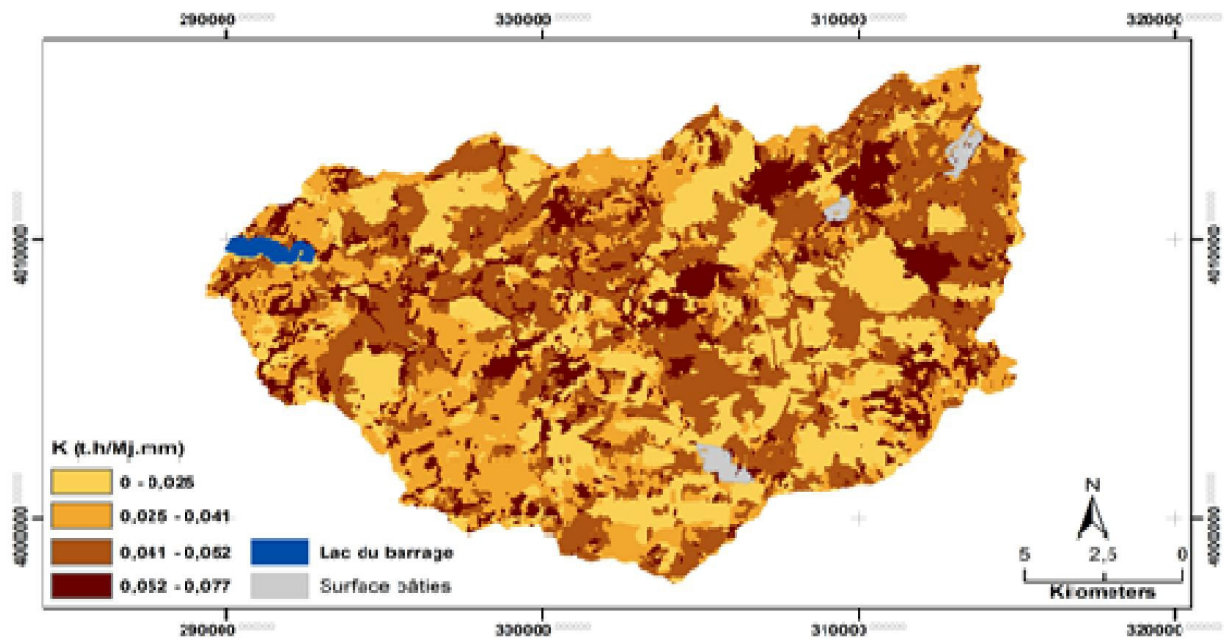
Chaque type de sol a été associé à une valeur de K. La carte de K a été établie suite à la méthode de reclassement à l'aide du logiciel ArcGis 10.2. Pour simplifier la lecture des résultats ainsi leur croisement avec d'autres cartes thématiques représentant le modèle *RUSLE*, il était utile de regrouper les valeurs rapprochées de K dans 4 classes différentes réparties selon un gradient d'érodibilité croissant. Ensuite grâce au SIG nous avons pu avoir la répartition spatiale de ces classes (Cf. Tableau13et Figure 18).

Tableau 13. Distribution des valeurs du facteur K dans le bassin versant de l'oued Kramis.

Classes de l'érodibilité du sol (K)	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

Source : L'Auteur, 2017.

D'après le tableau 13 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).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 18. Carte de l'érodibilité du sol de la zone d'étude.

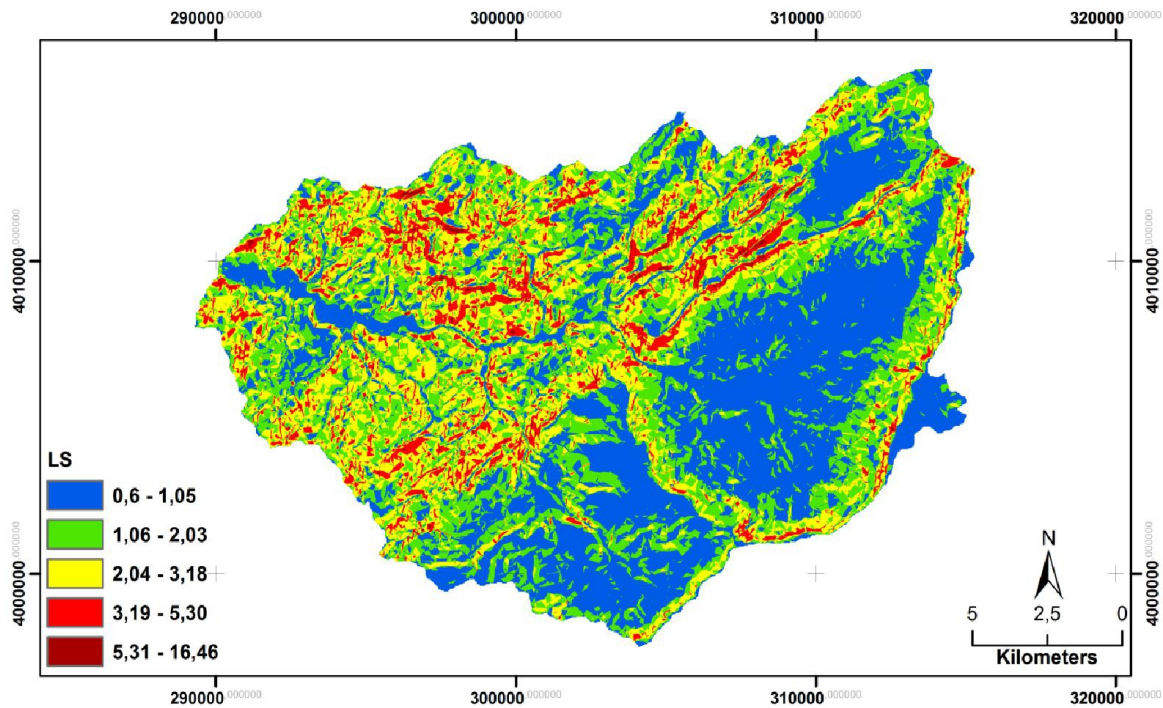
4.2.3. La topographie: Facteur LS

Le calcul de LS nécessite des facteurs tels que l'accumulation de flux et l'inclinaison de la pente. La combinaison de facteur LS à partir du la longueur MNT 30 a été faite pour le bassin versant de l'Oued Mina au moyen du *Kit Spatial Analyst* et l'outil *Hydrotools extension tools* suivant l'équation de Burch et Moore (1986).

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

Où *Cell size* pour cette étude est de 30 m.

Les valeurs du facteur LS dans la zone d'étude variées de 0,6 à 16,46, avec une moyenne et un écart type de 2 et 1,63 respectivement (Cf. figure 19).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 19. Carte de la topographie LS de la zone d'étude.

La majorité de la zone d'étude a une valeur de LS inférieure à 2 avec une surface de 51.8 % de la zone d'étude et certaines zones spécifiques uniquement montrant des valeurs supérieures à 5.31 (Cf. Tableau 14).

Tableau 14. Distribution des valeurs du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Kramis.

Classes de LS	Surface	
	Km ²	%
0.6 - 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 - 16.46	3.0	1.0
Total	302	100

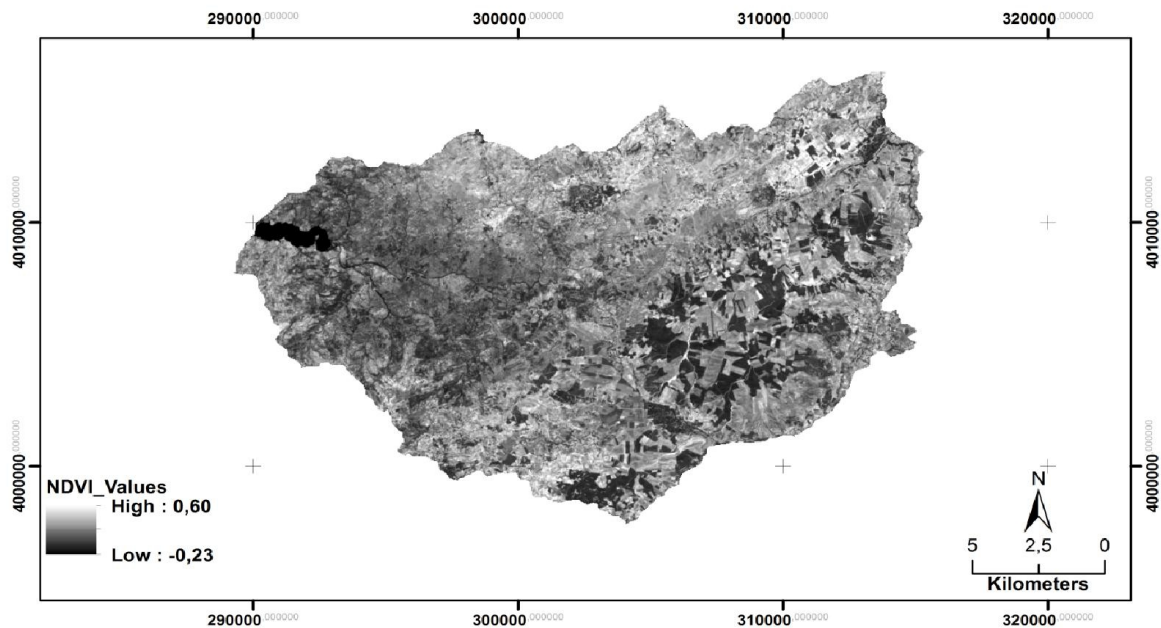
Source : L'Auteur, 2017.

