

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Application de la Télédétection à l'étude de l'érosion  
hydrique dans les bassins versants frontaliers de la Medjerda  
et le Mellegue ..

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 8-0004-22

APA Citation (توثيق APA):

Menasria, Amine. (2022). Application de la Télédétection à l'étude de l'érosion  
hydrique dans les bassins versants frontaliers de la Medjerda et le Mellegue . [Thèse de  
doctorat, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مباحثات، مقالات الدوريات، كتب...) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



République Algérienne Démocratique  
et Populaire

Ecole Nationale Supérieure  
d'Hydraulique de Blida



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

République Tunisienne



Institut National Agronomique  
de Tunisie



**ENSH-(n° d'ordre)**

**THESE DE DOCTORAT  
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE  
EN PARTENARIAT INTERNATIONAL AVEC L'INSTITUT  
NATIONAL AGRONOMIQUE DE TUNISIE**

Présentée par

Monsieur **MENASRIA Amine**

**pour obtenir le grade de**

**DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Sujet de la thèse :

**Application de la Télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans les  
bassins versants frontaliers de la Medjerda et le Mellegue**

Thèse présentée et soutenue à Blida le 27/06/2022 devant le jury composé de :

BENLAOUKLI Bachir	Professeur ENSH Blida	Président
MEDDI Mohamed	Professeur ENSH Blida	Directeur de thèse
HABAIEB Hamadi	Professeur INAT Tunis	Directeur de thèse
CHABAANE LILI Zohra	Professeur INAT Tunis	Examinatrice
BENABDALLAH Sihem	Professeur CERTE Tunis	Examinatrice
MOURSLI Boutkhil	Maitre de Recherche INRF Tlemcen	Examinateur

Année Universitaire 2021/2022

# APPLICATION DE LA TELEDETECTION A L'ETUDE DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LES BASSINS VERSANTS FRONTALIERS DE LA MEDJERDA ET LE MELEGUE

Amine MENASRIA



# *Dédicace*

À la mémoire de mon père et mes Grands Parents

Pour ma mère,

Mes frères, mes sœurs et ma femme

Mes amis et mes collègues

## Remerciements

C'est avec grand plaisir que je saisis cette occasion pour remercier toutes les personnes qui, de diverses manières, ont contribué à la production de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement mes encadrants :

Professeur Mohamed MEDDI et Professeur Hamadi HABAIEB. Je tiens à leur exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien avec lequel ils m'ont guidé et encouragé, et pour m'avoir permis de terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Le professeur Meddi est remercié pour son engagement et son soutien fidèle. Il a tiré la ligne du chemin que j'ai suivi au cours de ce travail. Il m'a aidé et m'a fourni de précieux conseils, non seulement pour bien finaliser cette thèse, mais aussi pour arriver à réaliser tous mes buts dans la vie, comme un père, qui veille toujours sur son fils pour bien vivre.

Le professeur HABAIEB m'a donné des encouragements, des conseils techniques et m'a renvoyé à la littérature récente qui ont énormément moulé ce qui a été réalisé dans cette thèse.

Je tiens également à présenter mes remerciements aux membres de jury, d'avoir accepté d'assister et d'évaluer ce travail.

Je tiens à mentionner et remercier les institutions suivantes qui m'ont permis de mener sereinement et jusqu'au bout ce travail. Ce sont l'école nationale supérieure d'hydraulique (ENSH) et le laboratoire de génie de l'eau et de l'environnement (GEE) et l'institut National d'agronomie de Tunis qui ont bien accueilli et accepté ce thème de recherche

Je remercie également l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) et la direction nationale des forêts et la Direction des Ressources Hydraulique Tunisienne pour leur assistance en me fournissant les données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Les membres de ma famille et surtout, ma mère, mes frères, mes sœurs et ma femme qui ont sacrifié leurs temps, leurs argents et leurs sentiments pendant les longues périodes où j'ai travaillé sur cette thèse.

Mes amis et mes collègues.

Merci à Tous

# Table des matières

Listes des tableaux .....	I
Listes des figures .....	V
Liste des symboles et des abréviations .....	IX
Les Résumés .....	X

INTRODUCTION GENERALE .....	2
-----------------------------	---

## Chapitre 1 : Erosion hydrique concept et quantification

1. Introduction et enjeu .....	7
2. Erosion hydrique concept et facteurs .....	8
3. Stratégies de Conservation des Eaux et des Sols .....	11
4. Techniques de pratiques de conservation des eaux et du sol .....	15
4.1 Conservation des eaux et des sols suivant la technique des Jessours .....	15
4.2 La conservation des eaux et du sol par la technique des Tabias .....	15
4.3 La conservation des eaux et des sols suivant la technique des Meskat .....	16
4.4 La valorisation des eaux de crues à travers la technique des Mgouds .....	16
4.5 La déviation des eaux de crues des oueds pour la valorisation agricole .....	16
4.6 Les citernes (moyennes de collecte des eaux pluviales) .....	16
4.7 Barrages de retenues collinaires .....	16
4.8 Barrages de Correction torrentielle .....	16
4.9 Cordons en pierres sèches .....	17
4.10 Les terrasses .....	17
4.11 Reboisement des versants et extension des parcours .....	17
4.12 Pratique agricole .....	17
5. Les incendies de forêt et l'érosion hydrique .....	17
6. Des travaux sur l'érosion hydrique .....	17

## Chapitre 2 : Modélisation de l'érosion hydrique et théorie de la télédétection

1. Introduction .....	21
2. Evaluation de l'érosion .....	21
2.1 Classification des modèles d'évaluation de l'érosion.....	21
2.1.1 Les modèles empiriques ( <i>empirical, lumped model</i> ) .....	21
2.1.1.1 Equation Universelle de Perte de Sol (USLE) ( <i>Universal Soil Loss Equation</i> ) .....	22
2.1.1.2 L'Equation Universelle de Perte de Sol Modifiée (MUSLE) .....	23
2.1.1.3 L'Equation Universelle de Perte de Sol Révisée (RUSLE).....	23
2.1.1.4 Méthode de la F.A.O .....	24
2.1.2 Les modèles à base physique .....	25
2.1.2.1 Le modèle "WEPP" (Water Erosion Predicting Project) .....	25
2.1.2.2 Le modèle "EUROSEM" (European Soil Erosion Model).....	26
2.1.2.3 Le modèle "Kineros" (Kinematic Runoff an Erosion Model) .....	26
2.1.3 D'autres méthodes d'estimations de l'érosions .....	27
2.1.3.1 Les apports de sédiments de la rivière .....	27
2.1.3.2 La photographie arienne et la télédétection .....	27
2.2 Le modèle RUSLE .....	28
□ R : le facteur érosivité de la pluie (MJ. mm /ha. h) .....	28
□ K : le facteur érodibilité du sol (t.ha.h/ha.MJ. mm) .....	28
□ LS : le facteur topographique (adimensionnel) .....	29

□ C : le paramètre du couvert végétal (adimensionnel) .....	29
▣ P : le facteur des pratiques antiérosives (adimensionnel) .....	31
2.2.1 Les limites de l'utilisation du modèle USLE et ses dérivés ( <a href="http://hmf.enseeiht.fr">http://hmf.enseeiht.fr</a> ) .....	31
2.2.2 Les Recherches effectuées en utilisant L'USLE/RUSLE .....	31
2.2.3 Application de RUSLE sur des zones climatiques semi-aride ou steppe .....	33
2.2.4 Application de RUSLE sur les zones climatiques méditerranéennes .....	34
3. La paramétrisation des modèles .....	35
3.1 Le calibrage .....	35
3.2 La validation .....	35
3.3 Critères d'évaluation de la modélisation .....	36
3.3.1 Erreur moyenne .....	36
3.3.2 Erreur quadratique moyenne .....	36
3.3.3 Erreur relative .....	36
3.3.4 Le coefficient d'efficacité (CE) .....	36
4. Théorie de la télédétection.....	37
5. Principe général de la télédétection .....	37
5.1 Principe de la télédétection .....	37
5.2 Le spectre électromagnétique .....	39
5.3 Les interactions entre le rayonnement et la cible .....	40
5.4 La signature spectrale des principales surfaces naturelles .....	40
5.4.1 Interaction rayonnement - Eau .....	40
5.4.2 Interaction rayonnement-végétation .....	41
5.4.3 Interaction rayonnement-sol .....	41
5.5 Régions spectrales utilisées pour l'observation à distance de la terre .....	42
6. Notions de l'échelle et Résolution d'une image en télédétection .....	42
6.1 La résolution spatiale .....	43
6.2 La résolution spectrale .....	43
6.3 La résolution temporelle (répétitivité) .....	43
6.4 La résolution radiométrique .....	44
7. Image numérique de télédétection .....	44
7.1 Traitement des images satellitaires .....	45
8. Méthode d'intégration entre la télédétection et les SIG .....	45
9. Apport de la télédétection et les SIG à l'étude de l'érosion .....	45
10. Les capteurs à haute résolution spatiale .....	47
11. Conclusion .....	49

## Chapitre 3 : Présentation générale de la zone d'étude

1. Introduction .....	51
2. Le bassin versant de la Medjerda .....	51
3. Découpage du bassin versant de la Medjerda .....	52
3.1 La haute vallée d'oued Medjerda .....	52
3.2 Le bassin versant d'oued Mellègue .....	52
3.3 Le bassin versant d'oued Tessa .....	52
3.4 Le bassin versant d'oued Siliana .....	52
3.5 Le bassin versant d'Oued Khalled .....	52
3.6 La basse vallée de la Medjerda .....	52
4. Présentation de la zone d'étude .....	53
5. Grands barrages .....	53
6. Lacs collinaires .....	54
7. Caractéristiques Climatologiques .....	56
7.1 La pluviométrie .....	56
7.2 La Température .....	57
8. Caractéristiques géophysiques de la zone d'étude (Aspects orographique) .....	57
8.1 Topographie et caractéristiques de forme .....	58
8.1.1 Topographie .....	58

8.1.2 La forme du bassin .....	60
8.1.3 Rectangle équivalent (rectangle de Gravelius) .....	61
8.1.4 Relief du bassin .....	62
8.1.5 La pente .....	63
8.1.6 Indice de pente .....	65
9. Réseaux hydrographiques .....	65
9.1 Paramètre hydrographique .....	66
9.1.1 Densité de drainage .....	66
9.1.2 Profil en long .....	67
10. La pédologie .....	69
11. Le couvert végétal .....	71
12. Les aménagements antiérosifs .....	73
13. Géologie.....	75
13.1 Géologie Historique .....	75
13.2 Géologie Structurale .....	76
14. Caractéristique socioéconomique .....	79
15. Elaboration des données nécessaires pour cette étude .....	81
15.1 Le modèle numérique de terrain MNT .....	81
15.2 Données de la télédétection (Images satellitaires) .....	81
15.3 Traitement des images satellitaires .....	83
15.3.1 Les prétraitements des images .....	84
15.3.1.1 Calibration radiométrique et Correction géométrique et atmosphérique. ....	84
15.3.1.2 Amélioration du contraste des images satellitaire « stretching » .....	86
15.4 Les images non-satellitaires .....	87
15.4.1 Les cartes et les plans d'aménagements .....	87
15.4.2 Les images de Google Earth .....	87
15.5 Acquisition de données terrain .....	87
16. Conclusion partielle .....	89

## Chapitre 4 : Classification de l'occupation du sol en utilisant la télédétection et le SIG

1. Introduction .....	91
2. Modifications visuelle et affichage des images .....	93
2.1 Affichage en gris .....	93
2.2 Affichage multi bandes (composition colorée) .....	93
3. Transformation des images satellitaire .....	94
4. Les indices de végétation.....	95
4.1 Indice de végétation normalisé NDVI .....	97
4.1.1 Explication physique du NDVI .....	97
5. Transformation en composantes principales (TCP) .....	99
6. Classification de sol .....	101
6.1 Classification supervisée .....	101
6.2 Classification non supervisé .....	102
6.3 Classification pseudo bande .....	102
7. La méthodologie suivie .....	103
7.1 La classification de l'occupation de sol .....	103
7.2 Choix des sites d'entraînement .....	104
7.3 Validation des résultats de la classification .....	105
8. Résultats de la classification .....	106
8.1 Etats d'occupation .....	106
8.1.1 Etat de l'occupation du sol en 1994 .....	107
8.1.2 Etat de l'occupation du sol en 2004 .....	107
8.1.3 Etat de l'occupation du sol en 2010 .....	108
8.1.4 Etat de l'occupation du sol en 2017 .....	109

8.1.5 Validation de la classification par la matrice de confusion .....	110
9. Extraction des zones inutiles (plans d'eaux) .....	113

## Chapitre 5 : Evolution de l'occupation du sol et estimation du facteur C-RUSLE

1. Introduction .....	116
2. Détection des changements et évolution temporelle et spatiales .....	116
2.1 Détection des changements .....	116
2.1.1 Variation interannuelle .....	116
2.1.2 Variation saisonnières .....	118
2.2 Etude de la dynamique de la végétation à l'aide de NDVI de SPOT Végétation .....	120
2.2.1 Prétraitement des séries temporelles du NDVI .....	120
2.2.2 Variation interannuelle .....	121
2.2.3 Variation mensuelle .....	122
3. Facteur d'occupation du sol (C-RUSLE) .....	124
3.1 Estimation des valeurs du facteur C .....	124
3.1.1 Estimation du facteur C à partir des valeurs de la littérature .....	124
3.1.2 Estimation du facteur C à partir des valeurs NDVI .....	125
3.1.3 Etude de corrélation entre NDVI et les valeurs du facteur C ( $C_{lit}$ et $C_{vk}$ ) .....	128
3.1.4 Evolution de l'érosion hydrique en fonction des valeurs du C .....	129
4. Conclusion Partielle .....	130

## Chapitre 6 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant le model RUSLE, la télédétection et le SIG

1. Introduction .....	132
2. Méthodes utilisées pour étudier l'érosion .....	133
3. L'agressivité de pluie .....	134
4. Des indices qui décrivent l'agressivité de pluie .....	134
4.1 Indice de fournier (IF) .....	134
4.2 Indice de fournier modifié (IFM) .....	134
4.3 Indice des concentrations des pluies (PCI) .....	135
4.4 La formule de Renard et al (1996) .....	136
4.5 La formule de Rango & Arnoldus (1987) .....	136
4.6 La formule de Meddi et al (2015) .....	136
4.7 La formule proposée par Belaid (2015) .....	136
5 Données de mesure du transport solide .....	137
6 Variabilité de la pluviométrie .....	138
7 Estimation de l'érosion par RUSLE .....	140
7.1 L'érosivité des pluies (R) .....	141
7.1.1 R de Blaid (2015) .....	141
7.1.2 R de Rango & Arnoldus (1987) .....	143
7.2 Facteur érodibilité de sol. (K) .....	145
7.3 Le facteur topographique LS .....	149
7.4 Facteur de couverture et de gestion (C) .....	151
7.5 Facteur de pratique antiérosive (P) .....	151
7.6 Carte de pertes en sols .....	153
7.6.1 Carte des pertes en sols pour R_Belaid et $C_{vk}$ .....	153
7.6.2 Carte pertes en sols pour R de Rango & Arnoldus (1987) et $C_{vk}$ .....	154
8. Validation des résultats et comparaison .....	156
9. Discussion et Conclusion .....	157

## Chapitre 7 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants de la zone d'étude à l'aide de l'USLE et la FAO

Objectif .....	162
1. Introduction .....	162
2. Méthodologies utilisées .....	162
3. Application du modèle USLE .....	163
3.1 L'érosivité de la pluie .....	163
3.2 Facteur érodibilité de sol. (K) .....	165
3.3 Le facteur topographique LS .....	166
3.4 Facteur de couverture et de gestion (C) .....	167
3.5 Facteur de pratique antiérosive (P) .....	167
3.6 Carte des pertes en sols (selon USLE) .....	168
4. Application du modèle de la FAO .....	170
4.1 Facteur d'érosivité des pluies (Indice de Fournier modifié) .....	170
4.2 Facteur pédologique ( <i>coefficient pédologique C<sub>1</sub></i> ) .....	173
4.3 Facteur topographique ( <i>coefficient topographique C<sub>2</sub></i> ) .....	174
4.4 Facteur d'occupation de sol ( <i>coefficient C<sub>3</sub></i> ) .....	175
4.5 Carte des pertes en sols (Selon FAO) .....	176
5. Validation des résultats et comparaison .....	177
5.1 Validation des résultats du modèle USLE .....	177
5.2 Validation des résultats du modèle de la FAO .....	178
6. Etude comparative .....	179

## Chapitre 8 : Etude statistique des scenarios de d'érosion en utilisant RUSLE et le SIG

1. Introduction .....	183
2. Effet de couvert végétal sur l'érosion .....	184
2.1 Réduction de l'énergie d'érosivité de pluie .....	184
2.2 Réduction de l'énergie du ruissellement .....	184
2.3 Maintien des sols .....	184
3. Analyse statistique des facteurs de production d'érosion .....	187
4. Utilisation du RUSLE pour l'étude des scénarios .....	188
4.1 L'érosion actuelle .....	188
4.2 Scénario d'érosion sans aménagements antiérosifs .....	188
4.3 Scénario d'érosion avec incendie (scénario d'incendie) .....	189
4.3.1 Résultats des modifications des facteurs du modèle RUSLE (Cas d'incendie) .....	190
4.3.2 Pertes en sols (cas d'incendie) .....	193
4.4 Scénario d'érosion avec proposition d'aménagement (scénario de projet) .....	195
4.4.1 Résultats des modifications des facteurs du modèle RUSLE (scénario de projet) .....	196
4.4.2 Pertes en sols (scénario de projet) .....	197
5. Rapport de la livraison de sédiment (Sediment delivery ratio, SDR.) .....	198
5.1 Application du modèle de Maner (1958) .....	200
5.2 Application du modèle de Renfro (1975) .....	201
5.4 Application du modèle EPM .....	203
5.5 Etude comparative .....	204
6. Conclusion partielle .....	206

CONCLUSION GENERALE .....	208
---------------------------	-----

BIBLIOGRAPHIQUES.....	213
-----------------------	-----

## Listes des tableaux

### Chapitre 1 : Erosion hydrique concept et quantification

Tableau 1.1 Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu (Roose).....	11
---	----

### Chapitre 2 : Modélisation de l'érosion hydrique et théorie de la télédétection

Tableau 2.1 Valeur du coefficient C1 (Chérif et al. 1995) .....	24
Tableau 2.2 Valeur du coefficient C2 (Chérif et al.1995) .....	25
Tableau 2.3 Valeur du coefficient C3 (Chérif et al. 1995) .....	25
Tableau 2.4 Présentation de quelques Modèles hydrologiques (Sivapalan et al. 2003) .....	26
Tableau 2.5 Valeur de C pour différents types de couvert végétal (Sadiki et al. 2004) .....	30
Tableau 2.6 Facteur du couvert végétal C en Tunisie (Cormary et Masson.1964) .....	30
Tableau 2.7 Applications de la télédétection. ....	38
Tableau 2.8 Caractéristiques des capteurs Landsat (Sources : <a href="http://e-cours.univ-paris1.fr/">http://e-cours.univ-paris1.fr/</a> ) .....	48

### Chapitre 3 : Présentation générale de la zone d'étude

Tableau 3.1 Caractéristiques des grands barrages de la Medjerda (DGBGTH) .....	55
Tableau 3.2 Indices de forme des bassins versants .....	61
Tableau 3.3 La longueur L et la largeur l du rectangle équivalent .....	61
Tableau 3.4 Les caractéristiques hypsométriques de la zone d'étude .....	63
Tableau 3.5 Indice de pente et dénivelé spécifique et type de relief de la zone d'étude. ....	65
Tableau 3.6 Variation de la pente des oueds Medjerda et Mellegue .....	68
Tableau 3.7 La population de la région d'étude selon les statistiques de 2014 .....	80
Tableau 3.8 Caractéristique des données satellitaire utilisées dans cette étude .....	82
Tableau 3.9 les caractéristiques spectrales des images utilisées .....	84
Tableau 3.10 Création de la base des données. ....	89

### Chapitre 4 : Classification de l'occupation du sol en utilisant la télédétection et le SIG.

Tableau 4.1 Exemples des indices utilisés pour l'étude de la végétation et de l'occupation de sol....	96
Tableau 4.2 Matrice de covariance des canaux d'entrée (image 2017) .....	100
Tableau 4.3 les pourcentages de l'information contenue attribuables à chacune des CP .....	100
Tableau 4.4 les classes du coefficient Kappa.....	106
Tableau 4.5 les résultats des classifications exprimées en % de la superficie .....	106
Tableau 4.6 matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 1994 .....	111
Tableau 4.7 matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 2004 .....	111
Tableau 4.8 matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 2010 .....	112
Tableau 4.9 Confusion matrix of the classification of the land use map of July 2017. ....	112

### Chapitre 5 : Evolution de l'occupation du sol et estimation du facteur C-RUSLE

Tableau 5.1 Spécification de changement d'occupation du sol entre 1994 et 2017 .....	118
Tableau 5.2 Croisement du sol couvert et sol nu permettant d'identifier la végétation hivernale ....	119
Tableau 5.3 les principales valeurs du facteur C utilisés pour la distribution (Rapportée par Masson (1971)) .....	124
Tableau 5.4 les résultats de calcul de validation de l'estimation effectuée .....	125
Tableau 5.5 les résultats de calcul de validation de l'estimation effectuée .....	126
Tableau 5.6 Classes d'occupation et leur facteur C moyen et calcul d'erreur .....	127

Tableau 5.7 les résultats de l'étude de la corrélation entre les valeurs du facteur C (Clit et CVK) et NDVI. ....	129
Tableau 5.8 les quantités des sédiments mesurées par bathymétrie aux niveaux des barrages de la Medjerda et les valeurs de CVK moyennes. (DGBGTH, 2016). ....	129

## Chapitre 6 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant le model RUSLE, la télédétection et le SIG

Tableau 6.1 Classe de l'indice de Fournier modifié (IMF) .....	135
Tableau 6.2 Caractéristiques et alluvionnement des barrages de la Medjerda (DGBGTH, 2016)....	137
Tableau 6.3 Mesures bathymétriques (Mm3/an). ....	138
Tableau 6.4 Les valeurs des pluies moyennes interannuelles des stations pluviométriques en (mm) (1971 à 2007) .....	139
Tableau 6.5 L'indice de l'érosivité des pluies de Blaid (2015) .....	141
Tableau 6.6 indices de l'érosivité des pluies de Rango & Arnoldus (1987) .....	143
Tableau 6.7 extrait les valeurs du facteur K de la base Harmonisée mondiale de données sur les sols (HWSD), version 1.2 (FAO / IIASA / ISRIC / ISS-CAS / JRC 2009). ....	146
Tableau 6.8 caractéristiques du sol de la Medjerda selon HWSD et valeurs du facteur K (t.ha.h/ha.MJ.mm .....	147
Tableau 6.9 Répartition spatiale du facteur K_RUSLE (t.ha.h/ha.MJ.mm) .....	148
Tableau 6.10 les valeurs et la Répartition spatiale du facteur aménagement antiérosive P .....	153
Tableau 6.11 les limites moyennes de tolérance des sols à l'érosion hydrique .....	153
Tableau 6.12 Superficie des classes des pertes de sol .....	154
Tableau 6.13 Superficie des classes des pertes de sol estimée par RUSLE avec R de Rango & Arnoldus (1987). ....	155
Tableau 6.14 Erosion estimée par le modèle RUSLE et l'érosion observée (Mm3/an). ....	156
Tableau 6.15 Valeurs du facteur et des paramètres trouvés dans les articles scientifiques traitant l'application du model RUSLE dans les zones semi arides .....	159

## Chapitre 7 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants de la zone d'étude à l'aide de l'USLE et la FAO

Tableau 7.1 Indice de l'érosivité de pluie Estimé par le modèle de Belaid (2015).....	164
Tableau 7.2 Répartition spatiale du facteur K_USLE (t.ha.h/ha.MJ.mm) .....	166
Tableau 7.3 Les valeurs et la Répartition spatiale du facteur aménagement antiérosive P .....	168
Tableau 7.4 Superficie des classes des pertes de sol .....	169
Tableau 7.5 résultats de calcul de l'Indice de Fournier modifié .....	171
Tableau 7.6 Indice de Fournier modifié pour les trois stations (Kef, Jendouba, Tunis) .....	172
Tableau 7.7 Valeur du coefficient C1 (Chérif et al. 1995) .....	173
Tableau 7.8 Valeur du coefficient C2 (Chérif et al. 1995) .....	174
Tableau 7.9 Valeur du coefficient C3 (Chérif et al. 1995) .....	175
Tableau 7.10 Superficie des classes des pertes de sol .....	177
Tableau 7.11 Erosion estimée par le modèle USLE et l'érosion observée (Mm3/an). ....	177
Tableau 7.12 Erosion estimée par le modèle FAO et l'érosion observée (Mm3/an). ....	178
Tableau 7.13 Comparaison des taux d'érosion calculée par rapport à celle mesurée (Mm3/an). ....	180
Tableau 7.14 Variation de l'écart quadratique. ....	181

## Chapitre 8 : Etude statistique des scenarios de d'érosion en utilisant RUSLE et le SIG

Tableau 8.1 Les résultats de l'application du modèle RUSLE sur les sous bassins délimités .....	185
Tableau 8.2 Les quantités de sédiment mesurées au niveau des de Barrage, Kasseb et Beni Mtir ..	186
Tableau 8.3 Les paramètres statistiques des différents facteurs du modèle RUSLE de la zone d'étude .....	187
Tableau 8.4 Résultats de l'étude de corrélation entre les paramètres qui déclenchent le processus d'érosion et la carte des risques d'érosion de la zone d'étude. ....	187
Tableau 8.5 Superficie des classes des pertes de sol (cas sans aménagement) .....	189
Tableau 8.6 Superficie des classes des pertes de sol (cas incendie) .....	194
Tableau 8.7 Pourcentages des superficies affectées par l'érosion selon les différentes mesures et actes de réduction de l'érosion hydrique.....	197
Tableau 8.8 Les équations de base des modèles utilisés pour calculer le SDR .....	199
Tableau 8.9 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de Maner (1958) .....	200
Tableau 8.10 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de Renfro (1975) .....	201
Tableau 8.11 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de Vanoni (1975) .....	202
Tableau 8.12 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de EPM .....	203
Tableau 8.13 Comparaison des taux d'érosion calculée par rapport à celle mesurée en utilisant les modèles d'SDR (Mm <sup>3</sup> /an). ....	204
Tableau 8.14 comparaison des résultats évaluées en utilisant les modèles SDR .....	204
Tableau 8.15 Variation de l'écart quadratique. ....	205

## Listes des figures

### Chapitre 1 : Erosion hydrique concept et quantification

Figure 1.1 processus de l'érosion hydrique (cheggour,2008) .....	8
Figure 1.2 Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie (Boiffin, 1984) .	9
Figure 1.3 historique de la dynamique des aménagements de CES en Tunisie (Braiki 2018). .....	13
Figure 1.4 Organigramme des structures responsables de la conservation des eaux et du sol en Tunisie .....	15

### Chapitre 2 : Modélisation de l'érosion hydrique et théorie de la télédétection

Figure 2.1 Relation entre échelles de temps et d'espace dans la modélisation de l'érosion (Le Bissonnais, 2008). .....	27
Figure 2.2 Valeur du facteur de couvert végétal en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation (Roose 1994). .....	30
Figure 2.3 Répartition géographique par pays des articles publiés en utilisant les modèles USLE et RUSLE au cours des 40 dernières années (1977 à juillet 2017). (Christine et al. 2019).....	32
Figure 2.4 Nombre d'études par continent et pourcentage du nombre total de publications (1977 à juillet 2017). (Christine et al. 2019) .....	33
Figure 2.5 Tendances des articles publiés entre 1977 et 2017 (Christine et al. 2019) .....	33
Figure 2.6 Le principe de la télédétection .....	38
Figure 2.7 Le spectre électromagnétique (Bonn et Rochon) .....	39
Figure 2.8 Les signatures spectrales des principales surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche et de l'infrarouge et infrarouge moyenne (source <a href="http://e.cours.univ-paris1.fr">http : //e.cours.univ-paris1fr</a> ).....	40
Figure 2.9 Comportement spectrale de l'eau dans le domaine du visible et de l'infrarouge. ....	41
Figure 2.10 Comportement spectrale de la végétation dans le domaine du visible et de l'infrarouge. ....	41
Figure 2.11 La signature spectrale des différents types de sol. Source : Girard M.C ; 1989 .....	42
Figure 2.12 Structure d'une image numérique (Toumi, 2013) .....	44
Figure 2.13 : Exemple de superposition de deux cartes (Linus, 2010) .....	46
Figure 2.14 Image du satellite ASTER illustre l'ampleur de la déforestation à Santa Cruz de la Sierra, Bolivie entre 1986 et 2001. En l'espace de 15 ans, les 'étoiles' du parcellaire agricole ont totalement rongé la forêt. (Copyright © NASA/Japanese Space Team.) .....	47

### Chapitre 3 : Présentation générale de la zone d'étude

Figure 3.1 Le bassin versant de la Medjerda (Source : Abidi, 2017) .....	51
Figure 3.2 Découpage du bassin versant de la Medjerda .....	53
Figure 3.3 La situation géographique de la zone d'étude .....	54
Figure 3.4 Ouvrages hydrauliques de la zone d'étude.....	55
Figure 3.5 Répartition des pluies annuelles du bassin versant étudié .....	56
Figure 3.6 La température mensuelle enregistrée dans les stations de Souk Ahres et Tébessa entre 1970 et 2007. ....	57
Figure 3.7 Le modèle numérique de terrain de la zone d'étude. ....	59
Figure 3.8 Délimitation de la zone d'étude en sous bassin versant .....	60
Figure 3.9 Courbe hypsométrique de la zone d'étude .....	62
Figure 3.10 Courbes hypsométriques des principaux sous bassins versant de la zone d'étude .....	63
Figure 3.11 Les principales classes des pentes de la zone d'étude. ....	64
Figure 3.12 Classification du réseau hydrographique de la Medjerda .....	67
Figure 3.13 Profils de Medjerda et ses affluents majeurs (Source : Equipe de l'étude JICA) (Japan International Cooperation Agency) 2007 ; in Kallel et al. 1974) .....	69

Figure 3.14 Carte des sols de la zone d'étude (HWSD, version 1.2 (FAO / IIASA / ISRIC / ISS-CAS / JRC 2009). .....	70
Figure 3.15 Le couvert végétal dans le BV de la Medjerda, d'après la carte de la végétation de la Tunisie (Mjejra, 2015) .....	72
Figure 3.16 Le couvert végétal dans de l'est de Medjerda, d'après la carte de la végétation algérienne (Coyen et Billier, 2011) .....	73
Figure 3.17 Localisation des aménagements CES existants de la Tunisie (Etat 2014) .....	74
Figure 3.18 Des images de haute résolution de Google Arth (2018) représentent les aménagements de CES en bon état dans la zone d'étude .....	74
Figure 3.19 Des images de haute résolution de Google Arth (2018) de la zone non aménagée. ...	75
Figure 3.20 Schéma structural de la chaîne alpine de la méditerranée occidentale (Benest 1985) .....	77
Figure 3.21 Extrait de la carte Map showing geology, oil and gas fields, and geologic provinces of Africa (Digitally compiled by Feliks M. Persits, Thomas S. Ahlbrandt, Michele L. Tuttle, Ronald R. Charpentier, Michael E. Brownfield, and Kenneth I. Takahashi 2011) .....	78
Figure 3.22 Répartition de la population de la zone d'étude sur les wilayas.....	79
Figure 3.23 schéma explicatif sur la séparation des deux objets sur un plan de deux bandes spectrale (source : Toumi et al. 2013). .....	83
Figure 3.24 Des images satellitaires de la zone d'étude et signatures spectrale avant et après la correction atmosphérique .....	85
Figure 3.25 Amélioration du contraste des images satellitaire « stretching » .....	86
Figure 3.26 Zones d'échantillonnage dans la zone d'étude (enquête socioéconomique) .....	88

## Chapitre 4 : Classification de l'occupation du sol en utilisant la télédétection et le SIG.

Figure 4.1 délimitation de la zone concernée par la classification et l'étude de végétation. ....	92
Figure 4.2 modes d'affichages des images. Band T4 de l'image satellitaire du Landsat 8 OLI (Aout 2017) sur la région de Souk Ahres en gris. ....	93
Figure 4.3 modes d'affichages des images. Compositions colorées produite à partir de l'image satellitaire du Landsat 8 OLI (Aout 2017) sur la région de Souk Ahres, affichée avec des couleurs réelles (bandes 2, 3,4 assignées respectivement aux couleurs primaires bleu vert rouge) .....	93
Figure 4.4 modes d'affichages des images. Compositions colorées produite à partir de l'image satellitaire du Landsat 8 OLI (Aout 2017) sur la région de Souk Ahres, affichée avec des couleurs fausses (bandes 2, 3,5 assignées respectivement aux couleurs primaires bleu, vert, rouge) .....	94
Figure 4.5 répartitions spectrales des réflectances dans le rouge et dans le proche infrarouge. ..	95
Figure 4.6 Explication physique de l'Indice de végétation normalisé NDVI (d'après Roose, 1994) .....	97
Figure 4.7 cartes des NDVI (année 1994 ; 2004 ; 2010 ; 2017) .....	98
Figure 4.8 compositions colorées produite à partir des composantes principales de l'image Landsat8 Oli captée en juin 2017 sur le bassin versant d'oued Medjerda. ....	100
Figure 4.9 les différentes méthodes utilisées dans les classifications des sols. (Toumi 2013) .....	101
Figure 4.10 Composition colorée produite à partir d'une classification pseudo-bande NDVI et les composantes principale 1, 2, NDVI sont assignée respectivement au rouge, verte et bleu. ....	103
Figure 4.11 Localisation des sites d'entraînements utilisés pour classifier l'occupation du sol de juillet 2017. (En rouge des sites repérés par Google Arth. En jaune des sites repérés suite à des sorties). .....	105
Figure 4.12 carte d'occupation du sol juillet 1994 .....	107
Figure 4.13 carte d'occupation du sol juillet 2004 .....	108
Figure 4.14 carte d'occupation du sol juillet 2010 .....	109
Figure 4.15 carte d'occupation du sol juillet 2017 .....	110

Figure 4.16 Comparison between the classification and photos from Google Earth TM. ....	113
Figure 4.17 Exemples sur des parties inutiles à l'analyse. (Barrages et lacs) .....	113

## Chapitre 5 : Evolution de l'occupation du sol et estimation du facteur C-RUSLE

Figure 5.1 les changements de différentes classes d'occupation du sol entre 1994 and 2017 ....	117
Figure 5.2 Évolution des surfaces occupées par l'eau entre 1994 et 2017. Classification des images satellitaires de 1994 et 2017. Landsat 30m.A/barrage Bouhrthma, B/ barrage Ain Dalia C/ barrage Siliana .....	118
Figure 5.3 Carte de croisement des classes de sols couverts et sol nus entre les deux saisons hivernale et estivale .....	119
Figure 5.4 variation annuelle du NDVI max et la moyenne annuelle de NDVI max au cours de la période 2010 – 2017 .....	121
Figure 5.5 Différence de la moyenne du NDVI max entre deux années voisines .....	122
Figure 5.6 variation mensuelle de NDVI max durant la période 2014 – 2017 .....	122
Figure 5.7 Dynamique du NDVI mensuel au cours de la période 2014 – 2017 .....	123
Figure 5.8 cartes de facteur C (générées en utilisant l'écart normalisé de l'indice de végétation (NDVI)). .....	128
Figure 5.9 Evolution de l'érosion hydrique et le facteur C dans des sous bassins de la Medjerda. ....	130

## Chapitre 6 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant le model RUSLE, la télédétection et le SIG

Figure 6.1 Méthodologie suivie pour les modèles (USLE et RUSLE) .....	133
Figure 6.2 les mesures bathymétriques effectuées sur les barrages de la zone d'étude (Mm3/an). ....	140
Figure 6.3 la variabilité interannuelle des pluies enregistrées durant la période allant de 1971 à 2007 dans 12 stations pluviométriques sur les sous bassins de la Medjerda. ....	140
Figure 6.4 Variation spatial du facteur R de Belaid. ....	142
Figure 6.5 Carte du facteur R_Belaid (2015) .....	142
Figure 6.6 Variation spatial du facteur R de Rango & Arnoldus (1987) .....	144
Figure 6.7 Carte du facteur R_(Rango et Arnoldus (1987)).....	144
Figure 6.8 le sol de la Medjerda (extrait les valeurs du facteur K de la base Harmonisée mondiale de données sur les sols (HWSD) .....	146
Figure 6.9 Carte du facteur K (RUSLE).....	148
Figure 6.10 Carte du facteur LS .....	150
Figure 6.11 Carte du facteur C .....	151
Figure 6.12 Carte du facteur P (RUSLE).....	152
Figure 6.13 Carte de perte de sol déterminée par le modèle RUSLE avec R_Belaid (2015) et CVK .....	154
Figure 6.14 Carte de perte de sol déterminée par le modèle RUSLE avec R de Rango & Arnoldus (1987). ....	155
Figure 6.15 Variation moyenne interannuelle de l'érosion (RUSLE) calculée et celle observée... ..	157
Figure 6.16 Comparaison entre la carte du risque érosif et la carte d'évolution saisonnière de la végétation .....	160

## Chapitre 7 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants de la zone d'étude à l'aide de l'USLE et la FAO

Figure 7.1 Variation du facteur R pour les 3 stations (Kef, Jendouba, Tunis) .....	164
Figure 7.2 carte du facteur K (USLE) .....	165
Figure 7.3 Distributions des valeurs du facteur LS (USLE) .....	166
Figure 7.4 carte du facteur LS_USLE .....	167
Figure 7.5 carte du facteur P_USLE .....	168
Figure 6 Carte de perte de sol déterminée par le modèle USLE .....	169
Figure 7.7 Facteur d'érosivité de pluie (indice de Fournier modifié). .....	171
Figure 7.8 Variation de l'indice IFM pour les 3 stations (Kef, Jendouba, Tunis) durant la période 1991-2006 .....	172
Figure 7.9 Carte du facteur topographique C1 (coefficient pédologique C1). .....	173
Figure 7.10 Carte du facteur topographique C2 (coefficient topographique C2). .....	174
Figure 7.11 Carte du facteur d'occupation C3 (coefficient d'exploitation des sols C3). .....	175
Figure 7.12 Carte de perte de sol déterminée par le modèle de la FAO .....	176
Figure 7.13 Variation moyenne interannuelle de l'érosion (USLE) calculée et celle observée. ...	178
Figure 7.14 Variation moyenne interannuelle de l'érosion (FAO) calculée et celle observée. ....	179
Figure 7.15 Variation de l'érosion calculée par les 3 modèles et de l'érosion mesurée (Mm3)...	180

## Chapitre 8 : Etude statistique des scenarios de d'érosion en utilisant RUSLE et le SIG

Figure 8.1 Evolution de la couverture végétale et l'érosion hydrique .....	186
Figure 8.2 Cartes du facteur C dans le cas d'incendie. a/incendie faible. b/ incendie fort. ....	191
Figure 8.3 Cartes des facteurs K dans le cas d'incendie. b /incendie fort. c/ incendie faible .....	192
Figure 8.4 carte des pertes en sol (Cas d'un fort incendie) .....	193
Figure 8.5 la distribution de la variation de l'érosion dans le cas d'un fort incendie par rapport à l'érosion moyenne actuelle en%. .....	194
Figure 8.6 une comparaison graphique entre l'évolution de l'érosion hydrique simulée par RUSLE dans le bassin de la Medjerda après un incendie et a/ la superficie du feu. b/la superficie du bassin versant. ....	195
Figure 8.7 Carte du facteur C dans le cas d'aménagement antiérosif. (Scénario de projet, mesure iii). .....	196
Figure 8.8 cartes des pertes en sol dans le cas d'un scénario du projet .....	198
Figure 8.9 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle de Maner. ....	200
Figure 8.10 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle de Renfro (1975). .....	201
Figure 8.11 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle de Vanoni (1975). .....	202
Figure 8.12 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle EPM .....	203
Figure 8.13 Comparaison des taux d'érosion calculée par rapport à celle mesurée en utilisant les modèles d'SDR (Mm3/an). .....	205

## Liste des symboles et des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principale  
ANB : l'Agence Nationale des Barrages  
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques  
CE: coefficient d'efficacité .  
CES : Conservation de l'Eau et des Sols  
CN : Compte Numérique  
DRS : Défense et Restauration des Sols  
ETM : Enhanced Thematic Mapper  
EVI : Enhanced vegetation index  
FAO : Food and Agriculture Organisation  
GCES : Gestion et Conservation de l'Eau et des Sols  
IRD : Institut de Recherche pour le Développement  
MIR : Moyen Infrarouge  
MNT : Modèle Numérique de Terrain  
MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
MSS : Multi-Spectral Sensor  
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index  
OA: The Overall Accuracy.  
OLI: The Operational Land Imager.  
ONID : Office National d'Irrigation et de Drainage  
PIR : Proche Infrarouge  
REM : Radiation Electromagnétique  
RMSE: Root Mean Square Error.  
RTM : Restauration des Terrains de Montagne  
RUSLE : Reserved Universal Soil Loss Equation  
RVB : Rouge, Vert et Bleu  
SIG : Système d'Information Géographique  
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission ou images satellitaires optique et radar  
SWAT : Soil and Water Assessment Tool  
THRS : Très Haute Résolution Spatiale  
TIRS: Thermal Infra-Red Sensor.  
TM : Thematic Mapper  
TM: Thematic Mapper.  
USA : United States of America  
USLE : Universal Soil Loss Equation  
VHSR: Very High Spatial Resolution.

## Les Résumés

### الملخص

يهدف هذا البحث الى دراسة حوض مجردة الكبير الواقع في الجزائر وتونس، وحوض ملاق الواقع في الجزائر، والذي يحتوي على مساحات زراعية كبيرة وسدود تستخدم للري وكذلك إمدادات مياه الشرب. الأهداف الرئيسية لهذا العمل هي: تقدير معدل انجراف التربة في حوض مجردة وملاق لتسليط الضوء على الكثافة المتزايدة لعمليات التآكل؛ وإظهار فعالية بعض أنظمة مقاومة تجرد التربة الموجودة في الحوض. يتمثل النهج المعتمد في رسم خرائط للعوامل التي تؤدي إلى التجرد المائي، باستخدام معادلة فقدان التربة العالمية المنقحة المدمجة مع صور الأقمار الصناعية لاندسات 8 أظهرت النتائج المتحصل عليها أن متوسط معدل التجرد في مجردة وملاق حوالي 13.27 طن / هكتار / سنة، مع وجود 2.1% و 13.6% و 62.12% من سطح الحوض حساسة للغاية وحساسة وأقل حساسية للتآكل على التوالي

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن إجراءات إدارة الأراضي ومواجهة التجرد التي تم محاكاتها قد أدت إلى انخفاض ملحوظ في معدل الانجراف من 14.91 إلى 8.98 طن / هكتار / سنة. من ناحية أخرى، تزيد حرائق الغابات من معدل التعرية بنسبة 8%، وهو ما تم تعريفه على أنه يمكن تحمله.

المستجمعات الصغيرة التي تضررت من الحريق هي الأكثر عرضة للتآكل ويبلغ معدل الرواسب التي تستطيع الوصول الى المصاببات المائية حوالي 40% من المعدل السنوي لفقدان التربة، يمكن أن تصل هذه القيمة إلى 52% في حالة وجود حرائق للغابات بشدة. إن تحسين كثافة الغطاء النباتي من خلال الجمع بين إعادة التحريج وتوسيع أراضي الرعي له تأثير ملحوظ على معدل التعرية مقارنة بالتقنيات الأخرى.

تعتبر أنظمة الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية فعالة للغاية عند دراسة تطور الغطاء الأرضي واكتشاف التغيرات. يهدف هذا العمل ايضا إلى دراسة ديناميكية الغطاء الأرضي من صور الأقمار الصناعية المتعددة من 1994 إلى 2017 وكذلك تطور المعامل C\_RUSLE وعلاقته بالتعرية المائية. تم الإشراف على التصنيف من خلال استخدام طريقة الاحتمالية القصوى والمقارنة متعددة التواريخ إلى جانب تقنية الأفتعة. أظهرت النتائج أن دقة التصنيف تتراوح من 76% إلى 91% وأن مناظر مجردة تحتوي إلى حد كبير على تربة بدون غطاء نباتي. خلال فترة الدراسة، خضعت كل من فئات الغطاء النباتي والتربة العارية لتغيرات كبيرة متموجة زمنيا. خلال الفترة من 2004 إلى 2010، لوحظ معدل انحدار سنوي للغطاء النباتي بلغ حوالي 55%. ومع ذلك، لوحظت زيادة بنسبة 66% خلال الفترة 2010-2017. وقد أظهر تقدير المعامل C\_RUSLE أن استخدام نموذج الانحدار الآسي فعال وأن الغطاء النباتي في منطقة الدراسة غير كافٍ لحماية الحوض من التآكل المحتمل.

الكلمات المفتاحية : مستجمعات المياه في مجردة. مؤشر الغطاء النباتي الفروق الطبيعي؛ الاستشعار عن بعد؛ معادلة فقدان التربة الشاملة المنقحة RUSLE ؛ المعامل Kappa نسبة توصيل الرواسب. SDR

## Abstract

Soil erosion is a major problem in the Maghreb countries. The consequences of this phenomenon are disastrous, with soil degradation, production of vast areas that are agriculturally sterile, besides agricultural drought conditions aggravated by the increase in runoff compared to infiltration, which leads to a decrease in soil water reserve. This phenomenon may as well cause serious problems of rapid sedimentation of dams. Relevant to this, the present work tries to study the large Medjerda basin located in Algeria and Tunisia, and the Mellegue basin located in Algeria, which contains large agricultural areas and dams used for irrigation as well as drinking water supply. The main objectives of this work are: (1) to estimate the soil erosion rate in Medjerda and Mellegue basins; (2) to highlight the increasing intensity of erosive processes; and (3) to show the effectiveness of some anti-erosion systems existing in the basin. The adopted approach consists in mapping the factors that trigger erosion, using the revised universal soil loss equation integrated with satellite imagery (Landsat Oli8). The obtained results have shown that the average erosion rate in Medjerda and Mellegue is about 13.27 t/ha/year, with 2.1%, 13.6% and 62.12% of the surface of the basin are very sensitive, sensitive and less sensitive to erosion respectively. The obtained results have shown that land management measures and actions are taken to reduce erosion cause a notable decrease of the erosion rate from 14.91 to 8.98 t/ha/year. On the other hand, forest fires increase the rate of erosion by 8%, which is defined, in the erosion class (from 36.17% of the area to 30.85%), as tolerable. The small catchments affected by the fire are the most vulnerable to erosion. The rate of sediment input is about 40% of the average annual rate of soil loss and sediment deposition found in dams in the region. This value can reach 52% in the case of a heavily burnt forest. Improving vegetation density through a combination of reforestation and extension of grazing land has a remarkable effect on the rate of erosion compared to other techniques.