4.2.4. L'occupation du sol: Facteur C

Pour couvrir notre zone d'étude, une scène d'images *Landsat_8 TM* acquises le 05 Mai 2014 avec une résolution spatiale de 30 m ont été utilisées (Cf. Figure 20). L'indice *NDVI* pour *Landsat-ETM* est donné par la formule suivante:

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

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



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 20. Les valeurs de *NDVI* de la zone d'étude d'une image satellite acquise le 05/05/2014.

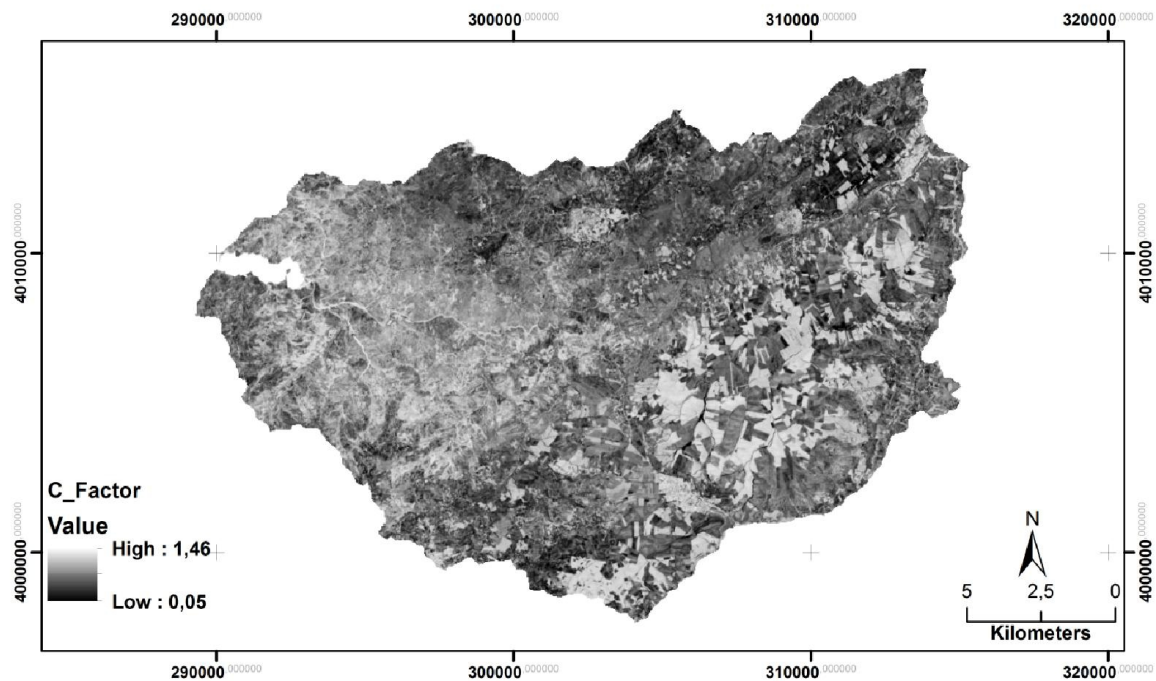
Pour générer l'estimation des valeurs de l'indice *C* en fonction de *NDVI* sur l'ensemble de la zone d'étude au moyen du logiciel ArcGIS 10.2, nous avons utilisé la formule suivante:

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

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

Van der Knijff et *al.*, (2000), et d'autres chercheurs Benchettouh et *al.*, (2017); ont trouvé une régression linéaire droite entre l'indice *NDVI* et les valeurs de *C* en prenant-compte

des paramètres α et β égale à 2 et 1, respectivement. Dans la zone d'étude les valeurs de C se situent entre 1,46 et 0,05 (Cf .Figure 22).



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 21. les valeurs de C de la zone d'étude d'une image satellite acquise le 05/05/2014.

4.2.5. Les techniques antiérosives: Facteur P

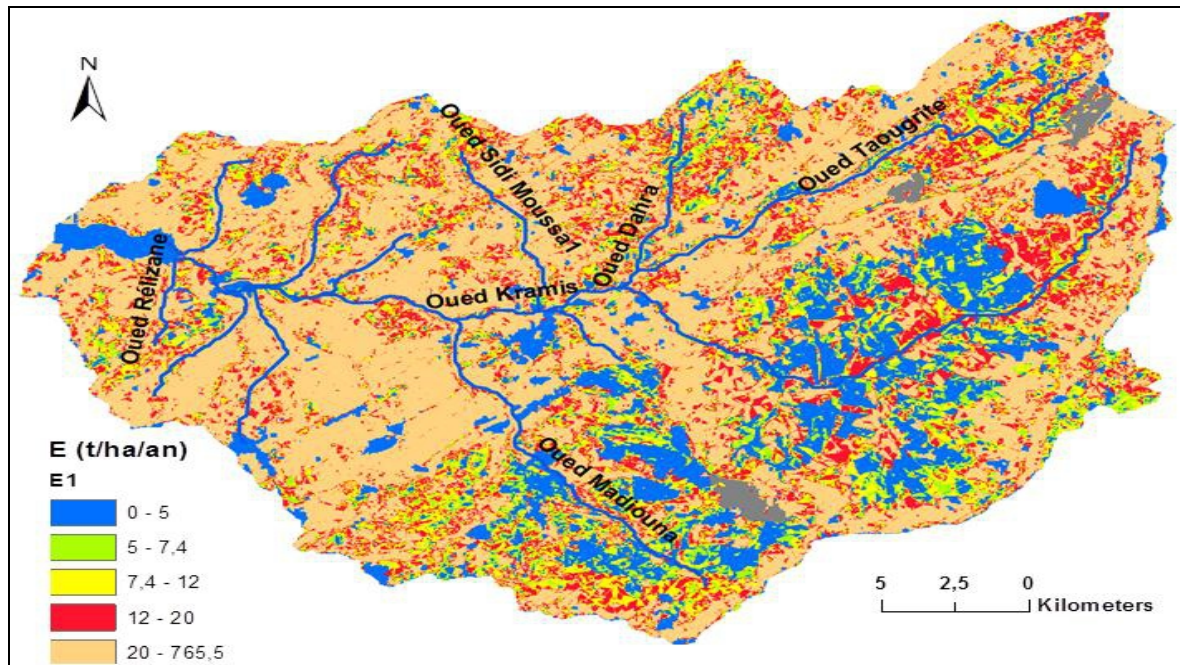
Sur toute la surface du bassin versant de l'oued Kramis n'a aucune technique antiérosive effectuée dans le cadre de lutte contre l'érosion hydrique sauf quelques aménagements mécaniques comme par exemple les seuils sur des versants à pentes raides pour contrer le ravinement.

En outre, la majeure partie de la surface de la zone d'étude se sont des cultures céréalières et les labours sont rarement parallèles aux courbes de niveau. Il y a quelque essai de réhabilitation des forêts par des reboisements de Pin d'Alep. Pour toutes ces raisons, nous avons attribué la valeur $P = 1$ à toute la superficie du bassin.

4.3. Résultats de la quantification des pertes en sol par le modèle *RUSLE*

L'évaluation des pertes en sol par érosion hydrique a été obtenue à l'aide de l'ArcGIS 10.2 par la superposition des cartes thématiques avec leurs bases des données des différents facteurs influençant l'érosion hydrique suivant le modèle *RUSLE*.

D'après la carte synthétique des pertes en sol (Cf. Figure 22), on déduit que, le taux d'érosion est différent d'une zone à l'autre du bassin versant selon l'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique.



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 22. Carte des pertes en sol du bassin versant de l'oued Kramis.

Le résultat obtenu fut une subdivision du bassin en 6 934 parcelles, qui possèdent chacune des valeurs homogènes des différents facteurs qui contrôlent l'érosion.

La perte en sol moyenne, par érosion hydrique, pour l'ensemble du bassin versant qui à une superficie de 302 Km² est de 27.3 t/ha/an. Les pertes maximales et minimales sont respectivement 765.5 t/ha/an et 0 t/ha/an avec un écart type de 31.23 t/h/an. Les pertes totales annuelles du bassin versant sont de 82 327 022.1 tonnes.