Remote sensing and geographic information systems are very effective when studying land cover evolution and detecting changes. This research has been carried out in the Medjerda watershed. It is aimed to study the dynamism of land cover from multiple satellite images from 1994 to 2017 as well as the evolution of the C factor and its relationship to water erosion. The classification has been supervised by the use of the maximum likelihood method, the multi-date comparison along with masks technique. Results have shown that the classification accuracy varies from 76% to 91% and the Medjerda landscape largely contains soils without vegetation. During the period of the study, both vegetation classes and bare soil go through considerable changes following an undulating tendency. During the period from 2004 to 2010, an annual vegetation regression rate of around 55% was observed. However, an increase of 66 % was observed during the period 2010- 2017. The estimation of the factor C has shown that the use of the exponential regression model is effective and the vegetation in the study area is insufficient to protect the basin against possible erosion.

**Keywords:** Medjerda catchment; Normalized Difference Vegetation Index; Remote sensing; Revised Universal Soil Loss Equation; Kappa coefficient; Sediment delivery ratio.

## Résumé

Les principaux objectifs de ce travail sont : (1) d'estimer le taux d'érosion des sols dans les bassins de la Medjerda et du Mellegue ; (2) mettre en évidence l'intensité croissante des processus érosifs ; et (3) montrer l'efficacité de certains systèmes antiérosifs existants dans le bassin. L'approche adoptée consiste à cartographier les facteurs qui déclenchent l'érosion, en utilisant l'équation universelle révisée de perte de sol intégrée à l'imagerie satellitaire (Landsat Oli8). Les résultats obtenus ont montré que le taux d'érosion moyen à Medjerda et Mellegue est d'environ 13,27 t/ha/an, avec 2,1%, 13,6% et 62,12 % de la surface du bassin sont respectivement très sensible, sensible et moins sensible à l'érosion. Les résultats obtenus ont montré que les mesures de gestion des terres et les actions prises pour réduire l'érosion provoquent une diminution notable du taux d'érosion de 14,91 à 8,98 t/ha/an. D'autre part, les feux de forêt augmentent le taux d'érosion de 8 %, qui est défini, dans la classe d'érosion (de 36,17 % de la superficie à 30,85 %), comme tolérable. Les petits bassins versants touchés par l'incendie sont les plus vulnérables à l'érosion. Le taux d'apport de sédiments est d'environ 40 % du taux annuel moyen de perte de sol et de dépôt de sédiments constaté dans les barrages de la région. Cette valeur peut atteindre 52 % dans le cas d'une forêt fortement brûlée. L'amélioration de la densité de la végétation par une combinaison de reboisement et d'extension des pâturages a un effet remarquable sur le taux d'érosion par rapport à d'autres techniques.

La télédétection et les systèmes d'information géographique sont très efficaces pour étudier l'évolution de la couverture végétale et détecter les changements. Cette recherche vise à étudier le dynamisme de l'occupation du sol à partir de multiples images satellites de 1994 à 2017 ainsi que l'évolution du facteur C\_RUSLE et sa relation avec l'érosion hydrique. La classification a été supervisée par l'utilisation de la méthode du maximum de vraisemblance, la comparaison multi-date ainsi que la technique des masques. Les résultats ont montré que la précision de la classification varie de 76% à 91% et que le paysage de Medjerda contient en grande partie des sols sans végétation. Au cours de la période d'étude, les classes de végétation et les sols nus subissent des changements considérables suivant une tendance ondulante. Au cours de la période de 2004 à 2010, un taux annuel de régression de la végétation d'environ 55% a été observé. Cependant, une augmentation de 66 % a été observée au cours de la période 2010-2017. L'estimation du facteur C a montré que l'utilisation du modèle de régression exponentielle est efficace et que la végétation dans la zone d'étude est insuffisante pour protéger le bassin contre une éventuelle érosion. .

**Mots-clés** : Bassin versant de la Medjerda ; Indice de végétation par différence normalisée ; Télédétection ; Modèle RUSLE ; coefficient Kappa ; SDR.

# Introduction Générale

## Introduction Générale

L'érosion des sols est très fréquente dans les pays du bassin méditerranéen et constitue un aspect majeur de la dégradation des paysages aux côtés des variations spatio-temporelles brutales des précipitations, des débits d'eau et de l'action du gel et du dégel (Boukheir et al, 2001 ; Touaibia et Achite, 2003 ; Hermassi et al, 2014 ; Allili et al, 2015 ; Berghout et Meddi, 2016 ; Meddi et Toumi, 2016 ; Gao et Wang, 2018). Elle est devenue un problème majeur dans la région du Maghreb en général où elle peut atteindre 2000t/km<sup>2</sup>/an en Algérie par exemple. L'érosion hydrique est la forme la plus répandue et la plus dangereuse et elle dépend de l'agressivité climatique et de la résistance du milieu. L'intensité du phénomène d'érosion se manifeste essentiellement en période de crue (Demmak, 1982) où une quantité importante de sédiments transite vers les réservoirs. L'érosion est un risque majeur pour les barrages et les terres agricoles dans les pays du Maghreb en général et en Algérie en particulier. Des quantités de sédiments en suspension, estimées à environ 47 millions de t/an, se déposent sur le littoral méditerranéen des côtes algériennes (Probst et Suchet, 1992). Le volume annuel de sédiments déposés dans les barrages algériens est d'environ 45 millions de m<sup>3</sup> (Remini et Hallouche, 2007). Actuellement, en Algérie, les problèmes d'érosion et de désertification sont classés parmi les plus nocifs pour l'environnement. Ce problème est directement lié à la menace de 14 millions d'hectares de terres agricoles en Algérie. Trois (03) millions d'hectares (27% des terres agricoles) ont déjà été touchés par l'érosion en Tunisie, parmi lesquelles, 1,5 million d'hectares sont modérément à fortement touchés et nécessitent des interventions à court et moyen terme (Hermassi et al, 2014).

Pour faire face à ce problème, l'Algérie et la Tunisie ont initié une politique d'aménagement ainsi que des programmes de conservation des eaux et des sols. Depuis 1990, ces programmes ont été complétés par la mise en œuvre de multiples stratégies pour éviter l'érosion hydrique et protéger les sols et les infrastructures hydrauliques.

Les sols de la méditerranée ne sont pas plus fragiles que les autres, mais ils ont tendance à se dégrader rapidement dès qu'on les dénude (labour) et qu'on les prive d'un apport régulier de litière. Les lithosols caillouteux, très fréquents en montagne, sont très résistants mais peu fertiles. Les vertisols calcique sont les plus résistants à l'érosion en nappe mais ils sont sensibles aux glissements et aux ravinements. Les sols bruns calcaire sont d'autant plus résistants qu'ils ont une charge importante en cailloux (calcaire) et une forte teneur en argiles saturées en calcium. Enfin, les sols rouges fersiallitiques méditerranéens lessivés sont généralement assez fragiles car sont pauvres en matière organiques (blavet et al, 2004 ; Roose et al, 2012).

Roose et al. (1993b) ont montré que la sensibilité des sols à la battance (impact des gouttes de pluies) et au tassement (remplissage de la macroporosité de surface par les particules fines déplacées par les gouttes de pluie) dépend non seulement de leur texture, mais aussi de leur teneur en matière organique et de l'humidité de l'horizon de surface, ces deux derniers facteurs

étant fortement dépendants de l'utilisation du sol et des pratiques agricoles. La matière organique en agissant comme liant entre les micros agrégats, accroît la stabilité des agrégats qui est d'autant plus grande que la fraction argileuse est importante. Pour les sols tropicaux, la bonne cohésion et consolidation des agrégats du sol est essentielle pour contrôler l'érosion en nappe et le ruissellement (Reichert et al, 1999). Dupriez (1996) fait mention de l'effet du surpâturage sur le développement de l'érosion en nappe. Celui-ci dénude le sol et le livre à la battance des pluies. En plus, le piétinement incessant des animaux réduit la porosité structurale de l'horizon de surface favorisant ainsi le tassement qui empêche la bonne infiltration de l'eau d'où un ruissellement important.

Les terres agricole en milieux semi-aride souffrent d'une crise environnementale dont l'érosion hydrique constitue la manifestation la plus spectaculaire ( Attia, 1977 ; Hamza, 1988, Amiréche, 1944 ; Laouina 1995 ; Kouri et al 1997 ; Sadiki et al, 2004 Bennari et al, 2007). L'érosion en nappe est un moteur très efficace de l'appauvrissement en particules fines et en nutriments de l'horizon superficiel de nombreux sols argilo-sableux ( Roose, 1981 ,1994).

Le Système d'information géographique (SIG) permet de croiser des cartes aux thèmes différents, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur les valeurs numériques des facteurs d'érosion qui y sont rangées. (Sadiki et al, 2004).

L'évaluation des risques d'érosion des sols des bassins versants nécessite la cartographie et l'analyse de plusieurs facteurs ayant un impact sur le processus d'érosion : l'intensité des précipitations, la pente et la longueur de la pente, l'érodibilité des sols, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. (Wischmeier et Smith, 1978 ; Balasubramani et al, 2015 ; Chafai et al, 2020). Plusieurs modèles sont disponibles pour estimer le taux d'érosion annuel : Empirique (par exemple EPM (Gavrilovic, 1962), USLE ( Wischmeier et Smith, 1978 ) et RUSLE ( Renard et al., 1991 ). A base physique (par exemple SWAT (Arnold et al, 1998) etc.) et déterministe (par exemple ANSWERS (Beasley et al, 1980), EUROSEM (Morgan et al, 1998) etc.). Parmi ces modèles, le modèle USLE mis au point par Wischmeier et Smith (1978), est le plus largement utilisé (Wischmeier et Smith, 1978 ; Kim et Julien, 2006, Mokhtari 2017, Sepuru et Dube, 2018;. Sahli et al, 2020). Ce modèle a été basé sur des milliers de données expérimentales collectées par le Soil Conservation Service et l'Agricultural Research Service dans 37 États américains. Selon ce modèle empirique, le risque d'érosion moyenne est une fonction multiplicative de cinq sous-modèles, l'érosivité des pluies et quatre facteurs de résistance environnementale (érodibilité du sol (K), facteur topographique (LS), couvert végétal (C) et pratiques antiérosive (P)). Une version révisée du modèle USLE, appelée RUSLE, a été appliquée sur de vastes zones et dans différents contextes (y compris les forêts, les parcours). (Di Piazza et al, 2007 ; Fernandez et al, 2010 ; Rulli et al, 2013 ; Karamesouti et al, 2016 ; Chadli et al, 2016 ; Koirala et al, 2019 ; Sahli et al, 2020 ; Chafai et al, 2020). Le modèle RUSLE, comme l'USLE, ne permet aucune estimation du dépôt et de la taille des sédiments ou de la distribution spatiale et temporelle de l'érosion ; cependant, il peut évaluer la perte moyenne de sol par an.

Le bassin versant de la Medjerda est situé dans un climat méditerranéen semi-aride avec une pluviométrie moyenne qui varie entre 350-600 millimètres, fait l'objet des travaux de cette thèse. Il est principalement rural et détient 1/3 de la superficie forestière, un quart des meilleures terres agricoles et 2/3 des eaux mobilisables du la Tunisie (Hermassi et al, 2014). Toutefois, ce bassin versant connaît un certain nombre de problèmes concernant les ressources naturelles liés à l'érosion, la sécheresse, les inondations et l'envasement des barrages et à une baisse de leur

capacité. A cause des fortes érosions et manque important du couvert végétal, des changements climatiques, la capacité de stockage des barrages diminuera de 30% à 40% d'ici 2030 (Sherif et al, 2012). Le bassin versant de la Medjerda est le plus touché par les incendies. Il se caractérise par une irrégularité des précipitations (Khedimallah et al, 2020). Les gouvernorats de Jendouba, Siliana, Kef et Béja, en Tunisie, sont les plus vulnérables où environ 1700 incendies ont été enregistrés entre 1986 et 2012 dans le gouvernorat de Jendouba par exemple et les destructions ont couvert 7600 ha. Le nombre maximum d'incendies a été atteint au cours de la dernière décennie. 1142 incendies ont été enregistrés, dont près de 500 en 2011 et 2012 (représentant 44% du total des incendies), (Chriha et Sghari, 2013). En 2017, plus de 200 hectares de végétation ont été détruits à Jendouba suite à 15 incendies intenses enregistrés dans les zones forestières de Fernana et de nord-est d'Ain Drahem. Selon les chiffres avancés par la cellule de communication de la Direction de la protection civile en juillet 2020, plus de 500 hectares de végétation, dont 50 hectares d'arbres forestiers, ont été détruits dans la wilaya de Souk Ahras (Algérie) par des incendies dévastateurs.

L'objectif général de cette thèse est de développer et de présenter une méthode qui peut être utilisée pour évaluer le risque d'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol révisé RUSLE. L'approche utilisée est basée sur l'intégration de données du traitement des images satellitaire Landsat et de données cartographique dans un système d'information géographique SIG pour l'identification et la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique. Nous proposons aussi de comparer des scénarios d'érosion pour mettre en évidence à la fois :

- ✚ L'intensité croissante des processus érosifs à cause des incendies de forêt, et l'efficacité de certaines techniques antiérosives.
- ✚ D'estimer le taux d'érosion des sols des sous bassins versant en utilisant le modèle SDR, (Taux de livraison des sédiments), le plus adéquate
- ✚ De réaliser une étude diachronique de l'occupation du sol du bassin versant de la Medjerda, durant la période 1994 – 2017, en utilisant des images satellitaires de Landsat et d'obtenir des cartes d'occupation de sol qui seront utilisée pour cartographie le facteur C.

La modélisation par l'USLE et RUSLE ne prend compte que l'érosion en nappe ou en rigole. Les résultats présentés doivent être testés et validés pour de nouvelles zones avant d'être adoptée pour utilisation ailleurs.

Ce document se décompose en huit chapitres :

**Le chapitre 1**, qui représente une introduction générale, expose les enjeux et les objectifs de la thèse.

**Le chapitre 2** dresse une synthèse bibliographique sur l'évaluation de l'érosion hydrique à partir de l'analyse de la littérature scientifique, un état des données et des méthodes permettant d'estimer l'érosion hydrique et présente brièvement quelques informations sur la télédétection, sur les satellites d'observation de la terre et sur les possibilités qu'offrent ces derniers pour traiter de grandes zones. Cette mise au point vise à livrer les éléments clés pour la lecture du reste du travail. Ce chapitre aborde aussi, les théories et les concepts du traitement des images satellitaires et les systèmes d'information géographique.

**Le chapitre 3** présente les caractéristiques climatiques, hydrologiques, socioéconomiques du bassin versant ainsi que la morphologie afin d'extraire les grandes unités géomorphologiques à partir des images satellitaires combinées avec le modèle numérique de terrain. Ce qui convient pour fixer les limites du bassin et choisir des critères adaptés à l'établissement de ces limites.

**Le chapitre 4** présente les procédures que nous avons suivi pour réaliser une étude diachronique de l'occupation du sol du bassin versant de la Medjerda en utilisant des images satellitaires de Landsat afin d'obtenir des cartes d'occupation du sol qui seront utilisées pour cartographier le facteur C.

**Le chapitre 5** concerne la détermination des gains et des pertes de chaque classe d'occupation du sol durant la période 1994-2017 et l'analyse des changements détectés à l'échelle du bassin versant, en détaillant les dynamiques spatio-temporelles interannuelles et saisonnières. Ainsi que l'estimation du facteur C-RUSLE en utilisant la télédétection et les cartes d'occupation du sol. La dynamique de la végétation a été étudiée en utilisant l'indice de végétation standard (NDVI).

**Le chapitre 6** est consacré à l'étude de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant de la Medjerda en utilisant l'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE) développée par Renard et al. (1991). L'érosivité de la pluie a été estimée par la méthode de (Blaid 2015) et la méthode de Rango et Arnoldus (1987).

**Le chapitre 7** est consacré à l'étude de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant de la Medjerda. En utilisant le modèle empirique de l'USLE, et le modèle physique de la « FAO ».

**Le chapitre 8** est consacré à estimer le taux d'érosion des sols des sous bassins, en utilisant les modèles SDR, (Taux de livraison des sédiments), et de mettre en évidence à la fois l'intensité croissante des processus érosifs, conséquence des incendies de forêt, et l'efficacité de certaines techniques antiérosives en comparant les scénarios, (incendie et projet) obtenus par des mesures et actions préventives.

Cette étude est très importante d'un point de vue pratique car elle donne une idée sur la répartition spatiale du risque d'érosion hydrique, en particulier l'érosion en nappe, dans la zone d'étude. Elle donne également un aperçu du développement de l'érosion à la suite d'incendies auxquels la zone peut être exposée, car les forêts existantes sont à haut risque, en particulier du côté nord du bassin. L'étude permet également de comparer les meilleures méthodes utilisées pour estimer le risque d'érosion hydrique. Elle donne une idée sur l'évolution et le changement de la végétation de la zone d'étude. Les futurs scénarios d'estimation de l'érosion seront simulés pour des événements similaires. Les résultats de cette étude peuvent être un outil d'aide à la décision nécessaire pour les décideurs et les planificateurs afin de préserver les terres agricoles et les barrages contre la sédimentation.

# Chapitre 1

## Erosion hydrique concept et quantification

## Chapitre 1 : Érosion hydrique concept et quantification

### 1. Introduction et enjeu

Les sols fertiles sont l'une des ressources les plus essentielles pour soutenir l'humanité (Christine et al, 2019). En consultant un article récent publié dans Science, nous avons constaté qu'ils ont été considérés comme une ressource essentielle pour la sécurité humaine (Amundson et al, 2015). Aujourd'hui, la principale menace pour cette ressource étant l'érosion des sols par le vent et par l'eau.

Depuis l'ancienne civilisation, l'érosion hydrique est reconnue comme un problème majeur pour les agricultures. Elle se développe lorsque les eaux de pluie ruissellent sur les parcelles en transportant les particules de sol (Cros-Cayot, 1996). À ce jour, selon les dernières publications des Nations Unies, à savoir Status of the World's Soil Resources, la plupart des sols du monde sont dans un état passable, mauvais ou très mauvais (FAO, 2015). Au début des années 90, on estimait que 56 % des terres mondiales étaient dégradées et présentaient des formes légères à sévères d'érosion des sols par l'eau (Oldeman, 1992). Étant donné que l'érosion hydrique est fortement exacerbée par la conversion de la végétation naturelle en terres agricoles, avec près de 40 % des terres de la Terre actuellement utilisées pour la production agricole (Foley et al. 2017).

Le problème de l'érosion est largement répandu dans les différents pays de la méditerranée. Il est devenu un problème majeur dans la région du Maghreb en général où il peut atteindre 2000 t/km<sup>2</sup>/an en Algérie par exemple. L'érosion hydrique est la forme la plus répandue et la plus dangereuse. Elle dépend de l'agressivité climatique et de la résistance du milieu. L'intensité du phénomène d'érosion se manifeste essentiellement en période de la crue (Demmak, 1982) où une quantité importante de sédiments se transporte vers les réservoirs. Des quantités de sédiments en suspension, estimées à environ 47 millions de t/an, se déposent sur le littoral méditerranéen des côtes algériennes (Probst et Suchet 1992). Le volume annuel de sédiments déposés dans les barrages algériens est d'environ 45 millions de m<sup>3</sup> (Remini et Hallouche 2007). Trois (03) millions d'hectares des terres agricoles (soit 27%) ont déjà été touchés par l'érosion en Tunisie dont 1,5million d'hectares sont modérément à fortement touchés et nécessitent des interventions à court et moyen terme (Hermassi et al. 2014). Selon la FAO (1990), la situation continue à se dégrader, En Tunisie plus de 45% de la superficie totale est menacée par l'érosion hydrique (Chevalier, 1995), au Maroc 40% (Celik 1996) et en l'Algérie 62% des zones telliennes sont touchées, soit 14 millions d'hectares (Chebbani, 1999).

## 2. Erosion hydrique concept et facteurs

L'érosion hydrique représente un vrai enjeu pour les zones semi arides. Elle est définie comme l'ensemble des actions chimique et organique qui aboutit à la destruction des roches et au nivellement progressif du terrain, elle affecte l'ensemble de la couverture terrestre géo pédologique, et c'est l'un des facteurs importants de la formation et l'évolution des milieux naturels (Dutil, 1984). Il met en danger la sécurité alimentaire, la productivité subsistance du sol, la surface de stockage de l'eau, la beauté du paysage et l'équilibre écologique naturel.

Selon Morgan (1986), l'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui résulte de trois phases, détachement, transport et dépôt, (figure 1.1), causés par l'action de la pluie et du ruissellement. L'énergie de l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface, du détachement de fragments de sol et de leur transfert (Bradford et Huang 1996). Ce détachement peut être assuré par le rejaillissement des particules sous l'impact des gouttes de pluie (Effet splash). L'importance du flux de détachement est contrôlée essentiellement par l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Le ruissellement a un rôle déterminant dans le transport du matériel mobilisé mais également dans le détachement des particules. En l'absence de ruissellement, les particules de sol détachées par la pluie ne sont pas transportées très loin. Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse, le couvert végétal et l'épaisseur de l'écoulement (Gimenez et Govers, 2002).

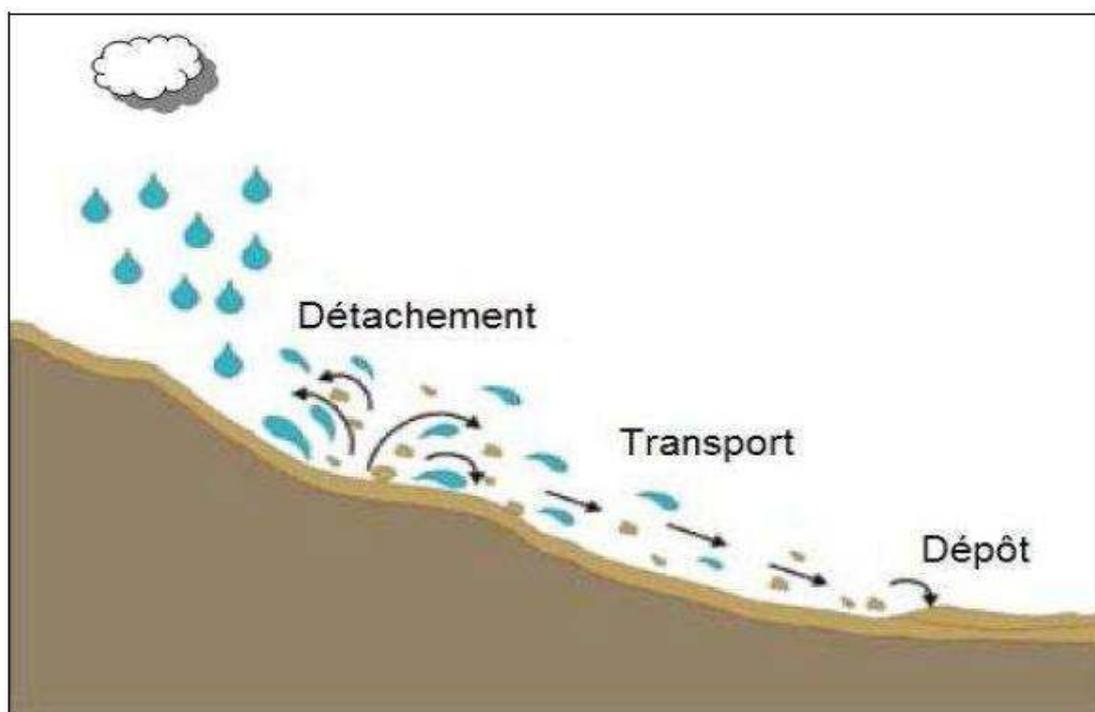


Figure 1.1 processus de l'érosion hydrique (cheggour,2008)

La figure 1.2 présente Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie (Boiffin, 1984)

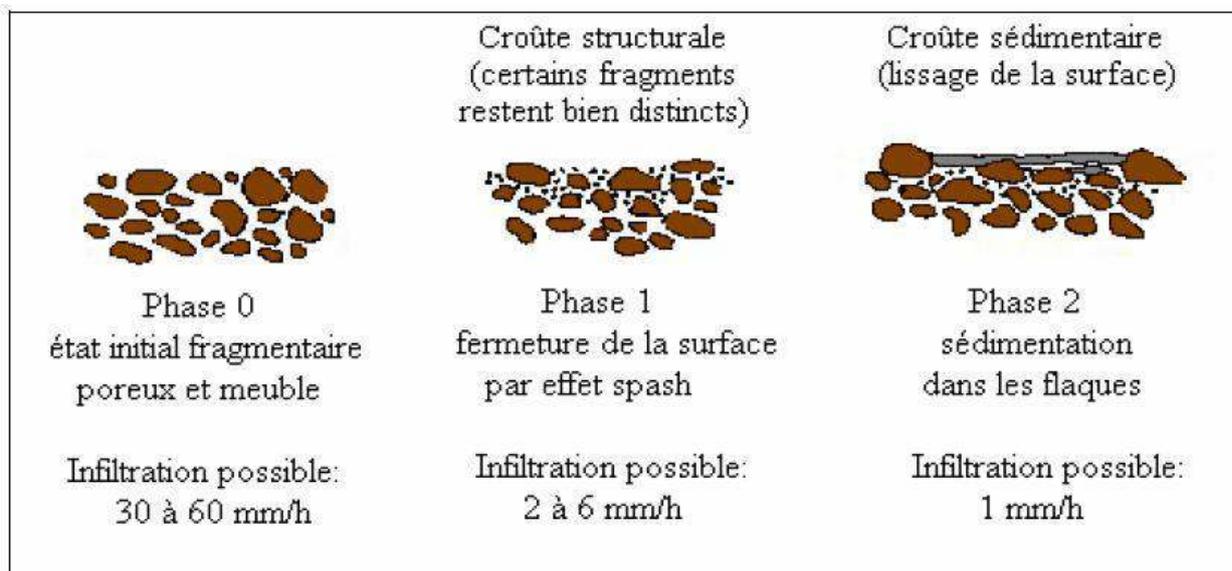


Figure 1.2 Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie (Boiffin, 1984)

L'érosion hydrique est très répandue dans la région du Meghreb, puisque toutes les conditions sont réunies pour déclencher et développer un tel processus : le climat qui est caractérisé par des précipitations limitées et irrégulières et des orages violents de courtes durées et de fortes intensités (Zahar, 1997 ; Khedimallah et al. 2020). La lithologie des sols qui sont en majorité de texture sablonneuse ou limoneuse pauvres en matière organique, notamment au sud du bassin méditerranéen, à cause des températures élevées et de leurs variations rapides et du manque d'eau (Al Ali et al. 2008).

La topographie représente un facteur important qui rentre dans le processus de l'érosion, s'exprime par le degré et la longueur des pentes, Lorsqu'une pente est forte et longue, l'écoulement est rapide développant une grande force destructrice. Généralement les montagnes méditerranéennes sont profondément découpées, complexes, et partiellement instables, avec de nombreux versants escarpés et des sols jeunes rocaillieux peu profonds (Naveh and Lieberman, 1984).

La végétation peut intervenir contre l'érosion hydrique de surface de deux manières principales : d'une part, elle peut empêcher l'ablation du substrat, d'autre part, elle peut favoriser la sédimentation des particules, grâce à des processus de piégeage et de rétention d'une partie des sédiments érodés à l'intérieur d'un bassin versant. Lee et al. en 1999 ont montré qu'il existe un effet de filtration des écoulements au travers de la végétation. Ces écoulements déposent les sédiments par suite de la réduction de leur énergie de transport.

La végétation joue un rôle d'interception des gouttes de pluie en fonction de la densité de couvert, lorsque la densité augment l'interception augmente aussi, elle permet de réduire l'énergie d'érosion et l'effet de splash (Geddes, 1999). En forêt, les précipitations inférieures à 2 mm en 24h sont presque entièrement interceptées ; au-delà, l'interception diminue lorsque l'intensité de la pluie augmente. La couverture végétale favorise l'infiltration de l'eau et améliore les propriétés

physiques et chimique de sol ; elle permet de maintenir les sols grâce aux systèmes racinaires. Les végétaux permettent, en effet, d'améliorer la cohésion des sols et donc de renforcer leurs propriétés mécaniques.

Certaines activités humaines et modes de développement accélèrent le phénomène de l'érosion. La région est anthropisée par ces principaux facteurs :

- ✚ La déforestation, qui favorise le ruissellement et accroît les risques d'inondations et les risques de glissement de terrain.
- ✚ Le surpâturage qui provoque un tassement du sol, une diminution de sa perméabilité et un accroissement du ruissellement.
- ✚ L'intensification de l'agriculture et de l'utilisation des pratiques culturales inadéquates des sols qui entraînent une suppression des éléments structurant le paysage, (retournement des prairies, agrandissement des parcelles...).
- ✚ L'incendie des forêts qui favorise la création d'une quantité de cendre, constituée de particules très fines qui provoque l'augmentation de la densité apparente et une réduction de la porosité du sol (Wells et al. 1979, DeByle, 1981).
- ✚ L'abandon des terres et en particulier de celles à faible rendement.
- ✚ La croissance démographique, l'accroissement de l'urbanisation en aval des terres cultivées augmentent la vulnérabilité aux phénomènes érosifs. (Auzet, 1987 ; Bissonais et al. 1998).

Les effets directs et indirects de l'érosion hydrique sont multiples et variés. Ils se manifestent sous plusieurs aspects, dont les plus négatifs sont les suivants :

- ✚ La dégradation des terres agricoles suite au décapage superficiel du sol et au ravinement intense.
- ✚ La diminution de la fertilité des sols par décapage successif de la couche arable du sol ce qui entraîne la baisse des rendements des cultures.
- ✚ L'envasement accéléré des infrastructures hydrauliques et donc une réduction des volumes d'eau stockés.
- ✚ L'augmentation des risques des inondations et des dégâts.
- ✚ La destruction des routes, les chemins et les infrastructures.
- ✚ Le transfert et la répartition spatiale des polluants dans l'environnement (métaux lourds ...).
- ✚ L'augmentation de la difficulté et du coût de traitement des eaux de consommation.

Il existe plusieurs types d'érosion, on peut citer par exemple : l'érosion éolienne, l'érosion mécanique (aratoire) et l'érosion hydrique. L'élément déclencheur de l'érosion hydrique est la pluie. Elle est subdivisée en :

- ✚ Erosion en nappe, qui est liée à 2 mécanismes : Le détachement des particules de terre causé par l'effet Splash, et le ruissellement lorsque l'intensité devient supérieure à la vitesse d'infiltration. Elle est considérée comme la plus dangereuse pour les terres agricoles. Elle est plus intense en automne à cause de l'agressivité de la pluie durant cette période et la faible densité de la végétation. (Cherif et al. 1993). L'érosion en nappe dépend de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement, l'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules, et l'état du sol (la durée des pluies, l'humidité du sol).

- ✚ Erosion linéaire, (en griffes ou en rigoles) qui intervient à la suite du ruissellement, des flaques de sol se forment suite au ruissellement puis des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent suivant la ligne de plus grande pente.

Le tableau 1.1 présente les formes et les processus de dégradation et d'érosion, les causes ainsi que les facteurs de résistance du milieu.

Tableau 1.1 Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu (Roose 1994).

<b>Les processus de dégradation et d'érosion et leurs formes</b>	<b>Les causes : différentes sources d'énergie</b>	<b>Les facteurs de résistance du milieu</b>
<b><u>Erosion mécanique sèche</u></b> Forme : Creeping	Gravité et poussée par les outils de travail du sol	- fonction de l'intensité du travail du sol, c'est-à-dire de la fréquence des travaux et du type d'outil - fonction de la pente et de la cohésion du terrain
<b><u>Erosion en nappe :</u></b> Forme nappe de sable, pellicule de battance ou de sédimentation, "demoiselle coiffée", micro-falaise	Battance des gouttes de pluie	- le couvert végétal, - la pente, - le sol, - les techniques et structures anti-érosives
<b><u>Erosion linéaire :</u></b> Forme griffes, rigoles, ravines	L'énergie du ruissellement dépend du volume du ruissellement et de sa vitesse au carré $1/2MV^2 = 1/2MGH$	- la vitesse du ruissellement est fonction de la pente et de la rugosité, - le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin versant et de la capacité d'infiltration, - résistance du profil du sol et des racines

### 3. Stratégies de Conservation des Eaux et des Sols

Dans l'objectif de retarder l'envasement des barrages et de protéger les terres et les équipements hydrauliques contre le problème de l'érosion, une stratégie a été développée pendant la période 1940 à 1980 par l'administration des eaux et des forêts algériennes, la DRS (défense et restauration de sols), tient à la fois de la RTM (Restauration des Terrains de Mongtane), et de la CES (Conservation des Eaux et des Sols). Elle comprend :

- ✚ La reforestation des hautes vallées, 800000 ha ont été reboisé depuis 1962, (Mazour, 1992)
- ✚ La correction torrentielle dans les périmètres de protections des barrages.
- ✚ Le terrassement des champs cultivés (350000 ha de banquettes d'après Heusch, 1986).

Entre 1980 et 1985 la DRS a été suspendue suite aux difficultés économiques et les paysans qui ont rejeté le système des terrasses de diversion et ont refusé de l'entretenir (Iefay, 1986). L'analyse de la CES et DRS et les enquêtes effectuées ont montré que les paysans ont refusé les techniques de terrassements car ces travaux exigent beaucoup de travail d'entretien et réduisent la surface cultivable de 5 à 15% mais n'améliorent pas la productivité des terres ni les revenus des paysans. (Iefay, 1986). A partir de 1985, une nouvelle approche a été développée par des chercheurs algériens en collaboration avec l'institut algérien pour la recherche forestière (INRF) et l'institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (OROSTOM) dans le but de développer un programme de formation et de recherche sur les causes et les facteurs de différents processus d'érosions et pour le tester dans les montagnes semi-aride d'Algérie. Cette approche comprend la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité de sol (GCES). La majorité des aménagements entretenus par les paysans et sont même détruits par les labours.

Un effort considérable a été déployé par l'état tunisien pendant plus de 50 ans pour faire face au phénomène de l'érosion et limiter ses conséquences, il se traduit par des réalisations physiques, institutionnelle et juridiques. Un investissement d'environ 1000M de dinars tunisiens a été assigné pour la protection des sols et la conservation des eaux pour objectifs d'augmenter la production agricole et de réduire les pertes en sols (Mtimet, 2016).

Historiquement, les stratégies d'aménagement et de développement agricole ont connu un essor marqué en Tunisie depuis longtemps (figure 1.3). Les anciennes techniques de collecte des eaux de ruissellement sont des murs de pierre qui sont construits sur les versants. Il s'agit d'irriguer des plantations arbustives. Pendant la colonisation française, de nouveaux systèmes de production et de mise en valeur de l'espace rural ont été introduits et ont inclus des stratégies de lutte contre les phénomènes de dégradation des sols. Des corrections des ravins et des torrents ont été faites. (Braiki 2018).

Vers les années 1950, des subventions publiques ont été accordées aux agriculteurs afin de les encourager à participer à la construction des aménagements antiérosifs. Le chômage était l'enjeu majeur du gouvernement, donc les travaux de CES ont été utilisés comme une source d'emploi pour diminuer le taux élevé de ce problème.

Depuis l'Indépendance de la Tunisie, des efforts importants ont été déployés par l'état pour lutter contre le risque d'érosion. Des réalisations physiques ont été effectuées, portées sur l'aménagement d'un million d'ha environ, dans une première tranche, par des techniques de conservation des eaux et du sol. Ces techniques varient du Nord au Sud suivant les conditions pédoclimatiques elles reposent sur le principe de récolte des eaux de ruissellement dans le Sud et le Sahel par l'intermédiaire des Meskats et des Jessours, sur le principe de l'épandage des eaux de crues dans la Tunisie Centrale et enfin sur le principe de lutte contre l'érosion dans le Nord du pays en utilisant les techniques appropriées. Les techniques les plus utilisées sont regroupées comme suit :

-  Les banquettes.
-  Les cordons.
-  Les cuvettes.
-  Les techniques traditionnelles (Meskats, Jessours, Tabias).

- ✚ La fixation biologique et les aménagements agro-pastoraux.
- ✚ La correction des ravins (seuils déversoirs en pierres sèches).
- ✚ Les techniques douces de CES (Conservation des Eaux et du Sol) (labour en Courbe de niveau, bandes enherbées).
- ✚ la sauvegarde des ouvrages.
- ✚ La consolidation comme complément à l'aménagement.
- ✚ La construction des lacs collinaires et les ouvrages de recharge et d'épandage des eaux de crues. Ce type d'aménagement est conçu dans le but de contribuer à la mobilisation des ressources en eau de surface du pays.

Les techniques de CES qui ont été adoptées durant les années soixante et les années soixante-dix, ne comprenaient que quelques travaux de conservation des eaux comme la construction et la sauvegarde des Jessours dans le Sud et les terrassements manuels et mécaniques dans le centre et le nord du pays avec une évolution importante pendant les années quatre-vingts.



Figure 1.3 historique de la dynamique des aménagements de CES en Tunisie (Braiki 2018).

Au niveau institutionnel, l'attention accordée à la conservation des eaux et du sol dans le pays est concrétisée par la création d'une structure administrative qui veille à la planification, l'exécution et le contrôle des activités du secteur, laquelle structure a évolué d'une section au sein du département de l'Hydraulique et de l'Équipement Rural (HER) dans les années 1960 à un service puis une sous-direction de la Direction des Forêts pendant les années 70 à 80 (Braiki 2018).

En 1984, la Direction de la Conservation des Eaux et du Sol a été créée dans l'objectif de mieux répondre aux besoins en conception, en planification, en étude et en exécution du secteur. L'une des raisons qui ont milité en faveur de cette création est l'importance à accorder, d'une part, pour

intensifier la lutte antiérosive chez les privés et d'autre part, pour faire de l'activité CES une véritable action de développement agricole. Au niveau régional, cette structure est représentée dans les gouvernorats par des arrondissements chargés de la mise en œuvre des projets de conservation des eaux et du sol (Braiki 2018). Les missions attribuées à cette nouvelle structure se résument comme suit :

- ✚ La mise en œuvre de la politique nationale en matière de la conservation des eaux et du sol destinée à la protection des sols et à l'amélioration de leur production.
- ✚ L'élaboration des études d'aménagement des bassins versants, des études socio-économiques des bassins versants et des zones à traiter.
- ✚ L'élaboration des études d'exécution des travaux antiérosifs et leur programmation.
- ✚ Le contrôle et le suivi de l'exécution des projets de conservation des eaux et du sol.
- ✚ Le suivi des travaux antiérosifs et d'amélioration de la production.
- ✚ La conception et la mise en œuvre de l'exécution des travaux mécaniques.
- ✚ La vulgarisation des techniques antiérosives.

Ainsi, selon cette structure, la mise en place de projets dont l'objectif est, d'une part la conservation des eaux et du sol, et d'autre part, la gestion durable des terres dans le pays, permettra, en plus de la protection de la nature et l'environnement, d'améliorer le revenu des populations locales en les fixant au sein de leurs exploitations agricoles.

Grâce aux investissements de l'État pendant les années 1990, 87 lacs collinaires ont été construits. Une stratégie nationale d'ACES a été planifiée à la direction de conservation des eaux et des sols du ministère de l'agriculture tunisien (1991-2000). Elle s'appuie essentiellement sur deux axes :

- ✚ L'aménagement des versants grâce aux banquettes mécaniques (Nasri et al. 2004) (bande de terre dressée suivant les courbes de niveau). Les banquettes sont implantées sur des pentes faibles. Des plantations telles que le cactus et l'acacia ont été plantées sur les banquettes pour améliorer leur fixation. Ces aménagements antiérosifs, en particulier les banquettes et les lacs collinaires, couvraient déjà plus d'un million d'hectares dans le pays dans les années 2000 (Leduc et al. 2007).
- ✚ La construction de lacs et barrages collinaires sur la dorsale tunisienne (Kingumbi et al. 2007 ; Horrich et Besbes 2008). En dix ans (1990-2000), 640 retenues collinaires sont construites dans les zones de forte érosion. En 2010, plus de 1000 retenues collinaires ont été installées. La capacité des lacs est de l'ordre de 0.1 million de m<sup>3</sup> alors que celle des barrages est de l'ordre de 1 million de m<sup>3</sup>. Il s'agit d'améliorer la productivité agricole, d'alimenter les nappes souterraines et de maîtriser des eaux de surface.

Aujourd'hui, les services de Conservation des Eaux et du Sol tunisiens capitalisent la connaissance de plusieurs techniques appropriées à nos bioclimats, semi-arides et arides, et dont l'objectif est la gestion durable des ressources naturelles, notamment de l'eau et du sol. Ces techniques constituent un capital à bien gérer en fonction des conditions édapho-climatiques et socio-économiques, et plus particulièrement en fonction de la région considérée. Le gouvernement tunisien, via le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche, réserve annuellement un budget pour la création et l'entretien des ouvrages de conservation des eaux et des sols dans le

pays, et ce dans le cadre de ses programmes de développement. Ainsi, au niveau local, les arrondissements de CES et les délégations, avec la participation de la population et des agriculteurs, identifient les zones prioritaires et procèdent à l'application des technologies appropriées et intègrent la population dans le processus de réalisation et d'entretien des ouvrages, qui participe à raison de 60% du budget dans les différentes opérations. L'organigramme des interventions figure dans le schéma de la figure 1.4. (Source : <http://www.environnement.gov.tn>)

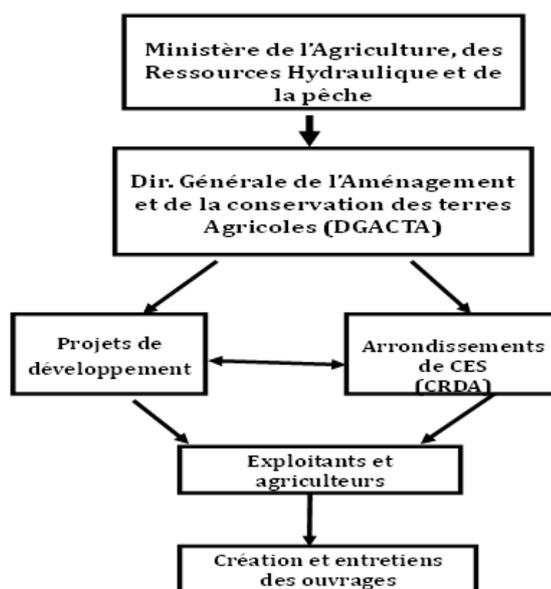


Figure 1.4 Organigramme des structures responsables de la conservation des eaux et du sol en Tunisie.

#### 4. Techniques de pratiques de conservation des eaux et du sol

Nous donnons ci-après un aperçu des différentes techniques de bonnes pratiques de conservation des eaux et du sol et de savoir-faire en Tunisie (Source : Rapport LADA-Tunisie). Ces techniques, constituant un bon cas de gestion des connaissances, ont prouvé leur efficacité, et ont donné des résultats spectaculaires en matière de Gestion Durable des Terres.

##### 4.1 Conservation des eaux et des sols suivant la technique des Jessours

C'est une méthode particulièrement pratiquée au niveau du massif des Matmatas en Tunisie. Les rendements obtenus pour des cultures pratiquées dans ces jessours sont parfois spectaculaires. En outre, ces Jessours ont bien prouvé leur efficacité concernant la conservation du sol et la lutte contre l'érosion. Elles méritent donc d'être pratiquées dans d'autres régions à bioclimat semi-aride et aride, cas de la région de Siliana.

##### 4.2 La conservation des eaux et du sol par la technique des Tabias

Cette technique est depuis longtemps pratiquée dans la majorité des régions de la Tunisie, là où le relief le permet. Il s'agit de confectionner des "digues" afin de retenir en place les eaux pluviales et les eaux de ruissellement. C'est aussi une pratique très efficace en matière de gestion durable des terres. Les rendements des cultures dans ce cas sont élevés, ce qui se traduit par l'amélioration des revenus des agriculteurs.

### **4.3 La conservation des eaux et des sols suivant la technique des Meskat**

Il s'agit de techniques traditionnelles utilisées pour capter les eaux de pluie, et ce en vue de la pratique de l'arboriculture. Ces techniques sont essentiellement pratiquées en Tunisie centrale. A l'heure actuelle, les Meskats sont encore visibles dans les plantations oléicoles de la région du Sahel. Comme pour les Jessours et les Tabias, les Meskats, en cas de leur pratique dans des petites parcelles, ne sont pas adéquats avec la mécanisation.

### **4.4 La valorisation des eaux de crues à travers la technique des Mgouds**

Les Mgouds sont des techniques basées sur des travaux plus ou moins compliqués, ayant pour objectif d'orienter les eaux de ruissellement, notamment au niveau d'un bassin versant, et leur rassemblement par des banquettes de déversions dans un lit d'oued adjacent, en vue de les détourner vers des champs d'épandage préalablement préparés. Les Mgouds sont par conséquent alimentés par de grands bassins versants et seules les précipitations importantes provoquent un ruissellement dans les cours d'eau.

### **4.5 La déviation des eaux de crues des oueds pour la valorisation agricole**

Cette méthode consiste à provoquer la submersion des champs moyennant la déviation des eaux de crues d'un oued ou d'un ravin par le prélèvement partiel ou total des eaux à travers les Mgouds. Dans ce cas, les eaux déviées sont utilisées pour l'irrigation des parcelles cultivées, soit en céréales, soit en arbres fruitiers, derrière des Tabias aménagées pour retenir ces eaux.

### **4.6 Les citernes (moyennes de collecte des eaux pluviales)**

Il s'agit d'un système de collecte des eaux pluviales très ancien en Tunisie. Il est conçu dans un objectif d'approvisionner la ou les familles propriétaires en eau pour les différents usages domestiques, y compris l'irrigation et l'abreuvement du cheptel en milieu steppique. La collecte des eaux pluviales par des citernes se fait à partir d'un impluvium qui doit être propre, salubre et imperméable.

### **4.7 Barrages de retenues collinaires**

Il s'agit de petits barrages de capture de sédiments construits au niveau de petits cours d'eau, permettant de collecter les eaux de ruissellement amont pour des besoins communautaires. Ils sont devenus la pièce maîtresse de la stratégie nationale tunisienne en matière de conservation des eaux et des sols, en tant que pièges à sédiments.

### **4.8 Barrages de Correction torrentielle**

Cette méthode fait appel à la fixation mécanique du fond des ravines avec des barrages en dur. Cette technique permet de stabiliser le fond des ravines en empêchant le surcreusement du lit et son approfondissement. L'érosion régressive et le sapement des berges sont alors stoppés. Utilisée en aval du bassin versant, là où les pentes sont faibles, elle permet de retenir une importante quantité de sédiments et limite ainsi l'envasement des retenues en aval. Des gabions sont employés pour construire le seuil. Une crête au niveau de l'ouvrage permet le déversement des eaux de crue

à l'intérieur de la section du lit. Un bassin de dissipation en aval du barrage contrôle l'infiltration et empêche l'érosion du sol.

#### **4.9 Cordons en pierres sèches**

Ce sont des structures confectionnées principalement avec des pierres sèches disposées les unes sur les autres en lignes à la limite des champs.

#### **4.10 Les terrasses**

Les terrasses sont des ouvrages modifiant radicalement la pente de terrain avec une plateforme et 2 talus sur des terrains à pente entre 17 et 25%. Les talus sont di fois consolidé par des murs de soutènements en pierres sèches par exemple.

#### **4.11 Reboisement des versants et extension des parcours**

Le reboisement affecte les terrains inaptes à l'agriculture, ceux qui sont fortement érodés ou vulnérables à l'érosion et ceux qui ont aussi des pentes supérieurs à 50%. Cette technique consiste à mettre en place des plantations ou à installer un nouveau couvert végétal herbacé ou arbustif sur un secteur donné, en vue de protéger le terrain contre l'agressivité des pluies et le ruissellement.

#### **4.12 Pratique agricole**

Il s'agit de techniques culturales, de modes de gestion des terres et d'élevage qui visent à améliorer l'état structural et physique du sol, et donc sa sensibilité à l'agressivité des pluies.

### **5. Les incendies de forêt et l'érosion hydrique**

Les incendies d'origine naturelle et humaine endommagent le sol et les ressources en eau. L'un de ces résultats négatifs, largement reconnu par les scientifiques, est l'érosion hydrique (Certini, 2005 ; Fox et al, 2008 ; Terranova et al, 2009 ; Efthimiou et al, 2020). L'ampleur de l'érosion hydrique peut être accrue par la gravité des incendies de forêt. Lorsqu'un grave incendie de forêt se produit, une grande quantité de cendres est créée, ce qui endommage la structure du sol. La destruction des sols consiste en :

- (i) La perte de fusion de particules de matière organique, de sable, de limon et d'argile sous forme d'agrégats ;
- (ii) Une augmentation de la densité apparente du sol (DeByle, 1981 ; Terranova et al, 2009 ; Efthimiou et al, 2020).
- (iii) Une diminution de la porosité du sol due à l'impact de la quantité de cendres créées et des gouttes de pluie tombant sur le sol nu (Wells et al, 1979 ; Ralston et Hatcher, 1971). La réduction de la porosité du sol diminue l'infiltration et favorise le ruissellement ce qui augmente le risque d'érosion (DeByle, 1981 ; Neary et al, 2005 ; Terranova et al, 2009 ; Efthimiou et al, 2020).

### **6. Des travaux sur l'érosion hydrique**

Plusieurs chercheurs à travers le monde, ont travaillé sur l'érosion hydrique. Dans le but d'illustrer ces travaux les exemples suivants sont présentés :

Tixeront en 1960, Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins algériens et 6 bassins tunisiens, dont la superficie varie de 90 à 22300 km<sup>2</sup>. Il a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques. Après avoir regroupé

les bassins en trois classes, suivant un critère régional, il a essayé de mettre en évidence le rôle des facteurs suivants : précipitations, écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol. Tixeront a trouvé que les teneurs en suspension des trois groupes de bassins augmentent lorsque le débit liquide diminue, Le substratum joue un rôle considérable, les bassins à plus forte abrasion se situent dans les régions sismiquement actives, La répartition régulière des pluies avec un maximum en saison végétative est favorable aux faibles teneurs.

Capolini (1965-1969) : L'auteur a entrepris une étude géomorphologique régionale sur le bassin de Cheliff, afin de mettre en clair le processus d'érosion qui conditionne les transports solides des principaux affluents de l'Oued Cheliff. Il a basé son étude sur l'analyse morphométrique des réseaux (densité de drainage, coefficient de torrentialité) mise au point par les géographes Américains Schumm et Horton. L'application a permis de trouver des résultats encourageants sur les bassins du Rhiau et du Fodda. A partir de ces résultats, l'auteur a généralisé la méthode à l'ensemble du bassin de l'Oued Cheliff. Les résultats ont permis à Capolini de Proposer une quantification des débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit spécifique, et d'établir une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins et le coefficient de torrentialité.

Arabi (1991) a démontré que l'érosion en nappe observé sur les parcelles et calculée par l'équation universelle (USLE) est faible même sur la pente élevée à une plus grande échelle. Il a examiné la relation entre les différents paramètres de l'équation universelle et l'érosion des sols mesurées sur 15 parcelles combinant trois type de sol (vertisol, ferrallitique et brun calcaire), il a distingué deux type de pluies : pluie automnale d'intensité élevée et fréquence faible et pluie hivernale et printanière moins intenses que celle de l'automne mais plus fréquente. Et il a remarqué que les vertisole sont les plus résistants.

Gommer et Touaibia (1991) ont utilisé un simulateur de pluie pour avoir une simulation de l'érosion hydrique avec des pluies de différents intensité sur trois type de sol avec des différentes pentes et couvert végétal. Cette simulation a été appliqué sur le bassin d'oued mina et ils sont trouvé que le couvert végétal a joué le rôle de protecteur.

Touaïbia et Achite (2003) à démontrer que la couverture végétale, le coefficient d'écoulement, la surface et la densité de drainage sont autant d'éléments qui influent directement sur l'érosion hydrique. Un modèle a été établi dans ce sens dans le cas du bassin versant de l'oued Mina dont la formulation est donnée par la formule :

$$Es = 34,12 S^{0,64} Dd^{-0,284} Ce^{0,573} Cv^{-0,329} \dots\dots\dots (1.1)$$

Avec un coefficient de corrélation multiple de 0,95.

D'après Raza finiaina (2002), la couverture végétale agit d'une façon positive sur la réduction de la formation des croûtes et l'amélioration de la rugosité, la limitation de la compacité et par conséquent une amélioration de l'infiltration. Les travaux de labour favorisent également l'infiltration par amélioration de la rugosité mais l'effet n'est pas durable car il suffit de deux pluies successives pour la réduire.

D'après Wischmeier (1974), les pentes concaves diminuent les transports solides tandis que les pentes convexes l'augmentent en fonction de l'inclinaison des segments les plus pentus. La présence de pentes concaves dans le paysage indique qu'il doit y avoir des piégeages, des colluvions et d'alluvions dans la vallée.

Delhoume (1981) a montré que dans les régions méditerranéennes semi-arides, les sols sous forêts bien entretenus sont considérés comme non sensible à l'érosion.

Guettoche (1991) a utilisé la télédétection par le traitement des images SPOT pour cartographie l'érosion hydrique pour la région de Médéa d'une façon simple et rapide et à faible cout.

Rosse (2004) a dit que les formes d'érosion changent selon l'inclinaison de la pente. Ainsi, pour des pentes inférieures à 4%, les particules fines qui migrent et pour des pentes supérieures à 7 %, des rigoles qui apparaissent.

Meddi (2013), a montré la prédominance de l'indice de Fournier modifié (IMF), par rapport à d'autres indices, dans la représentation de l'agressivité des pluies. Cet indice a été utilisé dans les études d'aménagement et pour la régionalisation de l'agressivité des pluies dans de nombreuses régions du monde (De Louis et al, 2010 ; Lujan et Gabriels, 2005 ; Meddi et al, 2013)

Meddi et Toumi (2014) à montrer une formule qui permet de calculer l'indice de Fournier modifié (IMF), qui a été largement utilisé dans les modèles d'estimation du facteur R de l'équation universelle des pertes en sol.

Hachemi (2015) a montré après une étude de l'érosivité que les averses dites érosives ou supérieure à 12,7 mm sont celles qui occupent la part la plus importante, Soit 82%, dont 45% pour les averses dites torrentielles ou celles supérieures à 30 mm, et il a présenté des formules empirique valables pour déterminer le facteur R pour toutes les stations non équipées de pluviographes de l'oued Remel (Zones semi arides).

Olfa hadji (2016), a modélisé l'érosion hydrique sur les bassins versant du Cap bon et dorsale de la Tunisie et elle a constaté que le modèle KINEROS2, permet de fournir une estimation de la dégradation des sols à n'importe quel endroit du bassin versant et présente un outil intéressant d'aide à la gestion des terres et des eaux sur les bassins versants situés en zones semi-arides. Et que les résultats du modèle KINEROS2 avec un taux de corrélation de 95%, montrent que ce modèle s'adapte bien aux petits bassins versants cultivés.

Miller et al. (2003) ont proposé d'augmenter les valeurs d'érodibilité du sol (facteur K de RUSLE) dans les zones forestières brûlées par un fort incendie de  $0,016 \text{ Mg.h.MJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$  au cours de la première année après le brûlage.

## **Chapitre 2**

# **Modélisation de l'érosion hydrique et Théorie de la Télédétection et des SIG**

## Chapitre 2 : Modélisation de l'érosion hydrique et Théorie de la Télédétection et des SIG

### 1. Introduction

La description mathématique des processus qui influent le système peut être sous forme des équations simples, exprimant souvent une relation statistique, D'autre part, elle peut être sous forme des équations complexes liées à la physique fondamentale ou de la mécanique du processus, c'est le cas des modèles à base physique. Généralement la modélisation nous aide à réaliser des prédictions sur le comportement du système considéré en réponse à des sollicitations, et d'obtenir des informations nécessaires afin de respecter certaines recommandations ou législations et de comprendre le système d'un point de vue hydrogéologique, chimique ou même géologique, et nous donne la chance à Fournir l'information nécessaire pour définir le réseau de mesures à installer et pour aider à l'organisation de nouveaux tests. On s'intéresse dans cette partie à la description des principales approches développées pour étudier et modéliser l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant.

### 2. Evaluation de l'érosion

L'évaluation de l'érosion hydrique est basée sur plusieurs approches. Selon Hajji (2015), ces approches peuvent être classifiées en deux catégories, soit des approches basées sur l'expertise ou des approches basées sur la modélisation. Les approches basées sur l'expertise sont développées en tenant compte le choix personnel de l'expert pour les paramètres pris en compte qui peuvent entraîner une perte d'informations, et entraîner un biais dans l'estimation du risque (Ben Slimane, 2013). Les méthodes basées sur la modélisation sont classifiées selon leur approches (Morgan, 2005) : Empirique, à base physique, déterministe ou statistique, Ou selon leurs échelle du temps considérée : Intra-averse, averse, mois, année, etc., ou selon l'échelle d'espace considérée : Parcelle, versant, bassin versant, région, etc.

#### 2.1 Classification des modèles d'évaluation de l'érosion

Selon Morgan (2005), la classification des modèles d'érosion est comme suit :

##### 2.1.1 Les modèles empiriques (empirical, lumped model)

Les modèles empiriques sont développés à partir des mesures expérimentales effectués sur une longue période. Ils nécessitent l'acquisition de longues séries de données pour réaliser le calage. Le modèle empirique le plus simple est dit « boîte noire ». Il considère le bassin versant comme une boîte noire où toute perturbation (pluie ou eau de ruissellement) engendre une perte en sol. Ainsi le modèle donne le débit solide à l'exutoire du bassin à l'aide de l'équation suivante :

$$Q_s = a * Q^b \dots\dots\dots (2.1)$$

Où  $Q_s$  est le débit solide ( $m^3/s$ ),  $Q$  est le débit liquide ( $m^3/s$ ), les valeurs de  $a$  et  $b$  varient selon la saison et l'événement.

Cependant cette équation suppose que l'état physique du bassin versant soit invariant, ainsi ce type de modèle ne tient pas compte de l'évolution spatio-temporelle de l'événement pluviométriques et des facteurs de l'érosion.

En Effet, Zingg (1940) a élaboré une équation de perte de sol pour les bassins versants et les parcelles qui relie l'érosion à l'inclinaison et la longueur de la pente. L'équation est sous la forme suivante :

$$E \cong \tan(\theta * l^{0.6})^{1.4} \dots\dots\dots (2.2)$$

Où  $E$  est la perte de sol (t/ha/an),  $\theta$  est l'angle d'inclinaison (degrés).  $l$  : est la longueur de la pente (m).

Ensuite, Plusieurs facteurs ont été introduits dans l'équation de perte de sol à savoir un facteur climatique basé sur la précipitation de 30 minutes maximum avec une période de retour de 2 ans (Musgrave 1947), un facteur de culture qui permet de tenir compte du couvert végétale du sol (Smith 1958), un facteur de pratique antiérosive et un facteur d'érodibilité du sol.

Les modèles actuels de calcul des pertes en sol et du transport des sédiments sont généralement basés sur l'équation universelle de perte en sol USLE (Universal Soil Loss Equation) établi par Wischmeier et Smith (1965), qui ont remplacé le facteur climatique dans l'équation de la perte de sol par l'érosivité des pluies ( $R$ ) pour donner la relation sous sa forme finale.

#### 2.1.1.1 Equation Universelle de Perte de Sol (USLE) (Universal Soil Loss Equation)

L'équation universelle des pertes de sol est un modèle empirique simple, il a été développé dans les années 1960 par Wischmeier et Smith du ministère américain de l'Agriculture comme un modèle à l'échelle de la parcelle sur la base des analyses de régression de taux de perte en sol, à différents lieux d'érosion aux USA. Le modèle est conçu pour estimer des taux annuels d'érosion sur le long terme dans les zones agricoles. Bien que l'équation ait des défauts et des limites, elle est très utilisée, à cause de sa simplicité et sa fiabilité (Desmet et Govers 1996).

Ce modèle devait permettre de quantifier l'érosion au niveau de la parcelle cultivée, afin de permettre aux techniciens de la lutte antiérosive et de choisir le type d'aménagement nécessaire (<http://hmf.enseiht.fr/travaux/>). Il est donné par la formule suivante

$$E = R * K * L * S * C * P \dots\dots\dots (2.3)$$

- ✚ A : exprime les pertes de terre annuelles moyennes possibles à long terme en tonnes par acre par année. Cette valeur peut ensuite être comparée aux limites de « pertes de terre tolérables ».
- ✚ R : correspond au facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique. Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion.
- ✚ K représente le facteur d'érodibilité du sol, Il s'agit de la perte de terre moyenne en tonnes/acre par unité de superficie. Le facteur K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer.

- ✚ LS est le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente. Le facteur LS représente un rapport des pertes de terre sous des conditions données, aux pertes de terre en un endroit caractérisé par une inclinaison « standard » de 9 % et une longueur de pente de 72,6 pieds. Plus la pente est forte et longue, plus élevé est le risque d'érosion.
- ✚ C : correspond au facteur de culture (végétation) et de gestion. Ce facteur sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre. Le facteur « C » est un ratio qui compare les pertes de terre provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques et les pertes correspondantes dans un champ travaillé constamment laissé en jachère.
- ✚ P correspond au facteur de pratique de conservation. Il reflète les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eaux de ruissellement et la vitesse de ruissellement et qui réduisent de ce fait l'importance de l'érosion. Le facteur P représente le ratio des pertes de terre associées à une pratique de conservation aux pertes de terre associées à la culture en lignes dans le sens de la pente.

L'équation universelle de perte de sol a été modifiée par Williams (1975) et Berndt (1977), pour donner la version "MUSLE " :

### 2.1.1.2 L'Equation Universelle de Perte de Sol Modifiée (MUSLE)

MUSLE est une version modifiée de l'USLE établi par Williams (1975) et Berndt (1977), elle basé sur les caractéristiques de l'écoulement, jugé comme le meilleur indicateur pour prédire l'apport des sédiments, à la sortie du bassin versant sur la base d'un événement pluvieux et de certains facteurs qui affectent l'érosion des sols (ASCE 1970 ; Williams 1975 ; Sadeghi et al, 2007 ; Hrisanthou, 2005). En effet, seul le facteur érosivité des pluies R qui diffère de l'USLE ou de la RUSLE, ce facteur est estimé par la formule suivante :

$$R = 11,8(V \times Q_p)^{0,56} \dots\dots\dots (2.4)$$

Avec V : le volume des eaux de ruissellement (m<sup>3</sup>).  $Q_p$  : le débit de pointe en m<sup>3</sup>/s.

L'USLE a été révisée en 1996 par Renard pour donner la version "Révisé USLE "ou "RUSLE" (Renard et al. 1996) qui donne plus de précision moyenne à long terme.

Ces modèles sont présentés dans l'Agricultural Handbook N° 537 du U.S.D.A. (Wischmeier et Smith, 1978) et ses versions subséquentes.

### 2.1.1.3 L'Equation Universelle de Perte de Sol Révisée (RUSLE)

RUSLE est une version révisée de l'USLE, développé par Renard en 1996, (Renard et al. 1997). RUSLE étant l'un des plus grands modèles techniquement avancé et montrant un potentiel pour une utilisation dans plusieurs parties du monde, y compris les pays en développement. En outre, la flexibilité du modèle RUSLE s'est avérée avantageuse pour l'application sur une échelle du versant (Smith et al. 2000). Dans l'équation de RUSLE, l'énergie cinétique, pour chaque intervalle d'intensité uniforme dans l'averse, est donnée par la formule suivante :

$$R = 0,29[1 - 1,72e^{-0,05i}] \dots\dots\dots (2.5)$$

Avec : e : énergie en MJ/ha.mn de pluie, et i : intensité en mm/h.

Afin d'adapter l'équation universelle de perte de sol à d'autre région, les chercheurs ont effectué un calibrage des paramètres de l'équation. On peut citer le modèle de l'estimation des pertes des sols pour l'Afrique de Sud (SLEMSA) (Elwell, 1995) et le modèle SOLOSS (Roswell, 1993) qui sont des exemples des modèles qui dérive du concept de USLE. (Morgan, 2005). D'autres ont proposé d'utiliser un certain aspect de l'"USLE" à savoir le modèle "EPIC" (Erosion productivity impact calculator, de Williams, Jones et Dyke, 1984) qui a utilisé l'équation "USLE" modifié ("MUSLE") développé par Onstad et Foster en 1976 et le modèle "AGNPS" (agricultural non-point source par Young et al, 1989). Ce modèle est basé sur l'équation universelle en utilisant un facteur d'ajustement de la pente ainsi que le modèle "ANSESWE" (Areal Non-point Source Watershed Environment Simulation, Beasley, 1989) qui utilise l'équation de continuité de Foster et Meyer (1972) et les valeurs de C et K déterminées à partir de l'équation universelle. (Morgan, 2005).

#### 2.1.1.4 Méthode de la F.A.O

C'est une méthode développée par La F.A.O en 1979 sur la base de l'USLE, elle représente une méthodologie à l'échelle nationale à la fois paramétrique et empirique. Cette formule a été élaborée par le service de la conservation des eaux et du sol de la FAO. Elle est validée en Tunisie. Elle dépend des caractéristiques suivantes : l'érosivité des pluies, la nature du sol, la pente du terrain, l'occupation du sol.

Elle donne le taux spécifique annuelle d'érosion  $E_s$  (en t/ha/an) selon la relation suivante :

$$E_s = F_m * C_1 * C_2 * C_3 \dots\dots\dots (2.6)$$

Avec :  $F_m$  : *indice de Fournier modifié caractérisant l'érosivité des pluies* ;

$$F_m = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \dots\dots\dots (2.7)$$

- ✚  $P_i$  étant la pluie moyenne du mois  $i$  (mm),
- ✚  $P$  la pluie moyenne annuelle (mm),
- ✚  $C_1$  le coefficient de texture des sols, compris entre 0,5 et 1,2 selon la nature du sol,
- ✚  $C_2$  le coefficient topographique variant de 0,5 à 1,5 selon la pente du terrain,
- ✚  $C_3$  le coefficient d'exploitation des sols variant de 0,4 à 1 selon l'occupation des sols.

$C_1$  est déterminé à partir de la carte pédologique du bassin versant selon la nature du sol, et  $C_2$  est déterminé à partir de la carte des pentes, et  $C_3$  est déterminé à partir de la carte d'occupation du sol. Les tableaux ci-après représentent les valeurs valables pour ce modèle.

Tableau 2.1 Valeur du coefficient  $C_1$  (Chérif et al. 1995)

Soil	Nature du sol	Coefficient $C_1$
Loamy sand	Sablo-limoneux	0,5 à 0,6
Loam	Limoneux	0,7 à 0,8
Clay loam	Limoneux-argileux	0,9 à 1,1
Clay	Argileux	1,1 à 1,2

Tableau 2.2 Valeur du coefficient C2 (Chérif et al.1995)

Classe de pente	0 – 8 %	8 – 30 %	> 30 %
C <sub>2</sub>	0,5 - 0,7	0,8 - 1,0	1,2 - 1,5

Tableau 2.3 Valeur du coefficient C3 (Chérif et al. 1995)

Occupation du sol	Culture céréalière	Arboriculture	Parcours	Broussaille	Forêts
C <sub>3</sub>	0,8 à 1	0,7	0,6	0,5	0,4

### 2.1.2 Les modèles à base physique

Les modèles à base physique cherchent à quantifier et à cartographier l'érosion en se basant sur la description des processus physiques de l'érosion. Le principe de cette modélisation à base physique est de décrire l'érosion à travers des représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux, à savoir : le détachement par les gouttes de pluie et/ou par le ruissellement, le transport par les gouttes de pluie, le transport par le ruissellement, et le dépôt par le ruissellement (Foster 1990). Les modèles à base physique permettent aussi de prédire la répartition du transport solide et liquide pendant un événement pluvieux. En effet, ces modèles sont fondés sur les lois de conservation de la masse et de l'énergie. La majorité de ces modèles utilise une équation différentielle particulière connue sous le nom de l'équation de continuité. Les modèles à base physique permettent de représenter les principaux mécanismes de l'érosion. D'autre part, ils tiennent compte des paramètres physiques tels que la croissance de la végétation et le climat. En effet, le modèle "WEPP" est un exemple de modèle à base physique qui combine un modèle hydrologique basé sur les processus, un modèle de l'équilibre journalier de l'eau, un générateur du climat et d'un modèle de consolidation du sol et basé sur une solution numérique (Morgan, 2005). L'utilisation des modèles à base physique a été mise en valeur après les années 1970, durant lesquelles ont été développés les modèles CREAMS (Knisel, 1980) et ANSWERS (Beasley et al, 1980). Le modèle WEPP (Etats-Unis), ainsi que les modèles EUROSEM, (Morgan et al.1998) ou LISEM (De Roo et al. 1996a,b).

#### 2.1.2.1 Le modèle "WEPP" (Water Erosion Predicting Project)

Le modèle "WEPP" est un modèle orienté vers le processus destiné à remplacer l'"USLE" pour l'évaluation de l'érosion par les organismes de la conservation des eaux et des sols et la planification environnementale (Morgan, 2005). Le "WEPP" contient trois modèles informatiques : une version de profil, une version des bassins versants et une version de la grille.

La version du profil estime le détachement du sol, des dépôts le long d'un profil et la perte nette totale du sol. Il utilise la méthode de l'"USLE". Les versions des bassins versants et la grille effectuent des estimations de perte de sol et les dépôts nets sur les petits bassins versants. Ces modèles tiennent compte du climat, de la topographie, de la gestion des sols et des pratiques existantes. Les processus d'érosion dans ce modèle sont limités à l'érosion en nappe, en rigole et dans chenaux (Jaoued 1997).

### 2.1.2.2 Le modèle "EUROSEM" (European Soil Erosion Model)

"EUROSEM" est un modèle basé sur les événements, conçu pour calculer le transport de sédiments, l'érosion et le dépôt dans un événement. Il peut être appliqué à des champs individuels ou de petits bassins versants. Par rapport à d'autres modèles, "EUROSEM" simule l'érosion en nappe explicitement, y compris le transport de l'eau et les sédiments des zones de rigoles, permettant ainsi le dépôt de matériel en cours de route. Ceci est considéré comme plus réaliste que confier la totalité ou portion définie de la matière détaché à la rigole. Le modèle peut être appliqué à l'écoulement sur une surface relativement lisse ou à pente contenant des rigoles. Ainsi le modèle calcule la vitesse d'écoulement et la profondeur par rigole.

### 2.1.2.3 Le modèle "Kineros" (Kinematic Runoff an Erosion Model)

Ce modèle est orienté pour les événements pluviométriques. Il décrit les processus d'interception, d'infiltration, d'écoulement de surface et d'érosion à partir des petits bassins versants agricoles ou urbains. Le bassin versant est représenté par une cascade de parcelles et de canaux. Il utilise l'approximation d'ordre cinématique pour les écoulements de surface et dans les canaux et suppose que le ruissellement est généré par un mécanisme de type Hortonien. La description de l'infiltration nécessite plusieurs paramètres tels que la conductivité hydraulique à saturation, la charge capillaire à saturation, la porosité du sol, la saturation relative maximale et la saturation relative initiale. Le modèle peut être utilisé pour déterminer les effets de différentes interventions, telles que les développements urbains, les petits réservoirs de rétention ou encore les aménagements des cours d'eau, sur les hydrogrammes de crues et la production de sédiments. Une version améliorée de Kineros est apparus qui est le modèle Kineros2. Il prévoit une simulation du transport solide avec les différentes dimensions des particules. Le tableau 2.4 représente quelques d'autres modèles hydrologiques à base physique utilisés pour décrire et prévoir l'érosion hydrique à différents échelle du temps.

Tableau 2.4 Présentation de quelques Modèles hydrologiques (Sivapalan et al. 2003)

Modèles	Type	Spatial échelle	Temporal échelle	Outputs
ANSWERS	Physique	Petit bassin versant	Événement / continue	Les eaux de ruissellement, débit de pointe, l'érosion, la production de sédiments
SWAT	Conceptuel	Bassin versant / bassin	Continu	Les eaux de ruissellement, débit de pointe, l'érosion, apport de sédiments
KINEROS2	Physique	Versant / petit bassin versant	Événement	Les eaux de ruissellement, débit de pointe, l'érosion, sédiment
LISEM	Physique	Petit bassin versant	Événement	Les eaux de ruissellement, des sédiments
STREAM	Physique	Petit bassin versant	Événement	Le ruissellement et l'érosion

Devente et Poesen (2005) ont montré que les modèles d'érosion développés à une échelle donnée ne sont pas forcément applicables à une autre échelle. En effet, le choix du modèle et des mécanismes décrits varie en fonction des différentes échelles de temps et d'espace.

D'après la figure 2.1, on constate que les modèles à base physique sont les plus adéquats pour décrire l'érosion hydrique à une échelle de temps et d'espace réduits. Par contre, les modèles empiriques sont mieux adaptés aux estimations de l'érosion à une grande échelle d'espace et de temps.

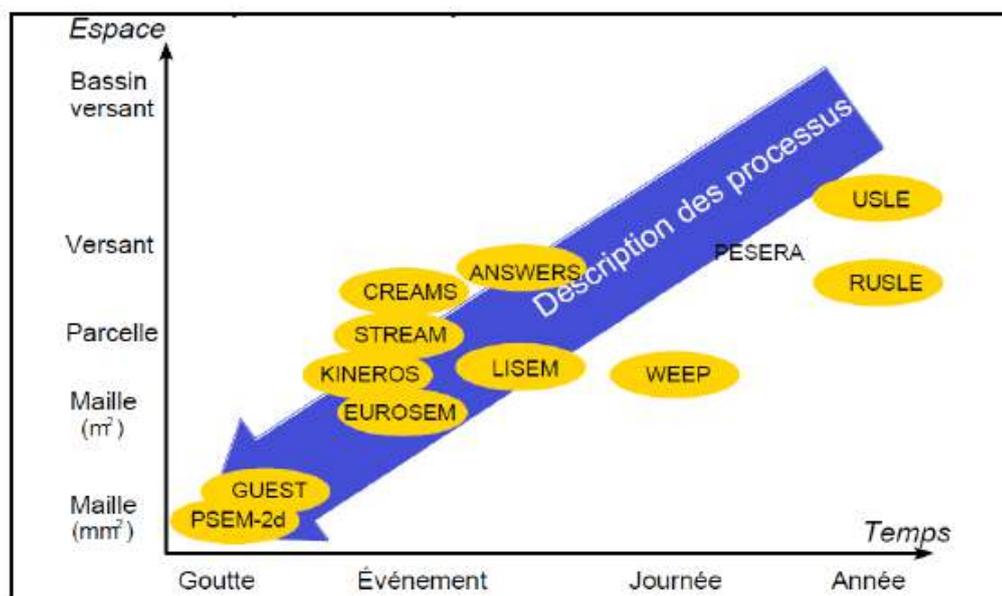


Figure 2.1 Relation entre échelles de temps et d'espace dans la modélisation de l'érosion (Le Bissonnais, 2008).

### 2.1.3 D'autres méthodes d'estimations de l'érosions

#### 2.1.3.1 Les apports de sédiments de la rivière

C'est une méthode utilisée pour évaluer le taux d'érosion par la collecte des données sur les sédiments des cours d'eau. Cette méthode est utile seulement pour la conception de la construction des barrages et l'estimation des charges de sédiments fluviaux. C'est vraiment difficile d'utiliser cette méthode pour les travaux de conservation des eaux et des sols car on ne peut pas repérer les points et les zones où l'érosion hydrique se déroule.

#### 2.1.3.2 La photographie arienne et la télédétection

C'est une autre méthode utilisée par plusieurs chercheurs dans le but de montrer la distribution de l'érosion des sols dans les milieux agricoles. A l'aide de la télédétection et la photographie arienne on peut distinguer les zones terrestres avec les occurrences de l'érosion visible, mais on ne peut pas mesurer l'étendue de l'érosion qui se passe en dessous de la canopée végétale, ceci est dû à l'obscurité des phénomènes au-dessous de la végétation (Okhoth, 2002)

## 2.2 Le modèle RUSLE

L'équation universelle des pertes de sol révisée (RUSLE) est un modèle empirique d'estimation de l'érosion des sols bien connu et universellement accepté et mis en œuvre. Pour l'estimation de la perte annuelle moyenne de sol (A), le modèle RUSLE est développé sur la base de cinq facteurs :

- ✚ Facteur d'érosivité des précipitations (R),
- ✚ Facteur d'érodibilité du sol (K),
- ✚ Facteur de longueur et d'inclinaison de la pente (LS),
- ✚ Facteur de gestion de la couverture (C)
- ✚ Facteur de pratique de conservation (P)

### ✚ R : le facteur érosivité de la pluie (MJ. mm /ha. h)

Le facteur d'érosivité des précipitations (R) exprime l'effet de l'impact des précipitations sous forme d'énergie cinétique. Il prédit le taux et la quantité de ruissellement qui est directement interconnecté avec cet événement de précipitation. L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier et Smith nécessite la connaissance des énergies cinétiques ( $E_c$ ) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes ( $I_{30}$ ) des gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule empirique de Wischmeier et Smith (1978) :

$$R = K E_c I_{30} \dots\dots\dots (2.8)$$

Où K : *étant un coefficient dépendant du système d'unités de mesure.*

Plusieurs chercheurs ont proposé d'autre formule empirique plus simple pour déterminer la valeur de R en fonction des pluies mensuelles et annuelles, On peut citer Rango & Arnoldus (1987), Meddi et al (2015), Belaid (2015), etc.

### ✚ K : le facteur érodibilité du sol (t.ha.h/ha.MJ. mm)

Le facteur d'érodibilité du sol (K) exprime la résistance du sol contre l'érosion due à l'impact des gouttes de pluie, Il dépend de la géologiques et de la pédologiques ainsi que des caractéristiques et des propriétés physiques et chimiques du sol (granulométrie, agrégation, stabilité structurale, porosité, teneur en matière organique, etc.) (Schwab et al.1994). Cet indice représente, pour une unité d'érosivité de la pluie, les pertes de sol d'une parcelle standard de 22m de long et 3,7 de largeur, possédant une pente de 9%, labourée suivant le sens de la pente et maintenue en jachère (sol nu). Cet indice est déterminé expérimentalement sous des conditions de précipitations naturelles et de plus en plus sous des précipitations artificielles. Les renseignements sur l'érodibilité des divers sols, provenant de plus de 10 000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles effectuées aux États-Unis, ont été utilisés pour définir les facteurs K (Wischmeier et Smith, 1978). Le facteur K est difficilement déterminable du fait de l'évolution des sols au cours du temps à l'échelle saisonnière et interannuelle.

### **LS : le facteur topographique (adimensionnel)**

La longueur de pente (L) et le facteur d'inclinaison (S) reflètent l'effet de la topographie sur le taux d'érosion des sols. La longueur de la pente représente le trajet que peut faire l'écoulement depuis le haut de la pente jusqu'à une structure d'interception. La multiplication des deux facteurs L et S nous donne un facteur combiné (LS) qui mirent en évidence l'interaction de la topographie dans le processus de l'érosion hydrique des sols.

Pour des objectifs d'expérimentation, les parcelles utilisées pour déterminer ces facteurs, ont une surface plane. En théorie, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse acquiert une énergie propre qui se traduit par une érosion en rigoles puis en ravines plus importantes. Lorsque l'inclinaison de la pente **S** augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15%.

### **C : le paramètre du couvert végétal (adimensionnel)**

La perte de sol dépend fortement de la quantité et du type du couvert végétal (facteur C) (Benkobi et al. 1994). Le facteur C est défini comme un ratio de la perte en sol d'un terrain avec une végétation particulière par rapport à la perte correspondante d'un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978). Il est influencé par plusieurs variables qui peuvent être considérées comme des sous-facteurs, il varie entre 1 pour le sol nu et moins de 0.1 pour les forêts denses.

Selon (Roose 1996 ; Al Zitawi 2006), Le facteur C dépend :

- du pourcentage de sol à nu, l'érosion intervenant majoritairement sur des sols à nus lors d'épisodes pluvieux agressifs ;
- de la hauteur du couvert végétal, il est intéressant d'avoir un couvert végétal, mais si celui-ci est trop élevé, l'amortissement des gouttes de pluies n'interviendra plus. En effet, après une première interception, les gouttes seront de nouveaux rejetées vers le sol ; -
- de l'architecture des plantes, des plantes en forme d'entonnoir auront tendance à drainer l'écoulement et à provoquer des ravinements. A l'inverse, les plantes dites "parapluie" vont disperser les gouttes d'eau et donc diminuer leur énergie.

Le facteur C peut être calculé à l'aide de nomogrammes de (Roose 1994) (voir Figure 2.2) ou estimé en prenant des valeurs de la littérature, connues pour un certain type de végétation ou de culture (exemple : Les valeurs de Sediki et al (2004). (Voir tableau 2.5) ; les valeurs de Cormary et Masson (1964) (tableau 2.6).

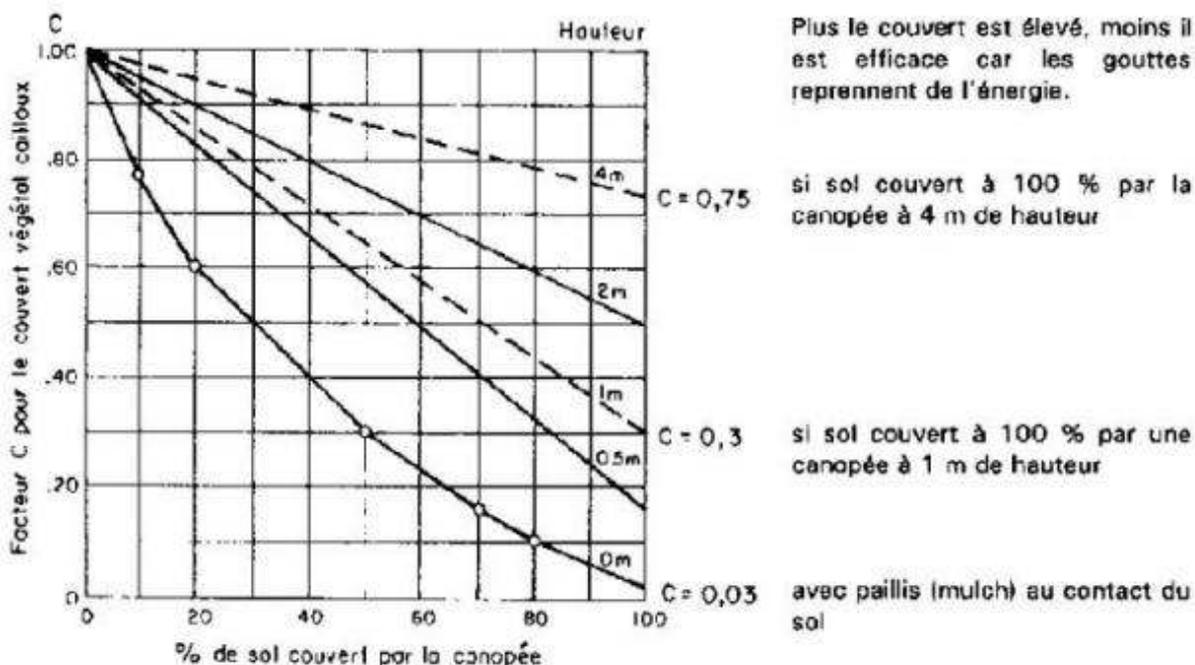


Figure 2.2 Valeur du facteur de couvert végétal en fonction du pourcentage de couverture du sol et de la hauteur de la végétation (Roose 1994).

Tableau 2.5 Valeur de C pour différents types de couvert végétal (Sadiki et al. 2004)

C annuelle moyen	Type de couvert végétal
0,058	reboisement dense
0,13	Forêt moyennement dense
0,17	matorral dégradé, parcours dense
0,18	reboisement clair
0,20	matorral clair, parcours dense,
0,22	Matorral très dégradé
0,32	steppes à alfa

Tableau 2.6 Facteur du couvert végétal C en Tunisie (Cormary et Masson.1964)

Occupation du sol	C annuelle moyen
Terre nue, Jachère nue	1
Arboriculture fruitière	0.9
Blé d'hiver	0.7
Assolement céréalière	0.4
Fourrages	0.2
Pâturages améliorés	0.01
Vignes et vergers travaillés continuellement	0.9
Parcours ordinaire	0.15
Reboisement	0.15
Forêt claire	0.05
Forêt dense ou pâturage dense	0,01

### **✚ P : le facteur des pratiques antiérosives (adimensionnel)**

Le facteur P représente le rapport de la perte de sol liée à une pratique de soutien particulière à la perte correspondante liée aux cultures et aux récoltes et ensemencement en amont et en aval de la pente (Wischmeier et Smith 1978). Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée. Les valeurs de P varient selon la pratique adoptée et le degré de la pente.

#### **2.2.1 Les limites de l'utilisation du modèle USLE et ses dérivés (<http://hmf.enseeiht.fr>)**

- La modélisation par RUSLE prédictif de l'érosion ne prend compte que l'érosion en nappe ou en rigole.
- Ce modèle peut seulement s'appliquer à des valeurs moyennes sur 20 ans. Il n'est en aucun cas valable à l'échelle de l'averse. Il faut donc pouvoir disposer de données concrètes sur une longue durée).
- Les résultats de la modélisation sont dépendants donc doivent d'être validés et testés pour des nouvelles zones avant d'être adoptés pour l'utilisation.
- Ce modèle néglige certaines interactions entre les facteurs. Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente. (Roose 1999).

#### **2.2.2 Les Recherches effectuées en utilisant L'USLE/RUSLE**

Le modèle USLE a été développé à l'origine pour les systèmes agricoles américains. Il a été adapté ensuite par les chercheurs et les scientifiques du monde et appliqué à des ensembles de données de différentes régions. On peut citer par exemple le manuel d'application du RUSLE publié par la Direction générale de la recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canadienne (Wall et al. 2002) ; Australie (Ferro et Porto 1999) ; Afrique (Haileslassie et al. 2005 ; Lufafa et al. 2003) et Asie (Lee et Heo, 2011 ; Meusburger et al. 2013 ; Xu et al. 2008).

En Europe la modélisation par RUSLE a été utilisée depuis le nord de la Scandinavie jusqu'au sud de la Méditerranée. Schwertmann et al. (1987) a été le premier qui a évalué l'applicabilité de ce modèle aux différentes conditions climatiques Européennes, il a travaillé sur les systèmes de gestion de l'utilisation des terres de Bavière (sud de l'Allemagne).

D'autres chercheurs ont utilisé le RUSLE en modifiant des paramètres pour avoir un modèle valable, par exemple Liu et al. (2002) ont remplacé les facteurs C et P par trois facteurs tenant compte de la biologie, de l'ingénierie et des pratiques de travail du sol pour valider le RUSLE en Chine.

Dans le cadre d'une recherche scientifique publiée dans International Soil and Water Conservation Research 7 (2019), et à l'aide de l'outil Science Direct. Christine et al. (2019) ont élaboré une base de données contenant les études qui ont été effectuées sur la modélisation par RUSLE en recherchant les mots-clés USLE et RUSLE (de 1977 à juillet 2017) avec un accent particulier sur le titre, l'année de publication, le domaine d'étude, la revue et les mots-clés. Ils ont constaté que

le modèle USLE/RUSLE a été largement utilisé au cours des 40 dernières années dans 109 pays (Figure 2.3). Le plus grand nombre de publications avec l'application du modèle USLE/RUSLE a été trouvé aux États-Unis d'Amérique (274 articles), en Chine (218 articles), au Brésil (88), en Italie (87), en Inde (67), en Espagne (66) Australie (50) et Turquie (43) Christine et al. (2019).

33% des articles publiés ont des zone d'étude dans 32 pays d'Asie et 24 % du nombre total d'études dans l'Europe. L'USLE/RUSLE est utilisé dans 31 pays en Amérique du Nord et dans 13 pays aux Caraïbes. En Afrique, 146 publications (9% du total) ont utilisé USLE/RUSLE pour estimer la perte de sol par l'eau dans 21 pays.

L'USLE/RUSLE est largement utilisé en Asie de l'Est et du Sud (Corée du Sud, Malaisie, Thaïlande et Indonésie), en Afrique centrale et orientale (Éthiopie, Kenya, Nigéria) et en Méditerranée (Italie, Espagne, Grèce, Portugal, Maroc, Tunisie, Algérie).

1556 articles sur l'utilisation de l'USLE/RUSLE à l'échelle régionale/nationale et continentale ont été publiés avec un taux moyen de 39 articles par an au cours de la période 1977 - 2017. Une forte augmentation des taux de publication a commencé à la fin des années 90. L'augmentation relative la plus élevée (76%) est notée dans la période 2008-12, qui devrait également se poursuivre dans la période actuelle (2013- à ce jours). Les articles publiés au cours des années comprises entre 2013-2017 seront estimés à plus de 600 articles par rapport aux 414 articles publiés en 2008-2012 Christine et al. (2019). (Figure 2.5).

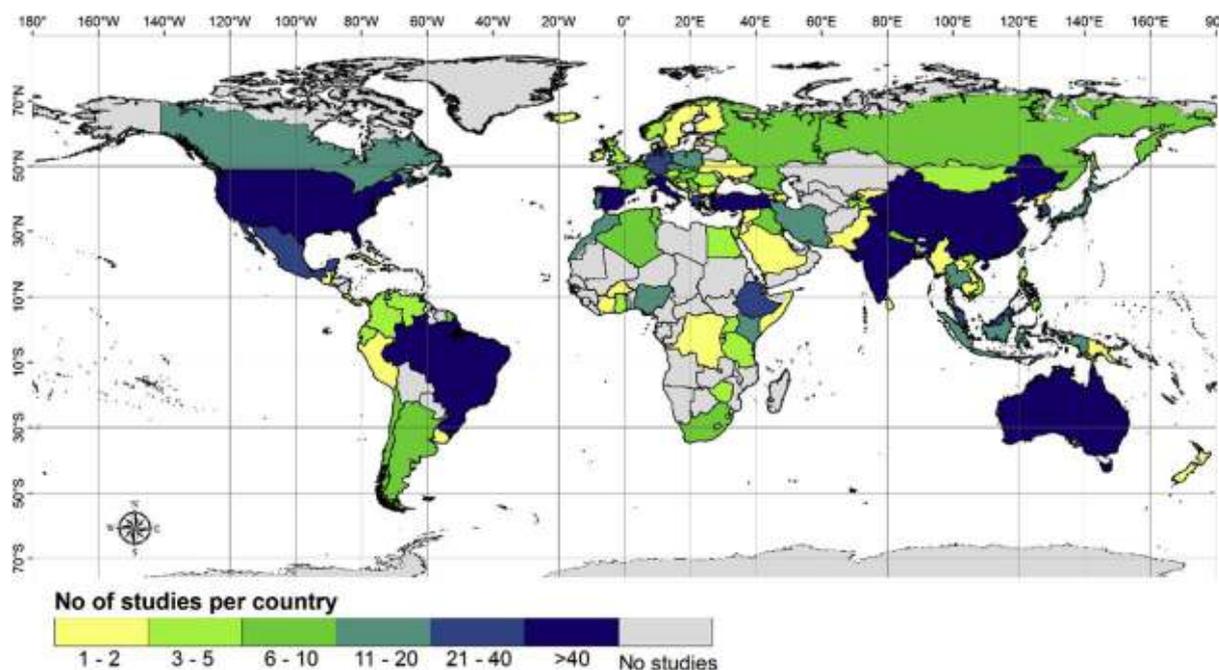


Figure 2.3 Répartition géographique par pays des articles publiés en utilisant les modèles USLE et RUSLE au cours des 40 dernières années (1977 à juillet 2017). (Christine et al. 2019).