Cette forte Hétérogénéité des surfaces en termes des pertes en sol du bassin versant de l'oued Kramis, s'expliquerait principalement par les deux principaux facteurs qui contrent l'érosion hydrique 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 de LS de 2 et un écart type de 1.3.

D'après la carte d'occupation des sols du bassin versant de l'oued Mina réalisée, on remarque que la surface couverte toute l'année et en particulier durant les grandes averses représente 60.3 % de la surface totale (Benchettouh et *al.*, 2017), tandis que celle du bassin

versant de l'oued Kramis ne représente qu'un taux de 8.9 % de la surface du bassin versant.

La perte moyenne en sol du bassin versant de l'oued Mina est de 11.2 t/ha/an. Les pertes maximales et minimales sont respectivement 521.4 t/ha/an et 0 t/ha/an avec un écart type de 18.6 t/h/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de 59 892 112.4 tonnes (Benchettouh et *al.*, 2017). Vu son importante surface par rapport au bassin versant de l'oued Kramis, on remarque que cette perte est très inférieure à celle trouvée au niveau de ce dernier. Cette grande différence correspond comme nous l'avons mentionné aux facteurs de l'érosion hydrique, notamment la topographie des reliefs et le couvert végétal.

4.4. Répartition des pertes en sol par rapport au seuil de tolérance

En se référant à la littérature, la moyenne des pertes de terre estimée par le modèle de *RUSLE* diffère d'une région à l'autre du globe, ainsi que le seuil de tolérance de cette perte.

En effet, aux Etats Unis et selon, Pimentel et *al.*, (1995), le seuil de tolérance des pertes des terres cultivées était entre 5 et 12 t/ha/an. En Asie, Prasannakumar et *al.*, (2011), ont constaté que le seuil de tolérance des pertes en sol dans le sous bassin versant de Kelara (l'Inde) était inférieur à 1.5 t/ha/an. Kouli et *al.*, (2009), ont constaté 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. En outre, Yang et *al.*, (2003), ont constaté un taux des 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, ce phénomène devient un sérieux problème. Dans le bassin versant de l'Alaca, en Turquie toujours, Imamoglu et Dengiz (2016), ont estimé le taux de tolérance de l'érosion hydrique entre 0 t/ha/an et 12 t/ha/an. Sur la rive sud du bassin méditerranéen, 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.

D'après Wischmeier et Smith (1978), les sols peuvent supporter une perte allant jusqu'à 12 t/ha/an. Masson (1971), dans une étude de l'érosion des sols par l'eau en Tunisie, 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, 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 dans des régions similaires à notre zone d'étude. D'après ces auteurs, si les pertes en sol dépassent un seuil de 20 t/ha/an, elles peuvent devenir fortes et dangereuses.

En Tunisie, 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 de risque de l'érosion hydrique sera élevé.

En Algérie, Benchettouh et al., (2017) dans une région similaire à notre zone d'étude (le bassin versant de l'oued Mina) région du Tell oranais, située au nord-ouest de l'Algérie ont donné une tolérance qui s'étale sur une moyenne de 7.4 t/ha/an à 12 t/ha/an.

Selon ces travaux qui ont été effectués à travers le monde et publiés dans le contexte de la quantification des pertes en terres par le Modèle *RUSLE*, il a parue claire que le seuil de tolérance varie d'une région à l'autre. Cette différence dans une région donnée est liée au substrat du sol et ses facteurs de pédogenèse. En effet, une région à un sol peu épais et sous un climat à aridité estivale accentuée et à une saison sèche très longue, la production de terre (pédogénèse) sera lente, et par conséquent le seuil de tolérance sera moins, c'est le cas par exemple, des régions méditerranéennes (Bou Kheir et al., 2001).

En Algérie, aucune classification de perte en sol n'a été signalée (Benchettouh et al., 2017). Pour nos résultats, 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 sont de plus de 20 t/ha/an elles peuvent devenir fortes et dangereuses. On note que, cette classification a été appliquée au Maroc, dans le bassin versant de l'oued Boussouab (Sadiki, 2004), et le bassin versant de l'oued Mina (Benchettouh et al., 2017) . Ces régions sont très similaires à notre zone d'étude.

Selon cette classification, les pertes en sol de notre zone d'étude sont réparties en cinq catégories:

- ☞ Très faibles, lorsqu'elles sont comprises entre 0 t/ha/an et 5 t/ha/an;
- ☞ Faibles, lorsqu'elles ne dépassent pas 7,4 t/ha/an ;
- ☞ Moyennes lorsqu'elles sont comprises entre 7,41 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.

La répartition de ces classes ainsi que leurs surfaces correspondantes sont représentées sur la figure 23 et les proportions de chaque classe sont figurées dans le tableau 15.

Tableau 15. Répartition des classes des pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Kramis.

Les pertes de sol	Classe (t/ha/an)	% des pertes de 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
Très fortes et dangereuses	> 20	82.7	147.0	48.6
Total	82 327 022.1	100	302	100

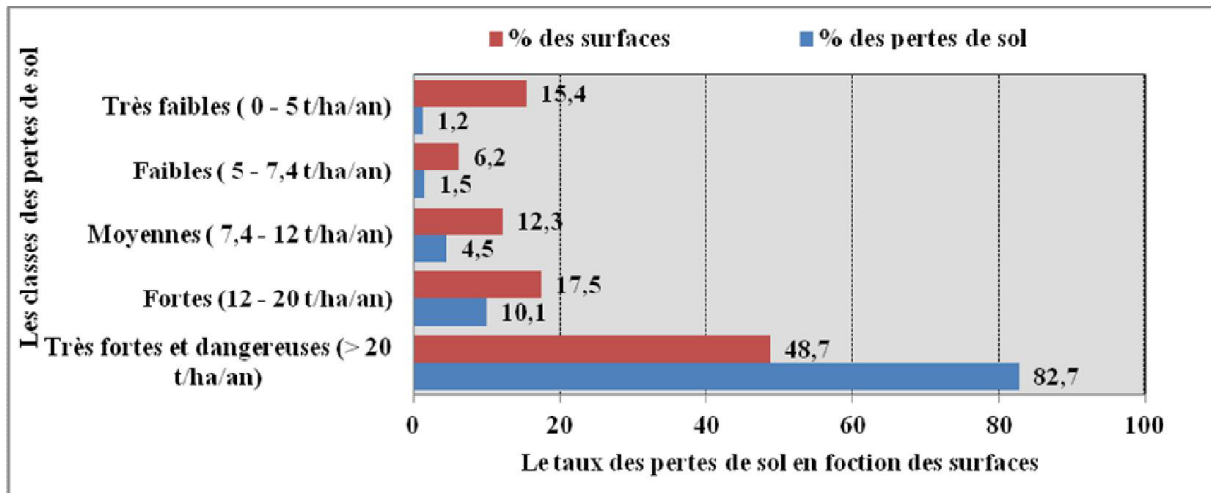
Source : L'Auteur, 2017.

Le tableau 15 et la figure 23 font apparaître les constatations suivantes:

☞ Seulement 21.6 % de la surface des sols du bassin versant de l'oued Kramis subissent une perte en sol tolérable (très faible à faible).

☞ La répartition des pertes n'est pas proportionnelle aux surfaces du bassin versant en effet; seulement 48.7 % de la surface du bassin contribuent par 82.7 % des pertes en sol totales.

☞ La moyenne des pertes en sol de la zone d'étude est de 27.3 t/ha/an. Cette valeur, se situe dans la catégorie où les pertes en sol considérées comme très fortes et dangereuses.

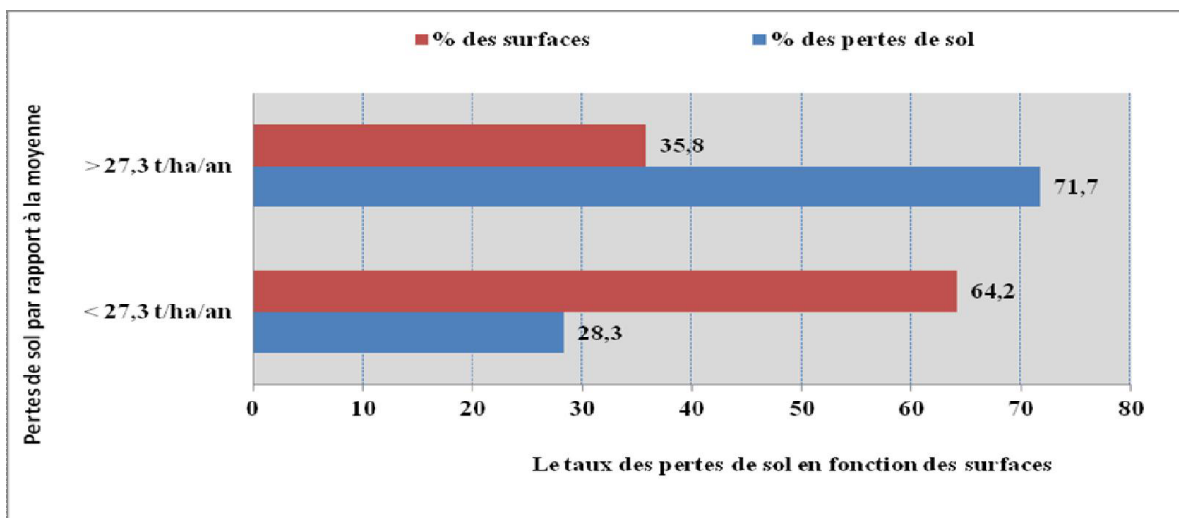


Source : L'Auteur, 2017.

Figure 23. Distribution des pertes en sol en fonction des surfaces par classe dans le bassin de l'oued Kramis.

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

La figure 24 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, alors que celles qui perdent moins que la moyenne occupent 64.2 % de la superficie du bassin et ne participent que par 28.3 % des pertes.



Source : L'Auteur, 2017.

Figure 24. Distribution des pertes en sol par rapport à la perte moyenne.

4.6. Comparaison avec les pertes en sols enregistrées dans d'autres bassins versants similaires à notre région d'étude

Les pertes en sols estimées par le modèle *RUSLE* au niveau du bassin versant de l'oued Kramis sont relativement élevées par rapport à celles trouvées soit en Algérie, par exemple la bassin versant de l'oued Mina (Benchettouh et *al.*, 2017) ; Soit en Tunisie comme le bassin versant de Batta (Kefi et *al.*, (2011);et celui de Jannet (Jebari, 2012),(Cf.Tableau 16).

Tableau 16.Taux moyen des pertes en sol calculé au moyen de *RUSLE* dans quelques bassins versants avoisinants et similaires au bassin versant de l'oued Kramis.

Nom du bassin versant	Localité	Surface du bassin versant (Km ²)	Pertes de sol moyennes (t/ha/an)	Auteurs
Oum Er-Rbia	Maroc	1531	224	Yjjou et al. (2014)
N'FIS	Maroc	1707	115	Markhi et al. (2015)
Oued Boussouab	Maroc	252.2	53.4	Sediki (2004)
Aknoul	Maroc	2.6	40	Faleh (2004)
Batta	Tunisie	9.61	19.9	Kefi et al. (2011)
Oued Jannet	Tunisie	5.41	12	Jebari (2012)
Oued Mina	Algérie	4800	11.2	Benchettouh et al. (2017)

Source : L'Auteur, 2017.

D'après le tableau 16, et de manière générale on constate que, les pertes en sol sur la rive sud de la méditerranée augmentent progressivement de l'ouest vers l'est. En effet, les bassins versants du Maroc subissent une perte en sol extrêmement importante, c'est le cas par exemple du bassin versant de l'oued Oum Er-Rbia, région ouest du Maroc avec une valeur de 22.4 t/ha/an. Tandis que, les bassins versants de la Tunisie ont 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 le bassin versant de l'oued Mina avec une perte moyenne de 11.2 t/ha/an.

A l'échelle locale, cette proportionnalité spatiale de l'ouest en est, sur l'érosion spécifique a été également signalée par Bourouba (2002), (Achite et *al.*, 2006) (Cf. Tableau 17).

Tableau 17. Les pertes en sol par l'érosion spécifique dans quelques bassins versants du nord Algérois.

Nom du bassin versant	Localité		Surface du bassin versant (Km ²)	Pertes en sol moyennes (t/ha/an)
	X (dd)	Y(dd)		
Tafna	- 1,42	34,88	5260	3.01 - 4.06
Côtiers Oranais	- 0,81	35,51	4591	9.38
Isser	3,42	36,36	4165	39.90
Côtiers Algérois	1,90	36,44	8069	15.57 - 93.97
Chott Hodna	4,67	35,26	25840	1.64 - 51.53
Côtiers Constantinois	8,25	36,65	3215	2.52 - 103.75

Source : L'Auteur, 2017.

Yjjou et *al.*, (2014), Ont constaté que 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 versant.

4.7. Les trois catégories de pertes en sol des régions traitées en priorité

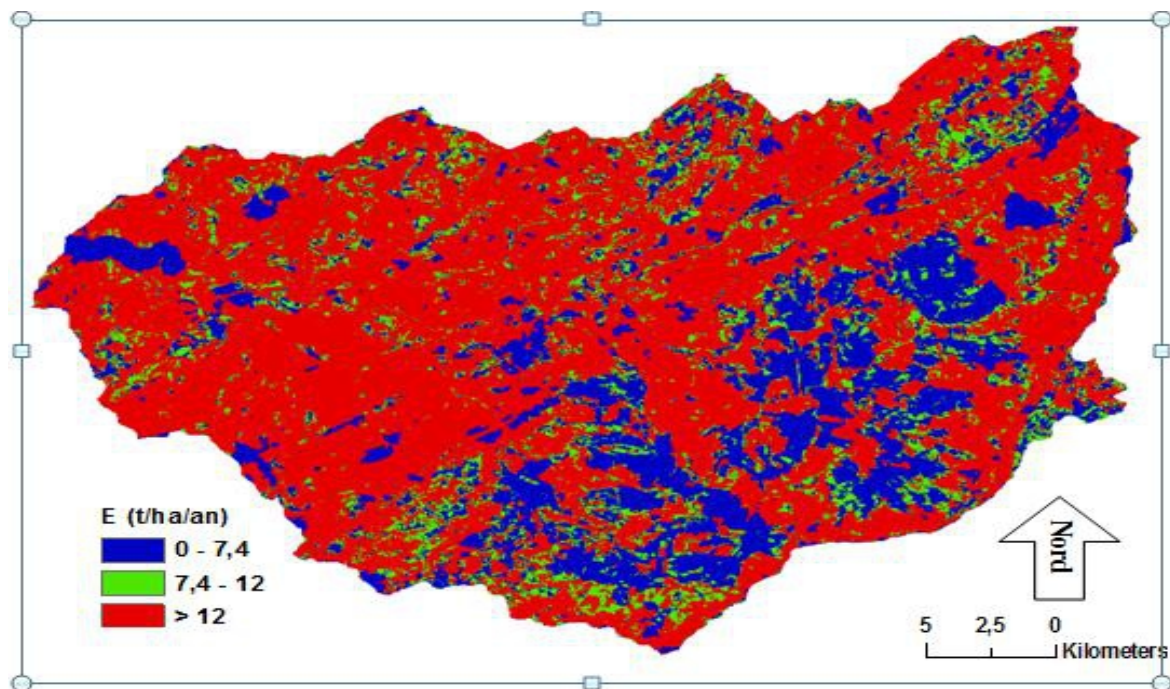
Les trois catégories de la classification des pertes en sol résultantes au niveau de notre zone d'étude sont figurées dans le tableau 18.

Tableau 18. Les catégories de classification des pertes en sol et leurs surfaces.

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
Fort et dangereux	> 12	199,7	66,1	A
Total	82327022,1 t/an	302	100	/

Source : L'Auteur, 2017.

Les résultats des pertes en sol obtenus par le modèle *RUSLE* ont permis de révéler qu'environ 66,1 % des versants du bassin de l'oued Kramis surjettent une perte en sol insupportable (élevée et dangereuse) et qu'un taux de 12,3 % de sa surface représente des régions où les pertes en sol sont moyennes. Ces zones sont cependant essentiellement près du réservoir ainsi qu'aux pourtours est et au sud-est du bassin (Cf. figure 25). Ces mêmes secteurs présentent également des versants susceptibles à toutes formes d'érosion.



Source : L'Auteur, 2017.

Figure25. Les catégories de classification des pertes en sol.

Dans la catégorie A (forte et dangereuse), on remarque que la majeure partie de cette catégorie se localise dans le secteur nord-ouest de la zone d'étude.

Les valeurs très élevés des pertes en sol se traduisent par des valeurs relativement importantes du facteur topographique LS (supérieures à 3,18) où les pertes en sol moyennes correspondantes dépassent 31,6 t/ha/an (Cf. Tableau 18), ça d'une part, et par le couvert végétal, d'autre part. Pour ce dernier et en se référant à la carte du facteur C (Cf. Figure 21), nous trouvons que le risque érosif dans ce secteur est généralement élevé ceci explique nettement que le facteur du couvert végétal joue un rôle de protecteur.

De plus, Panagos et *al.*, (2015), montrent que le facteur C diminue le risque érosif jusqu'à 1/10000 sous une forêt dense de conifères mixte ou une forêt dense à feuilles larges par rapport à une parcelle nue.