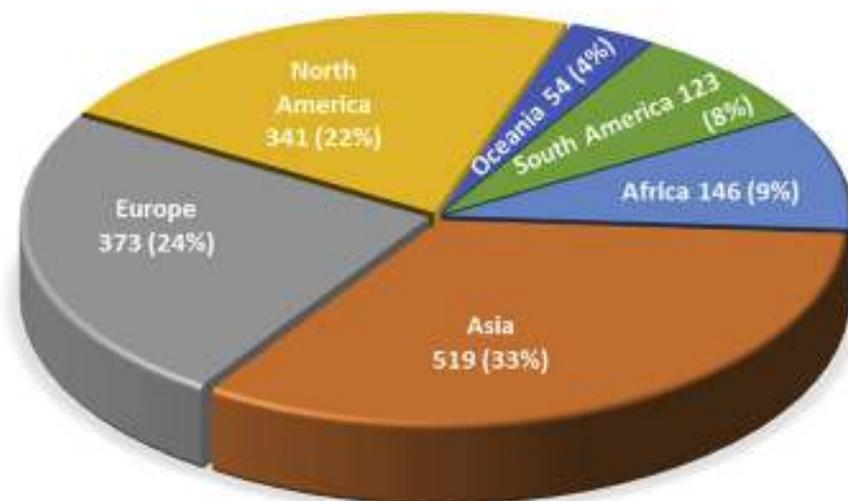


Figure 2.4 Nombre d'études par continent et pourcentage du nombre total de publications (1977 à juillet 2017). (Christine et al. 2019)

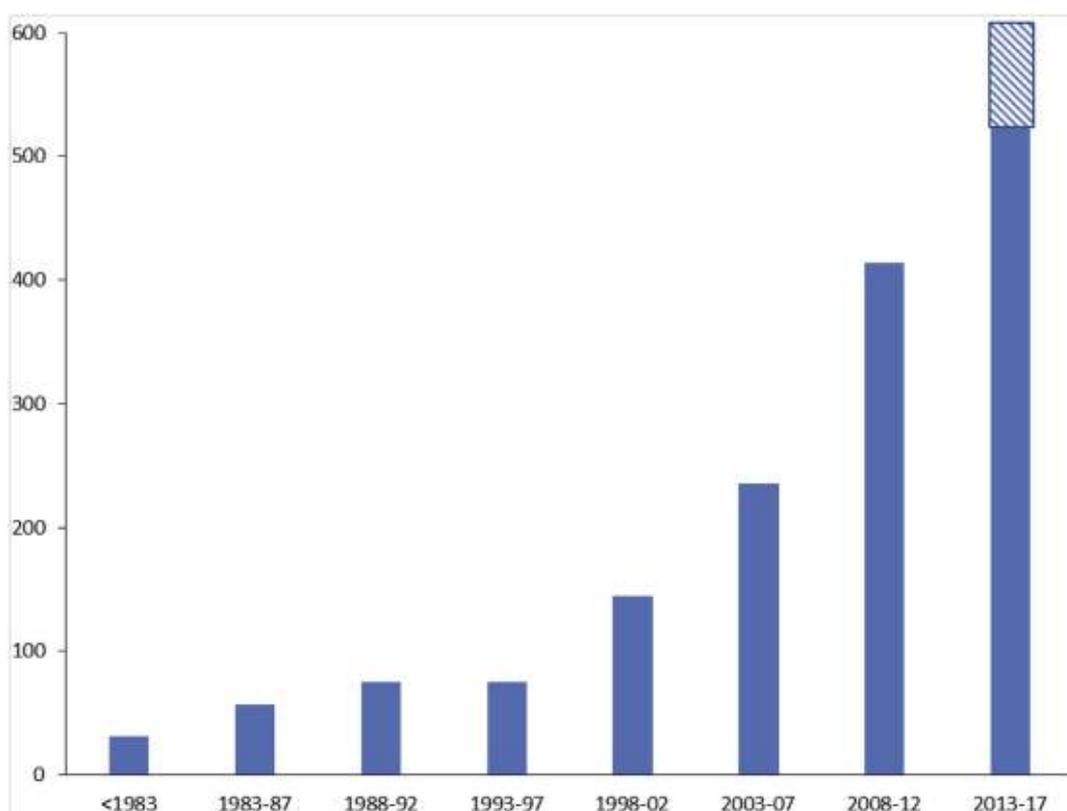


Figure 2.5 Tendence des articles publiés entre 1977 et 2017 (Christine et al. 2019)

### 2.2.3 Application de RUSLE sur des zones climatiques semi-aride ou steppe

Dans les zones climatiques semi-arides, la quantité de précipitations est inférieure à l'évapotranspiration potentielle. La variation des différents types de climat semi-aride dépend de la variation de température qui reflète la croissance de différents types d'écologie. Bu et al. 2003, a développé un modèle de facteur R pour les zones climatiques arides et semi-arides principalement pour la Chine :

$$R = (0.1281 \times I_{30B} \times P) - (0.1575 \times I_{30B}) \dots\dots\dots (2.9)$$

Où P est la pluviométrie annuelle (mm) ; R est le facteur d'érosivité des précipitations annuelles moyennes (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) et I<sub>30B</sub> est l'intensité maximale d'une averse sur 30 minutes (mm/h.).

Xu et al. 2007, a développé un autre modèle de facteur R pour les zones semi arides, en utilisant 2894 événements sur 25 ans et dans 10 stations pluviométriques pour construire et comparer l'érosivité mensuelle des précipitations en utilisant des séries de pluies journalières et mensuelles de Pékin, respectivement. Les résultats montrent qu'ils ont une similarité de précision avec R<sup>2</sup> égal à 0,72.

En Afrique de l'Est, Angima et al. (2003) ont utilisé le modèle de Renard et al. (1997) dans le bassin versant de Kianjuki, Embu, Kenya central.

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\sum_{k=1}^m (E_k I_{30}))_j \dots\dots\dots (2.10)$$

où E est l'énergie cinétique totale produite par les précipitations (MJ ha<sup>-1</sup>), I<sub>30</sub> est le maximum de l'intensité des précipitations sur 30 min (mm h<sup>-1</sup>), j est un indice qui indique le nombre d'années utilisé pour générer la moyenne des données pluviométriques, k est un indice qui indique le nombre des évènements survenues au cours d'une année, n est le nombre d'années utilisé pour obtenir le facteur d'érosivité des précipitations (R) et m est le nombre des évènements survenues au cours d'une année.

D'autres chercheurs, à travers le monde, ont proposé d'autres modèles de facteur R pour les zones climatiques semi-arides (Meddi et al. 2016 ; Belaid et al. 2015,)

#### 2.2.4 Application de RUSLE sur les zones climatiques méditerranéennes

Le climat méditerranéen est défini par un hiver humide et un été sec, il se caractérise par un régime de précipitations saisonnières, plusieurs chercheurs ont développé des modèles empiriques, qui sont valables pour ces régions, pour estimer le facteur d'érosivité des pluies (R). Van et al. (2000) ont généré un nouveau modèle de facteur R pour les zones méditerranéennes italiennes. L'équation a été utilisée dans plusieurs études (Zarris et al. 2011 ; Sigalos et al. 2010), qui se comportent exceptionnellement bien dans des conditions climatiques méditerranéennes ou plus spécifiquement grecques. L'équation est la suivante :

$$R = a. P \dots\dots\dots (2.11)$$

Où Le facteur « a » est égal à 1,3 et P est la moyenne des précipitations annuelles (mm).

Eftimiou et al. (2014) ont utilisé ce modèle pour le bassin versant de la rivière Venetikos, Macédoine, Grèce, Europe. Sorrentino (2001) a également généré un nouveau modèle de facteur R pour les conditions climatiques méditerranéennes italiennes. Dans son modèle, il montre que l'énergie cinétique dépend directement de l'altitude de cet endroit. Terranova et al. (2009) ont appliqué le modèle de Sorrentino (2001) en Calabre, dans le sud de l'Italie, en Europe.

$$R = (1163.45 + 4.9H - 35.2NGP - 0.58Z)/100 \dots\dots\dots (2.12)$$

Où H (mm y<sup>-1</sup>) est la précipitation moyenne annuelle, NGP est la moyenne des jours de pluie par an et Z est le altitude de ce site.

Diodato (2004) a développé un autre modèle pour le régime pluviométrique méditerranéen italien,

$$R = \frac{1}{N} \sum_{1}^N EI_{30} \dots\dots\dots (2.13)$$

Où N est le nombre d'années considérées.

Onori et al. (2006) ont utilisé ce modèle dans le bassin versant de Comunelli, centre-sud de la Sicile, Italie. Il a utilisé  $EI_{30 \text{ annuel}} = 12.142(abc)^{0.6446}$  (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) comme indice empirique érosif annuel. a, b et c sont exprimés en centimètres, où « a » est la précipitation annuelle, « b » est la précipitation quotidienne maximale annuelle et « c » est la précipitation horaire maximale annuelle. La variable « a » montre des précipitations moins érosives, avec un effet cumulatif sur une longue période. Les variables « b » et « c » décrivent des effets très érosifs dus aux précipitations extrêmes dans les orages et les fortes averses.

Flabouris (2008) a développé un modèle pour la Grèce. Rozos et al. (2013) ont appliqué ce modèle pour le nord de l'Eubée, l'île, la Grèce, l'Europe.

$$R = R_n \times a \dots\dots\dots (2.14)$$

Où a est égal à 0,5 pour la zone d'étude et R<sub>n</sub> est la pluviométrie annuelle moyenne.

### 3. La paramétrisation des modèles

#### 3.1 Le calibrage

Le calibrage des modèles est une opération indispensable. Il consiste à estimer et ajuster les paramètres de la modélisation en utilisant des données expérimentales afin de simuler le comportement hydrologique des bassins versants de la meilleure façon possible (Madsen, 2000). Il s'agit donc de rechercher le minimum d'une fonction mathématique reliant les données mesurées aux paramètres calculés (Hajji 2016). Mais le calage d'un modèle distribué pourrait être une histoire sans fin, où il y a toujours une possibilité d'amélioration (Refsgaard, 1997). Le calage peut se faire soit manuellement ou automatiquement à partir d'algorithmes de recherche d'optimum (Ambroise, 1999) et pourrait être amélioré à chaque fois jusqu'ou on obtient des erreurs sur l'estimation inférieure ou égale aux erreurs liée aux mesures.

#### 3.2 La validation

La validation du modèle consiste L'opération de validation consiste à tester le modèle dans des conditions qui diffèrent du calage et à vérifier la prédictive du modèle dans les conditions définies par les objectifs et hors du domaine temporel pour lequel les données ont servi lors du calibrage.

Klemes (1986) propose un schéma hiérarchique en quatre points pour la validation des modèles :

- Application du modèle à une série de données non utilisées pour le calage (Split sample test),
- Transposition du modèle à d'autres zones géographiques (proxy-basin test),

- Application du modèle au bassin versant de calage mais avec des données correspondant à un changement de l'occupation du sol ou du climat (differential split-sample test),
- Transposition du modèle à d'autres zones climatiques (proxy-basin differential test).

La validation peut porter soit sur le même type de variables et de critères que ceux qui ont servi au calage, c'est la validation mono-critère, soit sur d'autres variables et d'autres critères, c'est la validation multi-critère. Il va de soi que les résultats de la validation seront tributaires de la qualité et du type de données utilisées. Ainsi, si la base de données utilisée pour le calage et la validation ne contient que des événements de faibles débits, la performance du modèle quant aux événements de fort débit peut être douteuse (Klemes, 1986).

### 3.3 Critères d'évaluation de la modélisation

Un même modèle peut être évalué de plusieurs façons, selon les objectifs qu'on se fixe. Pour les satisfaire, plusieurs critères d'évaluation ont été développés, qui sont soit des critères graphiques, ou analytiques. Les plus utilisés en hydrologie sont :

#### 3.3.1 Erreur moyenne

Elle est notée  $\varepsilon$  et définie par la moyenne des écarts entre les valeurs observés et les valeurs calculés. Plus cette erreur quadratique ne tend vers zéro, plus l'estimation des débits est considérée meilleure.

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Eci - E0) \dots \dots \dots (2.15)$$

Avec  $n$  : nombre d'observations

$Eci$  : valeur calculé en (m<sup>3</sup>/s)

$E0$  : valeur observé en (m<sup>3</sup>/s)

#### 3.3.2 Erreur quadratique moyenne

Cette erreur se calcule comme étant la racine carrée de la moyenne des carrés des écarts entre les débits observés et les débits calculés. Plus cette erreur quadratique tend vers zéro, plus l'estimation est meilleure. C'est le critère le plus utilisé en hydrologie pour quantifier l'erreur. :

$$EQM = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Eci - E0)^2} \dots \dots \dots (2.16)$$

#### 3.3.3 Erreur relative

L'erreur relative au débit étant de la forme

$$Er = \frac{E0 - Eci}{E0} \dots \dots \dots (2.17)$$

#### 3.3.4 Le coefficient d'efficacité (CE)

$$CE = \frac{\sum_1^n (Xval_i - \bar{Xval})^2 - \sum_1^n (Xp_i - \bar{Xval})^2}{\sum_1^n (Xval_i - \bar{Xval})^2} \dots \dots \dots (2.18)$$

Où ( $Xval_i$ ) correspond aux valeurs du facteur C Obtenus, ( $\bar{Xval}$ ) correspond aux valeurs moyennes du facteur C obtenus et ( $Xp_i$ ) correspond aux valeurs estimées.

#### 4. Théorie de la télédétection

La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. Elle est habituellement définie comme la science, la technologie ou l'art d'obtenir à distance des informations sur des objets ou des phénomènes.

On distingue en général les moyens de télédétection 'active' et 'passive' :

- ✚ **Télédétection passive** : enregistrement du rayonnement naturel, fourni par la lumière ou la chaleur, qu'il soit émis, réfléchi ou réfracté (ex : photographies aériennes) du paysage éclairé par la lumière du soleil ainsi que certaines images satellitaires comme SPOT, LANDSAT, IKONOS,....
- ✚ **Télédétection active** : enregistrement du rayonnement que réfléchit l'objet ou le paysage 'illuminé' par l'opérateur (ex : Images radar).

D'un point de vue d'application, la télédétection est un outil de collecte de données raster ou des images. Les images de la télédétection représentent un enregistrement objectif du spectre qui concerne les propriétés physiques et la composition chimique des matériaux de la surface de la terre (lieux et Philippa, 2009).

La diffusion accélérée et l'augmentation de la puissance des ordinateurs contribuent de façon continue à promouvoir de nouvelles méthodes d'utilisation des données toujours plus abondantes que fournit la télédétection spatiale. Les données des satellites météorologiques et océanographiques sont aujourd'hui un auxiliaire indispensable de la prévision numérique du temps et du climat et font l'objet d'une assimilation directe par les modèles numériques. Les images de télédétection destinées à l'observation fine de la surface terrestre, y compris les photographies aériennes traditionnelles, sont, sous forme numérique, intégrées aux Systèmes d'Information Géographique.

#### 5. Principe général de la télédétection

##### 5.1 Principe de la télédétection

Le principe de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme. Elle est le résultat de l'interaction de trois éléments fondamentaux :

- ✚ La cible qui est l'élément ou la portion de la surface terrestre observée par le satellite.
- ✚ La source d'énergie qui éclaire la cible en émettant une onde électromagnétique.
- ✚ Le capteur ou plateforme de télédétection mesure l'énergie réfléchie par la cible.

La méthode d'acquisition utilise normalement la mesure des rayonnements électromagnétiques des objets étudiés dans un certain domaine de fréquence (infrarouge, visible, micro-ondes). Ceci est rendu possible par le fait que les objets étudiés (plantes, maisons, surfaces d'eau ou masses d'air) émettent ou réfléchissent du rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités selon leur état. Le principe de la télédétection repose donc sur l'acquisition de signaux de radiation ou de réflexion de l'objet, par exemple, l'utilisation des sols, par un capteur à distance installé sur

différentes plates-formes (telles que l'avion, le satellite) en utilisant les bandes visibles, infrarouge et micro-onde.

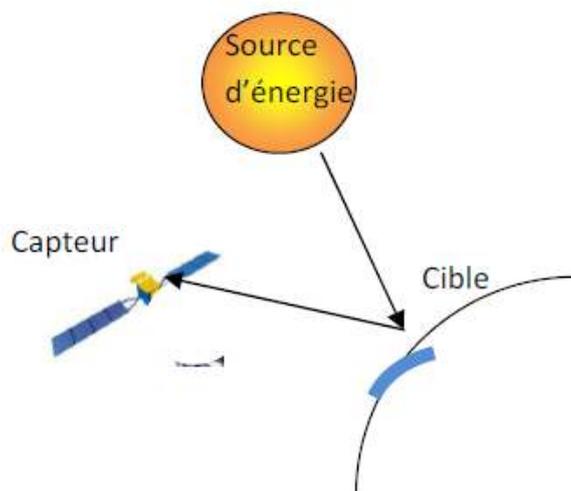


Figure 2.6 Le principe de la télédétection

Tableau 2.7 Applications de la télédétection.

Vecteurs	Capteurs	Domaines d'applications
<b>Télédétection de l'ATMOSPHERE (Météorologie, Climatologie) :</b>		
Satellites géostationnaires (Météosat). Satellites à défilement (NOAA).	Basse et moyenne résolution (on privilégie la répétitivité et la couverture spatiale). Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes. Sondeurs atmosphériques. Dans le futur : radars pluviométriques, lidars (capteurs à laser).	Etude de la nébulosité Mesure des températures Vapeur d'eau et précipitations Eléments du bilan radiatif
<b>OCÉANOGRAPHIE et ETUDES LITTORALES</b>		
Avions. Satellites météorologiques ou de télédétection terrestre, Satellites spécialisés (Nimbus, Seasat, ERS-1).	Toutes résolutions selon les espaces considérés (de l'océanographie côtière à l'océanographie globale).  Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes.  Radars imageurs, radar-altimètre, diffusiomètre.	Analyse de la couleur de l'océan (production biologique, turbidité). Mesures des températures de surface de la mer.  Vagues et vents. Altitude de la surface (dynamique de l'océan). Glaces de mer
<b>APPLICATIONS TERRESTRES</b>		
Avions. Satellites à défilement en orbite polaire (Landsat, SPOT).	Surtout haute et très haute résolution spatiale : Photographie aérienne. Capteurs passifs : radiomètres à balayage (domaine optique). Capteurs actifs : radars imageurs	Cartographie régulière et thématique Géologie, prospection minière, géomorphologie. Hydrologie, neige, risques naturels. Agriculture, sylviculture. Urbanisme. Aménagement, génie civil.

## 5.2 Le spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique, d'origine naturelle ou artificielle, existe pour une gamme très étendue de fréquences ou de longueurs d'onde (de  $10^{-9}$  m à 105 m), qui constitue le spectre électromagnétique. Une partie très limitée de ce spectre, entre  $0,390 \mu\text{m}$ , et  $0,7 \mu\text{m}$ , constitue la lumière visible à laquelle est sensible l'œil humain.

Une décomposition en fonctions des longueurs d'onde de la lumière visible (lumière blanche) aboutit à distinguer les lumières colorées : violet (390 à 450 nm), bleu (450 à 490 nm), vert (490 à 580 nm), jaune (580 à 600 nm), orange (600 à 620 nm) et rouge (620 à 700 nm). Les longueurs d'onde inférieures à 390 nm (ou les fréquences supérieures à celle du violet) ne sont pas perçues par l'œil humain ; il s'agit du rayonnement ultra-violet. De même, les longueurs d'onde supérieures à 700 nm, également non-perçues par l'œil humain, constituent le domaine infrarouge

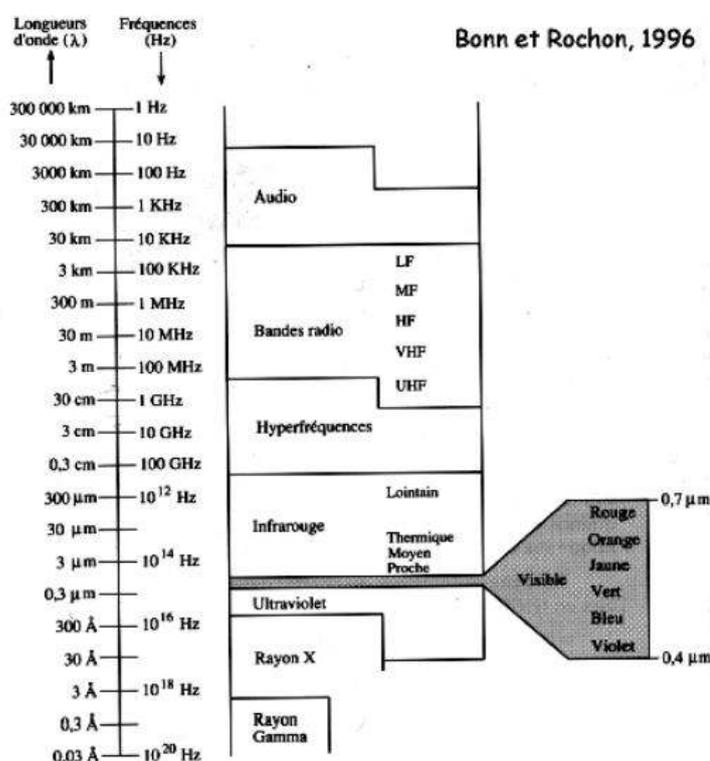


Figure 2.7 Le spectre électromagnétique (Bonn et Rochon)

Les sources du rayonnement varient également selon le domaine du spectre :

- ✚ le rayonnement ultraviolet, visible ou infrarouge est émis par les corps, objets ou surfaces en fonction de leur température : rayonnement solaire (U.V., visible et proche infrarouge), rayonnement terrestre (infrarouge thermique).
- ✚ les rayonnements de très courte longueur d'onde (rayons gamma, rayons X) sont produits par les restructurations des noyaux des atomes (radioactivité).
- ✚ les rayonnements visibles, infrarouge ou microonde peuvent être produits artificiellement par vibration ou rotation des molécules (fluorescence, lasers, four à microondes).
- ✚ les rayonnements de grande longueur d'onde sont produits par des oscillations électroniques (antennes).

### 5.3 Les interactions entre le rayonnement et la cible

Lorsque le soleil éclaire la surface terrestre, des interactions se produisent entre le rayonnement et la cible illuminée. En fonction des propriétés et des caractéristiques de la cible (Toumi, 2013). Une partie du rayonnement est réfléchi vers le capteur satellitaire. Chaque objet possède une réponse spectrale bien précise à une longueur d'onde donnée. L'ensemble des réponses spectrales à différentes longueurs d'onde constitue ce que l'on appelle la signature spectrale d'une surface. Chaque type de surface peut donc être caractérisé et identifié sur une image.

### 5.4 La signature spectrale des principales surfaces naturelles

La signature spectrale est l'émission électromagnétique caractéristique d'un objet en fonction de la longueur d'onde. De manière générale, selon une combinaison des propriétés. Chaque surface possède une signature spectrale, quantité d'énergie émise ou réfléchi en fonction de la longueur d'onde, qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires. La figure ci-dessous présente la signature spectrale des principales surfaces naturelles.

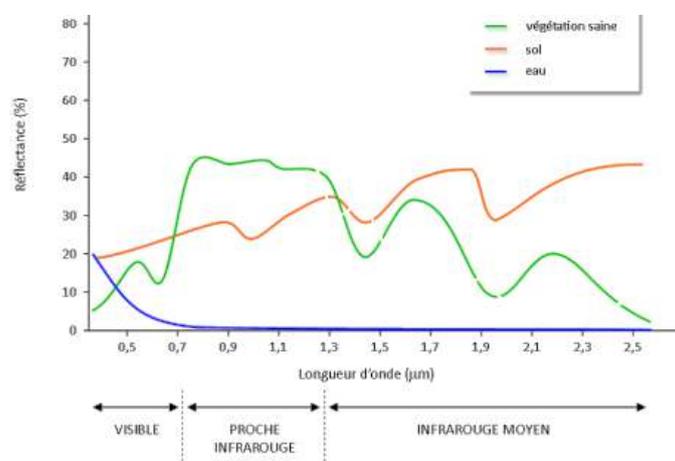


Figure 2.8 Les signatures spectrales des principales surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche et de l'infrarouge et infrarouge moyenne (source <http://e.cours.univ-paris1.fr>).

#### 5.4.1 Interaction rayonnement - Eau

L'eau absorbe davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible et du proche infrarouge. Ainsi, l'eau paraît généralement bleue ou bleu-vert car elle réfléchit davantage les petites longueurs d'onde, elle paraît encore plus foncée si elle est observée sous les longueurs d'onde du rouge ou du proche infrarouge. Lorsque les couches supérieures de l'eau contiennent des sédiments en suspension, la transmission diminue, la réflexion augmente et l'eau paraît plus brillante. La couleur de l'eau se déplacera légèrement vers les plus grandes longueurs d'onde. Nous confondons parfois l'eau qui contient des sédiments en suspension avec l'eau peu profonde et claire. La chlorophylle dans les algues absorbe plus de bleu et réfléchit plus de vert. L'eau paraît donc plus verte quand elle contient des algues.

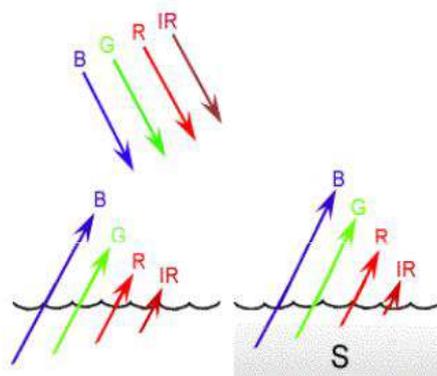


Figure 2.9 Comportement spectral de l'eau dans le domaine du visible et de l'infrarouge.

#### 5.4.2 Interaction rayonnement-végétation

La chlorophylle, est une molécule qui absorbe fortement le rayonnement aux longueurs d'onde du rouge et du bleu, mais réfléchit le vert. Les feuilles, qui contiennent un maximum de chlorophylle en été, sont donc plus vertes pendant cette saison. En automne, les feuilles qui contiennent alors moins de chlorophylle, absorbent moins de rouge, et paraissent donc rouges ou jaunes (le jaune est une combinaison des longueurs d'onde du vert et du rouge). La structure interne des feuilles en santé agit comme un excellent réflecteur diffus pour les longueurs d'onde de l'infrarouge, c'est pour cela les scientifiques utilisent d'ailleurs l'infrarouge pour déterminer l'état de santé de la végétation.

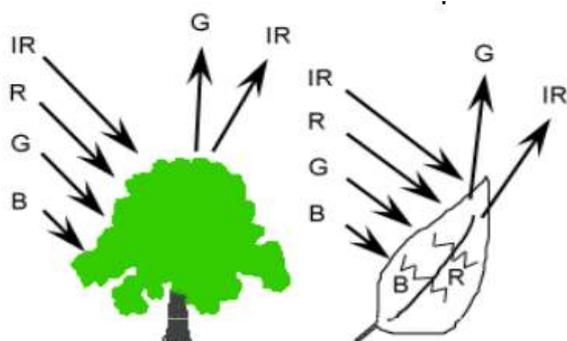


Figure 2.10 Comportement spectral de la végétation dans le domaine du visible et de l'infrarouge.

#### 5.4.3 Interaction rayonnement-sol

La signature spectrale des sols est en général caractérisée par une augmentation progressive de la réflectance depuis les longueurs d'onde du visible jusqu'à celles de l'infrarouge. Les seules discontinuités observées correspondent aux bandes d'absorption de l'eau, à  $1,4\mu\text{m}$  et  $1,9\mu\text{m}$ . Fonctions à la fois de la composition minérale et organique des sols, de leur contenu en eau et de la rugosité, les propriétés optiques des sols peuvent présenter une variabilité considérable. Une augmentation de l'humidité du sol entraîne une baisse de la réflectance sur tout le spectre, de même qu'un accroissement de la rugosité (obscurcissement par effet d'ombre).

Une surface lisse produit une réflexion spéculaire, c'est-à-dire que toute l'énergie est redirigée dans une même direction (comme c'est le cas d'un miroir). La réflexion diffuse se produit quand la

surface est rugueuse, ce qui redirige l'énergie uniformément dans toutes les directions. La plupart des objets de la surface terrestre se situent entre ces deux extrêmes.

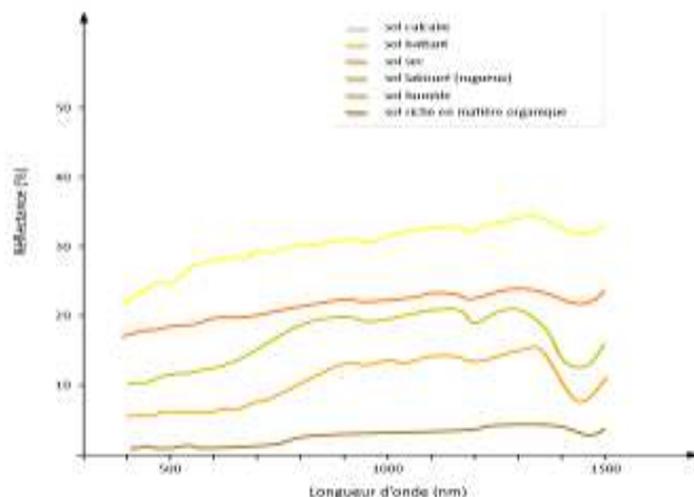


Figure 2.11 La signature spectrale des différents types de sol. Source : Girard M.C ; 1989

### 5.5 Régions spectrales utilisées pour l'observation à distance de la terre

- ✚ **Spectre visible (0,4-0,7 m)** : Gamme de fréquence de l'œil humain. Rayonnement solaire maximal. Subdivisé en trois groupes : R, G, B.
- ✚ **Infrarouge proche (0,7-1,1 m)** : Appelé IR réfléchi. L'énergie solaire des corps réfléchissants. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible.
- ✚ **Infrarouge moyen (1,1 -8 mm)** : Mélange de rayonnement solaire et d'émission. Affecte de manière significative l'atmosphère : employé pour mesurer les concentrations de vapeur d'eau, ozone, aérosols, etc.
- ✚ **Infrarouge thermique (8-14 mm)** : Rayonnement émis par les organismes eux-mêmes. La Tp d'un corps peut être déterminée (IR thermique). Les images peuvent être disponibles à tout moment de la journée.
- ✚ **Micro-ondes (1mm-1m)** : Intérêt croissant de la télédétection dans cette bande. Perturbations atmosphériques sont mineures et sont transparentes pour les nuages. Les capteurs actifs sont généralement utilisés.

## 6. Notions de l'échelle et Résolution d'une image en télédétection

Les images numériques de télédétection et les données analogiques peuvent être entrées directement dans un SIG ou utilisés par une conversion analogique-numérique ou par Scan (Jensen, 2000). Le plus souvent, les données de télédétection sont d'abord interprétées et analysées par divers méthodes d'extraction d'information afin de fournir les données nécessaires pour les SIG. Le succès de la collecte de données à distance à partir de l'imagerie captée nécessite la compréhension de quatre résolutions de base, qui sont : la résolution spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle (Jensen, 2000).

### **6.1 La résolution spatiale**

Une image matricielle est composée de pixels ; une image affichée est définie par une taille (en centimètre ou en pouce) ; la conjonction de ces deux données s'exprime en nombre de pixels par unité de longueur. Cette résolution, qui indique la « densité de pixels », est simplement nommée « Résolution spatiale ». La résolution spatiale est une mesure de la finesse des détails d'une image pour une dimension donnée. Elle désigne la taille minimum des objets pouvant être distingués et mesurés au sol (Robin, 2001). Plus la résolution spatiale diminue, plus il est difficile d'identifier des limites d'objets, le mélange de différents types d'occupation et d'utilisation du sol ayant tendance à augmenter au sein des pixels.

La résolution spatiale est fonction de l'altitude du capteur, détecteur taille, taille focal, et la configuration du système (Jensen, 2005). Les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une résolution "grossière" ou "basse". Les images à résolution fine ou élevée permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. Une résolution plus élevée présente la nécessité d'un plus grand stockage de données et un coût plus élevé et peut entraîner des difficultés dans le traitement de l'image pour une vaste région d'étude.

Les images à très haute résolution spatiale, sont les plus appropriées pour les études effectuées à l'échelle locale, et les images d'une résolution spatiale moyenne, comme celle employant les données de Landsat TM /ETM + / Oli 8 et ASTER, sont utilisées le plus fréquemment pour les études effectuées à l'échelle régionale. Sur l'échelle continentale ou mondiale, les images à une résolution spatiale grossière, telles que les images de MODIS sont les plus appropriées.

### **6.2 La résolution spectrale**

La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Elle se rapporte aux intervalles spécifiques des longueurs d'ondes dans le spectre électromagnétique qu'un senseur puisse enregistrer (Lecerf, 2008). Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites. Par exemple, le senseur SPOT-P est considéré comme ayant un spectre de résolution spectral grossier puisqu'il enregistre la radiation électromagnétique REM entre 0.51 et 0.73 mm tandis que le senseur Landsat TM3 lui, a une résolution plus fine, car il enregistre le REM entre 0.63 et 0.69 mm (Jensen, 1986).

### **6.3 La résolution temporelle (répétitivité)**

La résolution temporelle est conditionnée par l'orbite du satellite et par l'objectif de sa mission, c'est le temps que fait un satellite (généralement en unité de jour) pour qu'il repasse (capte une image) sur la même région (On parle aussi de la répétitivité). Plus ce temps est court plus la résolution temporelle est bonne. Les satellites à bonne résolution temporelle sont les plus utilisés pour le suivi et l'analyse des catastrophes naturelles telles que les inondations. La résolution temporelle et la résolution spatiale des capteurs sont fortement dépendantes l'une de l'autre et dépendent directement du champ de visée du capteur. Plus la résolution spatiale des images est grossière, plus le champ de visée des capteurs est élargi et, en conséquence, la fréquence d'acquisition des images (répétitivité) augmente. La résolution temporelle est un élément important considération dans la télédétection de la végétation, car la végétation se développe selon des cycles phénologiques quotidiens, saisonniers et annuels (Toumi el al. 2013).

## 6.4 La résolution radiométrique

La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Elle se réfère au rayon d'action dynamique ou le nombre possible de valeurs dans chaque bande, et ce, par le nombre de bits par lequel l'énergie enregistrée est répartie dans le fichier image. Par exemple, des données 8-bits sont celles ayant 28 valeurs, soit 256 niveaux de brillances allant de 0 à 255. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme plage dynamique.

## 7. Image numérique de télédétection

Une image de photographie est une représentation plane divisée en petits morceaux de forme et taille égale nommée « pixels ». Chaque pixel est représenté par une valeur numérique (CN) selon leur luminosité. L'image numérique est constituée de données des lignes et des colonnes. Une telle disposition de données sont appellee donnees Raster. Comme les images numériques sont des matrices des donnees, les opérations mathématiques peuvent être facilement réalisées sur le nombre d'images numérique. Les opérations mathématiques sur les images numériques sont appelées « traitement numérique des images ». Les donnees des images numériques peuvent également avoir une troisième dimension appelée « couche » qui est une image de la même scène mais avec des informations différentes. En images multi spectrale, les couches sont des images de différentes gammes spectrales appelées bandes ou canaux. La structure de l'image numérique de la télédétection est en tout point semblable à celle d'un fichier en mode d'image (raster) tel qu'il est définit en système d'information géographique (SIG) elle est divisée en deux partie :

*L'entête* et la matrice numérique de « n » lignes et « m » colonnes : contient la métadonnée ou méta-information, c'est-à-dire toutes les informations que le producteur de l'image juge utile de fournir à l'utilisateur.

La matrice numérique formée de nombres entiers entre 0 et 255 selon la luminance spectrale relative à chaque cible.

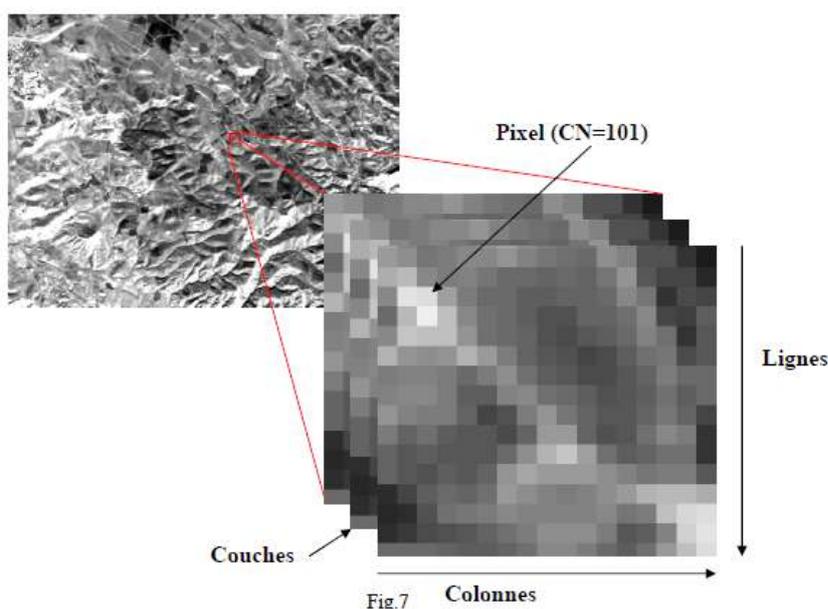


Figure 2.12 Structure d'une image numérique (Toumi, 2013)

### 7.1 Traitement des images satellitaires

Avant d'exploiter les images satellitaires et d'extraire ces informations utiles, un ensemble d'opérations sont nécessaires, ce sont des opérations de traitements. En effet le traitement des images satellitaire est l'ensemble des opérations effectuées sur les images dans le but d'extraire des informations utile pour la compréhension et l'explication et la modélisation d'un phénomène se déroulant sur la terre terrestre (Toumi, 2013). Les fonctions de traitement des images sont regroupées en 4 catégories principales :

- ✚ Prétraitement de l'image
- ✚ Rehaussement de l'image
- ✚ Transformation de l'image
- ✚ Classification et analyse de l'image

Les opérations de prétraitement se divisent en corrections radiométriques et en corrections géométriques. Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.

### 8. Méthode d'intégration entre la télédétection et les SIG

D'après Wilkinson, 1996 la détection et le SIG peuvent être combinée selon les trois principales façons suivantes : (1) la télédétection qui est utilisée comme un outil de collecte de données pour les utiliser dans SIG. (2) les données du SIG sont utilisées comme information auxiliaire pour améliorer les produits provenant de la télédétection, et (3) la télédétection et les SIG sont utilisés ensemble pour la modélisation et l'analyse.

La combinaison des informations provenant d'images satellitaire avec d'autres sources d'information géographique, biologique ou écologique est idéalement gérée au sien d'un SIG. Un SIG peut être utilisé comme la base de données à partir de laquelle on peut déduire des relations en utilisant des méthodes statistiques de modélisation.

### 9. Apport de la télédétection et les SIG à l'étude de l'érosion

L'application de la télédétection pour les études de l'érosion suit deux axe de recherche : d'une part, le contrôle des signaux qui décrivent des variations spatio-temporelle des caractéristiques de surface du sol, et d'autre part, des améliorations majeurs dans les méthodes utilisées pour relier ces signaux surveillés avec hydrologiques et géomorphologiques variables pertinentes des modèles utilisés pour étudier les processus d'érosion. Travailler avec des images à plusieurs résolutions différentes permet d'observer un territoire et ces éléments. Chaque gamme d'objets observés peut être restituée à l'échelle locale. Le choix des capteurs de télédétection est guidé par leur résolution spatiale afin de l'adapter au mieux à la taille des objets observés et l'échelle de restitutions souhaitée. Plusieurs chercheurs ont utilisé la télédétection comme source de données et les SIG pour la gestion et l'analyse de ces données afin d'estimer et cartographier l'érosion hydrique.

La télédétection nous a permis d'évaluer les facteurs nécessaires au fonctionnement des modèles (RUSLE, USLE, ...) tel que la longueur de pente et la pente (LS) à l'aide des modèles numériques de terrain (MNT). Nous avons aussi exploité les images satellitaires pour estimer le facteur d'occupation et de l'utilisation des terres (C) et les pratiques de conservation (P). La télédétection a permis aussi de produire la cartographie des réseaux hydrographiques, de diverses caractéristiques géomorphologiques de terrain ainsi que la cartographie géologique.

Les systèmes d'information géographique regroupent tous les facteurs déterminés par les images satellitaires afin de les stocker, analyser et les modéliser. Ces données peuvent être introduites selon les catégories suivantes :

- ✚ Les entrées du modèle sont des facteurs stables (ou évoluant sur une période longue) sol, morphologie, géologie, hydrographie, pente.
- ✚ Les entrées événementielles comme l'intensité de la précipitation ou saisonnières comme l'évolution de la végétation et l'état de surface des sols.
- ✚ Les interventions de l'homme (incendies des forêts, urbanisation, la conservation des sols).

Le système d'information géographique joue le rôle d'intégrateur des données nécessaires pour l'estimation de l'érosion. Les données de base (cartes, données climatologiques, images de satellites) sont traitées et manipulées dans le SIG afin d'obtenir des informations distribuées, qui fournissent les principaux facteurs du RUSLE pour chaque maille du site. Ces facteurs sont ensuite superposés dans le SIG selon le RUSLE en fonction de leur distribution spatiale afin d'estimer l'érosion. En effet, chaque facteur est présenté par une carte thématique (Couche) sous format Raster. Ainsi chaque cellule de chaque couche a une valeur unique et référence le même emplacement géographique. En conséquence, la superposition des couches est la multiplication mathématique des couches et l'attribution d'une nouvelle valeur à chaque cellule dans la couche en sortie qui est la carte d'érosion. La figure suivante illustre un exemple de superposition de deux cartes A et B et C est la carte de sortie : (Linus, 2010)

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 2 \\ \hline 3 & 0 & 4 \\ \hline 5 & 5 & 0 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 9 & 2 & 3 \\ \hline 2 & 3 & 2 \\ \hline 1 & 1 & 6 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 9 & 4 & 6 \\ \hline 6 & 0 & 8 \\ \hline 5 & 5 & 0 \\ \hline \end{array}$$

A
B
C

Figure 2.13 : Exemple de superposition de deux cartes (Linus, 2010)

Ainsi l'application de l'approche RUSLE/SIG pour estimer la perte de sol, à travers 6 étapes :

- ❖ **Etape 1** : Elaboration de carte de pente et de la longueur de la pente (Facteur LS).
- ❖ **Etape 2** : Elaboration de la carte d'érosivité des pluies (Facteur R).
- ❖ **Etape 3** : Elaboration de la carte d'érodibilité de sol (Facteur K).
- ❖ **Etape 4** : Elaboration de la carte de la couverture végétale (Facteur C).
- ❖ **Etape 5** : Elaboration de la carte des pratiques de conservation des sols (Facteur P).
- ❖ **Etape 6** : Elaboration de la carte de perte des sols par la combinaison des cartes précédentes.

## 10. Les capteurs à haute résolution spatiale

L'imagerie satellite à haute résolution spatiale (Landsat, SPOT, Ikonos, Quickbird, etc.) est utilisée dans de nombreuses applications relatives à l'étude et le suivi de la végétation, le développement des pratiques agricoles et de l'élevage, la cartographie et la lutte contre les feux de forêt, ainsi que la surveillance de l'extension urbaine... En ce qui concerne la cartographie et la lutte contre les feux de forêt, les images sont intégrées aux systèmes d'information géographique, pour simuler la propagation des incendies en fonction de paramètres météorologiques.

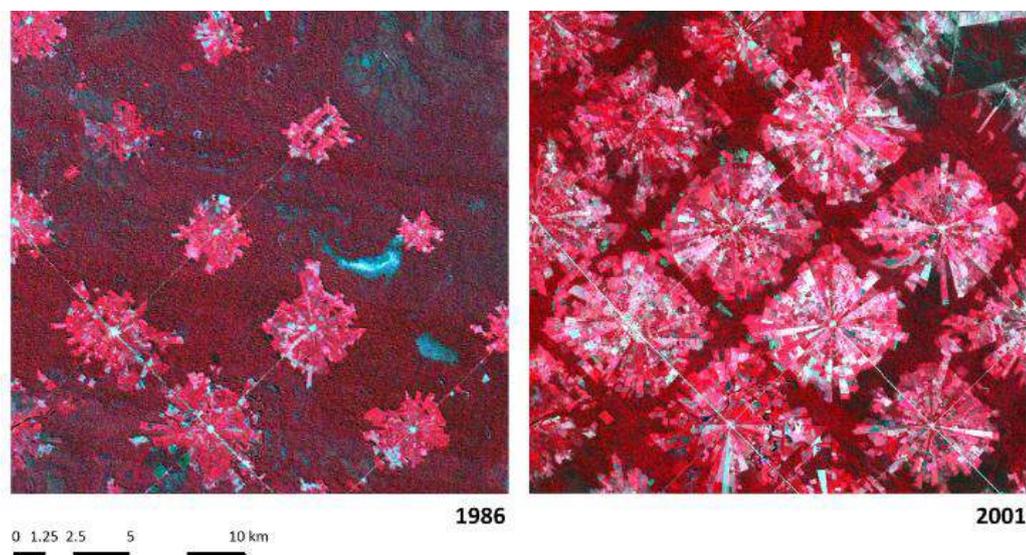


Figure 2.14 Image du satellite ASTER illustre l'ampleur de la déforestation à Santa Cruz de la Sierra, Bolivie entre 1986 et 2001. En l'espace de 15 ans, les 'étoiles' du parcellaire agricole ont totalement rongé la forêt. (Copyright © NASA/Japanese Space Team.)

Parmi tous les satellites de haute résolution utilisés pour l'étude de la végétation, les plus anciens sont ceux de la série « Landsat ». Le programme américain de télédétection spatiale Landsat a été le premier programme civil d'observation de la Terre par satellite. Il a commencé avec le lancement du premier satellite « Landsat-1 », appelé à l'origine ERTS (Earth Resources Technology Satellite) en 1972. L'objectif du programme initié par le gouvernement des Etats - Unis et la NASA, était de fournir de façon régulière des images des ressources terrestres sur le long terme, mais également d'estimer le rendement des récoltes céréalières aux Etats - Unis et en Russie, afin d'anticiper l'évolution des cours du marché boursier. A ce jour, huit satellites Landsat ont été lancés depuis juillet 1972, le dernier, Landsat 8, a été mis en orbite le 11 février 2013 (voir tableau). Les instruments embarqués sur les satellites Landsat et la continuité exceptionnelle du programme ont permis d'acquérir des milliers d'images de la surface de la planète, utilisées non seulement pour la surveillance des ressources terrestres, mais aussi pour de nombreuses autres applications.

Tous les satellites de la série Landsat sont placés sur des orbites héliosynchrones quasi polaires (Inclinaison de 98°). Les trois premiers satellites tournaient sur une orbite située à environ 900 km d'altitude, avec une répétitivité de 18 jours. A partir de Landsat 4, l'altitude de l'orbite a été ramenée à 705 km, permettant un gain de deux jours pour la répétitivité. Le décalage de phase entre les orbites de Landsat 4 et 5 permet d'abaisser la répétitivité à 8 jours, ce qui est très intéressant pour suivre l'évolution de la dynamique de la végétation.

Afin d'assurer la continuité du programme Landsat pendant au moins cinq années supplémentaires, un nouveau satellite a été lancé. Il s'agit du huitième satellite du programme Landsat et le septième à atteindre l'orbite avec succès. Initialement appelé Landsat Data Continuity Mission (LDCM), il s'agit d'une collaboration entre la NASA et le United States Geological Survey (USGS). Le Goddard Space Flight Center de la NASA à Greenbelt, dans le Maryland, assure le développement, l'ingénierie des systèmes de mission et l'acquisition du lanceur, tandis que l'USGS assure le développement des systèmes au sol et poursuit les opérations de la mission. Le satellite est construit par Orbital Sciences, qui est le maître d'œuvre de la mission. Les instruments du satellite sont construits par Ball Aerospace et le Goddard Space Flight Center de la NASA, et le lancement est confié à United Launch Alliance. Au cours de ses 108 premiers jours en orbite, LDCM est soumis aux évaluations par la NASA et le 30 mai 2013, les opérations sont transférées de la NASA à l'USGS lorsque LDCM est officiellement nommé Landsat 8.