Selon leur nature (sol et topographie), ces zones nécessitent des interventions de lutte antiérosive de divers types sur une surface totale de 199,7 Km², soit sur environ 66,1 % du secteur étudié (Cf. Tableau 18).

Dans la catégorie B, on constate qu'une surface totale de 37,2 Km², soit sur environ 12,3 % du secteur étudié a été qualifiée comme une zone à risque érosif moyenne. Cette catégorie des pertes en sol correspond à l'effet du facteur topographique LS, qui varie entre 0,6 - 1,05 et celui de l'érodibilité du sol qui comprend entre 0 - 0,025 t,h/Mj,mm.

En ce qui concerne, les zones classées dans la catégorie C d'une surface totale de 65,1 Km², nécessite des techniques antiérosives conduites par les agriculteurs de la région.

4.8. Plan d'aménagement de protection

Un plan d'aménagement de protection a été proposé pour lutter contre toute forme de l'érosion hydrique dans notre bassin versant.

Selon ce plan, le bassin nécessite des interventions de lutte anti-érosive de divers types sur une surface de 161.3 km², soit sur environ 53.4 % du secteur étudié. Ces interventions font l'objet d'une dizaine de techniques de protection dont certaines purement mécaniques (implantation des seuils pour contrer le ravinement, installation des retenus collinaires sur les versants et un ouvrage de capture des sédiments sur le lit de l'oued principal) (Cf. Tableau 19). C'est le cas des zones classées dans la catégorie extrême noté A. Par ailleurs, certaines zones nécessitent une intervention de lutte antiérosive combinée, c'est le cas des zones classées dans la catégorie B.

Ces aménagements consistent à mettre en place des seuils sur les versants pour contrer le ravinement et des reboisements sur les régions aptes à recevoir des espèces forestières, comme par exemple, le Pin d'Alep et l'opuntia.

En ce qui concerne, les zones classées dans la catégorie C, cette dernière nécessite des techniques antiérosives conduites par les agriculteurs de la région, comme par exemple, la plantation des haies vives, des cordons en pierres sèches et des techniques de labour suivant les courbes de niveaux.

Tableau 19. Coordonnées d'implantation des retenues collinaires et de l'ouvrage de capture des sédiments dans les oueds.

Retenues et ouvrage	Coordonnées géographiques de chaque site à aménager (Nord_sahara_1959 UTM_zone 31N)	
Retenue # 1	X : 302926.3	Y : 4008338.4
Retenue # 2	X : 302895.02	Y : 4008127.4
Retenue # 3	X : 298995.4	Y : 4007196.7
Retenue # 4	X : 300856.7	Y : 4007557.3
Retenue # 5	X : 295126.2	Y : 4008276.5
Retenue # 6	X : 292965.2	Y : 4009236.5
Retenue # 7	X : 294435.6	Y : 4008066.4
Retenue # 8	X : 294134.9	Y : 4007915.8
Retenue # 9	X : 292575.7	Y : 4008157.6
Retenue # 10	X : 296235.6	Y : 4008276.4
Ouvrage de capture de sédiments	X : 294957.4	Y : 48133.6

Source : L'Auteur, 2017.

4.9. Conclusion

L'intégration des cartes thématiques des facteurs de l'équation universelle des pertes en sol dans le Système d'Information Géographique (SIG), nous a permis de répondre à un certain nombre de questions relatives à:

- la classification multicritère des zones d'érosion ;
- la contribution de chaque facteur dans l'explication des pertes en sol.

La superposition des cartes des facteurs de l'équation universelle Révisée (*RUSLE*) et le croisement, multiple des bases de données nous a permis de démêler partiellement la complexité et l'interdépendance de ces facteurs dans l'analyse des risques d'érosion.

L'analyse statistique de ces résultats amènera certainement à plus d'éclaircissement et permettra de meilleures interprétations.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, on a fait appel au modèle de prédiction de l'érosion hydrique *RUSLE* au moyen des outils spatiaux à savoir SIG et la Télédétection. Cela afin d'évaluer le risque érosif et de cartographier les régions du bassin versant de l'oued Kramis potentiellement produisant des sédiments contribuant à l'envasement de son barrage. Ce bassin versant qui fait une partie importante du Tell oranais, est caractérisé par une irrégularité spatiotemporelle des pluies, un écart thermique assez élevé, une forte pente, une lithologie marneuse détériorée et une couverture végétale basée pour la plupart des cas sur des activités agricoles très inappropriées. Ce qui le rend très vulnérable à l'érosion hydrique sous toutes ses formes. Les données de Télédétection multi-temporelles et le SIG ont été utilisées pour évaluer et cartographier chaque facteur du modèle de *RUSLE* individuellement.

L'approche *RUSLE*/SIG adoptée pour ce travail est actuellement le seul moyen pour cartographier l'érosion hydrique dans ce bassin versant. En effet, elle permet d'évaluer le potentiel des pertes en sol en tout point (pixel) d'une région. Plus 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 empirique *RUSLE* définit la perte en sol comme étant l'interaction de cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique à savoir: l'érosivité des pluies (R), la sensibilité du sol à l'érosion (K), longueur / inclinaison de la pente (LS) et l'utilisation du sol (C et P). L'intégration de ce modèle dans un environnement SIG présente aussi beaucoup d'avantages, surtout ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans l'érosion. Cette intégration permet de gérer d'une façon rationnelle une quantité considérable de données quantitatives et qualitatives relatives aux différents facteurs de l'érosion hydrique, de démêler leur interdépendance et leur influence sur l'aléa érosif par des traitements statistiques issues d'une base des données relatives à une carte synthétique de quantification et de répartition des degrés de sensibilité à l'échelle spatiale.

Le résultat obtenu des pertes en sol du bassin versant de l'oued Kramis d'une superficie de 302 Km² fut sa subdivision en 6934 parcelles générant une perte totale annuelle de 82327022,1 tonnes et une perte moyenne en sol de 27,3 t/ha/an. 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

Conclusion générale

la surface du bassin versant subissent une perte tolérable et que 12,3 % appartiennent à la classe des pertes moyennes et 66,1 incluent dans la classe des pertes fortes à dangereuses.

Au total, une surface de 236,9 Km² des versants du bassin de l'oued Kramis produisent un taux des pertes en sol de 97,3 % nécessitera des mesures d'intervention pour contrer l'érosion des sols. Pour ce faire, seules les zones prioritaires reçoivent une attention particulière en matière de mesures antiérosives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abd-El Monsef, H. 2015.** *New approach for qualitative sediment yield assessment of ungauged drainage basins.* Sécheresse 2004 ; 15 (4) : p.367-73.
- Achite, M., Maddi, M. 2004.** *Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien).* Sécheresse 2004 ; 15 (4) : 367-73.
- Achite, M., B., Touaibia, et S., Ouillon. 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, p 14-19.
- Achite, M., Ouillon, S. 2007.** *Suspended sediment transport in a semiarid watershed, river Abd, Algeria (1973–1995).* J hydrol 343: p.187–202.
- AGENCE DE PRESSE XINGHUA. 2008.** *L'érosion du sol menace la Chine,* [En ligne]. http://french.china.org.cn/china/txt/2008-11/21/content_168044_46.htm. [date de consultation : 15/04/ 2017].
- 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), p.687-690.
- 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), p. 615–626.
- 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 (2017) 29–39. doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.003.
- Antoni, V., Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Zaidi, N., Laroche, B., Barthès, S., 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; p 34-39.
- Arnoldus, H.M.J.1980.** *Methodology used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco,* Bulletin F.A.O., 34 p
- Arekhi, S., Niazi, Y., Kalteh, AM. 2012.** *Soil erosion and sediment yield modeling using RS and GIS techniques: a case study, Iran.* Arab J Geosci 5:285–296.
- ANBT. 2017.** *Agence nationale des Barrages et Transfère.* [En ligne] http://www.soudoud-dzair.com/?action=contact_generale. Date de consultation. 25/05/2017.

- 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.
- Bagnouls, F., Gaussen, H. 1955** .*Saison sèche et indice xéothermique.* Bull. Soc. Hist.Nat. Toulouse 83: p. 193-239.
- Ben Slimane, 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.
- 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 (2017) 10:79. DOI 10.1007/s12517-017-2875-6.
- Benkadja, R., Hattab, A., Mahdaoui, N. Zehar, C. 2012.** *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.*agricultural field using fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex.* Journal of Environmental Radioactivity 115 (2013) 97-106. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.013.
- Benmansour, M., Duchemin, M., Nouira, A., Gallichand, J., 2006.** *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 p.
- Benmansour, M., Mabit, L., Nouira, A., Moussadek, R. Bouksirate, H. Duchemin, M. Benkdad A. 2013.** *Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan.*
- Bertol, I., Schick, J., Bandeira, D.H., Paz-Ferreiro, J., Vázquez, E.V. 2016.** *Multifractal and jointmultifractal analysis of water and soil losses from erosion plots: A case study under subtropical conditions in Santa Catarina highlands, Brazil.* Geoderma xxx (2016) xxx–xxx. doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.008.
- 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*

References Bibliographiques

ferrugineux tropical sableux au Nord-Cameroun (Mbissiri). CahOrstomSérPédol 1993 ; 28 : 309-26.

Boukheir, R., M.C., Girard, M., Khawlie, et C., Abdallah. 2001. *Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique.* Étude et Gestion des sols, Volume 8, 4. p 231 à 245.

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, 2016 - p 91 à 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. p. 255-263.

Browning, G.M., Parish, C.L. et Glass, J.A. 1947. *A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa.* Soil Science Society of America Proceedings, 23: p. 246-249.

Bourouba, M. 2002. *Contribution à l'étude des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur (Algérie orientale).* Bulletin de l'ORSTOM 18 :76-97.

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, p.125-129.

Cerdan, O.2001. *Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés.* Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France, 186 p.

Charreau, C., Nicou, R.1971. *L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux de la zone tropicale sèche Ouest Africaine.* Agron .Trop 1971 ; 26, 9 : 903-78.

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), p.400-408.

CNES, 2000. Le Conseil national économique et social. [En ligne]. <http://www.cnes.dz/cnes/>. [Date de consultation : 04/06/2017]. Algérie.

CEHQ, 2008. Centre Expertise hydrique et barrages. Québec. [En ligne] ; <https://www.cehq.gouv.qc.ca/>. [Date de consultation 04/06/2017].

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.

- Damnati, B., Ibrahimi, 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), p.195-199.
- Demmak, A. 1982.** *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale.* Thèse de Dr. Ing., Université de Pierre et Marie Curie, Paris.
- 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.I.
- 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.
- Diodato, N. 2004.** *Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy With a Mediterranean rainfall regime.* Hydrol Earth Syst Sci Discuss Copernicus Publ 8(1):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. 2009.** *MedREM, a rainfall erosivity model for the Mediterranean region.* J. Hydrol. 387, 119–127.
- Dumas, J., 1964.** *Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques O.R.S.T.O.M.* Tunis, sér. Pédologie, 3, p. 307-333.
- El Hmaid, 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 ; p. 83-91.
- El-Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Tribak, A. et Abahrour, 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.* Revue Télédétection, vol. 8, n° 3, p. 193-201.
- Emberger, L. 1955 .** *Une classification biogéographique des climats.* Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sci. Serv. Bot. Montpellier. 7: p. 3-43.
- F.A.O. Food and Agriculture Organization. 1976.** *Assessing soil degradation.* Soils bulletin 34.
- F.A.O. Food and Agriculture Organization .1990.** *La conservation et la restauration des terres en Afrique. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture_ Rome, 1990. [En ligne] [Date de consultée : 29.03.2017].*

References Bibliographies

- 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.
- Fu, B., Burgher, J. 2005.** *Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater*. Journal of Arid Environments 113 (2015) 59-68.
- Filippo, V. 2006.** *Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece*. Environ Geol (2009) 57:483–497. DOI 10.1007/s00254-008-1318-9.
- García-Ruiz, J M., Beguería, S., Nadal-Romero, Ec., González-Hidalgo, J C., Lana-Renault, N., Sanjuán, Y. 2013.** *A meta-analysis of soil erosion rates across the world*. Geomorphology 239 (2015) 160–173. doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008.
- G.D.R.E.C. 2008.** *General Directorate of Reforestation and Erosion Control*, <http://www.agm.gov.tr>, [En ligne], Date de consultation le 29.03.2017.
- Goor, F. 2005.** *L'érosion hydrique des sols dans la région wallonne, les sols et l'environnement terrestre*, [En ligne] ; <http://environnement.wallonie.be> .[Date de consultée : 21.06.2017].
- Gomer, D. 1994.** *Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen*. Thèse de Doctorat, Wasserbau, Université de Kajsruhe, Allemagne.
- 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.
- Haut Commissaire aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. 2008.** *L'érosion Au Maroc*. [En ligne]. <http://www.eauxetforets.gov.ma/fr/index.aspx>. [Date de consultation : 16/03/2017].
- 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.
- 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. 1986.** *Cinquante ans de banquettes de D.R.S. - C.E.S. en Afrique du Nord*.
- He, Q., Walling, D.E. 1997.** *The distribution of fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in undisturbed and cultivated soils*. Applied Radiation and Isotopes 48 (5), p.677-690.
- Huete, A., Justice, C. et Liu, H. 1994.** *Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS*, Remote Sensing of Environment, 49(3): p.224-234.

- 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., and 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.
- 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, p. 1-140.
- Jebari, S., Berndtsson, R., Olsson, J., Bahri, A. 2012.** *Soil erosion estimation based on rainfall disaggregation.* J Hydrol 436–437:102–110.
- Jebari, S., & Bensalah, R. 2014.** *Journée Nationale sur la valorisation des Résultats de la Recherche dans le Domaine des Grandes Cultures.* Tunisie. p. 59 -61.
- 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), p.599–606.
- 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, p.77-85.
- José, L., Garcia, R., Martin, C., Gimenez, S. 2012.** *Methodology for estimating the topographic factor LS of RUSLE3D and USPED using GIS.* Geomorphology, p 98–106.
- Kinnel, P.I.A. 2016.** *A review of the design and operation of runoff and soil loss plots.* Catena 145 (2016) 257–265. doi.org/catena.
- 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.
- Khali Issa, L., Ben Hamman, k., Lech-Hab, A., Raissouni, A. 2016.** *Cartographie Quantitative du Risque d’Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental).* Maroc, ISSN : 2028-2508.
- Kouli et al., 2009.** *Maria Kouli, Pantelis Soupios, Filippou Vallianatos. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece.* Environ Geol (2009) 57:483–497. DOI 10.1007/s00254-008-1318-9.

References Bibliographies

- 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 ; p 257–260.*
- Lahlaoui, 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, p128-139.
- Lal, R. 1995.** *Erosion-crop productivity relationships for soils of Africa.* Soil Sci Soc Am J 59(3): p 661–667.
- Laouina, A. 1992.** *Recherches actuelles sur l'érosion au Maroc.* Bull Réseau Erosion ; 12 : 292-9.
- Laflen, J. M. et Moldenhauer, W. C. 2003.** *Pioneering soil erosion prediction: the USLE story,* World Association of Soil and Water Conservation (WASWC), Special Publication, no 1, 54 p.
- Lahlou, A. 1997.** *Dégradation spécifique des bassins versants au Maroc.* Rapport n°1000. Ministère de l'équipement et de la promotion nationale, Direction de l'hydraulique, Division exploitation, service de gestion des eaux, Rabat, Maroc.
- Lee MH, Heo, L. 2011.** *Evaluation of annual rainfall erosivity index based on daily, monthly, and annual precipitation data of rainfall station network in Southern Taiwan.* Int J Distr Sensor Net. Volume 2011, Article ID 214708, doi.org/214708.
- Le Bissonnais, Y. 2008.** *L'érosion des sols: Processus, résultats expérimentaux, modélisation et cartographie,* 51p.
- 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), p.380-384.
- Lufafa, A., Tenywa, M.M., Isabirye, M., Majaliwa, M.J.G., Woome, 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.
- MADR. 2016.** Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural. Algérie.

References Bibliographies

- 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.
- Masoudi M, Patwardhan AM, Gore SD . 2006 .***Risk assessment of water erosion for the Qareh Aghaj subbasin, southern Iran.* Stoch Environ Res Risk Assess 21:15–24.
- 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.* La Houille Blanche 8, 673-679.
- Meddi, M.,Toumi.,S Assani.,A. 2016.** *Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria:* Arab J Geosci (2016) 9:282.
- McHenry, J.R. 1968.** *Use of tracer technique in soil erosion research.* Trans. ASAE 11 : p.619-625.
- Ministry of Agriculture, Forestry and Villages. 1987.** General management planning of turkey (soil conservation main plan).
- MRE. 2015.** Ministère des Ressources en Eau. Algérie. [En ligne] <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/>. [Date de consultée : 14.04.2017].
- Mohamadi, M.A., Kavian, A. 2015.** *Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots.* International Soil and Water Conservation Research (2015) 273–281. doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.10.001.
- Morsli B., M. Meddi, A. Boukhari. 2002.** *Etude de ruissellement et du transport solide sur parcelle expérimentale. Utilisation de la simulation des pluies.* Actes du Séminaire sur la gestion de l'eau. Univ. Mascara Algérie, 2002 : p.80-88.
- 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. 2002.** *Erosion et envasement des barrages: cas du bassin versant Nakhla (Rif occidental, Maroc).* Colloque sur l'eau, 24/25 octoe 2002. Université Abdelmalek Essaidi, Tétouan, Maroc.
- Mulumba, L.N., Lal, R. 2008.** *Mulching effects on selected soil physical properties.* Soil & Tillage Research 98, 106-111.