Le Landsat 8 embarquera un instrument très similaire à l'ETM+, l'OLI. L'instrument possèdera deux bandes supplémentaires : une bande 'aérosols côtiers' centrée sur 0,44 $\mu$ m qui devrait permettre d'améliorer l'observation de la teneur en sédiments des eaux littorales, ainsi qu'une bande 'cirrus' (1,36 $\mu$ m - 1,39 $\mu$ m) pour faciliter la détection automatique de la couverture nuageuse sur les images. Les autres différences notables concernent la résolution radiométrique améliorée (12 bits au lieu de 8 bits) et une capacité d'enregistrement plus rapide, permettant l'acquisition d'environ 400 images par jour de la surface terrestre.

Tableau 2.8 Caractéristiques des capteurs Landsat (Sources : <http://e-cours.univ-paris1.fr/>)

Satellite	Date de lancement	Altitude	Bandes spectrales	Instruments	Répétitivité
Landsat-1	23/07/1972	907 km	4 (2 visibles / 2 proche IR)	Imageur Multispectral (MSS), Caméra Return Beam Vidicon (RBV)	18 jours
Landsat-2	22/01/1975	908 km	4 (2 visibles / 2 proche IR)	MSS, RBV	18 jours
Landsat-3	05/03/1978	915 km	5 (2 visibles / 2 proche IR / 1 IR thermique)	MSS, RBV	18 jours
Landsat-4	16/07/1982	705 km	8 (3 visibles / 3 proche et moyen IR / 1 IR thermique / 1 panchromatique)	Thematic Mapper (TM), MSS	16 jours
Landsat-5	01/03/1984	705 km	8 (3 visibles / 3 proche et moyen IR / 1 IR thermique / 1 panchromatique)	TM, MSS	16 jours
Landsat-6	05/10/1993	n/a	8 (3 visibles / 3 proche et moyen IR / 1 IR thermique / 1 panchromatique)	Échec lors de la mise en orbite	16 jours
Landsat-7	11 Avril 1999	705 km	8 (3 visibles / 3 proche et moyen IR / 1 IR thermique / 1 panchromatique)	Enhanced TM (ETM+)	16 jours
Landsat-8	11 février 2013	705 km	9 (4 visibles / 4 proche et moyen IR / 1 panchromatique)	Operational Land Imager (OLI)	16 jours

## 11. Conclusion

Malgré le grand nombre de modèles d'érosion du sol disponibles pour la prédiction de la perte de sol à diverses échelles, les modèles de type USLE restent les plus utilisées dans le monde. À partir de notre évaluation de la littérature, nous avons conclu que ces modèles n'ont pas une incertitude plus élevée que d'autres modèles plus complexes et ils peuvent être un choix en ce qui concerne les problèmes de disponibilité des données et/ou la facilité d'utilisation et d'interprétation. Ceci doit être considéré avec précaution en cas d'augmentation de la disponibilité des données d'entrée, ce qui permettra de modéliser le processus d'érosion d'une manière plus dynamique et potentiellement basée sur le processus.

# **Chapitre 3**

## **Présentation Générale de la zone d'étude**

## Chapitre 3 : Présentation Générale de la zone d'étude

### 1. Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre à la présentation de la zone d'étude et les caractéristiques morphologiques et hydrographiques des bassins versants indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques.

### 2. Le bassin versant de la Medjerda

Le bassin versant de la Medjerda, principal bassin hydrologique de la Tunisie et l'un des principaux oueds du Maghreb, s'étend sur un territoire d'environ 23 7000 Km<sup>2</sup> (dont 15930 km<sup>2</sup> en Tunisie) soit 9,7% de la superficie de la Tunisie (Sherif, 2012). Il prend sa source près de Souk-Ahras, dans le Constantinois Algérien, puis coule vers l'Est avant de se jeter dans la mer Méditerranée (Golfe de Tunis). Il coupe la Tunisie dans sa diagonale et il s'étire sur un axe de direction SO-NE, Son lit est principalement sur le territoire de la Tunisie parcourant 350 km soit 80% de son cours d'eau total. Le bassin versant de la Medjerda couvre 5 gouverneras en Tunisie et 4 en Algérie qui sont : Jendouba, Kef, Siliana, Beja et Manouba (en Tunisie), Souk Ahres Tébessa, Khanchela et Oum El baoughi (en Algérie). Le bassin versant de la Medjerda est considéré comme le "château d'eau" de la Tunisie, il détient 2/3 des eaux mobilisables de la Tunisie, et il fournit la majeure partie des eaux de surface, et il alimente près de 38% de la population tunisienne, en particulier la ville de Tunis (MARH, 2007). Plusieurs barrages ont été réalisés sur les affluents d'oued Medjerda avec une capacité de stockage de 1,4 milliards de m<sup>3</sup> et une production hydro-électrique de 89M kw/an.

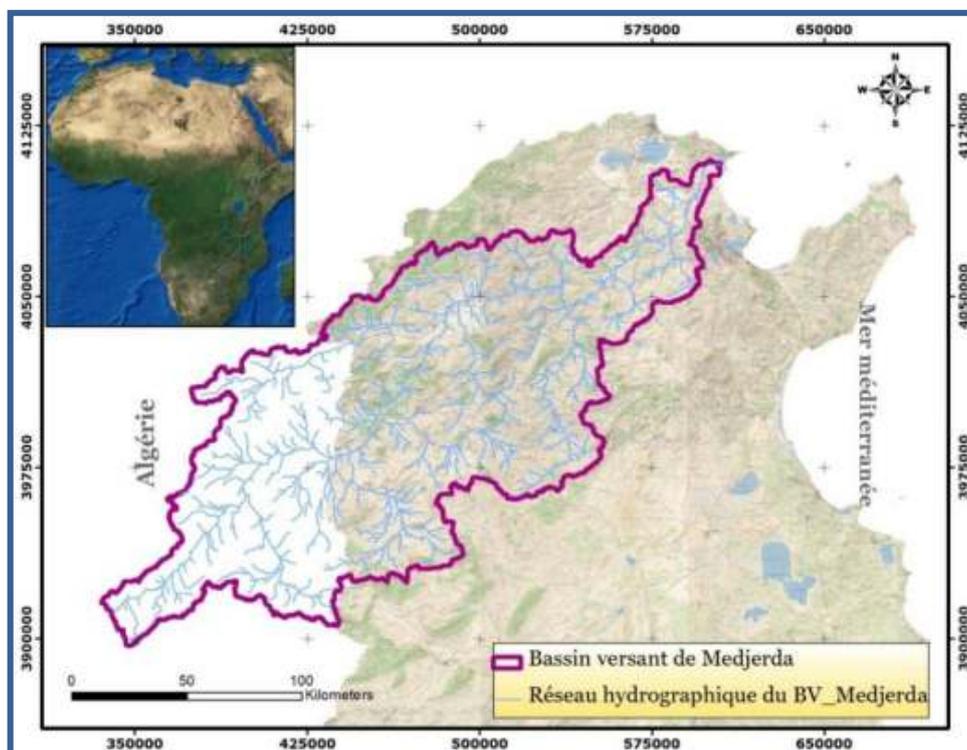


Figure 3.1 Le bassin versant de la Medjerda (Source : Abidi, 2017)

### 3. Découpage du bassin versant de la Medjerda

#### 3.1 La haute vallée d'oued Medjerda

Cette unité comprend toute la partie Sud des monts de la Medjerda. Elle s'étire en ligne droite d'orientation sur une longueur de 130 km et une largeur de 25 à 30 km et comprend les bassins versants de la Medjerdah à Ghardimaou, du Rarai, de L'oued Meliz, des oueds Bou Heurtma, oued Kasseb ; oued Ranem, oued bateun, oued djerd.

#### 3.2 Le bassin versant d'oued Mellègue

C'est un affluent principal de la Medjerda, il possède un bassin versant très vaste dont les 2/3 se situent en Algérie. La limite sud du bassin suit la longue chaîne montagneuse de l'Atlas tunisien qui sépare le nord et le centre de la Tunisie, puis se prolonge en Algérie par les monts de Tébessa, jusqu'au massif des Aurès.

#### 3.3 Le bassin versant d'oued Tessa

L'oued Tessa est formé d'une succession de petites plaines reliées les unes aux autres par des sections de vallées très encaissées, l'extension du bassin versant d'oued Tessa vers le sud est limitée par l'Atlas tunisien et son exutoire est situé légèrement à l'amont de Bousalem. Les apports liquides et solides d'oued Tessa à la Medjerda sont loin d'être négligeables.

#### 3.4 Le bassin versant d'oued Siliana

Le bassin versant d'oued Siliana est un bassin allongé, il est limité au sud par la dorsale tunisienne, son exutoire est situé à la délégation de Testour (gouvernorat de Bèja), juste à l'aval de la confluence des oueds Khalled et Medjerda.

#### 3.5 Le bassin versant d'Oued Khalled

Le bassin versant d'oued Khalled est situé à l'amont du bassin versant d'oued Siliana, dont l'exutoire est situé juste à l'aval du barrage de Sidi Salam.

#### 3.6 La basse vallée de la Medjerda

Elle regroupe la partie du bassin versant de la Medjerda comprise entre Pont Trajan et la mer. La région représente une plaine qui traverse des terrains inférieurs à 100m. Elle est entourée par un ensemble de Jbels d'altitude modeste environ 300 m : Jbel Nahli, Jbel Ammar et Jbel Ennadhour, ici la vallée n'a pas des grands affluents. La pente moyenne du delta est faible, de l'ordre de 7.2% et ne commence à s'accroître que dans la partie amont du delta (les alentours de barrage Laroussia) pour se jeter enfin dans la Lagune de Ghar Melh (Samaâli, 2011). Elle se distingue par une topographie homogène, plate, marquée par la présence des zones humides (Garâat, Sebkhât, marécages) avec une ouverture sur la Méditerranée.

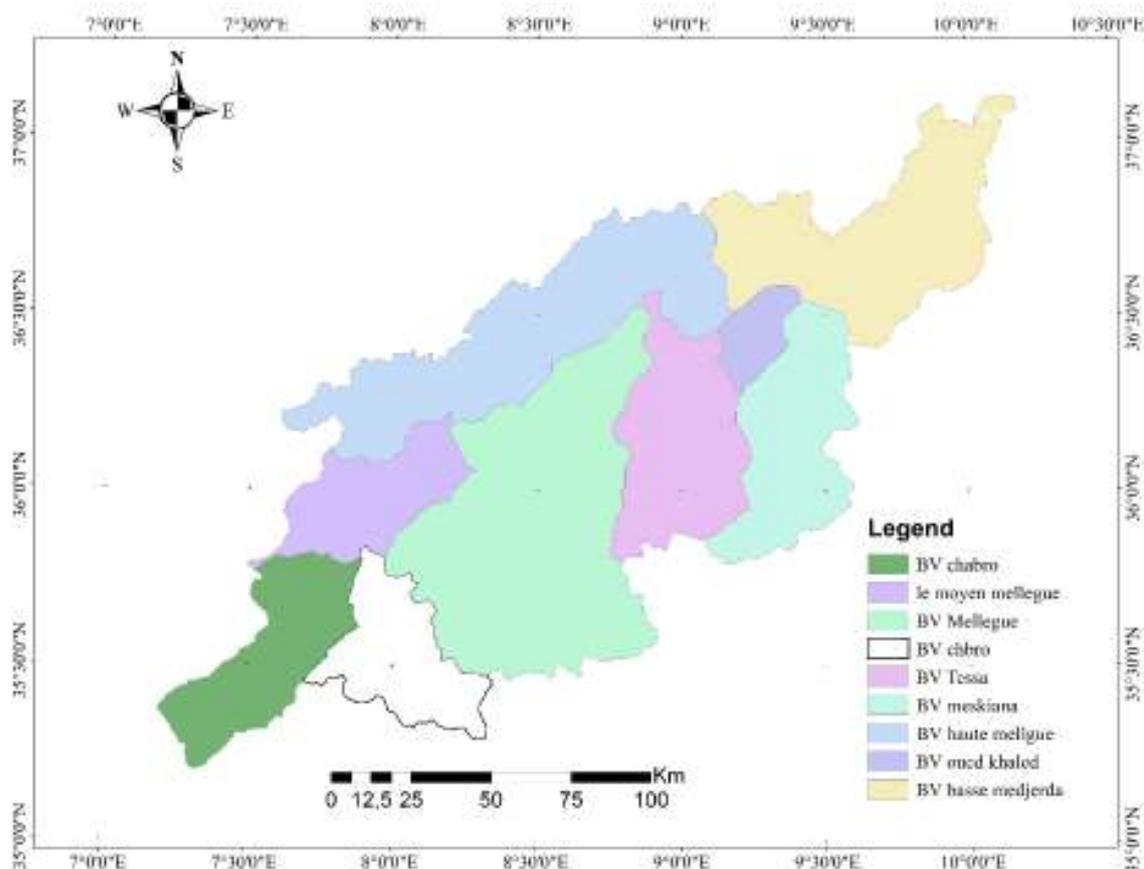


Figure 3.2 Découpage du bassin versant de la Medjerda

#### 4. Présentation de la zone d'étude

La zone concernée par cette étude s'étendue entre le barrage de Sidi Salem en Tunisie et l'amont de barrage Oldjet Mellgue en Algérie, elle est développée entre 37°02'24" et 35°00'00" N et 7°18'46" et 9°50'36" E, sur une superficie de 20 700 km<sup>2</sup>. Cette région est encadrée par le constantinois et le Seybouse au nord, et chott Melghir à sud-ouest et la basse Vallée de la Medjerda à l'est. Elle regroupe des bassins versants algériens et tunisiens, elle couvre le bassin d'oued Siliana et le bassin du barrage Sidi Salem qui regroupe les sous bassins versants d'Oued Tessa, Oued Mellegue, Oued khalled, et la haute vallée de la Medjerda, et un tronçon de la basse vallée entre le pont Tarjent et le barrage Sidi Salem (Rodier et al. 1981).

#### 5. Grands barrages

Le premier programme de construction des barrages et des lacs collinaires dans la Medjerda a été lancé en 1945, destiné à mettre en valeur les ressources encore inutilisées de cette vallée. Ce programme a permis en particulier de construire le barrage de Naebeur en 1954 à oued Mellgue qui contrôle 40% du bassin versant de la Medjerda, et de construire aussi le barrage de Beni Metir en même date sur oued ellil qui est utilisé pour l'alimentation en eau potable de quelque ville. D'autres grands barrages ont été construits après dans le programme de développement du bassin qui sont gérés par la DG/BGTH pour les barrages tunisiens et la ANBT pour les barrages algériens.

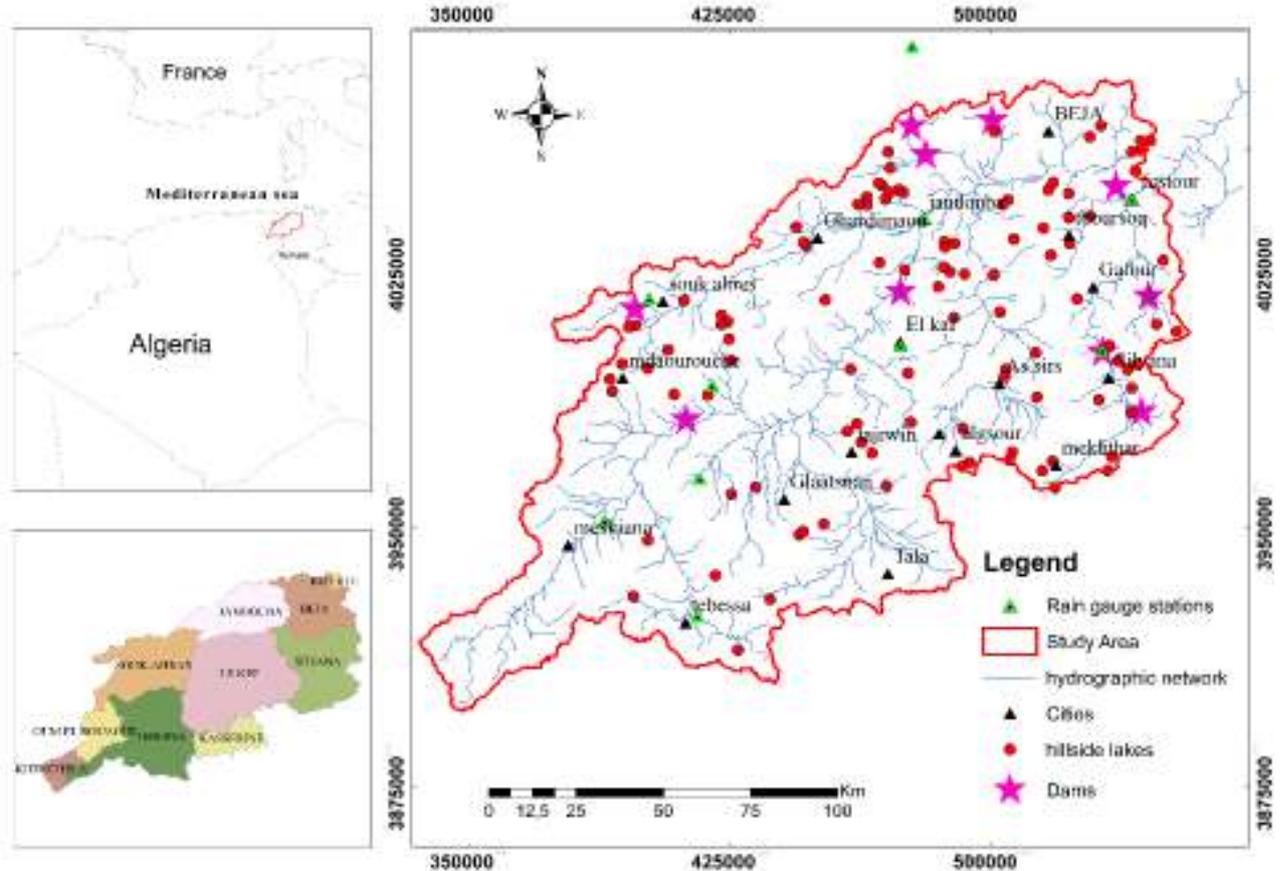


Figure 3.3 La situation géographique de la zone d'étude

## 6. Lacs collinaires

La construction des lacs collinaire en Tunisie a débuté vers la fin des années soixante. A partir de l'année 1990 une stratégie de conservation des eaux et des sols dans sa 1<sup>ère</sup> phase a été élaborée, cette phase a été concentrée essentiellement sur les réalisations physiques et la construction des lacs collinaires (Hammadi, 2014). L'Algérie n'a connu de véritable politique de construction de retenues collinaires qu'après l'indépendance, La première retenue collinaire d'un programme étatique a été réalisée en 1976. Elle fut suivie par plusieurs autres réalisations. Les résultats de cette opération ont été décevants en raison de l'envasement rapide des retenues. La première retenue collinaire réalisée sur le bassin de Medjerda a été en 1985. Les barrages collinaires en Tunisie sont étudiés et construits par la DG/BGTH et sont gérés par les CRDA (Commissariat Régional de Développement Agricole) et les AIC (Association d'intérêt Collectif). Les lacs collinaires sont programmés, étudiés et construits par les CRDA (arrondissement CES) et gérés par les AIC (suivis par la D/CES et les CRDA). Les lacs et les retenues collinaires en Algérie sont construits est gérés par ANBT et MRH. 83 barrages collinaires et 176 lacs collinaires sont construits sur le bassin versant de la Medjerda dans sa partie tunisienne d'une capacité totale de 35,5 Mm<sup>3</sup>. 23 retenues collinaires sont construites dans la partie algérienne du bassin versant de la Medjerda d'une capacité totale de 1,25 Mm<sup>3</sup>, dont trois seulement sont exploitées maintenant, en raison de l'envasement, destinées essentiellement à l'irrigation.

Tableau 3.1 Caractéristiques des grands barrages de la Medjerda (DGBGTH)

Nom du barrage	Mise en eau	Gouvernorat (wilaya)	Superficie du bassin versant (Km <sup>2</sup> )	Apport moyen Annuel (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an)	Capacité de la retenue initiale (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Capacité de la retenue actuelle (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
<b>Mellègue</b>	1954	Le Kef	10300	183,82	268	51,13
<b>Ben Metir</b>	1954	Jendouba	103	43,46	61,63	60,39
<b>Lakhmess</b>	1966	Siliana	127	13,47	8,22	7,22
<b>Kasseb</b>	1968	Beja	101	44,06	81,88	76,9
<b>Bou Heurtma</b>	1976	Jendouba	390	83,36	117,5	112,04
<b>Sidi Salem</b>	1981	Beja	7950	404,98	814	580,35
<b>Siliana</b>	1987	Siliana	1040	36,39	70	30,99
<b>Rmil</b>	2002	Siliana	232	10,19	4	2
<b>Ain dalya</b>	1987	Souk Ahres	193	55	70	40
<b>Oldjet el Mellegue</b>	2015	Tébessa	4343	-	145,4	145,4
<b>Sarrat</b>	2016	Le Kef	1850	22,4	21	21

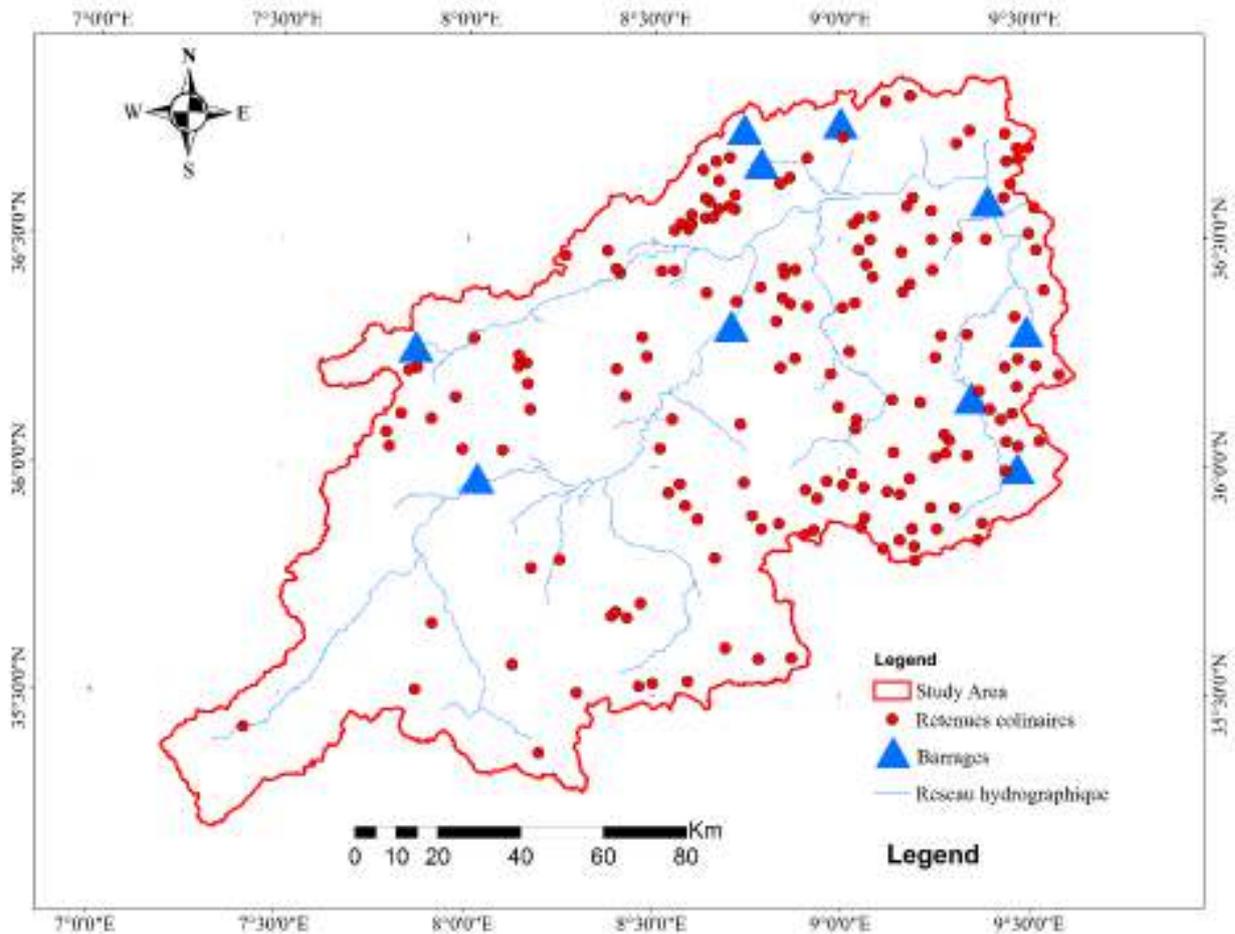


Figure 3.4 Ouvrages hydrauliques de la zone d'étude

## 7. Caractéristiques Climatologiques

Le climat de la Tunisie et de l'Algérie est un climat méditerranéen, caractérisé par un hiver humide et doux et un été chaud et sec.

### 7.1 La pluviométrie

La pluviométrie annuelle dépasse les 1000 mm au nord du bassin versant de Medjerda, est diminué progressivement vers le sud (Kotti, 2015), une répartition hétérogène des intensités pluviométriques a été observé sur l'ensemble du bassin au cours des différentes décennies, de 1971 à 2007 (Khoulida, 2015). Pour étudier le régime pluviométrique de la zone d'étude, nous avons traité une série de 35 années de pluie mensuelle et annuelles des 12 stations pluviométriques fournis par la DGRE tunisienne et ANRH algérienne.

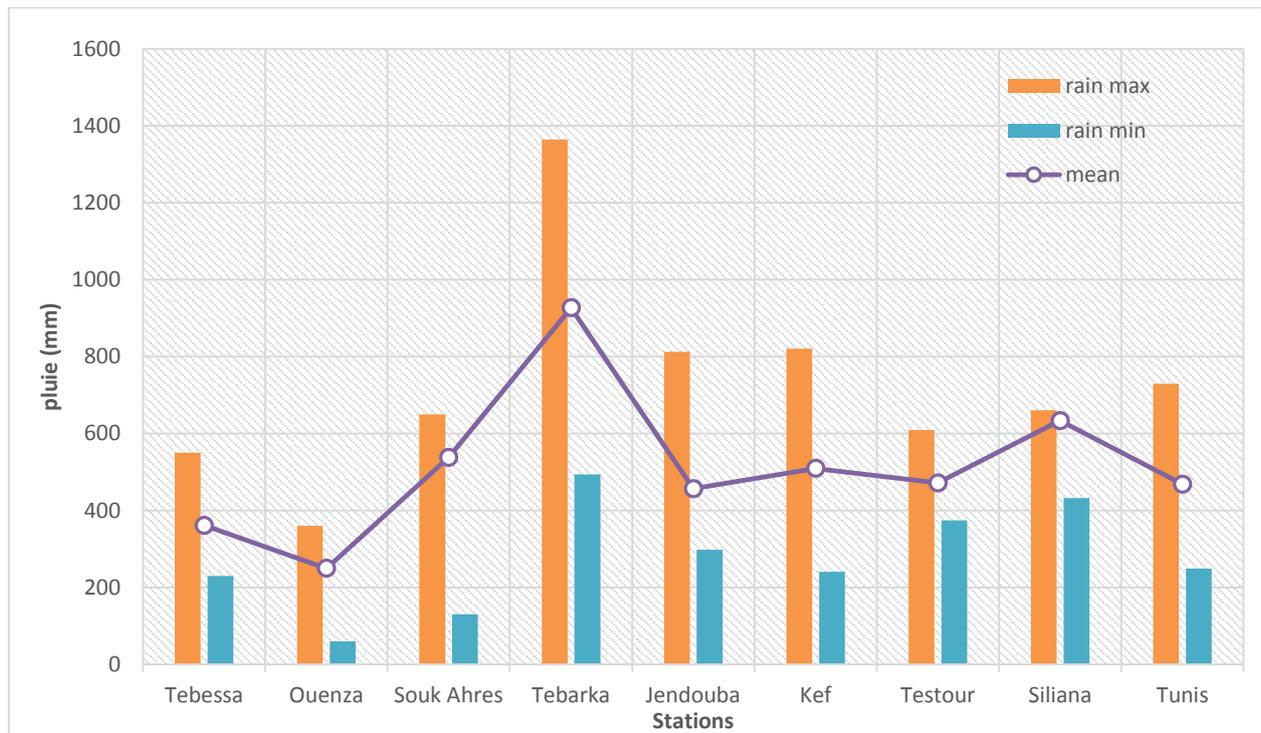


Figure 3.5 Répartition des pluies annuelle du bassin versant étudié

La pluie annuelle minimale varie entre 60mm à Ouenza (bassin versant d'oued Mellegue) et 432mm à Siliana. Les valeurs max de pluie dépassent les 1000mm et peuvent atteindre les 1300mm. La plaine de la haute vallée de la Medjerda représente la zone la plus pluvieuse dans les environs de Jendouba et Boussalem.

Du côté d'oued Mellègue et ses affluents, de fortes crues peuvent survenir surtout en automne pour une durée de 2 à 3 jours. L'eau commence à ruisseler à partir de 15 à 30 mm par jour (Abidi, 2017).

## 7.2 La Température

La température moyenne varie entre 17°C et 25°C, elle varie selon la région et la saison. La température maximale moyenne atteint les 37°C. Le mois de juillet est le mois le plus chaud, Des valeurs maximales très élevées sont enregistrées des fois dans quelque station météo logique, une valeur de 45°C a été enregistrée à Jendouba en 2005. Les valeurs basses sont enregistrées dans les altitudes et atteintes les 8°.

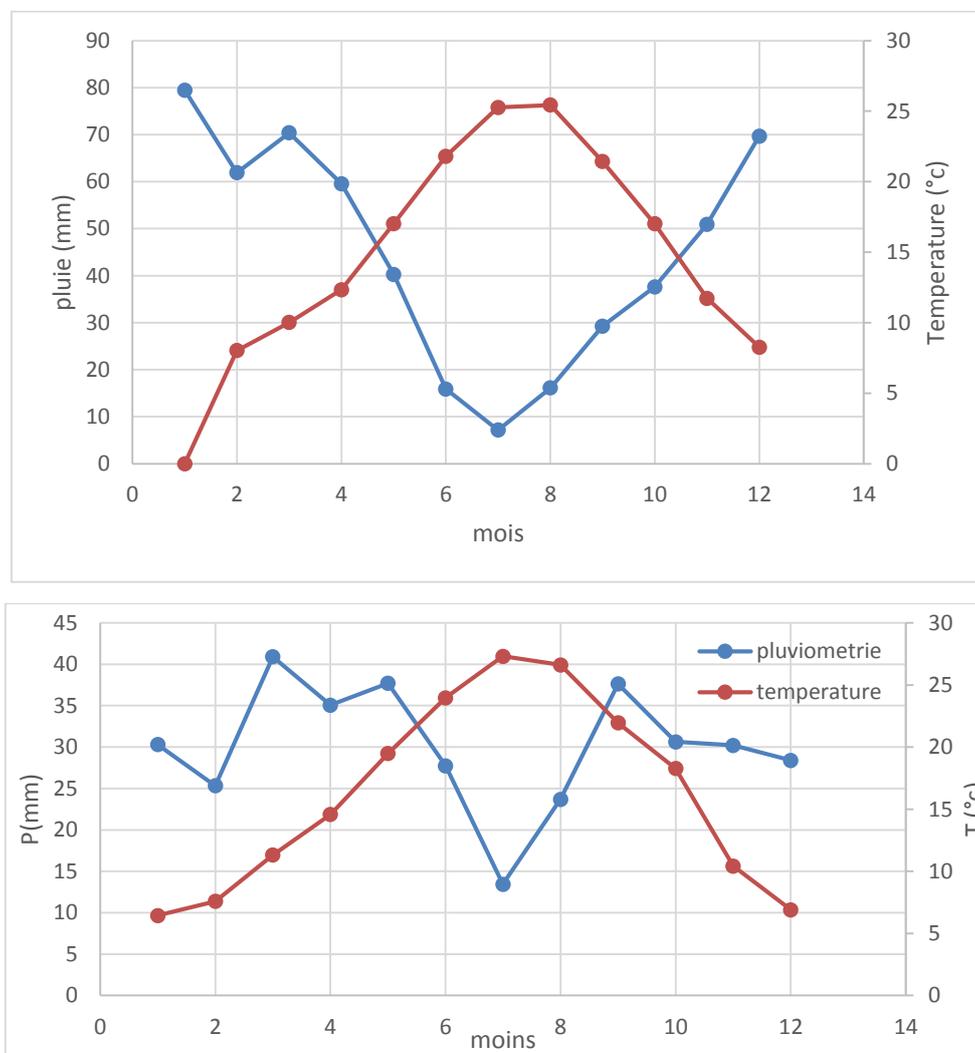


Figure 3.6 La température mensuelle enregistrée dans les stations de Souk Ahres et Tébessa entre 1970 et 2007.

## 8. Caractéristiques géophysiques de la zone d'étude (Aspects orographique)

Le milieu physique d'un bassin versant est toujours représenté par le relief, l'occupation du sol, et le réseau hydrographique. La connaissance des caractéristiques morphologiques d'un bassin versant est indispensable pour analyser leur comportement hydrologique. La description du milieu physique établie dans ce chapitre est basée sur les éléments suivants :

- ✚ Les cartes topographiques et géologiques
- ✚ images satellite Landsat 7TM et Landsat8 OLI de 30m de résolution

- ✚ Des images SRTM de 30m de résolution
- ✚ Recueil d'informations auprès des Directions de l'Hydraulique des Wilayas de Tébessa, Souk Ahras et Kenchela, de la Direction des Services Agricoles et à la Conservation des Forêts de la Wilaya de Tebessa,
- ✚ La revue de la morphologie de la medjerda établi par OROSTOM
- ✚ Recueil d'informations auprès de la Direction de ressource hydraulique du Tunis.
- ✚ Des travaux de plusieurs chercheurs qui ont travaillé sur la Medjerda
- ✚ Les cartes topographiques et lithologiques de la zone d'étude

## 8.1 Topographie et caractéristiques de forme

### 8.1.1 Topographie

La topographie de la zone d'étude est très variée : des plaines, collines, ensemble de Jbels, formations de pentes et des dépressions allongées et étroites. L'altitude maximale de la région atteint 1636m aux monts de Tebessa, qui font partie de l'atlas saharien, située entre la dorsale tunisienne au nord et les monts de Nemmecha (Aures) au sud-ouest, et s'abaisse pour atteindre 195 m à Gardimaou, 143 m à Jendouba, jusqu'à 60 mètres à oued Zarga dans la basse vallée de la Medjerda. Cette partie représente le point de croisement des grands affluents de la Medjerda d'où on trouve le plus grand barrage de la Tunisie (Sidi Salem). Cette zone est considérée comme la zone la plus inondable de la Medjerda (à titre d'exemples les inondations catastrophiques des années, 1973, 2003 et 2012, 2015).

Au sud les monts subhumides de Souk-Ahras subdivisées en deux parties : Est et Ouest. D'une longueur de 97 km environ d'Est en Ouest et d'une profondeur de 31 km environ du Nord au Sud, le tracé du massif prend forme à partir de la limite d'état à l'est du pays au niveau de la commune frontalière d'Ouled Moumen. Les reliefs les plus accentués du bassin versant de la Medjerda se situent en Algérie. En Tunisie, ils sont positionnés à la bordure sud et un peu moins à la bordure nord du bassin. En avançant vers la mer ces reliefs ont tendance à s'adoucir.

L'utilisation de la télédétection et le SIG à rendre facile la représentation de la topographie de milieu par le biais du modèle numérique de terrain (MNT) et numérique d'élévation (DEM). Pour notre cas, et afin de déterminer les caractéristiques morphométriques de la zone d'étude, nous avons utilisé le modèle numérique d'élévation en format SRTM, fournis gratuitement par USGS en 30m de résolution, (voir figure 7). Les données de SRTM sont appelées à l'aide d'un SIG. Le bassin versant de la zone d'étude contrôle une superficie de 20700 Km<sup>2</sup>.

Afin de faciliter la présentation des caractéristiques morphométriques, et découper le bassin versant par des zones selon le niveau de gravité de la perte des sols. Nous avons délimités les sous bassins versants en utilisant le module HEC-GeoHMS selon les affluents d'oued Medjerda à partir de l'MNT, suivant neuf opérations qui permettent d'obtenir la schématisation du modèle de bassin qui sont :

1. Correction du MNT par un remplissage des cuvettes (**Fill Sinks**) afin de pouvoir déterminer le sens d'écoulement dans l'étape suivante.

2. Sens de l'écoulement (**Flow direction**). Lors de cette étape la direction de chaque cellule est définie selon les 8 directions possibles (nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest, nord-ouest).
3. Accumulation de l'écoulement (**Flow Accumulation**). Cette étape détermine le nombre de cellules ascendantes s'écoulant dans une cellule donnée.

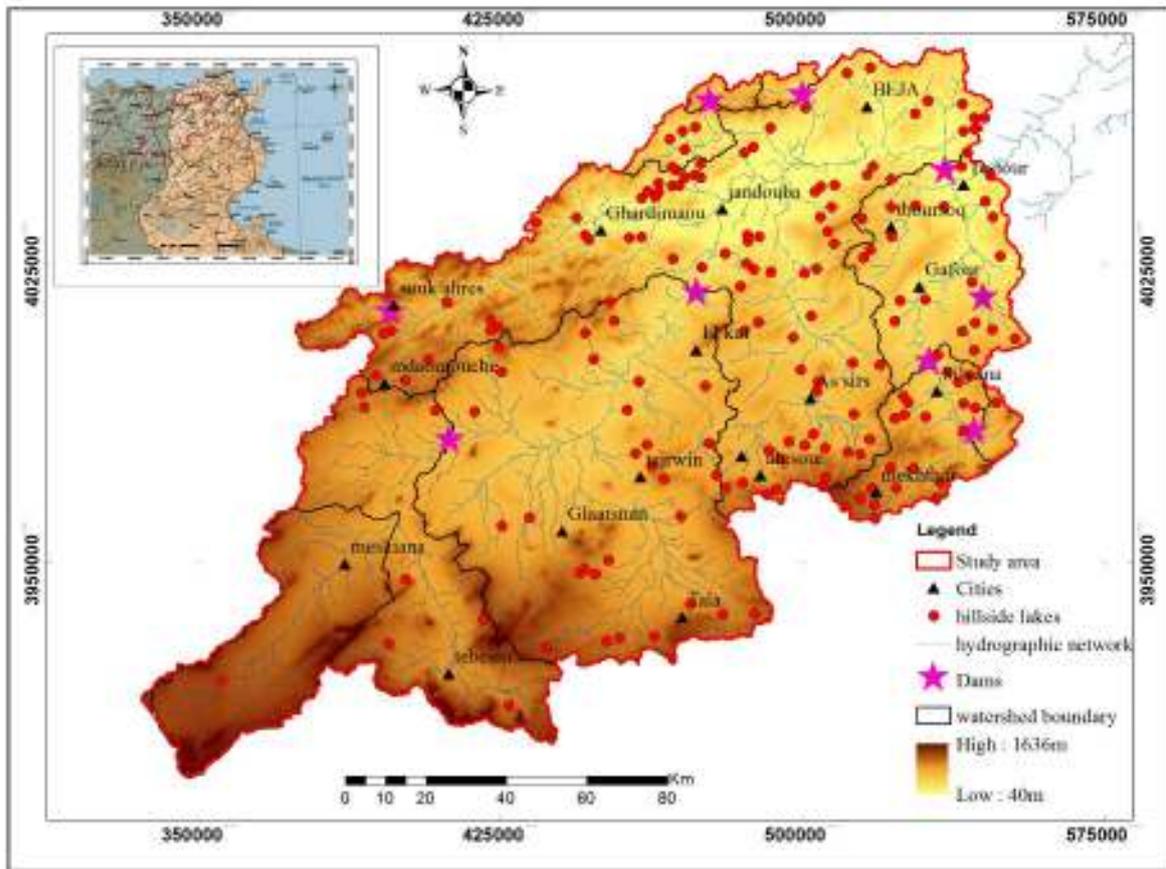


Figure 3.7 Le model numérique de terrain de la zone d'étude.

4. Définition du cours d'eau (**Stream Definition**). Cette étape classe toutes les cellules dont l'accumulation d'écoulement est plus grande qu'un seuil défini par l'utilisateur.
5. Segmentation du cours d'eau (**Stream Segmentation**). Cette étape divise les cours d'eau en des segments. Les segments du cours d'eau sont des sections d'un cours d'eau qui relient deux jonctions successives ou une jonction et un exutoire, ou une jonction et une diffluence.
6. Délimitation en sous-bassins (**Catchment Grid Delineation**). Cette étape trace les limites des sous-bassins pour chaque segment du cours d'eau.
7. Polygones des sous-bassins (**Catchment Polygone Processing**). Cette étape convertit la représentation en grille des sous-bassins en représentation vectorielle.

8. Traitement des segments du cours d'eau (**Drainage Line Processing**). Cette étape convertit les ruisseaux de la représentation en grille en représentation vectorielle.
9. Agrégation des lignes de partage (**Adjoint Catchment Processing**). Cette étape agrège les sous-bassins à chaque confluence de ruisseaux.

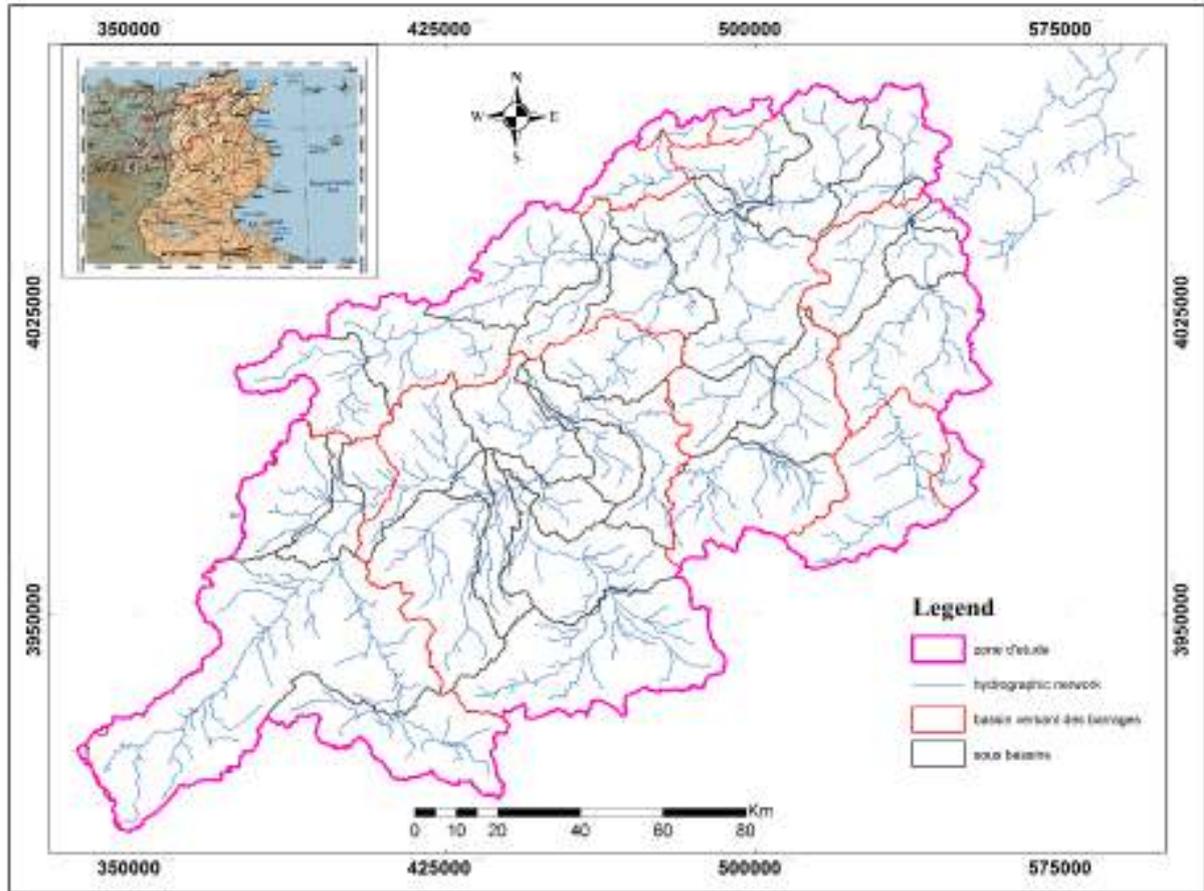


Figure 3.8 Délimitation de la zone d'étude en sous bassin versant

### 8.1.2 La forme du bassin

La forme du bassin versant représente la projection de sa géométrie sur un plan horizontal. Elle influence fortement l'écoulement global et notamment le temps de réponse du bassin versant. Un bassin versant allongé ne réagira pas de la même façon qu'un bassin versant de forme ramassée (Roche 1963).

L'indice de forme peut être donnée par l'indice de compacité de Gravelius (Bendjoudi et al., 2002)  $K_c$  et l'indice de Horton (1932)  $K_H$ :

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad K_H = \frac{A}{L^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

Avec :  $K_c$ : Indice de compacité de Gravelius ;  $S$  : Surface du bassin versant [Km<sup>2</sup>] et  $P$  : Périmètre du bassin [Km]. Sachant que  $K_c = 1$  bassin circulaire ;  $1 < K_c < 1,12$  bassin compact ;  $K_c > 1,12$  bassin allongé.

D'après les résultats du calcul mentionner dans le tableau 2, nous avons remarqué que l'indice de forme  $K_c$  est loin de 1,12 donc le bassin versant est allongée, et la forme des hydrogrammes est étalée avec un débit de pointe pas élevé.

Tableau 3.2 Indices de forme des bassins versants

Sous bassin	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	$K_c$
Oued Siliana	2198,95	249,072	1,49
Oued mellegue	10631,61	687,2881	1,87
Oued Tessa	2343,68	257,257	1,49
Haute vallée	3933,27	462,925	2,07
Basse vallée	1052,951	230,149	1,99
Oued khaled	508,638	103,168	1,28
Zone d'étude globale	20700	1120,65	2,18

### 8.1.3 Rectangle équivalent (rectangle de Gravelius)

C'est une transformation géométrique en un rectangle de dimension L et l. ayant la même surface que le bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement. La longueur L et la largeur l sont données en Km selon la formule suivante :

$$L, l = K_c \frac{\sqrt{5}}{1.128} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right) \dots\dots\dots (3.2)$$

Les résultats du rapport varient entre 2.79 et 11.34 (Tableau II.3). La comparaison des longueurs et des largeurs des rectangles équivalents montre que la longueur est trois (10) fois supérieure que la largeur, ce qui confirme leurs allongement favorisant un écoulement lent des eaux de ruissellement mais qui dépend cependant de la forme du relief.