- Obalum, SE. Buri.MM., Nwite JC, Watanabe Y, Hermansah, Igwe CA, 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.
- 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.
- Ozsoy, G., Aksoy, E., Sabri Dirim ,M., Tumsavas, Z. 2012.***Determination of soil erosion risk in the Mustafakemalpaşa 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., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C.2015.** *The new assessment of soil loss by water erosion in Europe.* Environmental Science & Policy 54 438–44. [En ligne]<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>. [Date de consultée : 14.04.2017].
- Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C., Billib, M. 2009.** *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 (2016) 595–620. doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002.
- Panos Panagos a, Pasquale Borrelli a, Katrin Meusburger b, Emma H. van der Zanden c, Jean Poesen d, Christine Alewell. 2015.** *Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale.* environmental science et policy 51 (2015) 23 – 34. Doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012.
- Pascal, D. 2010.** *Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta - Bouloupari (Nouvelle-Calédonie)*, Les Cahiers d'Outre-Mer ;URL [En ligne]<http://com.revues.org/6123> ; DOI : 10.4000/com.6123. [Date de consultée : 01.05.2017].
- Pascal D., Olivry 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, p 269-278.

- 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.
- Poesen, J-W., Torri D., Bunte, K. 1994.** *Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scale: a review.* Catena 23: p.141-166.
- Poesen, J. 1998.** *Surface sealing influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments.* Earth surface processes and landforms 11:p1-10.
- Prasannakumar, V., H., Vijith, S., Abinod, N., Geetha, 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) (2012) 209-215.
- Prats, S.A., dos Santos 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 .p468, 464-474.
- Profea, b., Bernhard Höfle, f., Hämmerle , Steinbacher, f., Yang, d., M., Andrea, S., Norbert, F. 2016.** *Characterizing tufa barrages in relation to channel bed morphology in a small karstic river by airborne LiDAR topo-bathymetry.* :p.664–675.
- 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.
- 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, p.30–33.
- 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 p.
- Renard, K.G., et al., 2011.** *Protection des terres céréalières contre l'érosion hydrique.* In Jebari, S., & Bensalah, R. 2014. *Journée Nationale sur la valorisation des Résultats de la Recherche dans le Domaine des Grandes Cultures.* Tunisie ; p. 59 -61.
- 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.

- 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), p.977–988.
- Roose, E.J., et F., Lelong.1978.** *Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale - étude sur petites parcelles expérimentales de sol*, Revue de géographie physique et de géologie dynamique, 10 p.
- Roose, E. 1991.** *Conservation des sols en zones méditerranéennes, Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive: la GCES*, Pédologue à l'Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVI, no 2, 1991: p 145-181.
- Roose, E. 1993.** *Erosion: a current environmental problem. The GCES, a new strategy for fighting erosion to resolve this dilemma of a growing society*. In: S. Wicherek (Editor), Farm and land erosion : in temperate plains environment and hills. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, p.571-585.
- Roose, E., G., De Noni, J.M., Lamachère.1994.** *L'érosion à l'ORSTOM : 40 ans de recherches multidisciplinaires*. Réseau Erosion du Centre ORSTOM, 13 p.
- 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, É., Sabir, M., Arabi, M., Morsli, B., et Mazour M., 2012.** *Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb*. Physio- Géo - Géographie Physique et Environnement, volume VI.
- Römkens, M. J.M. 2010.** *Erosion and sedimentation research in agricultural watersheds in the USA: from past to present and beyond*. In: Banasik, K., Horowitz, A.J., Owens, P.N., Stone, M., Walling, D.E. (Eds.), *Sediment Dynamics for a Changing Future*, 337. IAHS Publication, p. 17–26.
- Rodríguez, G., et M.C., Giménez Suárez. 2010.** *Historical Review Of Topographical Factor, Ls, Of Water Erosion Models revision Historica*, Aqua-LAC - Vol. 2 Sep. 2010. p. 56-61.
- 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. 2015.** *Reducing sediment concentration and soil loss using organic and inorganic amendments at plot scale*. Soil Earth 6: p.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 (2016) 1–12. doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.007.
- 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. 2005.** *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., 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. p. 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, p. 179-188.
- 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.
- 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.
- Sfeir-Younis, A. 1986.** *Soil conservation in developing countries.* Western Africa Projects Department/The World Bank, Washington, DC.
- Shoa, ZT, 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.
- Shiferaw, A. 2011.** *Estimating soil loss rates for soil conservation planning in the borena woreda of south wollo highlands, Ethiopia.* Journal of Sustainable Development in Africa (Volume 13, No.3, 2011) ISSN: 1520-5509.
- Smith, D.D. 1941.** *Interpretation of Soil Conservation Data for Field Use.* Agricultural Engineering 22, p.173-175.
- Smith D.D. et Whitt D.M. 1948.** *Estimating soil losses from areas of claypan soil.* Soil Sci. Soc. Am. N°12, p. 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.
- Stewart, P.1969.** *Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique.* Bull Soc Hist Nat Afri Nord; 59 : p. 23-36.nd. Environ Int 33:706–711.
- Sultan, M. et al., 1987.** *Lithologic mapping in arid regions with Landsat thematic mapper data: Meatiq dome, Egypt.* Geo.Science.World. Etats-Unis. Vol 99, n 6. [En ligne] [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1987\)99<748:LMIARW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1987)99<748:LMIARW>2.0.CO;2). [Date de consultation 23/05/2017].
- 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 (2014) 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.*
- 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. Université Mentouri – Constantine, Algérie, 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 de l'école nationale supérieure d'hydraulique, Algérie, 189 p.
- Thorntwaite, C.1946.** *Approach towards rational classification of climate.* Geogr. Rev. 38 (1) p. 55-94.
- Van der Knijff, J.M., R.J.A., Jones et L., Montanarella. 2000.** *Estimation du risque d'érosion en Italie.* p26.
- Valentin, C. Fritsch, Planchon O. 1987.** *Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferralitique de savane.* In: « Land developmenl management of acid soils", IBSRAM, Proceeding 4, Bangkok, p.67-81.
- Vogt, T., et D., Gomer.1992.** *Estimation du ruissellement et des matières en suspension par l'utilisation d'un SIG intégrant MNT, données Landsat TM et données hydrologiques de terrain.* Bulletin de la société française de photogrammétrie et télédétection 128(5) :p.7-17.

- 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).
- 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, p. 11-33.
- Wang, Y., G., Wang, H., Hu, et H., Cheng. 2002.** *Erosion rates evaluated by the Cs137 technique in the high altitude area of the Qinghai–Tibet plateau of China.* *Environ Geol* 53:1743–1749.
- Wang, G., Hapuarachchi, P., Ishidaira, H., Kiem, AS., Takeuchi, K. 2009.** *Estimation of soil erosion and sediment yield during individual rainstorms at catchment scale.* *Water Resour Manag* 23:1447–1465.
- 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.
- Wang, L, Dalabay, N., Lu, P., Wu, F. 2016.***Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall.* *Soil & Tillage Research* , doi.org/10.1016/j.still.2016.09.007.
- Wischmeier, W.H. and D.D.,Smith. 1978.** *Predicting rainfall erosion losses.A Guide to Conservation Planning,* Washington, USDA 537, 58p.
- 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/s11368-015-1134-2Xu, L, Xu.
- Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., Musiake, K. 2003.** *Global potential soil erosionwith reference to land use and climate changes.* *Hydrol. Processes* 17 (14), 2913–2928.
- Yang, Y. H., Yan, B. X., Zhu, H. 2011.** *Estimating soil erosion in Northeast China using 137Cs and 210Pbex.* *Pedosphere.* 21(6): p.706–711.
- Yjjou, M., Bouabid, R., El Hmaid, 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*