Tableau 3.3 La longueur L et la largeur l du rectangle équivalent

Sous bassin	Superficie (km <sup>2</sup> )	$K_c$	L (km)	l (km)	Rapport (L/l)
Oued Siliana	2198,95	1,49	102,12	21,53	4,74
Oued mellegue	10631,61	1,87	306,52	34,68	8,83
Oued Tessa	2343,68	1,49	105,50	22,21	4,75
Haute vallée	3933,27	2,07	211,20	18,62	11,34
Basse vallée	1052,951	1,99	37,74	13,48	2,79
Oued khaled	508,638	1,28	104,15	10,11	10,30
Zone d'étude globale	20700	2,18	516,32	40,03	12,89

### 8.1.4 Relief du bassin

Le relief généralement est caractérisé pour chaque bassin versant par sa courbe hypsométrique qui a une grande importance dans l'étude des bassins versant, elle permet de déterminer les caractéristiques suivantes :

- La dénivelée  $D$  écart des deux altitudes au-delà desquelles se situent 5% et 95% de la superficie globale du bassin.
- L'indice global de pente  $I_g$  qui est le rapport de la dénivelée a la longueur du rectangle équivalent
- La dénivelée spécifique, produit de l'indice global de pente par la racine carrée de la surface  $D_s$ .

Le BV de la Medjerda, en général, a un relief accidentée (Rodier et *al.* 1981). La dénivelée spécifique pour l'ensemble de la région est de 257m. Une dénivelée assez élevée de 342m a été signalé dans le sous bassin d'oued Siliana qui sa baisse à 68m dans la basse vallée de la Medjerda (entre le pont Tarjent et le barrage sidi Salem) Ceci indique que la pente est assez forte plus en amont qu'en aval. Le BV de la Medjerda a une tendance à s'allonger de sa naissance vers son exutoire. Les reliefs les plus accentués du bassin versant de la Medjerda se situent en Algérie. En Tunisie, ils sont positionnés a la bordure sud et un peu moins à la bordure nord du bassin. En avançant vers la mer ces reliefs ont tendance à s'adoucir. (khedimlah.2020)

Les figures et le tableau ci-dessous représentent les courbes hypsométriques et les caractéristiques morphologiques du bassin versant de la zone d'étude (Medjerda et ses affluents) par tranche d'altitude.

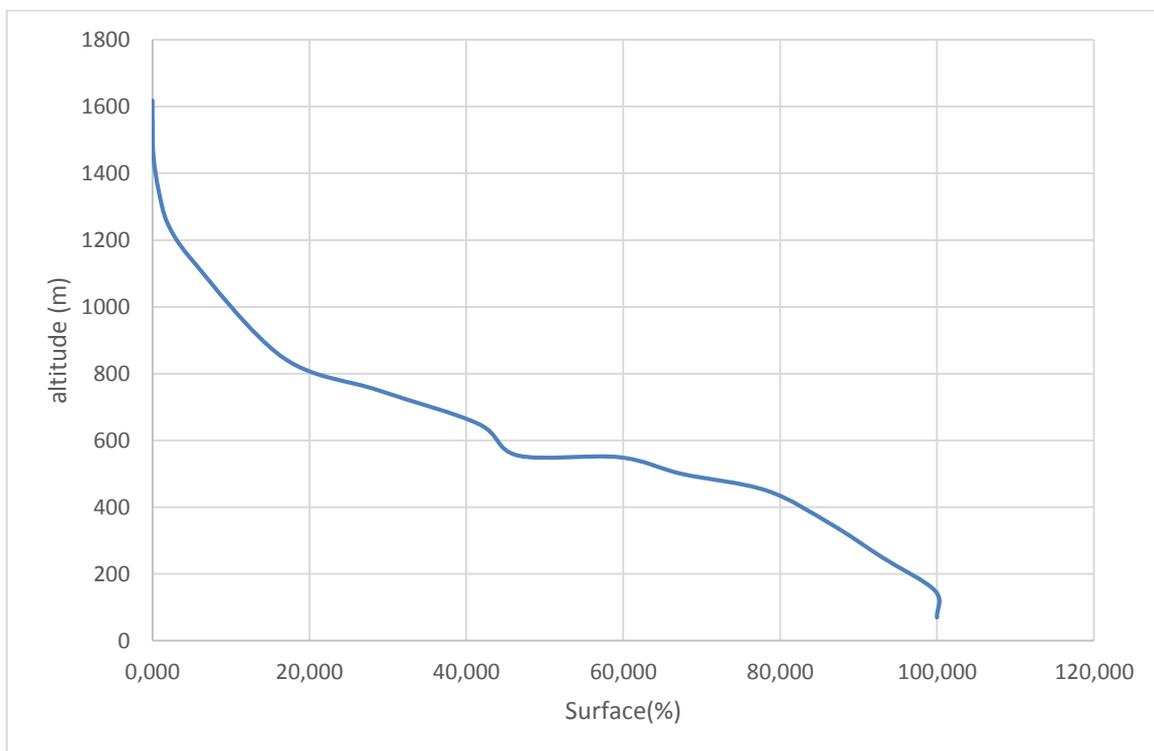


Figure 3.9 Courbe hypsométrique de la zone d'étude

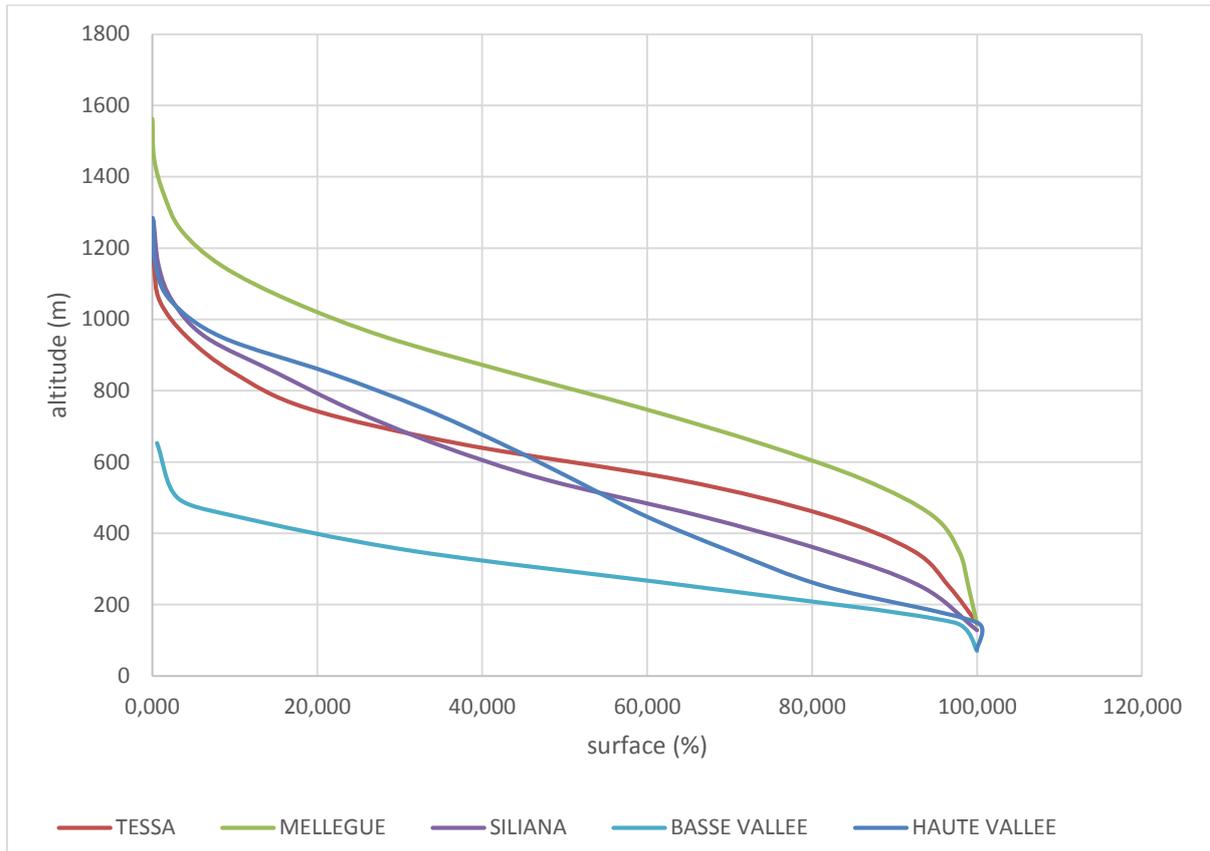


Figure 3.10 Courbes hypsométriques des principaux sous bassins versant de la zone d'étude

L'altitude moyenne de la zone d'étude d'une façon générale est 575m, le bassin versant d'oued Mellegue est le plus élevé. L'altitude maximum est 1636 située au mont de Tebessa (Algérie) dans le bassin versant d'oued Meskiana, le point le plus bas est situé à 60m, à oued Zarga. La zone dont l'altitude dépasse les 1000 m occupe 5% de la surface totale du bassin versant.

Tableau 3.4 Les caractéristiques hypsométriques de la zone d'étude

Le bassin versant	$H_{moy}$ (m)	$H_{5\%}$ (m)	$H_{95\%}$ (m)	$H_{50\%}$ (m)
Oued Siliana	520,78	974	228	536
Oued Mellegue	726,33	1209,5	433	810
Oued Tessa	556,01	932	300	600
Haute vallée	520,78	992	182	562
Basse vallée	257,33	475,5	159	295
Zone totale	575	1140	218	550

### 8.1.5 La pente

La pente est un facteur très important dans l'étude de l'érosion hydrique, puisqu'elle contribue à la détermination de la possibilité d'érosion avec d'autres facteurs de mécanisation de culture, des techniques et d'installation d'irrigation et de possibilité de pâturage.

La zone d'étude est caractérisée par une pente assez forte en amont qu'en aval, elle a une tendance à s'allonger de sa naissance vers son exutoire. Pour simplifier la représentation, nous avons subdivisé la carte des pentes qui a été établie sur la base du modèle numérique de terrain en trois classes qui sont :

- ✚ Classe des pentes  $< 12\%$  : elle représente les plaines et les hauts plateaux de la Medjerda, cette classe est plus stable, et le risque d'érosion est faible. Elle occupe 60% de la superficie totale du bassin versant
- ✚ Classe des pentes entre 12 et 30% : elle représente un relief montueux, généralement c'est le prolongement des montagnes, ce sont généralement des terrains de parcours et des terrains forestière (Toumi, 2013), le risque d'érosion est plus fort que la première classe surtout dans les zones agricoles. Elle couvre 33% de la superficie de la zone.
- ✚ Classe des pentes  $> 30\%$  : elle représente les montagnes et les hauts piémonts qui sont généralement couverte par la végétation. Cette classe occupe 7% de la superficie de la zone d'étude.

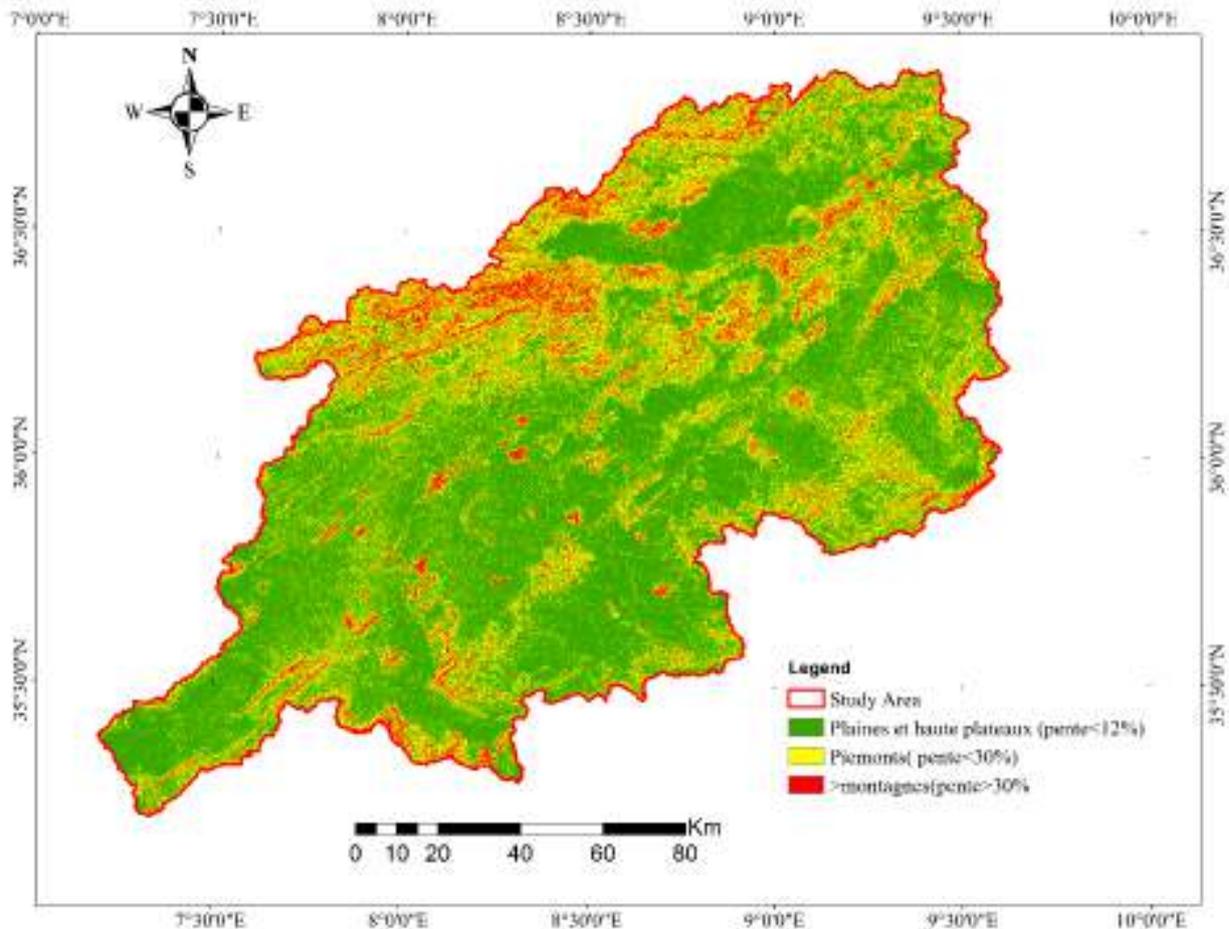


Figure 3.11 Les principales classes des pentes de la zone d'étude.

### 8.1.6 Indice de pente

C'est le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin versant, l'indice de pente globale caractérise le relief des bassins versant dont la surface est de l'ordre de 25km<sup>2</sup>. Pour notre cas on a utilisé la dénivelée spécifique D<sub>s</sub>, exprimé en (m) par la formule suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A} \dots\dots\dots (3.3)$$

Le type de relief est déterminé selon la classification de Rodier et al. 1981 (le bassin de la Medjerda, monographies hydrographiques, OROSTOM n°6.). Le tableau ci-après représente les résultats de calcul des indice I<sub>g</sub> et D<sub>s</sub>.

Le relief du bassin d'étude est fort dans plusieurs positions, ce qui favorise le ruissellement et l'érosion hydrique. Le bassin versant d'oued Mellegue, présente une courbe hypsométrique dont la partie médiane, qui occupe 60 à 70% de la surface totale du bassin, peut être assimilé à une droite entre les altitudes 1000 et 500m. Entre ces deux altitude la pente du rectangle est régulière estimé à 2,8m/km. La pente s'accroît fortement est estimé à 4,3m/km au-dessus de 1000m et 5m/km au-dessous de 500m.

Le bassin versant d'oued Siliana et oued Tessa ont des courbes hypsométriques analogues. La partie médiane de leur courbe peut être assimilé à une droite, dans cette zone la pente de Siliana est plus forte que la pente de Tessa. L'accroissement de pente aussi bien vers l'amont que vers l'aval, il est dû à la présence de reliefs assez élevés près des exutoires des deux bassins. La pente s'accroît aussi fortement dans les deux bassins au-dessus de 1000m.

Tableau 3.5 Indice de pente et dénivelé spécifique et type de relief de la zone d'étude.

<b>Le bassin versant</b>	<b>I<sub>g</sub></b>	<b>D<sub>s</sub></b>	<b>Type de Relief</b>
<b>Oued Siliana</b>	7,31	342,56	R6: relief fort
<b>Oued Mellegue</b>	2,53	261,20	R6: relief fort
<b>Oued Tessa</b>	5,99	290,01	R6: relief fort
<b>Haute vallée</b>	3,84	240,53	R5: relief assez fort
<b>Basse vallée</b>	3,04	68,54	R4: relief modéré
<b>Zone totale</b>	1,79	256,73	R6: relief fort

### 9. Réseaux hydrographiques

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est dense, il constitue le système hydraulique le plus important en Tunisie, il est représenté par un cours d'eau principal, Medjerda, qui prend sa source en Algérie, et débouche vers le barrage de Sidi Salem.

Les principales affluents qui donnent la naissance à oued Medjerda sont :

- ✚ Oued Mellegue : principal influent d'oued Medjerda, prend sa source en Algérie (aux monts de Tebessa et les Aurès) et il le rejoint le sous bassin de la haute Mejerda dans la plaine de Bou Salem après un parcours de 317km.

- ✚ Oued Tessa : il prend sa source dans la région de la haute plaine des atlas tunisiens, Son exutoire est situé légèrement à l'amont à 133m d'altitude. Sa longueur est estimée à 143km.
- ✚ oued Siliana : il prend sa source dans les monts de l'atlas tunisien, il rejoint le medjerda à Testour à la cote 80m. après un parcours de 171km.
- ✚ Oued bouhertma : Il conflue près de la localité de Bou Salem avec l'oued Medjerda après un parcours de 64 km.
- ✚ Oued Beja : c'est un affluent rive gauche d'oued Medjerda qui se jette directement dans la retenue de Sidi Salem. Limité au pont Trajan, il draine un bassin de 336 km<sup>2</sup> et à la confluence avec Medjerda un bassin de 340 km<sup>2</sup>. Il prend naissance à partir des sources Soltane, il coule suivant une direction sensiblement Nord-Sud.
- ✚ Oued kasseb : il draine un bassin de 255 km<sup>2</sup>, dont 101 km<sup>2</sup> sont contrôlés par le barrage. En aval du barrage, la pente moyenne de son cours principal est faible (3‰).
- ✚ Oued Meskiana : il draine un bassin de 1 845 km<sup>2</sup> Cet oued, en provenance de la région de Khenchela, présente des lacs salés dans sa partie amont.
- ✚ Oued Chebro : il draine un bassin de 1560km<sup>2</sup>, prend sa source dans la région de Tébessa. L'oued Chabro et l'oued Meskiana se rejoignent légèrement en amont d'El Aouinet pour former l'oued Mellegue.

## 9.1 Paramètre hydrographique

### 9.1.1 Densité de drainage

Elle est définie comme le rapport de la longueur totale des cours d'eau de tout ordre, à la surface du bassin.

$$D_d = \frac{\sum li}{A} \dots\dots\dots (3.4)$$

Avec :  $D_d$  Densité de drainage en Km/Km<sup>2</sup>,  $\sum li$  Longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en Km, A : Superficie du bassin en Km<sup>2</sup>.

La densité de drainage, permet de mieux apprécier les variations de l'écoulement à l'échelle du bassin. Elles sont étroitement dépendantes de la lithologie et l'abondance des précipitations. La densité de drainage est relativement élevée dans le bassin de la Medjerda ; où elle est de 1.72 km/km<sup>2</sup>.

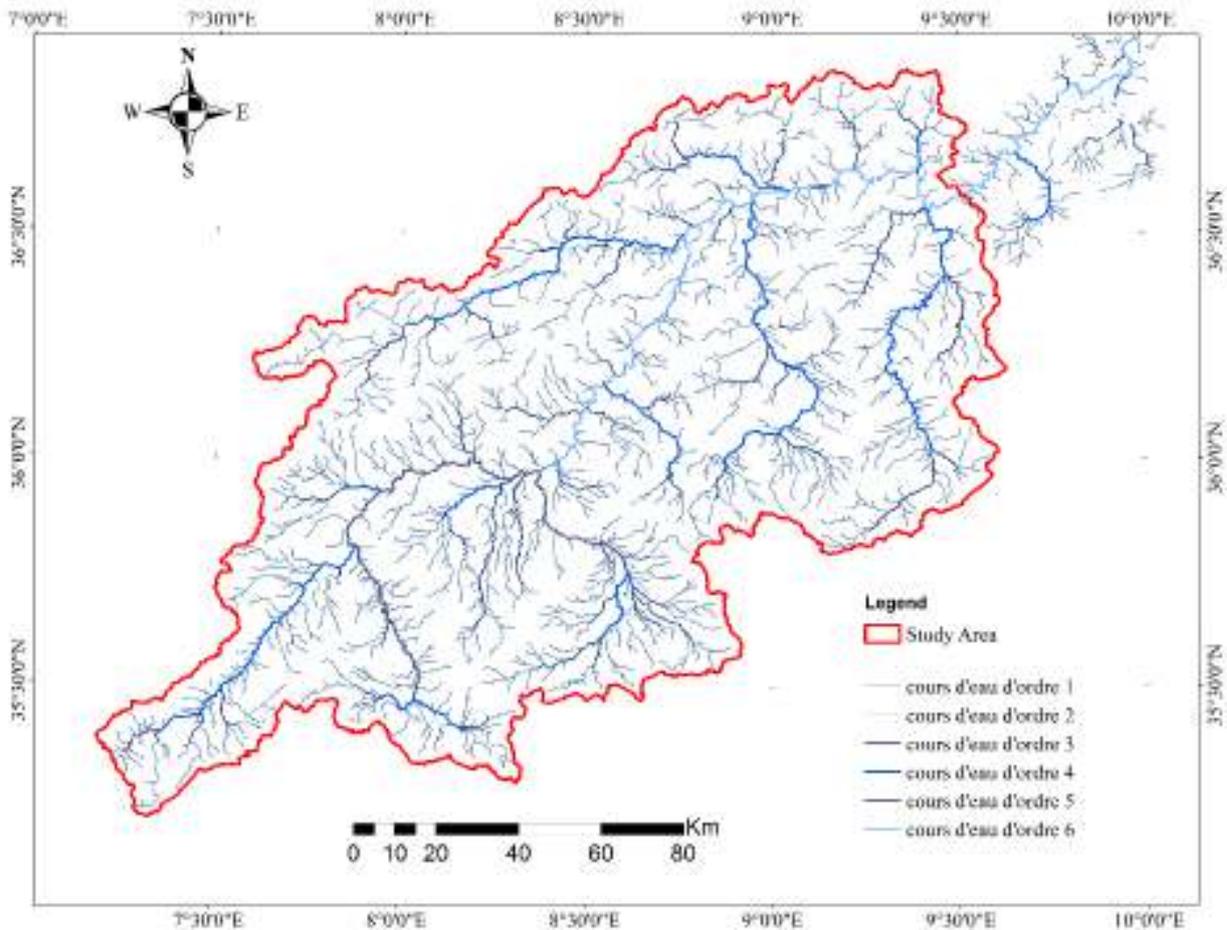


Figure 3.12 Classification du réseau hydrographique de la Medjerda

### 9.1.2 Profil en long

Le tracé du profil en long de la Medjerda avec leurs affluents a été découpé en sections présentant une certaine homogénéité de pente. Puis les différentes pentes moyennes des sections ont été calculées.

Les fortes pentes de l'oued Medjerda sont situées au niveau du territoire Algérien atteignant les 100 m/km, ces pentes décroissent grandement entre les altitudes 950-650 m atteignant 9.1 m/km ceci sur 32 km, puis passent à 5.6 m/km entre les altitudes 650-192 m sur un linéaire de 82 km. Sur le territoire Tunisien, ces pentes sont nettement plus faibles et se situent entre 0.80 m/km et 0.18 m/km (Kallel et al. 1974) (voir Tableau). Concernant l'oued Mellegue les pentes en amont sont fortes et débutent avec une pente de 15 m/km sur 26 km puis passent à 5.30 m/km sur le restant du linéaire Algérien.

Le découpage proposé nous a permis de remarquer une décroissance des pentes des oueds Medjerda et Mellegue d'amont en aval, ainsi que de l'altitude 1150 m à l'altitude 950 m, la pente du cours d'eau est de 100 m par kilomètre sur une distance de 2 kilomètres et elle se décroît vers l'aval, prenant une valeur moyenne de 9.1 m par kilomètre sur une distance de 32 km. Cette dernière passe de 5.6 m par kilomètre à 0.33 m par kilomètre sur une distance de 133 km en arrivant à une pente moins de 0.18 m par kilomètre sur une distance de 67 km ensuite, elle croit entre les

altitudes 130 m à 40 m avec une pente de 0.80 m par kilomètre sur une distance de 108 km et entre les altitudes 40 m et 0 m avec une pente de 0.33 m par kilomètre sur une distance de 133 km. Il en est de même pour l'oued Mellegue, d'amont en aval entre l'altitude de 1450 m à 1060 m, la pente moyenne passe de 15 m par kilomètre sur une distance de 26 km à 5.3 m par kilomètre jusqu'à sa confluence avec l'oued Medjerda. Ces deux exemples montrent bien, malgré un découpage grossier des profils en long, l'existence de ruptures de pentes dans le profil des oueds Medjerda et Mellegue.

Tableau 3.6 Variation de la pente des oueds Medjerda et Mellegue

Oued principal	Altitude (m)	Différence d'altitude (m)	Linéaire (km)	Pente (m/km)
Medjerda 495 km (130 km en Algérie)	1000-950	200	2	100.00
	950-650	290	32	9.10
	650-192	458	82	5.60
	192-142	50	71	0.70
	142-130	12	67	0.18
	130-44	86	108	0.80
	44-0	44	133	0.33
Mellegue 308 km (78 km en Algérie)	1100-1060	390	26	15.00
	1060-670	390	74	5.30
	670-425	245	72	3.40
	425-250	175	73	2.40
	250-142	108	47	2.30
	142-138	4	16	0.25



Le bassin de l'oued Guetara a des caractéristiques semblables, mais comprend quelques zones de limons alluvionnaires. Le sous bassin versant de Meskiana comprend des sols limoneux de plaine sur plus de 60% de sa superficie. Des sols à dominante calcaire ou conglomératique, donc relativement stables, se retrouvent sur des versants d'altitude plus élevée et plus pentus au sud. En revanche, des marnes sont présentes sur un peu moins du quart de la surface du bassin, comprenant des sols calcaire sur marne assez sensibles au nord sur des versants modérément pentus, et des sols argileux sur marne dans une zone pentue, située à l'est du bassin.

La moitié de la superficie du sous-bassin intermédiaire de Mellegue est à dominante marno argileuse. Les versants pentus sont surtout couverts de sols calcaire sur marne, à l'origine de conditions assez favorables à l'érosion. On note également la présence de sols gypseux et de limons sur des zones plus plates au centre du bassin. Autour de l'oued Chabro, les sols limoneux récents sont également majoritaires. Les marnes sont cependant plus représentées que dans le bassin de Meskiana, en particulier sur plusieurs zones de pente forte (au Nord-Ouest, Sud et Nord-Est du bassin), à hauteur de 30 % pour la dominante argileuse et de 15 % pour la dominante calcaire sur marne.

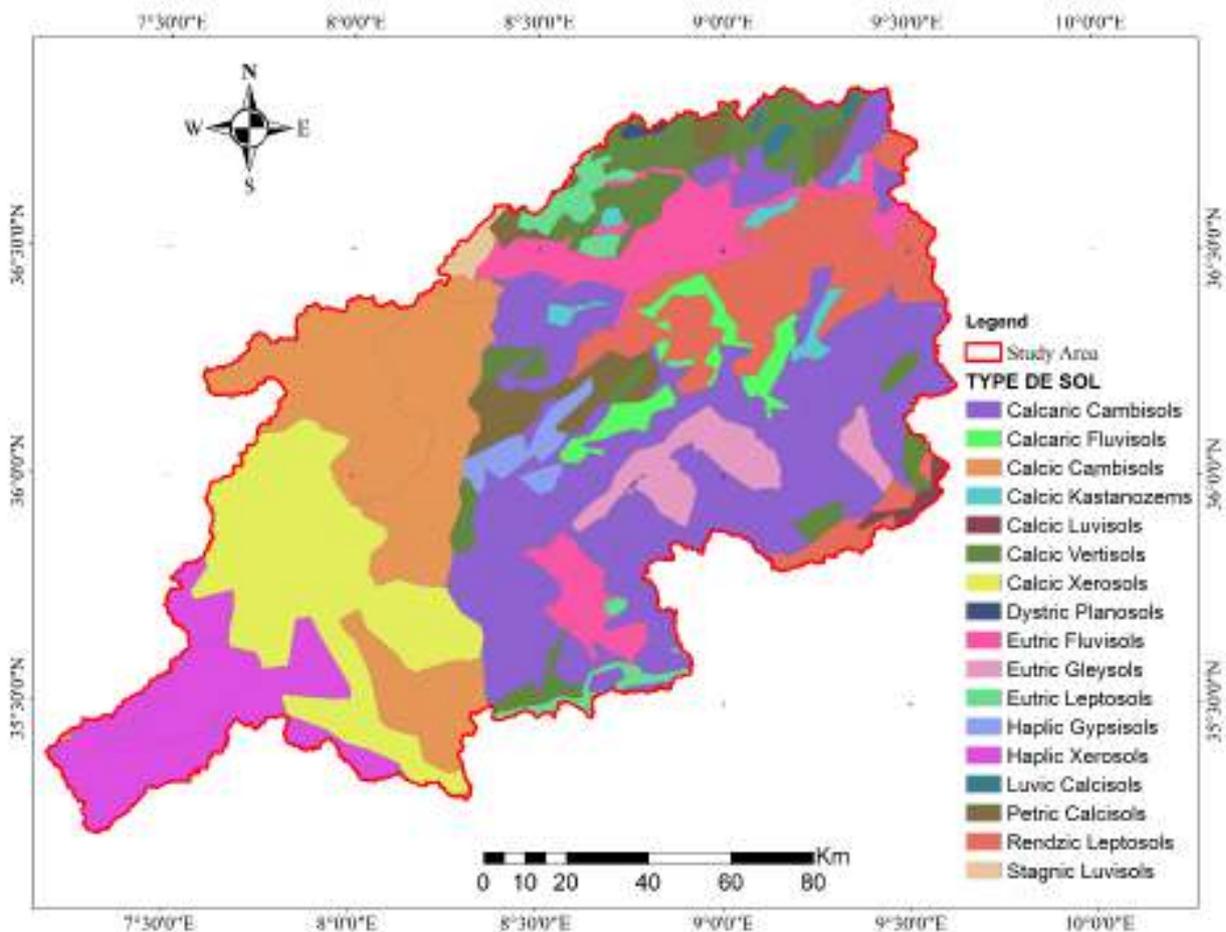


Figure 3.14 Carte des sols de la zone d'étude (HWSO, version 1.2 (FAO / IIASA / ISRIC / ISS-CAS / JRC 2009).

## 11. Le couvert végétal

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin Elmeddahi et al. (2016). Le couvert végétal est indispensable dans l'étude de l'érosion hydrique, il intervient dans le processus de déplacement des particules sous l'effet de ruissellement. C'est un facteur protecteur, il améliore la cohésion et la stabilité de sol et freine le ruissellement, les feuilles des plantes brise l'érosivité de la pluie et minimise son énergie.

La zone d'étude s'étend sur une superficie de 20700 Km<sup>2</sup>, elle est caractérisée par un couvert végétal qui offre une diversité spatiale. Selon la carte de la végétation de la Medjerda extraire à partir de la carte de végétation de l'Atlas National de la Tunisie, révisée par Gammar A.M., 1999, le couvert végétal de la Medjerda est faible. Il est dégradé sur les montagnes et les piémonts, et les plaines sont cultivés. A partir des cartes mentionnées en dessus nous avons distingué les groupes suivants :

### ✚ Les Forêts :

Caractérise les limites nord du bassin versant et les monts de telle, sont généralement des chênes lièges, chêne zen, chêne verts et pins d'Alpes. Ils occupent 7% de la surface totale de la zone d'étude.

### ✚ La végétation des terres cultivées :

Sont généralement des cultures céréalières et fourragères (blés, orges, luzernes, bersem...), elles occupent les terres intérieures de la zone d'étude sur les environs de Baja, Siliana, la région de Meskiana et la moyenne de la Medjerda et les haut plateaux de la Medjerda et du Kef et Ghardimou qui sont caractérisé par la pratique des céréalicultures pluviales.

### ✚ Les périmètres irrigués :

Les périmètres irrigués sont situées le long d'oued Medjerda, et ses principaux affluents, sur les pentes inférieure à 7%, et sur les plaines surtout de le Medjerda et Meskiana. Sont généralement des artichauts, des légumes à racines, des légumes à feuillus, ...

### ✚ Les matorrals :

Sont généralement situés sur les palataux de tell et les monts de Siliana et de Tebessa et en particulier sur la rive droite d'oued Medjerda, sont généralement caractérisés par les chênes kermès, oléastres, lentisques, les caroubiers, les romarins, et la végétation des piémonts.

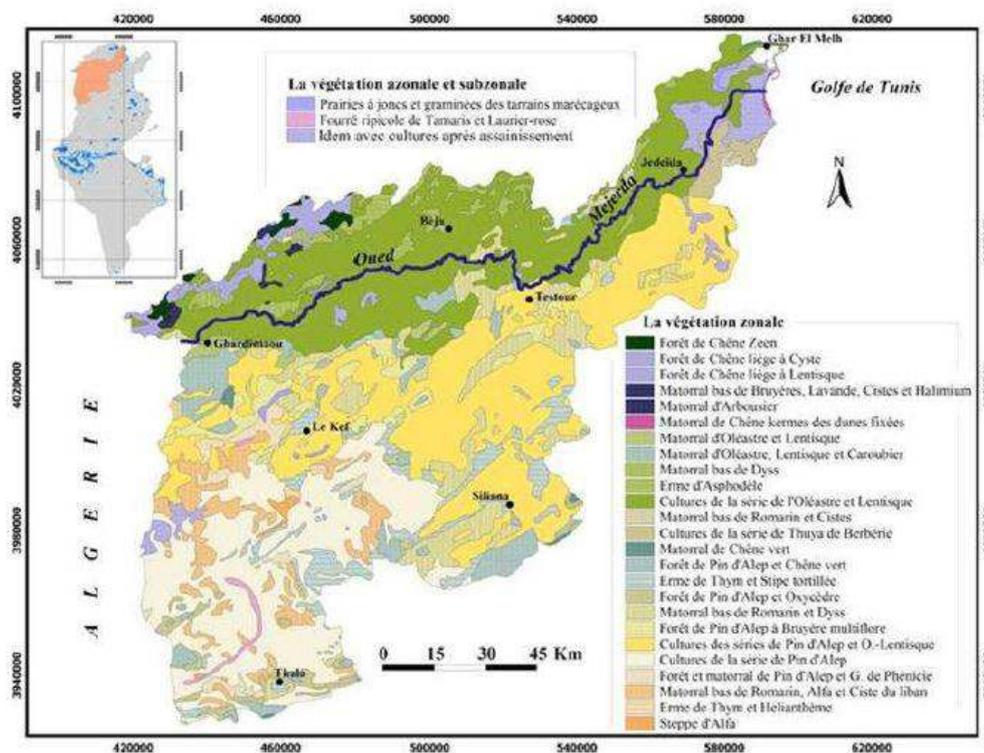


Figure 3.15 Le couvert végétal dans le BV de la Medjerda, d'après la carte de la végétation de la Tunisie (Mjeira, 2015)

Le sous-bassin rattaché aux affluents directs de la retenue d'Oldjet el mellegue est couvert de parcours et de steppes sur près de 70% de sa superficie. Ce type de végétation rase est dispersé sur l'ensemble du bassin, comprenant une petite zone à pente forte. On trouve également 7% de sols nus dégradés. Cependant, la plupart des zones pentues sont couvertes de forêt peu dense à dense (respectivement 14% et 8%). Le bassin de Guetara est constitué de parcours, steppes, et sols nus dans sa quasi-totalité (plus de 90%) et notamment dans plusieurs des zones à pente forte. Le bassin intermédiaire de Mellegue comprend des parcours ou steppes sur un peu moins de la moitié de sa surface et des sols nus ou dégradés (environ 10%). Les cultures Céréalières sont également bien représentées le long de l'oued, de même que la forêt peu dense qui couvre des zones potentiellement sensibles du fait de leur pente. Dans le sous-bassin versant de Meskiana, les cultures céréalières et en partie maraîchères s'étendent sur les sols alluvionnaires bordant le cours d'eau principal, de même que quelques nappes alfatières. Les forêts denses (7%) et les zones de maquis (20%) sont également assez importantes. Cependant, on recense aussi des zones moins végétalisées, comprenant des parcours sur versants pentus à l'ouest et des sols découverts sur pentes fortes au sud et à l'est du bassin. De même que pour Meskiana, le bassin de Chabro est dédié à la culture céréalière sur une bonne partie de sa superficie (environ 20%) et la forêt peu dense couvre près de 30% du territoire. Plusieurs bandes constituées d'alfa bordent également les principaux affluents.

Cependant, de grandes étendues steppiques et de sol nu au sud-ouest (assez en amont du bassin) couvrent des zones à haut risque potentiel du fait des pentes fortes et parfois aussi du contexte pédologique. La distinction entre le nord et le sud du bassin versant est de nouveau à souligner :

les parcours et steppes couvrent de grandes étendues sur une zone située au nord de la confluence entre les oueds Meskiana et Chabro (comprenant les trois sous-bassins les plus nordiques et le nord-ouest du sous-bassin de Meskiana). Plus au sud, l'agriculture est très présente et les massifs forestiers, plus ou moins denses, tapissent la plupart des zones de relief. On trouve cependant aussi de grandes surfaces de sols nus ou à végétation rare, souvent de texture argilo-marneuse et parfois même en pente forte (comme au centre de l'oued Chabro par exemple).

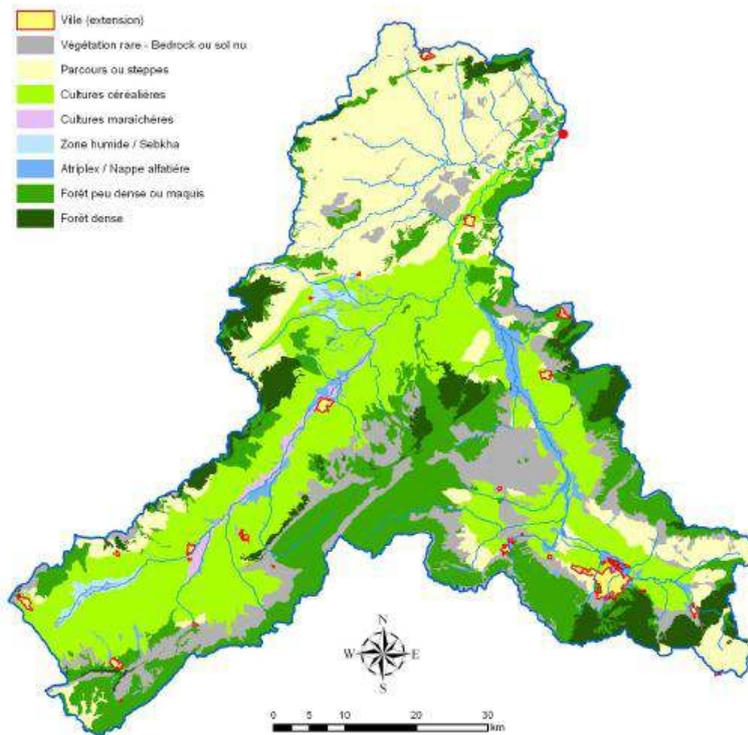


Figure 3.16 Le couvert végétal dans de l'est de Medjerda, d'après la carte de la végétation algérienne (Coyen et Billier, 2011)

## 12. Les aménagements antiérosifs

Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Le bassin versant de Siliana, est aménagé par des banquettes avec et sans plantations, et par des cordons en pierres sèches, les cultures sont surtout céréalières et les agriculteurs n'utilisent pas de pratique culturales. Le bassin d'oued Medjerda est aménagé par des banquettes avec des plantations. Les agricultures utilisent quelque technique antiérosives, les labours sont parallèles aux courbes de niveau. Pour les bassins des oueds de Meskiana et oued Chbro, aucun aménagements antiérosifs a été trouvé, Les cultures sont généralement des céréalières, Les agriculteurs n'utilisent pas des pratiques culturales antiérosives, et les labours sont rarement parallèles aux courbes de niveau. Une carte de localisation des aménagements antiérosifs, établit par la direction générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres agricoles ACTA, état 2014, (figure 12) a été utilisé pour repérer la localisation des aménagements, ainsi que les images de très hautes résolution

de Google Earth. L'état actuel de ces ouvrages a été vérifié par visualisation direct en utilisant les images de haute résolution de Google Earth.

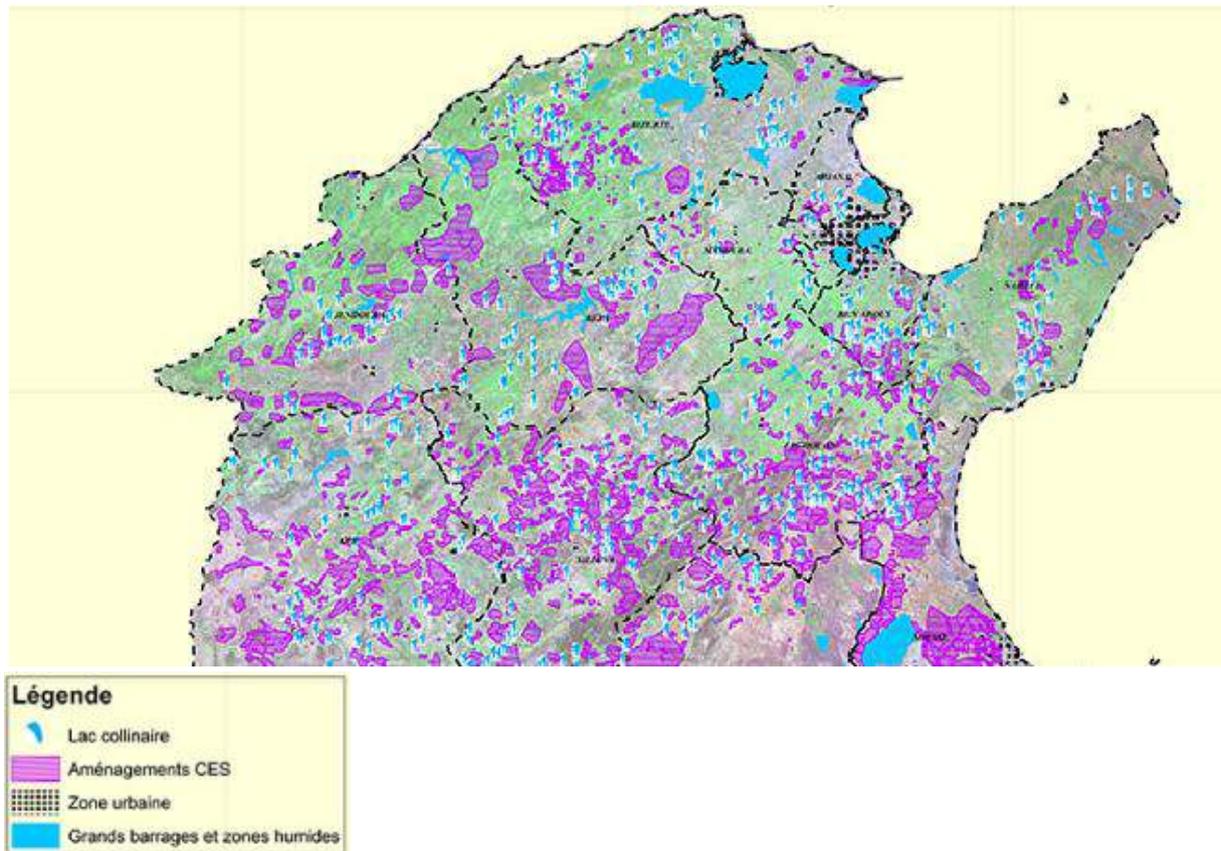


Figure 3.17 Localisation des aménagements CES existants de la Tunisie (Etat 2014)

### 12.1 Vérifications par des images de haute résolution (Source Google Earth)



Figure 3.18 Des images de haute résolution de Google Earth (2018) représentent les aménagements de CES en bon état dans la zone d'étude

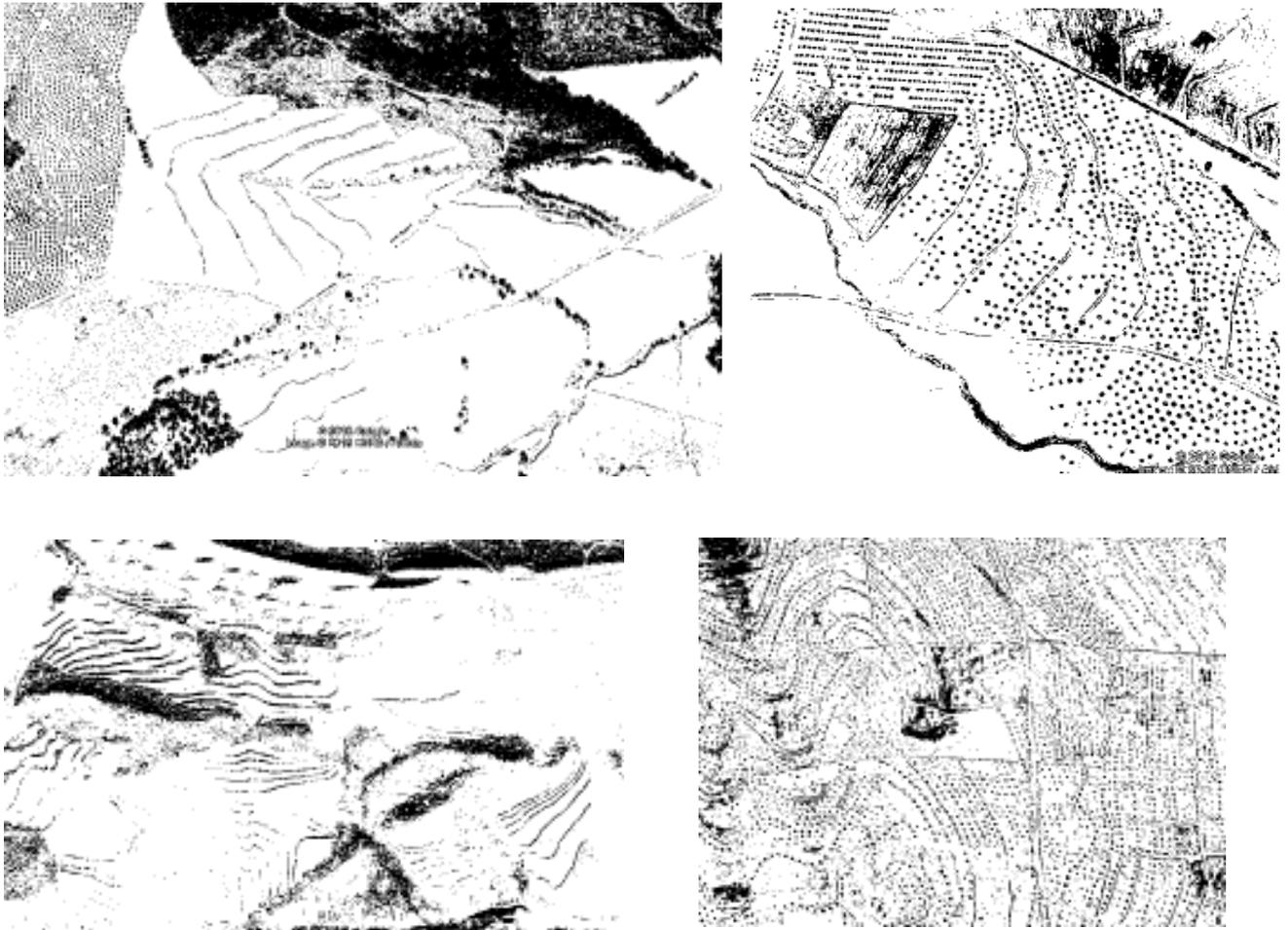


Figure 3.19 Des images de haute résolution de Google Arth (2018) de la zone non aménagée.

### 13. Géologie

#### 13.1 Géologie Historique

L'histoire géologique de la Tunisie Septentrionale dans laquelle s'inscrit le bassin de la Medjerda remonte au Crétacé. Une série de rides profondes orientées E.W. s'amorce à partir du Trias elle s'accroît à l'Aptien au point de former un sillon. Marnes et calcaires s'y accumulent alternativement. Cette structure profonde se maintiendra jusqu'au Lutétien. Au Lutétien supérieur, on assiste à l'émergence d'une zone continentale correspondant approximativement au bassin versant des affluents de rive droite (Mellegue, Tessa, Siliana). A l'emplacement de la Medjerda, il n'y a encore qu'une plateforme continentale où domine une sédimentation détritique : sables, grès ou argile en milieu marin ou lagunaire. La poussée alpine fait émerger cette plateforme vers la fin de l'Oligocène. Au Miocène, le tracé de la Medjerda se précise. L'orogénèse a modifié l'orientation des plis qui est devenue NE-SW. Une série d'accidents tectoniques parallèles (Jauzein 1967) limite des compartiments dans lesquels la Medjerda a tracé son cours. Ce cours subit un changement important après Oued Zarga où la Medjerda passe d'un compartiment à un autre à la faveur d'une capture possible à la fin du Villafranchien. (Fournet 1969). A partir de cette période, le réseau hydrographique de la Tunisie du Nord peut "être considéré comme définitivement tracé et ne subira que des retouches mineures.

Les travaux de (David 1956 ; Rouvier 1977 ; Castany 1954 ; Gottis et Sainfeld 1955 ; Guellala et al. 2008) dans leurs études géologique des monts de la haute Medjerda, ont mis en évidence que cette région est essentiellement caractérisée par des formations sédimentaires dont l'âge le plus ancien est le Trias jusqu'au Quaternaire, constituée généralement par des calcaires, des grés, des marnes, des cailloutis et des alluvions.

### 13.2 Géologie Structurale

La structure de la Tunisie Septentrionale, pour la partie qui nous intéresse, comprend schématiquement du Nord au Sud (Figure 3.20) :

Une zone de nappe de charriage constituée par un flysch d'âge oligocène. Les plis orientés NE-SW font suite aux reliefs de l'Atlas tellien. Cette zone n'occupe qu'une faible portion du bassin versant de la Medjerda mais par son relief relativement élevé, par son climat plus pluvieux, elle joue un rôle important dans l'alimentation en eau des régions situées en aval.

Une zone intermédiaire dite des "écaillés" constituée par des bancs de calcaire éocène se chevauchant et flottant sur une masse plastique d'argiles et de marnes. Une poussée tangentielle consécutive à l'orogénèse alpine, appliquée sur les deux couches de compétence différente ; a brisé la plus rigide. Le réseau hydrographique (Oueds Béja, et Zarga) s'est établi sur les marnes plus tendres.

Une zone de hautes plaines, dernier prolongement en Tunisie des hauts plateaux algériens affaissés au cours du quaternaire dans lesquels la Medjerda a établi son cours supérieur. Une zone à plis de revêtement dû au glissement sur le socle d'une masse importante de terrains secondaires.

La "Dorsale" proprement dite véritable arête continue formée par l'alignement des massifs jurassiques : Bou Kornine, Zaghouan Fkirine. Zaress que prolonge la série des grands anticlinaux crétacés Jebels Bargou et Belouta, Forêt de la Kessera. L'ensemble est limité par un grand accident : la faille de Zaghouan qui sépare la Tunisie Septentrionale de la Tunisie Centrale. La Dorsale constitue une ligne de séparation des eaux entre l'Oued Medjerda (par son affluent, Oued Siliana et Oued Miliane) pour la Tunisie du Nord d'une part et l'Oued marguellig d'autre part qui se dirige vers la Tunisie Centrale. Chacune des cinq zones décrites ci-dessus est séparée de sa voisine par un accident tectonique (Jauzein 1967). Ce sont donc bien des unités structurales distinctes.

Au S W, la zone présente généralement une structure simple. Cette structure dite Aurassienne, elle est composée d'une série de plis synclinaux larges et d'anticlinaux plus étroits datant du Crétacé. Leur couverture et généralement mince, elle présente une épaisseur de quelques milliers de mètres au maximum (David 1956). Au nord, vers le Tell, les plis adoptent une orientation Ouest, Cette orientation dite Numidienne est très visible, surtout dans la zone Nord-ouest. Cette compression latérale a réduit la taille de l'ensemble des plis en donnant des synclinaux couchés, dans la plupart des cas failles.

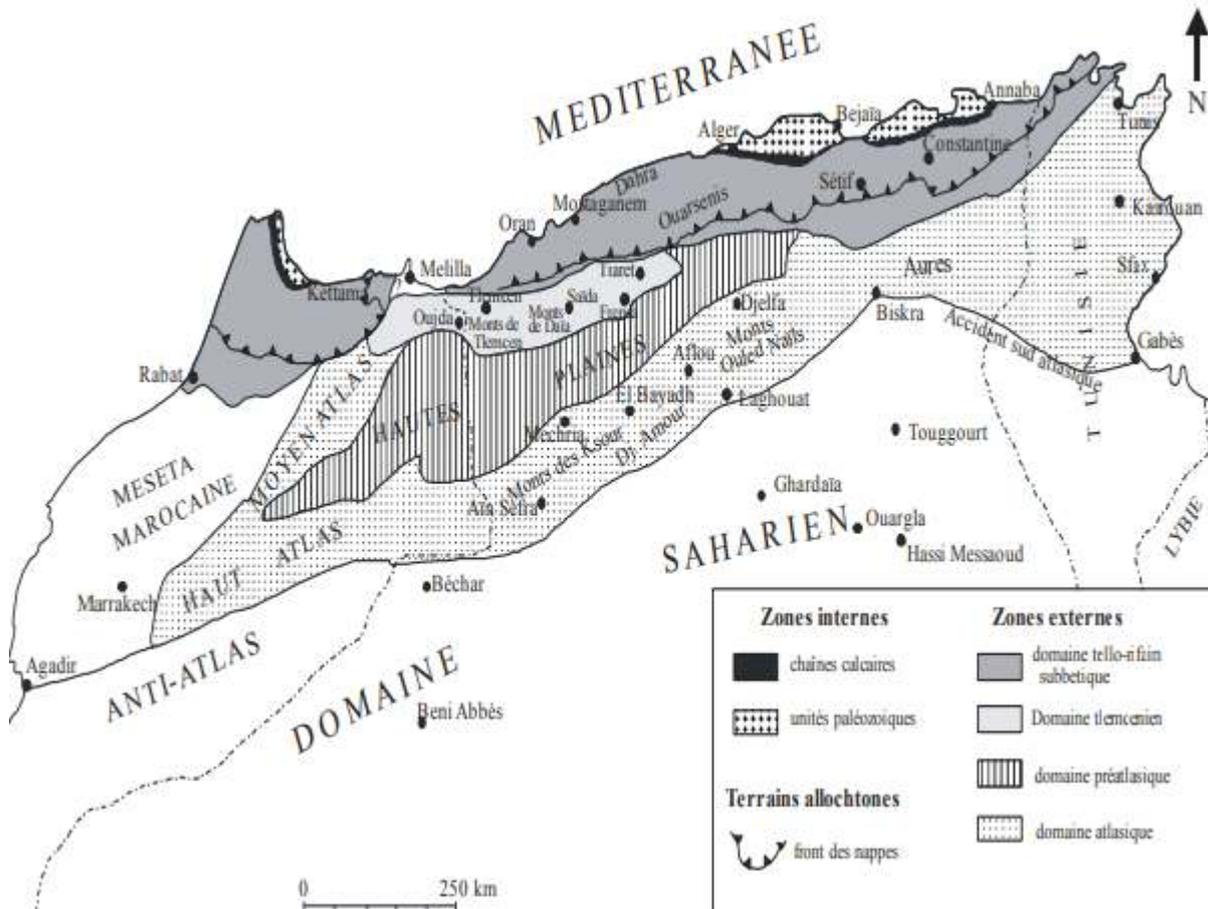
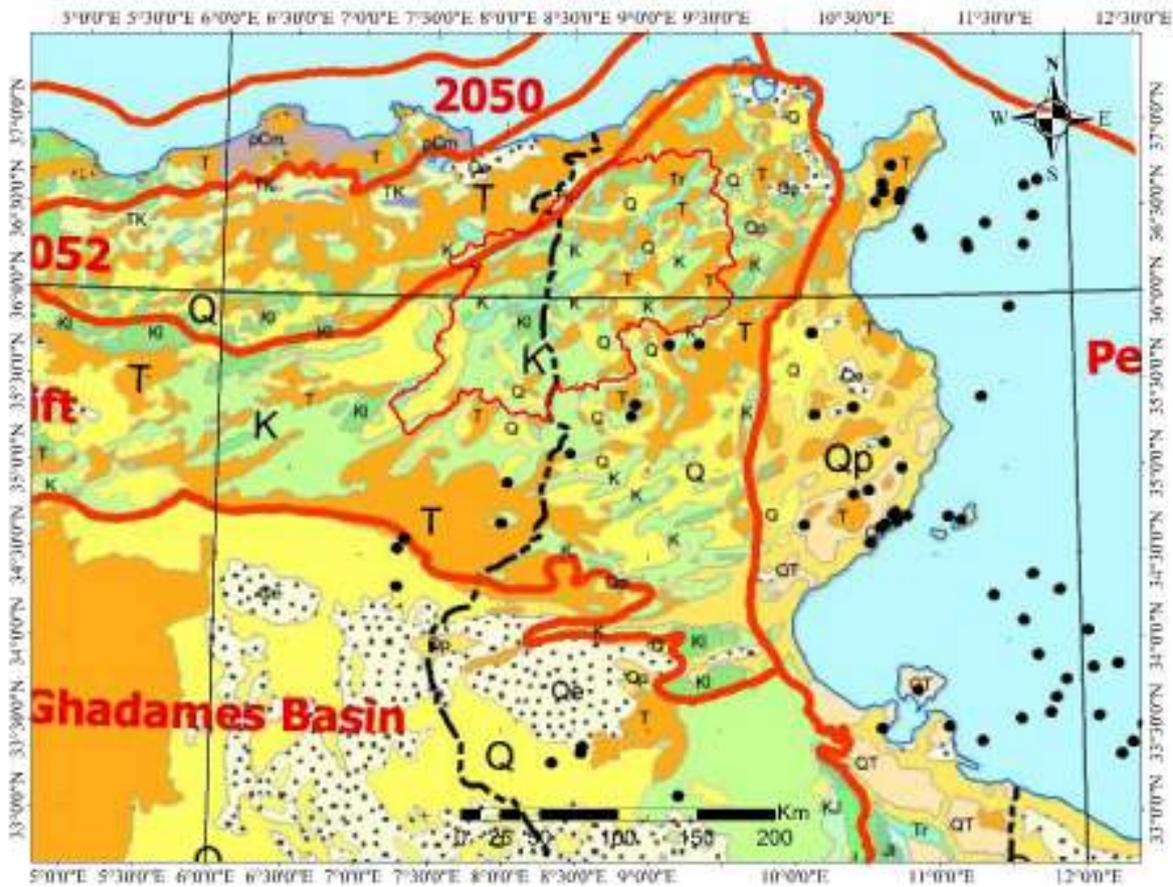


Figure 3.20 Schéma structural de la chaîne alpine de la méditerranée occidentale (Benest 1985)

On remarque donc un passage progressif de la structure Atlasique à la structure Tellienne sans différence fondamentale (Gottis et Sainfeld 1955 ; David 1956). La nuance réside dans les efforts tangentiels générateurs des décollements de la couverture se produisant à la base du système Numidien entre le Crétacé et le Tertiaire, qu'a connu la zone Tellienne. Aussi, la présence des fractures transversales responsables des bassins d'effondrement (Taoura), les plis Telliens ont subi une légère torsion vers le Nord de la zone (O.R.G.M 2002). La mise en place de cette structure s'est faite comme pour toute la chaîne montagneuse Nord orientale au cours de nombreuses phases orogéniques (David 1956).



**EXPLANATION**

Geologic Province Outline	Lower Cretaceous	Tertiary extrusive and intrusive rock
Geologic Province Name	Cretaceous and Jurassic	Mesozoic extrusive and intrusive rock
Geologic Province Code	Jurassic	Mesozoic-Paleozoic extrusive and intrusive rock
Center of Oil or Gas Field	Lower Jurassic	Paleozoic extrusive and intrusive rock
Country Boundary	Jurassic and Triassic	Kimberlite
Quaternary (undivided)	Triassic	Subsurface salt dome
Holocene	Lower Triassic	Internal Water Body
Pleistocene	Mesozoic and Paleozoic	SEA
Cenozoic	Cretaceous through Carboniferous	Area outside of African Continent
Tertiary	Jurassic through Carboniferous	
Mesozoic	Paleozoic	
Tertiary and Cretaceous	Permian	
Cretaceous	Triassic and Permian	
Carboniferous		
Carboniferous and Devonian		
Devonian		
Upper and Middle Devonian		
Devonian and Silurian		
Silurian		
Silurian-Ordovician		
Ordovician		
Ordovician-Cambrian		
Cambrian		
Precambrian (undivided)		
Paleozoic-Precambrian		
Quaternary extrusive and intrusive rocks		

Figure 3.21 Extrait de la carte Map showing geology, oil and gas fields, and geologic provinces of Africa (Digitally compiled by Feliks M. Persits, Thomas S. Ahlbrandt, Michele L. Tuttle, Ronald R. Charpentier, Michael E. Brownfield, and Kenneth I. Takahashi 2011)

### 14. Caractéristique socioéconomique

Le bassin versant de la zone d'étude recouvre 4 wilayas algériennes qui sont : SOUKAHRES, TEBESSA, KHANCHELA, ET OUMBOUAGHI, et six wilayas tunisiennes qui sont : BEJA, KESSRINE, JANDOUBA, KEF, BIZERT, SILAIANA. La zone d'étude recouvre une superficie de 20700 km<sup>2</sup>, la wilaya de Kef représente 23,29% de cette superficie, suivi par la wilaya de Tébessa qui occupe 16,81% de la superficie totale, la wilaya de Siliana et la wilaya de Souk Ahres occupent 13,7% et 13,5% respectivement. Par contre la wilaya de Jendouba et la wilaya de Beja recouvrent 10,5% et 9,5% respectivement. Des petites parties sont occupées par les wilayas de Kasserine (5% de la superficie totale, Oum El Bouaghi (4% de la superficie totale), et Khanchela (2% de la superficie totale et Bizert) (0,5% de la superficie totale). La population de la zone d'étude est estimée à 1929282 habitants, 11,82% de cette population réside dans la wilaya de Beja et 12,6 dans la wilaya de kef. La plus importante partie de la population réside dans les wilayas de Tébessa et Souk Ahres. Le tableau et les figures ci-après représentent les données de la population de la région selon les statistiques de 2014 fournis par l'institut nationale des statistiques de la Tunisie (INS) et office national des statistiques algérien (ONS).

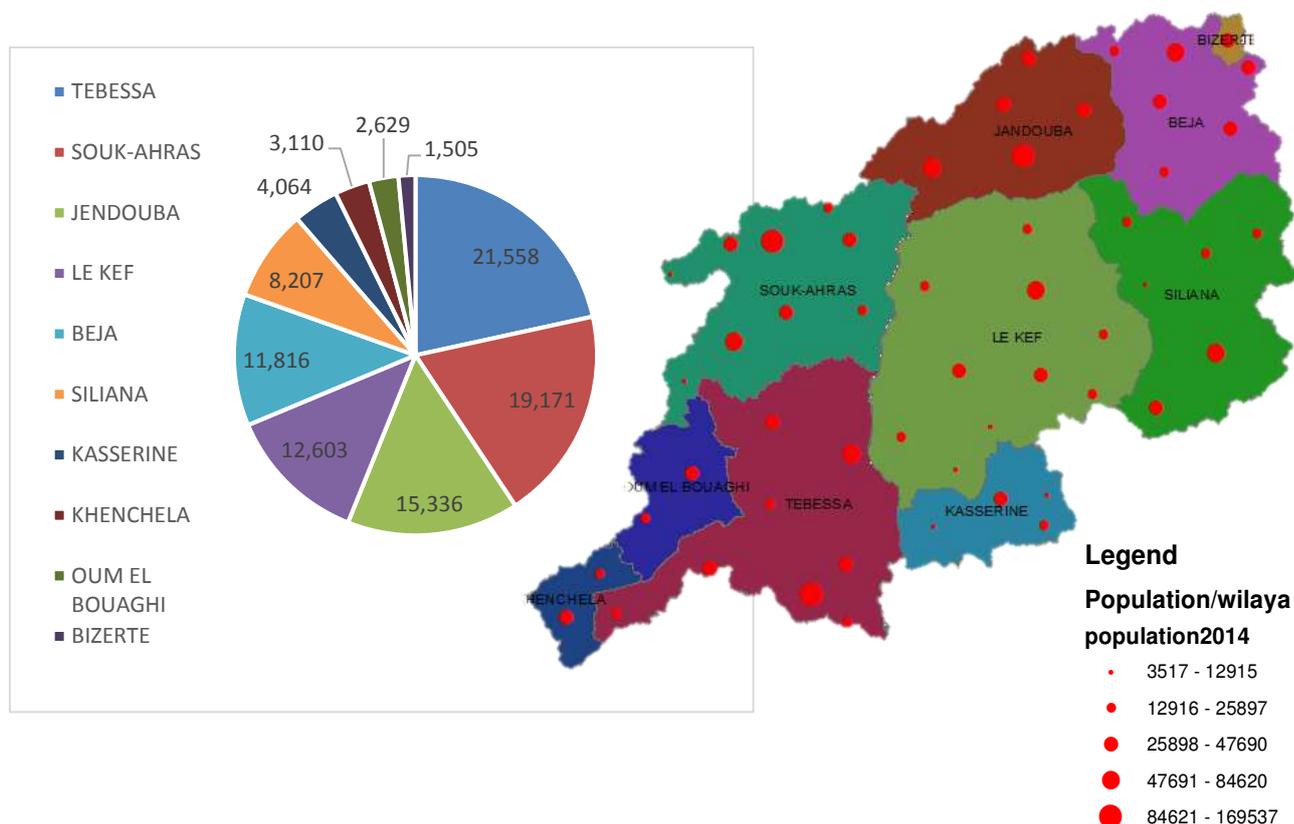


Figure 3.22 Répartition de la population de la zone d'étude sur les wilayas.

Tableau 3.7 La population de la région d'étude selon les statistiques de 2014

N°	Départements (Daira)	Gouv (Wilaya)	Total /Wilaya	%	N°	Départements (Daira)	Gouv (Wilaya)	Total /Wilaya	%		
61	Beja Nord	Beja	227963	11,82	75	Nebeur	Le Kef	243156	12,60		
63	Amdoun	Beja			77	Sakiet Sidi Youssef	Le Kef				
64	Mejez El Bab	Beja			79	Le Kef	Le Kef				
66	Beja Sud	Beja			81	Sers	Le Kef				
67	Testour	Beja			83	Tajerouine	Le Kef				
72	Teboursouk	Beja			84	Dahmani	Le Kef				
59	Djoumine	Bizerte	29029	1,50	86	Ksour	Le Kef			50724	2,63
62	Ain Draham	Jendouba	295877	15,34	87	Kalaat Senan	Le Kef				
65	Bou Salem	Jendouba			90	Jerissa	Le Kef				
68	Fernena	Jendouba			92	Kalaat Khasba	Le Kef				
70	Ghardimaoui	Jendouba			35	Meskiana	O Bouaghi				
71	Jendouba	Jendouba			41	Dhalaa	O Bouaghi				
93	Thala	Kasserine	78398	4,06	73	Bou Arada	Siliana	158343	8,21		
94	Jedliane	Kasserine			74	Krib	Siliana				
95	Haidra	Kasserine			76	Gaafour	Siliana				
96	El Aioun	Kasserine			78	Sidibourouis	Siliana				
44	Ain Touila	Khenchela	60006	3,11	85	Siliana	Siliana			369867	19,17
56	Ouled Rechache	Khenchela			88	Makthar	Siliana				
75	Nebeur	Le Kef	243156	12,60	2	Mechroha	Souk-Ahras				
77	Sakiet Sidi Youssef	Le Kef			4	Ouled Driss	Souk-Ahras				
79	Le Kef	Le Kef			11	Souk-Ahras	Souk-Ahras				
81	Sers	Le Kef			14	Merahna	Souk-Ahras				
83	Tajerouine	Le Kef			15	Haddada	Souk-Ahras				
84	Dahmani	Le Kef			16	Khemissa-Sedrata	Souk-Ahras				
86	Ksour	Le Kef			18	Taoura	Souk-Ahras				
87	Kalaat Senan	Le Kef			22	Mdaourouche	Souk-Ahras				
90	Jerissa	Le Kef			23	Oum El Adhaim	Souk-Ahras				
92	Kalaat Khasba	Le Kef			25	El Ouenza	Tebessa				
35	Meskiana	Oum Bouaghi			50724	2,63	27	El Aouinet	Tebessa	415919	21,56
41	Dhalaa	Oum Bouaghi					34	Morsot	Tebessa		
73	Bou Arada	Siliana	158343	8,21	42	El Kouif	Tebessa				
74	Krib	Siliana			46	Bir Mokadem	Tebessa				
76	Gaafour	Siliana			48	Tebessa	Tebessa				
78	Sidibourouis	Siliana			52	El Ma Labiad	Tebessa				
85	Siliana	Siliana			57	El Oglia	Tebessa				
88	Makthar	Siliana									

## 15. Elaboration des données nécessaires pour cette étude

Avant de commencer le travail il faut de tout d'abord élaboré une banque de données nécessaires pour réaliser cette étude, notre objectif est d'utiliser les images satellitaires pour localiser les zones vulnérables vis-à-vis l'érosion hydrique, donc la télédétection est la source de base nécessaire à l'opération.

Le choix d'une unité spatiale appropriée dépend de plusieurs facteurs, tel que le type d'information requis, le phénomène à étudier, la qualité et la résolution de l'image, l'échelle d'investigation, la disponibilité des outils d'analyse de l'information (Daoudi et al, 2009).

### 15.1 Le modèle numérique de terrain MNT

Un modèle numérique de terrain (MNT ; en anglais, digital elevation model ou DEM) est une représentation de la topographie d'une zone terrestre créée à partir des données d'altitude du terrain sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur. Le MNT ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels que les plantes et les bâtiments. Le MNT est l'entrée principale pour le calcul de la longueur de la pente et le gradient de la pente (facteur LS).

Le modèle numérique de la zone d'étude est généré à partir des données numériques fournies gratuitement par la NASA (USGS). Les données téléchargées en format SRTM (Schuttle radar Topography Mission) avec une résolution de 30 m. sont importées dans un SIG (Arcgis 10.5) afin de les utiliser à partir des échantillons de points relevés de deux cartes topographiques de l'Algérie et la Tunisie du nord.

### 15.2 Données de la télédétection (Images satellitaires)

Notre objectif est de produire une carte d'érosion hydrique en utilisant la télédétection et le modèle RUSLE, pour le faire, il est indispensable de choisir un satellite dont les capteurs disposent de plusieurs canaux dans le visible. Les images fournies par le satellite LANDSAT 8 en L1 sont gratuites avec une haute résolution (30m). Généralement les parcelles situées sur la zone d'étude dépassent les 50m en largeur, donc la taille des pixels utilisés est valable pour détecter l'occupation du sol (végétation, eau, sol nu, .....).

Le choix de résolution des capteurs dépend de l'objectif visé : la détection des objets peut être effectuée par des pixels dont la taille est inférieure à celle de l'objet, l'identification est effectuée par des pixels de même taille que l'objet, et l'analyse des images nécessite que l'objet soit couvert par plusieurs pixels. (Toumi, 2013).

Pour les besoins de l'étude, des cartes d'occupation du sol de la zone d'étude sont réalisées pour les années suivantes : 1994, 2004, 2010 et 2017. Elles sont obtenues à partir de bases de données multi-sources :

- ✚ Des campagnes de terrain de 2017 et 2019, dans lesquelles les sites d'entraînement ont été identifiés sur lesquels s'appuyer pour classer les scènes captées en 2017 et 2018, ainsi que les sites utilisés pour vérifier la validité des résultats, notamment lors de l'utilisation de la matrice de confusion. Les sites choisis représentent les différentes classes d'occupation du

sol. Ils ont servi à établir le fichier (ROI), qui a servi à la classification des scènes ainsi qu'à la comparaison avec les résultats de la classification à l'aide de la matrice de confusion.

- ✚ Extraits d'images de Très haute résolution de Google Earth (année 1994, 2004).
- ✚ Des Scènes Landsat (L7 ETM+, OLI8; TM5) réalisées pendant des périodes sèches (juillet) et humides (Avril) qui ont été téléchargé gratuitement à partir du site Web <https://earthexplorer.usgs.gov/> de l'USGS . Les images ont été choisies sur la base des critères suivants (Toumi et al.2013) :
  - La période entre la prise des deux scènes couvrant la zone d'étude est la plus courte possible pour éviter les anomalies pouvant survenir du fait du système de capture lors de l'opération de balayage.
  - Les scènes couvrant la zone d'étude sont dépouillées de nuages et de taches.

Le mois de juillet a été choisi car il représente une période sèche où le couvert végétal atteint sa densité la plus faible, ( $NDVI_{min}$ ) ; il représente également la période précédant les premières pluies d'automne, qui sont considérées comme très érosives (Meddi et al. 2016).

Pour étudier la variation saisonnière de l'occupation des sols, une classification supervisée de deux images a été réalisée, l'une capturée en période humide (Avril 2018), et l'autre en période sèche (Juillet 2017). Les deux images ont été obtenues à deux périodes différentes ce qui permet de distinguer facilement les types d'occupation du sol. De plus, le mois d'avril a été retenu car il représente une période humide pendant laquelle le couvert végétal atteint sa densité maximale ( $NDVI_{max}$ ).

Les années 1994, 2004, 2010, 2017 ont été choisi selon des critères de chaque période, avec un pas de temps de 10 ans, prenant en considération la deuxième stratégie de la de conservation des eaux et des sols (1991-2004), les périodes sèches avec et sans incendies des forêts (2004,2017), l'amélioration des activités agricoles et de mise en eaux des périmètres irrigués, l'arrêt des opérations de reboisement et les mesures de CES.

La région d'étude se situent entre 02 scènes, un mosaïque des scènes a été procédé. Le tableau ci-après représente les caractéristiques des images

Tableau 3.8 Caractéristique des données satellitaire utilisées dans cette étude

Periode	Acquisition	Sensor	Range (um)	Bands	Path/row	Résolution
<b>Humide</b>	02/04/2018	OLI	0.452–0.879	2,3,4,5	191-192/34-35	30m
	23/07/1994	TM5	0.45–0.90	1,2,3,4	191-192/34-35	
<b>Seche</b>	17/07/2004	TM5	0.45–0.90	1,2,3,4	191-192/34-35	
	22/07/2010	ETM+	0.45–0.90	1,2,3,4	191-192/34-35	
	27/07/2017	OLI	0.452–0.879	2,3,4,5	191-192/34-35	

Chaque image téléchargée est accompagnées d'un fichier métadonnées qui montre tous les informations nécessaires tel que la date de prise, la position géographique « les coordonnées », le système de projection, les paramètres de calage, et d'autres informations.

L'intérêt de l'utilisation des images multi spectrales (multi bandes) est de faciliter la séparation des objets ayant des signatures spectrales différentes grâce à l'utilisation des différentes longueurs d'onde qui offre la possibilité pour séparer les objets plutôt que d'utiliser une seule bande avec une seule longueur d'onde. La figure 2 montre un schéma explicatif sur la séparation des deux objets sur un plan de deux bandes spectrales.

Comme elle montre la figure 2, il est difficile de distinguer entre les deux types d'objets dans le premier cas (un seul graphe dans une seule dimension). Tandis que les deux objets peuvent être facilement séparés dans le deuxième cas.

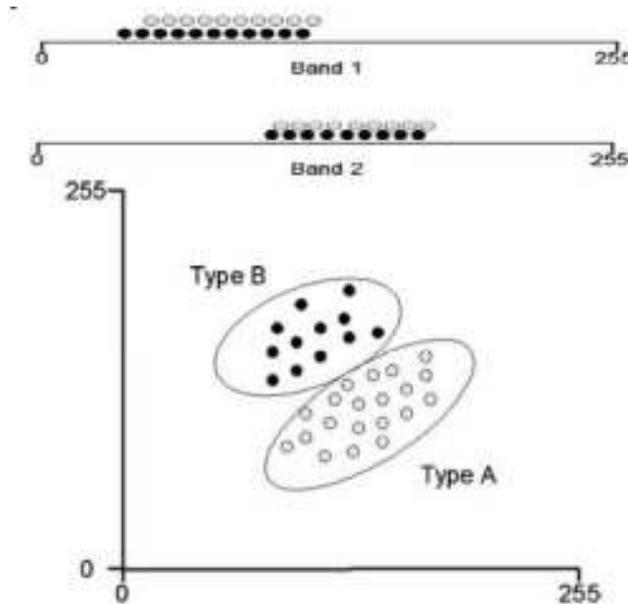


Figure 3.23 schéma explicatif sur la séparation des deux objets sur un plan de deux bandes spectrales (source : Toumi et al. 2013).

### 15.3 Traitement des images satellitaires

Le traitement des images satellitaires est l'ensemble des opérations effectuées sur les images dans le but d'extraire des informations utiles pour la compréhension et l'explication et la modélisation d'un phénomène se déroulant sur la terre terrestre (Toumi, 2013). Les fonctions de traitement des images sont regroupées en 4 catégories principales :

1. Prétraitement de l'image
2. Rehaussement de l'image
3. Transformation de l'image
4. Classification et analyse de l'image

Le tableau 3.9 présente les caractéristiques spectrales des images utilisées.

Tableau 3.9 les caractéristiques spectrales des images utilisées

N bandes	Nature	Longueur d'onde	Résolution
1	Bande côtière	0,485	30m
2	Bande bleu	0,560	30m
3	Bande Vert	0,660	30m
4	Bande Rouge	0,830	30m
5	Bande Proche Infrarouge	1,65	30m
6	Bande Infrarouge moyen	11,45	30m
7	Bande Infrarouge thermique	2,22	30m

Les images utilisées ce sont des images satellitaires multi bandes issu des radiomètres multi spectrale « Oli ; ETM+ ; TM5 » de satellite Landsat-8 et 7 et 5, d'une résolution de 30m pour les bandes du visible et de l'infrarouge et de 15 m pour la bande panchromatique dans le cas de satellite Landsat 8. Les images ont été téléchargées sous le format TIFF (Tagged image file format) et projetées en UTM zone 32N en utilisant le WGS 1984.

### 15.3.1 Les prétraitements des images

Avant d'exploiter les images satellitaires et d'extraire ces informations utiles, un ensemble d'opérations sont nécessaires, ce sont des opérations de traitements primaire, appelés « les prétraitements ».

Les opérations de prétraitement se divisent en corrections radiométriques et en corrections géométriques. Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.

#### 15.3.1.1 Calibration radiométrique et Correction géométrique et atmosphérique.

Le traitement numérique de l'image est l'ensemble des techniques appliquées aux images numériques dans le but d'améliorer la qualité visuelle ou de faciliter la recherche et l'extraction d'information. La correction géométrique des images satellitaire est très importante en télédétection, Ces corrections nous donnent la possibilité de faire une comparaison entre plusieurs scènes positionnées dans un même référentiel géographique, ainsi que leur superposition à la base de données ortho-photos ou à d'autres sources de données.

Pour faire une correction géométrique, il faut créer tout d'abord un fichier de référence, soit par des objets (schématisés par des lignes et des polygones), soit par des points topographiques (X, Y, Z), Soit les deux à la fois. Tous les scènes fournit par USGS sont traités géométriquement et radiométriquement avec un niveau standard (L1, correspond à des données ortho-rectifiées avec points d'appuis, exprimées en réflectances au sommet de l'atmosphère) en intégrant des points de contrôle tout en utilisant un modèle numérique d'élévation (DEM).

Le radiomètre multi spectral Oli (Operational Land Imager) acquiert des images dans neuf bandes spectrales allant du visible au moyen infra-rouge. Les 7 premiers bandes spectrales ont les mêmes caractéristique que les bandes de ETM+ de Landsat 7, Deux canaux supplémentaires ont été ajoutés, destinés principalement à la correction atmosphérique (canal bleu à 440 nm) et à la détection des nuages (1380 nm). Enfin, les bandes dans l'infrarouge thermique sont maintenant confiées à l'instrument TIRS. La technologie utilisée sur OLI est radicalement différente de celle des autres radiomètres. Le scanner à miroir oscillant (whiskbroom) est remplacé par une barrette fixe de détecteurs qui capte les données sur toute la largeur du champ optique. L'instrument Oli utilise une technologie testée à bord du satellite expérimental EO-1. La résolution optique est de 30 mètres sur toutes les bandes sauf sur la bande panchromatique (15 m). Une vérification de la correction géométrique a été effectuée par visualisation et par RMS (Root Mean square). Bien que les images utilisées soient déjà corrigé géométriquement, une calibration radiométrique est nécessaire, cette calibration transforme les mesures de luminances relatives, qui sont codés en tant que compte numérique (CN) en 8 bits (0 – 255), en luminance physique avec l'application des équations de calibration :

$$L = a * CN + b \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

Donc les valeurs de luminance CN a été converti en réflectance, nous avons utilisé le logiciel ENVI, Ce dernier peut facilement convertir les donnes en utilisant le module calibration automatique. Les valeurs obtenues après la calibration sont des valeurs de luminances au-dessus l'atmosphère TOA. Et puisque on a besoin des valeurs physique de la réflectance de surface, et pour assurer la reproductibilité de méthodes d'identification ou de classification, il est donc indispensable de faire une correction atmosphérique, et réduire l'effet des gaz et des vapeurs d'eau et d'aérosols sur la réflectance. Pour cela nous avons utilisé le module correction atmosphérique de l'ENVI pour avoir des images satellitaire calibré et traités, avec une meilleure signature spectrale.

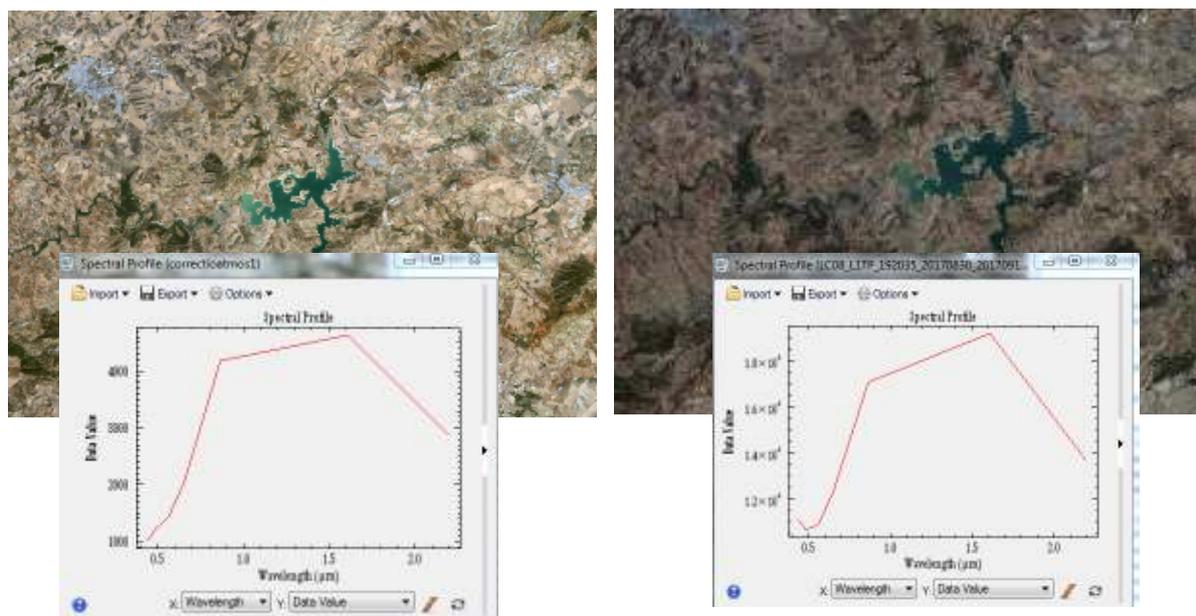


Figure 3.24 Des images satellitaires de la zone d'étude et signatures spectrale avant et après la correction atmosphérique

15.3.1.2 Amélioration du contraste des images satellitaire « *stretching* »

La visualisation est très importante pour extraire les informations contenues dans les images. Une image de bonne qualité est celle dont l'apparence permette à notre system visuel d'identifier le maximum d'informations. L'objectif est d'améliorer la qualité visuelle des images utilisées, pour cela nous avons utilisé le module « stretching ». Un meilleur stretching est obtenu lorsque les pixels sont repartis d'une manière gaussienne sur l'axe des abscisses (Labiedh 2013). Nous allons faire un stretching sur les trois bandes des images de la zone d'étude (RVB).

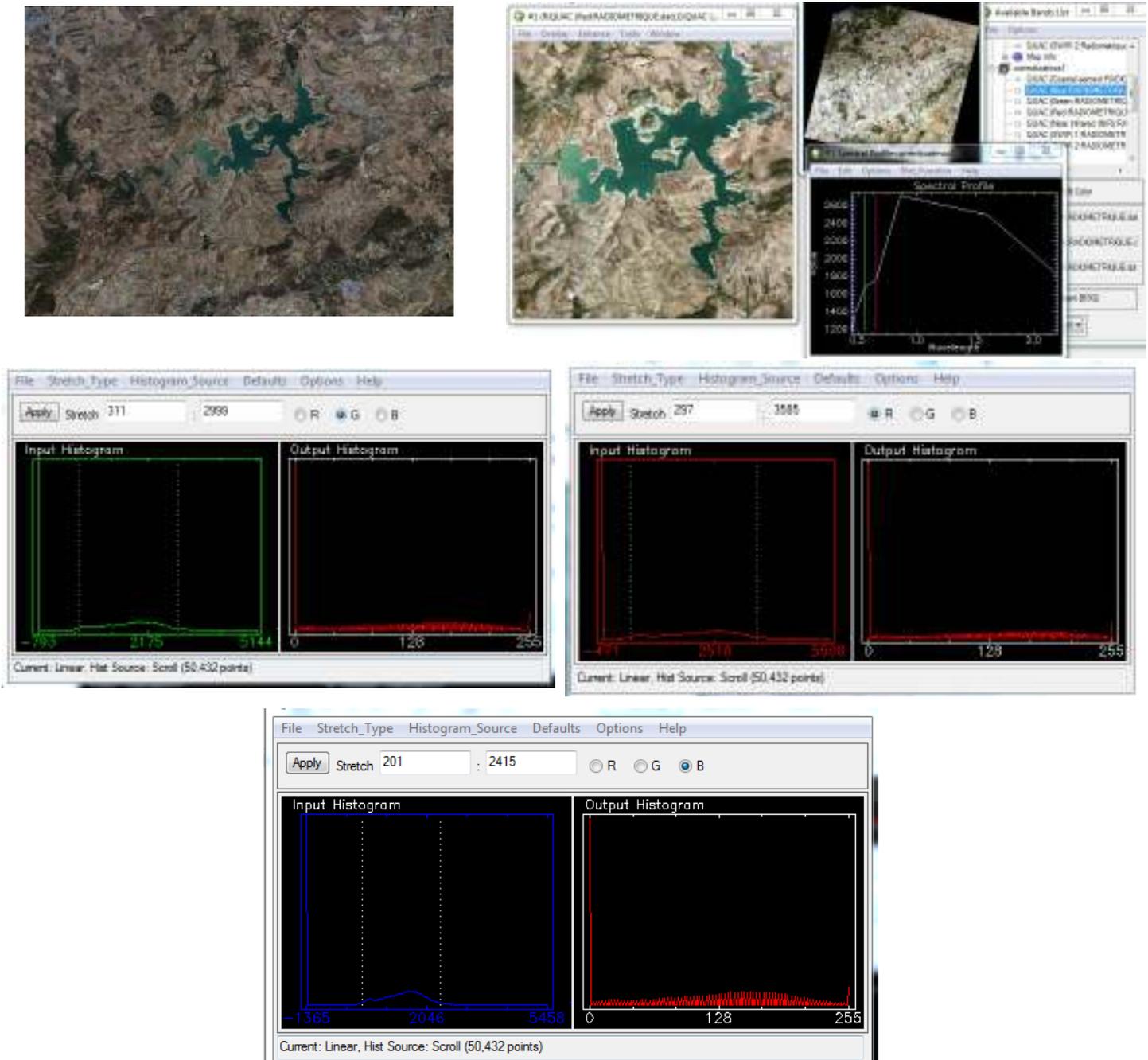


Figure 3.25 Amélioration du contraste des images satellitaire « stretching »

## 15.4 Les images non-satellitaires

### 15.4.1 Les cartes et les plans d'aménagements

Les cartes et les plans représentent un outil très important pour notre étude, Afin de construire une base de données multi-thèmes, ces documents ont été géo référencés avec le logiciel « ArcGis », selon le système de géo référencement WGS84.

### 15.4.2 Les images de Google Earth

Pour interpréter le contenu des images satellitaires téléchargées et vérifier l'état des aménagements CES implantés sur les sites, et vérifier les résultats de la densité de la végétation détectées par les classifications effectués, nous avons utilisé des images de hautes résolutions de Google Earth.

## 15.5 Acquisition de données terrain

L'acquisition de données de terrain est nécessaire pour réaliser une classification supervisée des images de télédétection. Pendant la préparation nous avons programmé plusieurs sorties sur terrain, nous avons visité les champs au voisinage du barrage Sidi Salem, les terrains agricoles à Souk-Ahras et à oued Mellegue. L'objectif de ces sortie est de :

- ✚ Déterminer des zones d'apprentissage et de teste (vérification)
- ✚ Un contact direct avec le terrain, et connaissance de quelque mode d'occupation du sol et pratiques agricole utilisés par les agricultures.
- ✚ Vérification de quelque aménagement CES détecté par les images de hautes résolutions de Google Earth, ou par les carte des aménagements réalisé par les services concernées.

Une sortie sur terrain a été effectuée après la réalisation de la carte de vulnérabilité (2018) pour vérifie les résultats obtenu et les validés. Plusieurs images de bonnes qualité a été prises dans l'objectif de disposer d'un référentiel visuel. Une enquête socioéconomique couvrant une partie de la zone d'étude (les deux bassins de oued Ranem et oued Djerda) a été effectué à l'aide d'un groupe bénévole, nous avons rapproché aux agricultures afin de connaître les principales activités et pratiques agricole utilisées, ces informations sont utilisées pour étudier l'effet sur l'érosion hydrique. La préparation de cette enquête repose sur les caractéristiques sociodémographiques et les propriétés et les pratiques agricoles, les caractéristiques de l'habitation et les aménagements existés. La figure 25 représente la localisation des sites touchés par l'enquête.

D'après les résultats de l'enquêtes nous avons remarqué que :

❖ Pour le bassin d'oued djedra :

- ✚ La ville Ain synour et la seule d'importance et les autres sont généralement des Douares et des Décheras.
- ✚ 33% de la superficie totale est occupé par les trains agricoles, 20% sont des céréalicultures et les cultures fourragères et 13% sont des cultures maraichères
- ✚ La population la plus oriente vers l'activité agricole est celle de ouled Driss avec un taux de 28%. Et la moins présente dans l'activité agricole est celle de souk ahres avec seulement 4%.

- ✚ Les agricultures utilisent généralement des méthodes traditionnelles, le travail du sol est dans le sens de la pente, les méthodes d'irrigation sont traditionnelles et la source est le barrage d'Ain dalya. une absence des aménagements anti érosive a été remarquée, sauf quelque seuil en pierres dans un état dégradé.

❖ Pour le bassin d'oued Ranem :

- ✚ 32% de la superficie totale est occupé par les trains agricoles, 21,5 % sont des céréalicultures et les cultures fourragères et 10% sont des cultures maraichères
- ✚ Les agricultures utilisent des méthodes traditionnelles pour l'irrigation, le travail du sol est perpendiculaire à la pente, la source est le barrage d'Ain dalya et des fourrages implantés dans le bassin. une absence des aménagements.



Figure 3.26 Zones d'échantillonnage dans la zone d'étude (enquête socioéconomique)

Nous avons créé une base des données présentée sous forme des cartes thématiques qui sont : la carte du réseau hydrographique, la carte des altitudes et des pentes qui sont une représentation directe du Modèle Numérique de Terrain (MNT), la carte des pentes. Pour la carte d'occupation des sols et la localisation et l'état des aménagements CES, nous avons basé sur le traitement des images satellitaires et les images de hautes résolutions de Google Earth (Tableau 3.10).