References Bibliographies

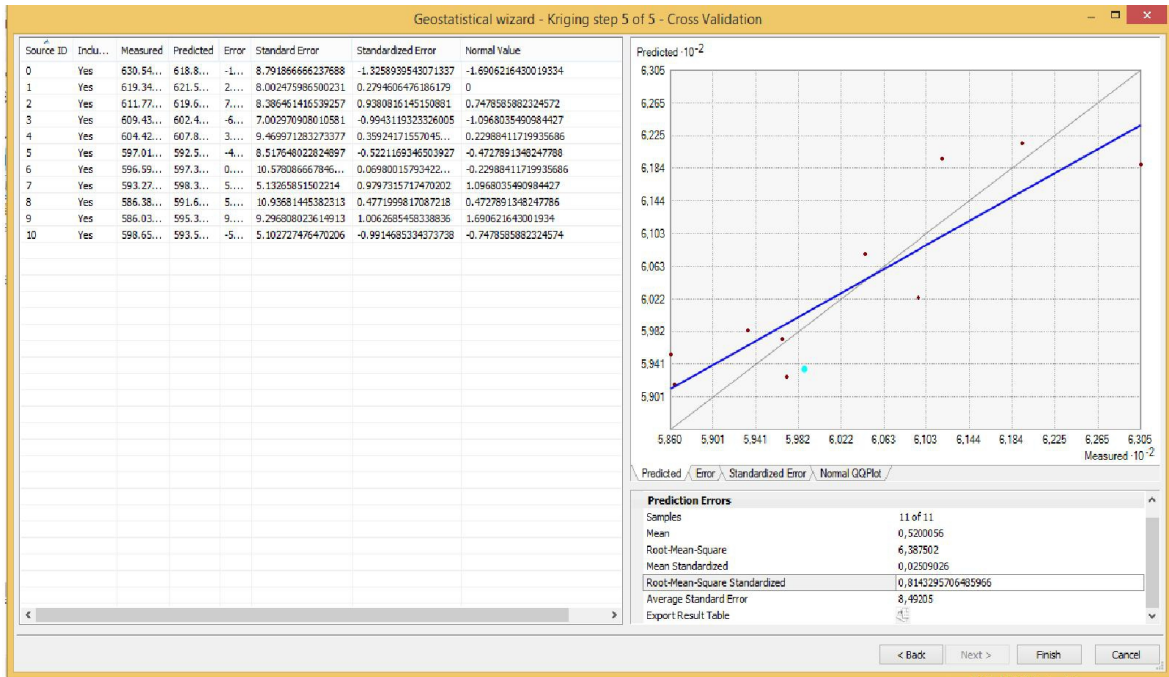
bassin versant de l'Oum Er-Rbia. The International Journal Of Engineering And Science (IJES). Volume .3. Issue. 8. Pages: p.83-91.

Yuksel, A., Gundogan, R, and Akay A.E. 2008. *Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaras, Turkey*. Sensors, 8, 4851-4865; DOI: 10.3390/s8084851.

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 (2017) 34–45. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.024.

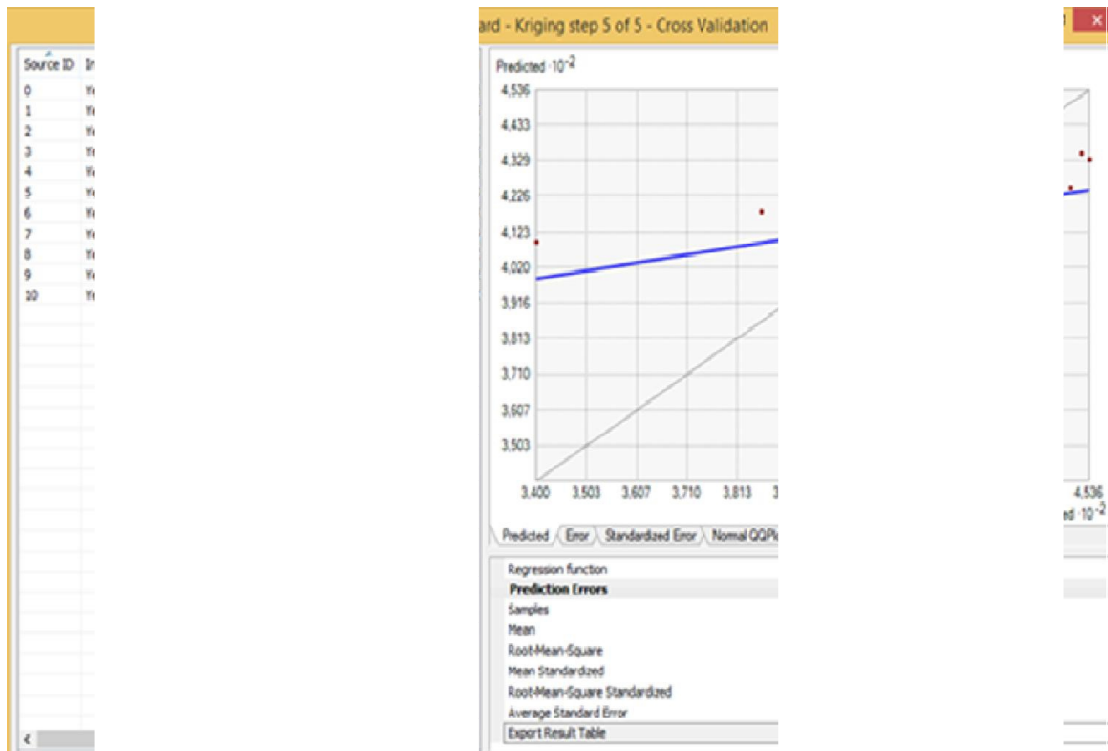
Zingg, R.W. 1940.*Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff*.Agric, Engr., 21:p.59-64.

Annexe 1



Source : l'Auteur, 2017.

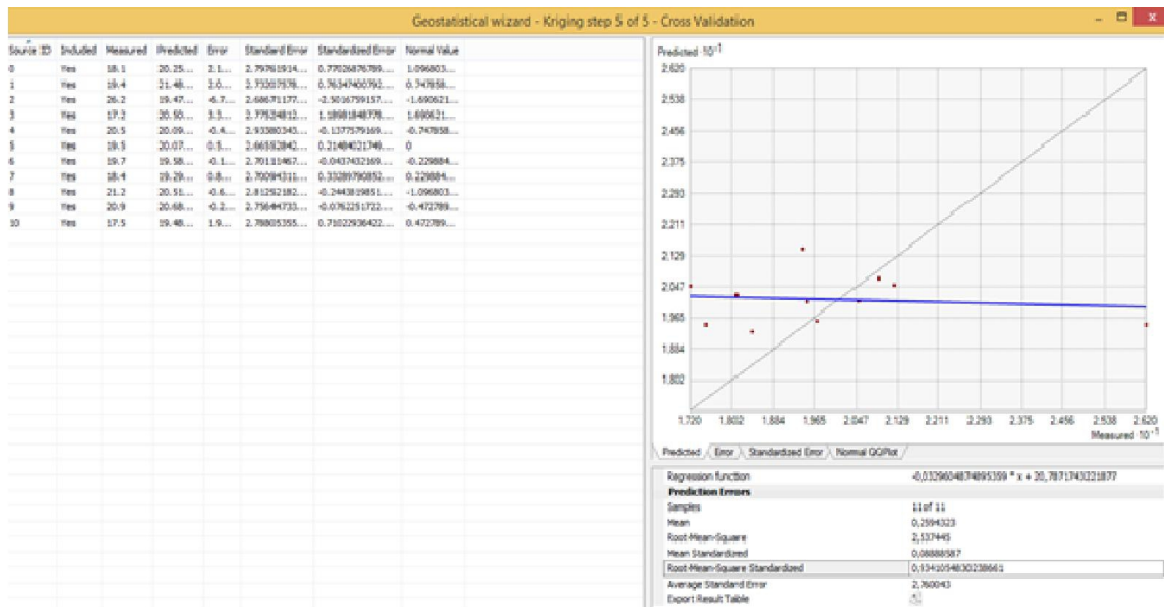
Figure 26. Analyse géostatistique des paramètres appliquant un contrôle de validation croisée sur le R-facteur estimé.



Source : l'Auteur, 2017.

Figure 27. Résultats de la validation croisée des données de précipitations annuelles par la méthode Kriging/CoKriging.

Annexe 2



Source : l'Auteur, 2017.

Figure 28. Résultats de la validation croisée de températures moyennes annuelles par la méthode Kriging/CoKriging.

Tableau 20. Les classes de pente de la zone d'étude.

Classe	Surface entre CN	% surface	surface cumulée	surface à la limite d'inférieure %	Élévation
63-113	4,8	1,6	1,6	100,0	63
113-163	8,7	2,9	4,5	98,4	113
163-213	12,4	4,1	8,5	95,5	163
213-263	17,5	5,8	14,3	91,5	213
263-313	35,3	11,6	25,9	85,7	263
313-363	56,1	18,4	44,3	74,1	313
363-413	42,0	13,8	58,1	55,7	363
413-463	59,0	19,6	77,7	41,9	413
463-513	32,0	10,8	88,5	22,3	463
513-563	16,0	5,5	94,0	11,5	513
563-613	11,1	3,6	97,7	6,0	563
613-663	4,6	1,5	99,2	2,3	613
663-713	2,1	0,7	99,9	0,8	663
713-757	0,4	0,1	100,0	0,1	713
	302	100		0,0	757

Source : l'Auteur, 2017.

Tableau 21.La superficie des forêts existe.

Formation forestière	Superficie (ha)
Forêt Chabaibia	298
Forêt domanial	220
Araar	60
Sidi Saïd	120
Zekri	40
Saha	80
Sidi Khalfi	60