Tableau 3.10 Création de la base des données.

Données de base	Source	Echelle	Mode d'acquisition	Origine
Limite des bassins versants	SRTM	30 m	Numérisation	Nos travaux
MNT	SRTM	30 m	Numérisation	Nos travaux
Pentes	MNT	30 m	Analyse	Nos travaux
Réseau hydrographique	DEM	30 m	Numérisation	Nos travaux
Type du sol	Carte pédologique et télédétection	1/200000	Analyse + numérisation	Carte agricole
Occupation des sols	Télédétection	30m	Numérisation	Nos travaux
Aménagement CES	Plan d'aménagement et Google Earth	1/25000	Numérisation	Cartes et nous travaux

## 16. Conclusion partielle

La zone d'étude, d'une superficie de 20700 km<sup>2</sup>, s'étale sur deux domaines naturels bien distincts, l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud. L'étude géologique a montré que le bassin présentent une géologie très hétérogène, caractérisée par des formations sédimentaires dont l'âge le plus ancien est le Trias jusqu'au Quaternaire, constituée généralement par des calcaires, des grès, des marnes, des cailloutis et des alluvions. La topographie de la zone d'étude est très variée. L'altitude maximale de la région atteint 1636m aux monts de Tebessa, et s'abaisse pour atteindre 60 mètres à oued Zarga dans la basse vallée de la Medjerda. Cette partie représente le point de croisement des grands affluents de la Medjerda d'où on trouve le plus grand barrage de la Tunisie (Sidi Salem). Cette zone est considérée comme la zone la plus inondable de la Medjerda. Au sud les monts subhumides de Souk-Ahras subdivisées en deux parties : Est et Ouest. D'une longueur de 97 km environ d'Est en Ouest et d'une profondeur de 31 km environ du Nord au Sud, le tracé du massif prend forme à partir de la limite d'état à l'est du pays au niveau de la commune frontalière d'Ouled Moumen. En effet, la région d'étude est exposée à un climat semi-aride méditerranéen (pluie d'hiver, sécheresse estivale). La pluviométrie annuelle dépasse les 1000 mm au nord du bassin, est diminué progressivement vers le sud (Kotti, 2015), Ses pluies sont torrentielles et irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Les études réalisées dans le bassin de la Medjerda, montrent la présence de plusieurs nappes Dont deux sont importantes ; La première, libre et la seconde considérée comme captive, ainsi que la présence de plusieurs barrages et retenues collinaires.

# Chapitre 4

## Classification de l'occupation du sol en utilisant la télédétection et le SIG

## Chapitre 4 : Classification de l'occupation du sol en utilisant la télédétection et le SIG

### Objectif

L'objectif de cette étude est de réaliser une étude diachronique de l'occupation du sol du bassin versant de la Medjerda en utilisant des images satellitaires de Landsat et d'obtenir des cartes d'occupation de sol qui seront utilisées pour cartographier le facteur C. Il représente un facteur de contrôle de risque d'érosion des sols. Nous proposons aussi de vérifier l'application d'un modèle empirique exponentiel pour estimer le facteur C et de suivre l'évolution de ce facteur durant la période 1994-2017 et sa corrélation avec l'érosion mesurée par bathymétrie dans les barrages de la zones d'étude.

### 1. Introduction

L'occupation des sols décrit la couverture biophysique de la surface des terres émergées. (Charlotte 2017). Elle est identifiée par le programme Global Climate Observing System (GCOS) comme l'une des cinq Variables Climatiques Essentielles (VCE) hautement prioritaires (GCOS 2016). Ces variables sont sélectionnées pour leur importance dans le cadre de la compréhension et de la prédiction des évolutions du climat, ainsi que pour leur caractère indispensable pour guider les mesures sur l'adaptation et l'atténuation aux changements climatiques (Charlotte 2017).

Les cartes décrivant l'occupation des sols sont de puissants outils scientifiques et décisionnels (Mjijra, 2015). Elles représentent une information de base pour les inventaires des cultures, les besoins en eau, et la gestion d'irrigation (Belhaj 2008 ; Amri 2013, Amani et al. 2020, Boulaassal et al. 2020). Elles sont utilisées aussi dans des travaux de recherche comme entrée des systèmes de modélisation des cycles de l'eau et du carbone ou encore pour les bilans d'énergie (Claverie et al. 2012 ; Houghton et al. 2012 ; Zhong et al.2019 ; Zhang et al. 2020). Elles servent également pour des applications opérationnelles, notamment pour le suivi des changements globaux, et de supports pour appliquer les consignes et recommandations des politiques publiques qui nécessitent une connaissance précise des territoires. (Feddemma et al. 2005 ; IPCC 2014 ; Pielke 2005 ; Niu et al.2019 ; Li et al. 2020 ; Chuenchum et al.2020), et pour le suivi des cultures à grande échelle (Inglada et al. 2017 ; Valero et al. 2016 ; Seo et al.2019 ; Stoian et al.2019) qui est utile dans le cadre de la sécurité alimentaire. L'importance de ces cartes a donc conduit à l'émergence de plusieurs initiatives visant à produire des cartes d'occupation des sols et de changements d'occupation.

Le couvert végétal est un facteur important, qui contrôle le risque d'érosion des sols (Wischmeier and Smith 1978). Il réduit le risque d'érosion par protection du sol contre l'action de goutte de pluie et la diminution de la vitesse de l'écoulement suite à l'augmentation de taux d'infiltration (Touaibia and Achite 2003 ; Almagro et al. 2019).

Dans l'Universal Soil Loss Equation Révisée (RUSLE), l'effet du couvert végétal est incorporé au facteur d'aménagement du couvert (appelé facteur C). Il est défini comme un rapport entre la perte en sol sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport à la perte en sol sur un terrain en jachère (Wischmeier and Smith 1978)

La classification d'images satellites a pour objectif de produire des images thématiques, c'est-à-dire des images dont le contenu ne représente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels (Toumi et al.2013 ; Pijl et al. 2020).

De nombreux travaux dans le monde ont fait intervenir cette approche pour déterminer le coefficient C afin d'évaluer les pertes de sol et proposer par conséquent des outils de protections contre le phénomène d'érosion. Le facteur C vient en deuxième position en termes de contrôle du risque d'érosion du sol (Knijff et al. 2000 ; Pham et al. 2018). Il traduit par son importance l'effet du couvert végétal sur le phénomène d'érosion et le ruissellement (Quinton et al. 1997 ; Zhou et al. 2008 ; Liu et al. 2018).

La télédétection et les images satellitaires fournissent les informations relatives au couvert végétal en utilisant l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Ce dernier est en relation avec la quantité de biomasse verte ce qui permet d'avoir une indication sur la nature spatiale du couvert végétal (Lunetta et al. 2006 ; Prabhakara et al. 2015 ; Cabrera-Bosquet et al. 2015). Ce facteur se calcule par le biais de nombreuses formules proposées par différents chercheurs (Almagro et al. 2019 ; Knijff et al. 2000 ; Meusburger et al. 2010 ; Vatandaşlar and Yavuz, 2017).

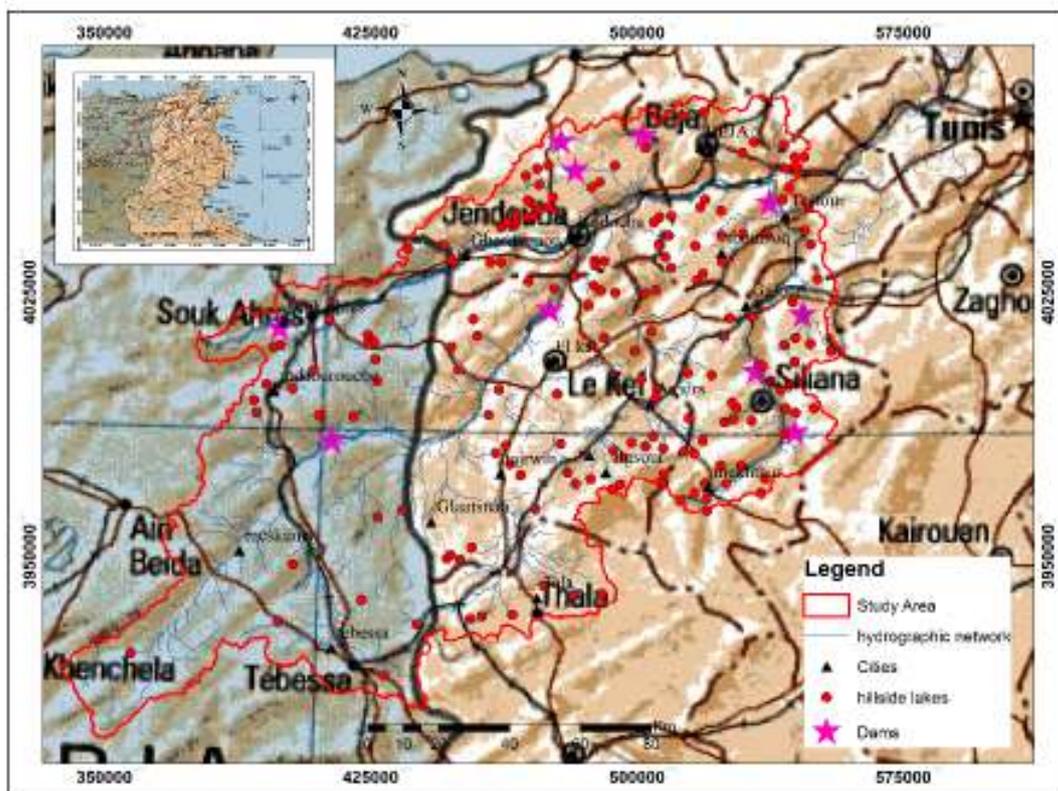


Figure 4.1 délimitation de la zone concernée par la classification et l'étude de végétation.

## 2. Modifications visuelle et affichage des images

Une image de bonne qualité est celle dont l'apparence permette à notre system visuel d'identifier le maximum d'informations, donc il est important de modifier les modes d'affichage des images pour visualiser les différentes modifications sur l'affichage des objets.

### 2.1 Affichage en gris

Il permet d'afficher et d'interpréter chacune des bandes individuellement. Il correspond à une image photographique noir et blanc. La figure 4.2 représente un exemple d'un affichage en gris

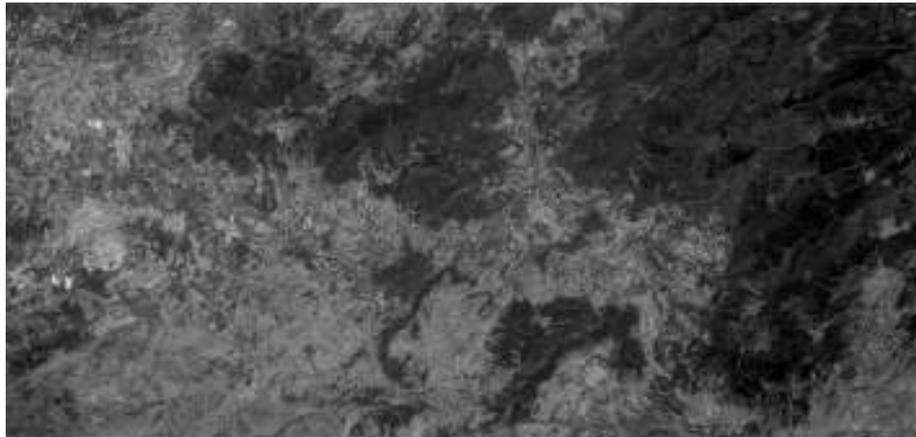


Figure 4.2 modes d'affichages des images. Band T4 de l'image satellitaire du Landsat 8 OLI (Aout 2017) sur la région de Souk Ahres en gris.

### 2.2 Affichage multi bandes (composition colorée)

Il permet d'afficher et d'interpréter des images composées de trois bandes. Les pixels des trois bandes sont superposés et leurs valeurs radiométriques sont additionnées. Le principe consiste à choisir trois bandes spectrales d'une image et à afficher chacune de ces trois bandes dans une couleur dite primaire : le bleu, le vert et le rouge. On obtient alors une composition colorée. Le résultat est une image affichée avec des couleurs dites naturelles ou réelles. Les figures 4.3 et 4.4 représentent un exemple d'un affichage en composition colorée.



Figure 4.3 modes d'affichages des images. Compositions colorées produite à partir de l'image satellitaire du Landsat 8 OLI (Aout 2017) sur la région de Souk Ahres, affichée avec des couleurs réelles (bandes 2, 3,4 assignées respectivement aux couleurs primaires bleu vert rouge)



Figure 4.4 modes d'affichages des images. Compositions colorées produite à partir de l'image satellitaire du Landsat 8 OLI (Aout 2017) sur la région de Souk Ahres, affichée avec des couleurs fausses (bandes 2, 3,5 assignées respectivement aux couleurs primaires bleu, vert, rouge)

### 3. Transformation des images satellitaire

Les transformations d'images sont des opérations similaires à celles de rehaussement de l'image, utilisés pour faciliter l'interprétation visuelle ou pour réduire le nombre des bandes qui seront fournies comme données d'entrée à des procédures de classifications. (Scanvic, 1983). Les transformations impliquent la manipulation de plusieurs canaux :

- pour transformer une image provenant d'un capteur multi spectral,
- pour transformer plusieurs images de la même région prises à des moments différents (données multitemporelles).

La transformation d'images génère une "nouvelle" image = néo canal en combinant les différentes sources d'information de manière à rehausser, synthétiser, extraire certaines caractéristiques ou certaines propriétés des données peu visibles sur les canaux d'origine. (Cherel, 2010).

L'objectif des transformations multispectrales est triple :

- ✚ convertir des luminances mesurées par le satellite en variables thématiques ayant une signification dans les domaines de l'environnement, comme la biomasse, la couverture foliaire, l'humidité d'un sol, etc.
- ✚ construire des indicateurs synthétiques permettant de décrire l'état d'un phénomène. L'indice de végétation (NDVI) rend compte par exemple de l'état, du stade de croissance de la végétation à un moment donné.
- ✚ réduire le nombre des données par la sélection des données les plus utiles. Les canaux (7 pour Landsat TM) d'une même scène sont souvent corrélés entre eux ce qui entraîne une redondance de l'information. La transformation permet de synthétiser l'information. (Cherel 2010).

Le calcul de ces nouvelles couches d'information synthétiques s'appuie sur des méthodes d'analyse statistique et des combinaisons arithmétiques de canaux (appelées aussi rapports spectraux) débouchant sur la création de nouveaux canaux (néo-canaux). Un grand nombre de ces transformations multi spectrales se basent sur les bandes rouge et infrarouge. Plusieurs raisons à cela :

- ✚ C'est entre les bandes rouge et infrarouge qu'on observe les plus grands écarts de réflectance entre la végétation et les sols,
- ✚ Le canal infrarouge possède la plus grande richesse d'information (variance élevée),
- ✚ L'interprétation des bandes rouge et infrarouge en termes d'occupation du sol est assez aisée,
- ✚ Ces bandes sont présentes sur pratiquement tous les capteurs (Spot, Landsat, NOAA, Ikonos, ...) permettant certaines comparaisons entre différentes sources d'images. (Cherel 2010).

Dans la suite on cite quelque exemple des techniques de transformation des images :

#### 4. Les indices de végétation

Les indices de végétation sont des combinaisons arithmétiques des réflectance dans le visible et l'infrarouge. Sont bien corrélée à la croissance des plantes, la quantité de la biomasse verte et la couverture végétale. (Rondeaux et al 1996).

Les indices de végétation visent plusieurs objectif, sont utilisés pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, et pour estimer certains paramètres biophysiques tel que :

- Les caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse.
- l'indice de surface foliaire.
- la fraction de rayonnement photosynthétique actif, etc.

Pour le calcul des indices de végétation, on utilise principalement les différences des propriétés optiques de la végétation dans le rouge et le proche infrarouge. Les réflectances dans le proche infrarouge augmentent avec la présence de la végétation, tandis que celles dans le rouge diminuent.

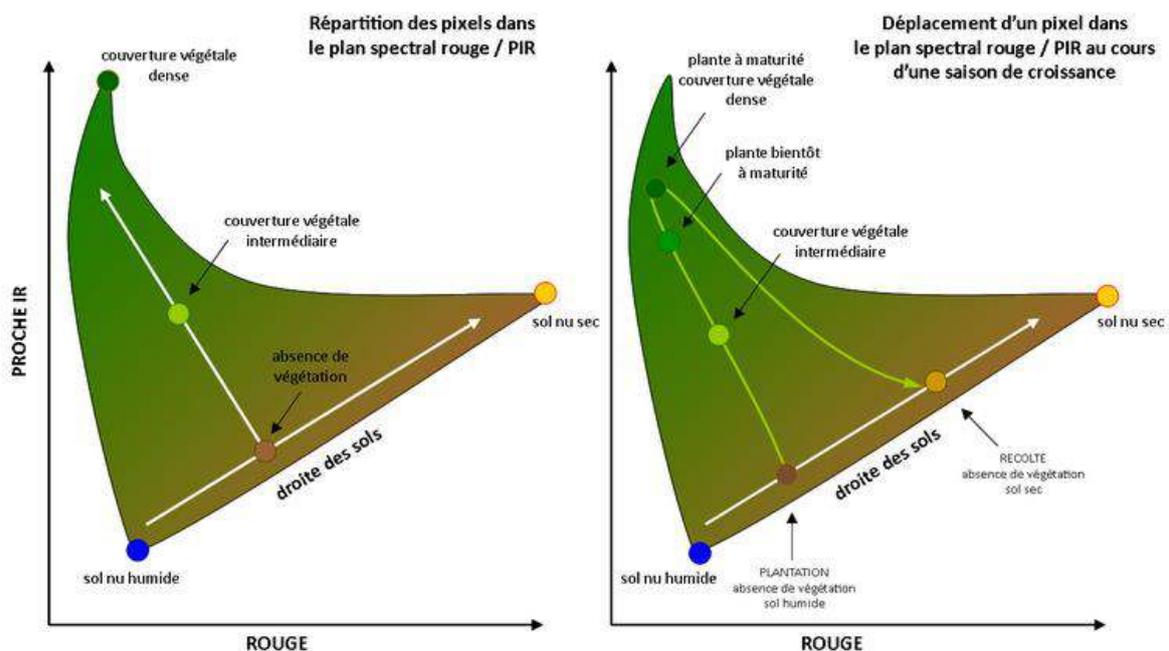


Figure 4.5 répartitions spectrales des réflectances dans le rouge et dans le proche infrarouge.

Plus la couverture végétale est dense, plus les valeurs de réflectance augmentent dans le PIR et plus elles diminuent dans la bande rouge. La droite des sols, dépourvue de végétation présente des réflectances qui varient en fonction de leur teneur en eau. (b) exemple du déplacement d'un pixel 'agricole' dans l'espace multi spectral rouge / PIR au cours d'une saison de croissance. Après la germination, la réflectance du pixel s'éloigne de la ligne des sols pour atteindre le sommet du chapeau. Après la récolte, le pixel retrouve une valeur de réflectance correspondant à un sol nu, éventuellement plus sec. Le tableau 1 représente des exemples des indices généralement utilisés dans l'étude de la végétation et de l'occupation du sol.

Tableau 4.1 Exemples des indices utilisés pour l'étude de la végétation et de l'occupation de sol

N°	Dénomination	formule	Caractéristiques	Auteurs et dates
01	Différence	R-PIR	Forte sensibilité aux variations atmosphériques	Monget 1980
02	Rapport	PIR/R	Saturation aux forts indices, sensibilité à la contribution spectrale des sols et aux effets atmosphériques	Jordan 1969. pearson et al, 1972
03	Indice de végétation par différence normalisée NDVI	$(PIR - R) / (PIR + R)$	Sensibilité aux effets atmosphériques, sensibilité aux variations angulaires de la visée, selon la position vis à vis du soleil	Rouse et al. 1974 Tucker, 1978
04	Indice de végétation transformé TVI	$(NDVI + 0.5)^{0.5}$	Essai d'élimination de valeurs négative Stabilisation de la variance	(Deering et al, 1975)
05	Indice de végétation ajuste au sol		Minimisation d'effet du sol	(Richardson et Wiegand 1977)
06	Indice de végétation résistant aux effets atmosphérique	ARVI	Diminue l'effet des aérosols sur l'NDVI mais très sensible à la contribution spectrale des aérosols	(Huete, 1988)
07	indice de végétation résistant aux effets atmosphériques	$ARVI = (PIR - RB) / (PIR + RB)$ Avec $RB = R - g(B - R)$ où g est fonction du type d'aérosols	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI mais sensible à la contribution spectrale des sols	(Kaufman et Tanre, 1992)
08	Indice de végétation amélioré	$EVI = 2.5[(PIR - R) / (PIR + 6R - 7.5B + 1)]$	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI et minimise l'effet du sol	(Huete, 1994)

#### 4.1 Indice de végétation normalisé NDVI

Le NDVI est un indice de végétation qui se définit comme la différence normalisée des mesures de réflectance spectrale acquises dans les zones de longueurs d'onde « Proche Infra-Rouge » (« PIR ») et « Rouge ».

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \dots\dots\dots (4.1)$$

Sa valeur théorique varie entre -1 et 1. En pratique, une surface d'eau libre (océan, lac,...) prendra des valeurs de NDVI proches de 0, un sol nu prendra des valeurs de 0.1 à 0.2, alors qu'une végétation dense aura des valeurs de 0.4 à 0.8.

##### 4.1.1 Explication physique du NDVI

Les plantes vertes absorbent une grande partie des radiations solaires dans une zone de longueurs d'onde appelée « PAR » (« Photosynthetically Active Radiation »), dont fait partie la zone du « Rouge ». Par contre, le « PIR » est fortement diffusé (non absorbé : transmis et réfléchi) par la plante. Par conséquent, une plante verte vive apparaît sombre dans le PAR (dont le rouge) car ces longueurs d'ondes sont absorbées par la plante (petite valeur de réflectance), et « brillante » dans le « PIR » car ces longueurs d'ondes sont réfléchies en partie (grande valeur de réflectance).

- ✚ Une végétation en bonne santé (gauche) absorbe la plupart de la lumière visible qu'elle intercepte et réfléchit une partie importante de la lumière PIR.
- ✚ Une végétation en mauvaise santé ou clairsemée (droite) réfléchit plus de lumière visible et moins de PIR. Les chiffres de la figure ci-contre sont représentatifs de valeurs réelles mais la réalité est bien plus variée. (Illustration by Robert Simmon, NASA GSFC)

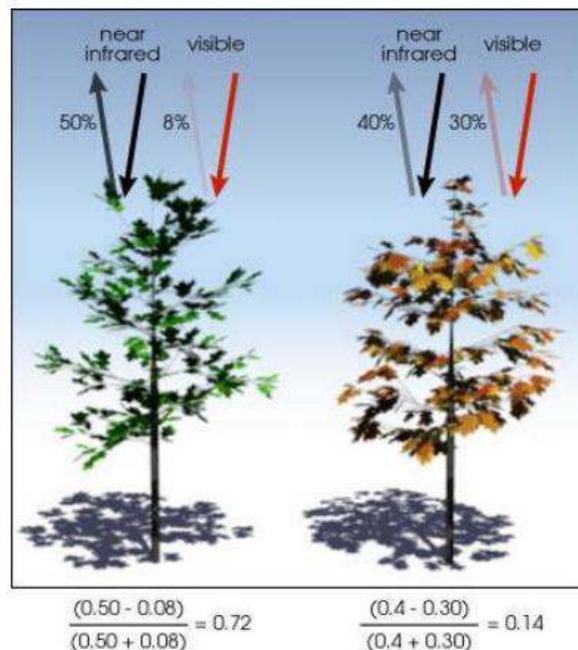


Figure 4.6 Explication physique de l'Indice de végétation normalisé NDVI (d'après Roose, 1994)

Le NDVI est directement lié à l'activité photosynthétique des plantes et donc à la capacité d'absorption énergétique de la canopée du couvert végétal. Il agit comme indicateur de la biomasse chlorophyllienne des plantes. En termes de réflectance dans le PIR et le Rouge, la neige et les nuages se comportent à l'inverse des plantes vertes.

Dans le cadre de cette recherche, l'indice de végétation normalisée NDVI a été calculé selon la formule (1) où les bandes rouge et proche-infrarouge équivalent aux bandes 4 et 5 respectivement. Donc une bande a été créée selon la formule suivante :

$$NDVI = \frac{Band\ 5 - Band\ 4}{Band\ 5 + Band\ 4} \dots\dots\dots (4.2)$$

La figure suivante illustre les pseudos-bandes des NDVI des images satellitaires, qui ont été utilisé ensuite dans la segmentation et la classification.

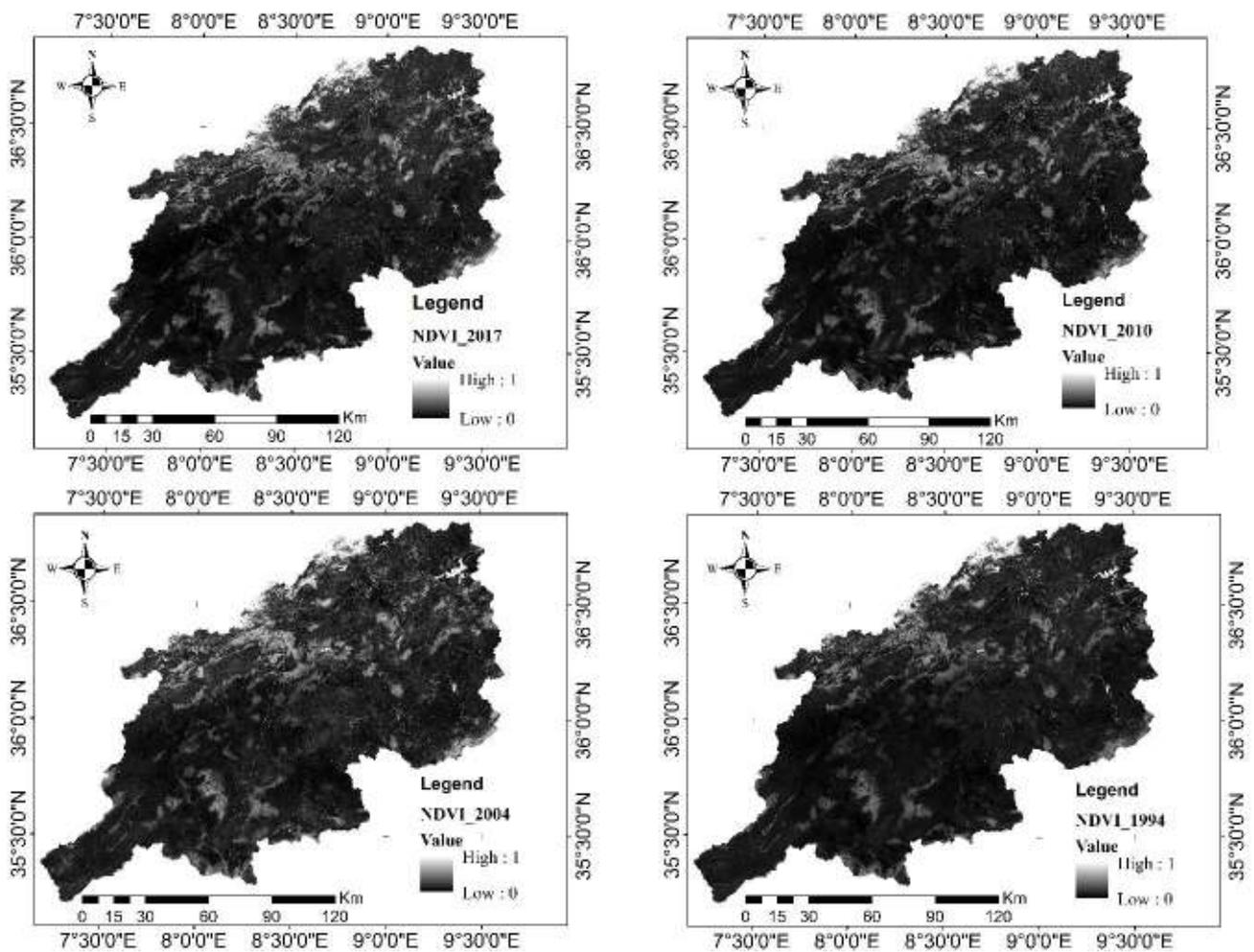


Figure 4.7 cartes des NDVI (année 1994 ; 2004 ; 2010 ; 2017)

### 5. Transformation en composantes principales (TCP)

Les transformations en composantes principales (TCP) sont basées sur L'analyse en composantes principales (ACP). Cette analyse est une approche statistique, appelée l'analyse factorielle (Caloz et Collet, 2001), connue aussi sous le nom de l' Hotelling, la transformation de Karhunen-Loeve ou d'Eigenchannel, elle représente une transformation linéaire pour rechercher un nouveau système d'axes qui maximise les variables à partir des axes originaux.

Les axes sont choisis de telle sorte que les variables sont ordonnées dans le sens décroissant, le premier axe porte toujours le plus d'information. Celle-ci qui permet de réduire un système complexe de corrélation en un moins nombre de dimensions. La particularité dans la télédétection réside dans le nombre très grande des données a traité, c'est-à-dire les pixels (Caloz et Collet, 2001).

En effet, cette transformation est basée sur les vecteurs propres (Eigenvectors) orthogonaux de la matrice de covariance produite d'un groupe de pixels ou l'ensemble des canaux spectraux de l'image initiale. Le rendement de cette transformation est un nouvel ensemble de canaux d'image lesquels sont appelés (Eigenchannels). Ce sont des bandes non corrélées avec un nombre restreint des composantes (Caloz et Collet, 2001).

On travaille sur les sept bandes de Landsat, on obtient sept composantes principales dont les trois premiers contiennent le maximum d'informations (ACP1, ACP2, ACP3).

Dans la plupart des cas, on trouve les ordres de grandeurs suivants :

- ✚ L'axe 1 est assez proche de la somme des valeurs de comptes numériques pour un même pixel. Cela ressemble à un canal panchromatique. En simplifiant, ce néo canal contient plus des 2/3 de l'information multispectrale d'origine.
- ✚ La deuxième composante met généralement en valeur l'opposition entre le visible et l'infrarouge. Cela ressemble à un indice de végétation dont la formule brute serait du type :  $IR - R$ . C'est donc sur ce canal que l'on détectera le mieux les divers types de végétation.
- ✚ L'ACP3 met plutôt en valeur les différences entre les deux canaux du visible.

L'analyse des composantes principales ou d'autres transformations complexes peuvent être utilisée comme techniques de rehaussement visuel pour faciliter l'interprétation ou pour réduire le nombre de bandes qui seront fournies comme données d'entrée à une procédure de classification numérique. (Cherel 2010).

Une analyse en composantes principales a été appliquée sur toutes les images satellitaires utilisées pour avoir la synthèse des différentes bandes informatives (Tableau 3). Les résultats montrent que les trois premières composantes principales expliquaient l'essentiel de la variance des bandes informatives pour chaque image. Les zones d'un même thème dans ces composantes sont plus homogènes. Ces composantes ont été utilisées pour segmenter et classifier l'image utilisée. Le tableau 5 présente les pourcentages de l'information contenue attribuables à chacune des composantes principales et la figure 8 montre la composition colorée produite à partir des composantes principales de l'image Landsat8 Oli captée en juin 2017 sur le bassin versant d'oued Medjerda.

Tableau 4.2 Matrice de covariance des canaux d'entrée (image 2017)

	1	2	3	4	5	6	7
1	0,00029						
2	0,00037	0,00047					
3	0,00055	0,0007	0,00108				
4	0,00077	0,001	0,00155	0,00229			
5	0,00074	0,00097	0,00151	0,00224	0,00248		
6	0,00104	0,00135	0,00211	0,00317	0,00318	0,00473	
7	0,00095	0,00122	0,00188	0,00282	0,00278	0,00421	0,00389

Tableau 4.3 les pourcentages de l'information contenue attribuables à chacune des CP

Composantes principales	Le pourcentage de la variance	Le pourcentage cumulé de la variance des composantes
	%	%
CP1	95,42	95,42
CP2	2,43	97,86
CP3	1,43	99,29
CP4	0,48	99,77
CP5	0,21	99,97
CP6	0,03	99,99
CP7	0,01	100

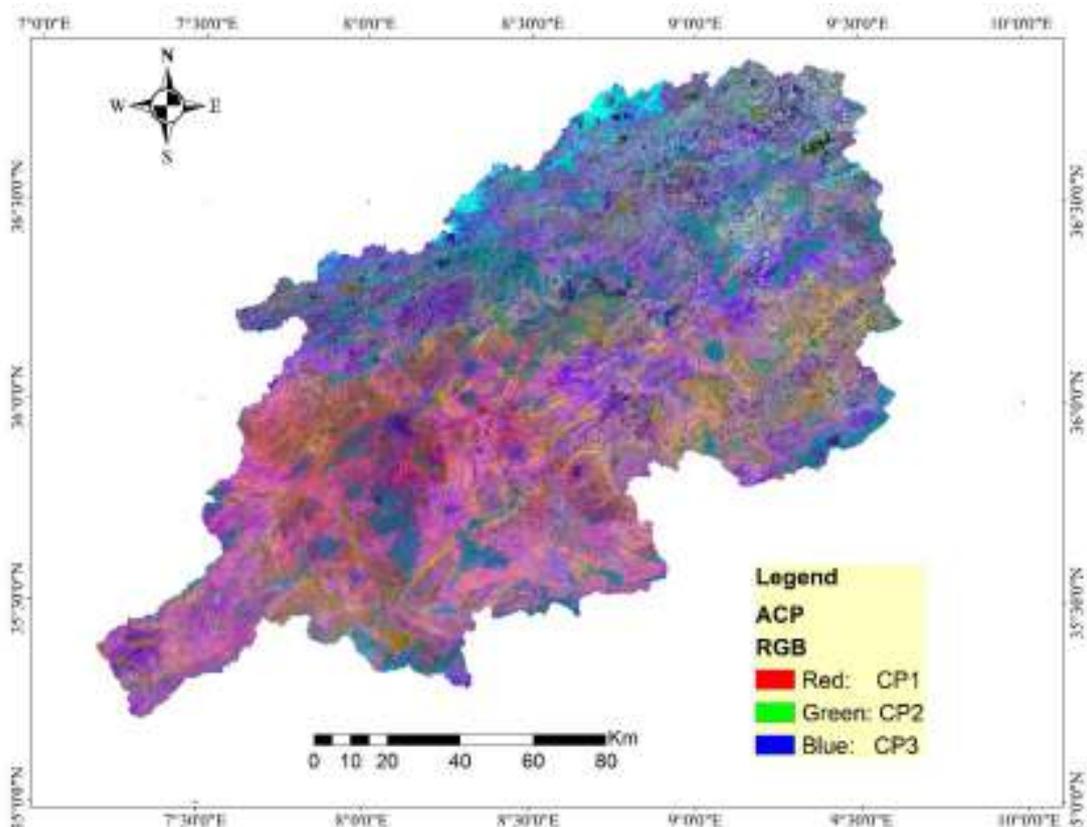


Figure 4.8 compositions colorées produite à partir des composantes principales de l'image Landsat8 Oli captée en juin 2017 sur le bassin versant d'oued Medjerda.

## 6. Classification du sol

La classification du sol permet de détecter et de séparer des objets à la surface du sol, tel que le sol, la végétation, l'eau, ..., on utilisant l'interprétation des images satellitaires avec des méthodes assisté par ordinateur et analyse visuelle. La classification numérique des images utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs de bandes pour classer chaque pixel individuellement, on cherche donc d'assigner une classe à chaque pixel pour avoir une information global sur la surface de sol, les classes nécessaires pour notre étude sont : la végétation avec sa densité, l'eau et le sol, pourquoi ces thème, car ils influent directement sur l'érosion hydrique.

Pour la détection et la séparation des objets à la surface des sols, plusieurs méthodes de classification sont utilisées sur la base des différents types d'information (NDVI, ACP). Ces méthodes exigent des connaissances au préalable sur le terrain et nécessitent la validation par une méthode où une autre. La figure 4.9 montre les différentes méthodes utilisées dans les classifications des sols.

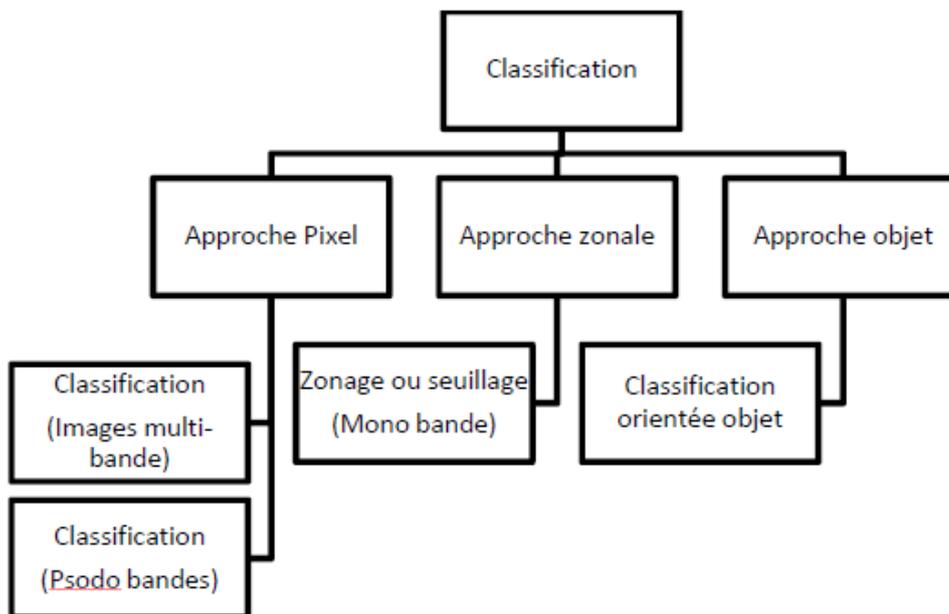


Figure 4.9 les différentes méthodes utilisées dans les classifications des sols. (Toumi 2013)

### 6.1 Classification supervisé

La classification supervisée, c'est une classification dirigée, pour laquelle l'opérateur définit lui-même les classes à produire (nombre, caractéristique spectrale,). C'est-à-dire que le nombre des classes et leurs caractéristiques sont connues à l'avance. Des sites (pixels) d'entraînement sont utilisés pour diriger la classification.

La méthode de classification supervisée utilisée pour cette étude est celle de maximum de vraisemblance, la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée est calculée et chaque pixel est affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte. (Eerens et al, 2000).

## 6.2 Classification non supervisé

La classification non supervisé, elle s'appelle aussi la classification non dirigée ou non assistée, c'est une classification automatique pour laquelle il suffit de choisir la méthode de classification, (selon le moyen ou selon la méthode des seuils, etc.). Cette méthode ne fait pas intervenir des sites d'entraînements. Son principale avantage est que la subdivisions est fondée sur les paramètres statistiques des classes plutôt que sur un « échantillon d'entraînement ». En effet, il est souvent utile distinguer les zones de l'image aux propriétés spectrale différentes. On établit des cartes de classes d'occupation du sol en utilisant la classification non supervisée de la trichromie ACP1, ACP2, NDVI et on les apporte sur le terrain pour déterminer la nature des subdivisions en question.

Parmi les méthodes utilisées dans la classification non supervisé, on trouve la méthode « Isodata », elle sert a calculé les moyenne de N classe régulièrement distribués dans l'espace des données, Puis la méthode va affecter les pixels restant aux centres de classes, sur la base de leur distance minimum par itération successive. À chaque itération les moyenne sont recalculées, l'opération continue jusqu'à ce que le taux de pixel changeant dans chaque classe soit inférieur au seuil fixé par l'utilisateur ou que le nombre max d'itérations soit atteint.

Une autre méthode appelle « K-mean » est utilisée, elle représente un regroupement des pixels de l'image au centre de classe, régulièrement distribués dans l'espace des données, les plus probables (statistique).

## 6.3 Classification pseudo bande

C'est une classification dirigée en utilisant des pseudos bandes, c'est un changement de variable, de telles façons à modifier les bandes usuelles par d'autres bandes plus significatives. L'analyse en composantes principales (ACP) et l'indice de végétation (NDVI) sont mis en œuvre dans le cas présent afin de sélectionner les meilleures bandes spectrales d'une part, et d'augmenter le contraste sol-végétation d'autre part, et cela dans le but de faciliter l'étape de segmentation. En effet, l'analyse en composante principale sert a créé une image sur laquelle chaque bande contient des informations uniques (Jensen 1996 ; Caloz and Collet 2001). L'indice NDVI réduit les effets d'éclairement ou de pente sur la réflectance des couverts végétaux (Bonn 1996 ; Lau 1997 ; Centre Canadien de Télédétection) et permet de mieux séparer la végétation (forêts, cultures) des sols nus et des surfaces urbanisées.

La figure 10 montre la composition colorée produite à partir d'une classification pseudo-bande, (NDVI-ACP). Tous ce qu'est en rouge représentent la végétation, la variation de la densité de couleur est en fonction de la densité de la végétation. Tout ce qu'est en vert représente un sol sans végétation.

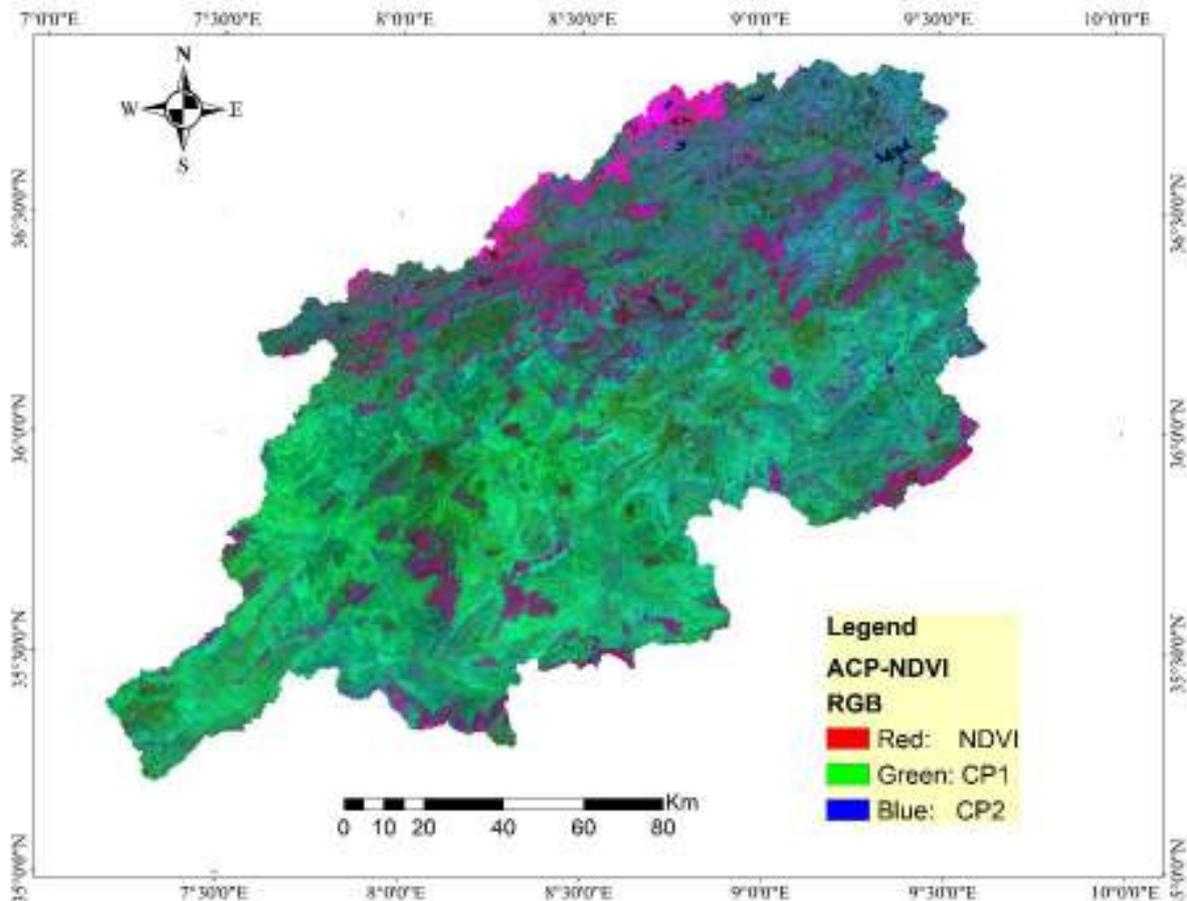


Figure 4.10 Composition colorée produite à partir d'une classification pseudo-bande NDVI et les composantes principale 1, 2, NDVI sont assignée respectivement au rouge, verte et bleu.

## 7. La méthodologie suivie

### 7.1 La classification de l'occupation du sol

La classification des scènes a été effectuée par la méthode de maximum des vrais semblances. Cette classification est la plus utilisée (Mejijra, 2010). Elle se base sur la probabilité qu'un pixel appartient à une classe particulière tout en utilisant « un algorithme automatisé qui détecte les pixels les plus purs dans la zone d'étude » (Duchemin et al., 2006). Par ailleurs, elle prend en compte la variabilité de classes en utilisant la matrice de confusion. La classification nécessite une étape d'apprentissage préalable pour définir des classes correctes sur les images selon les besoins de l'utilisateur et correspondent à des unités sémantiques de l'image.

Les images satellitaires captées nécessitent un prétraitement et un traitement spécifique. En utilisant le logiciel ENVI 5.1, des techniques de rehaussement et de correction géométriques et radiométriques ont été appliquées pour faciliter l'interprétation visuelle, et minimisé les effets des gaz et des nuages.

## 7.2 Choix des sites d'entraînement

Au point de départ, on a défini, sur les images satellitaires, des sites d'entraînement qui sont des régions de l'image que l'on juge représentatives d'une certaine classe. Le choix des sites d'entraînements des classes est basé sur :

- ❖ le type du couvert végétal du sol et l'activité agricole pour avoir de polycultures (cultures annuelles, jachères, arboricultures).
- ❖ la position géographique dans la région, pour mieux avoir une répartition spatiale équilibrée sur toute la région.
- ❖ la disponibilité des données de la pratique agricole.
- ❖ La facilité de l'accès.

Dans le choix des sites d'entraînement, il ne suffit pas de choisir une seule parcelle par classe, car il se peut que les mêmes paysages aient des spectres de réflectance différents à cause d'une exposition différente au soleil. En outre, malgré les différentes étapes de traitements effectués sur les images.

Pour cartographie l'occupation du sol de juillet 2017, nous avons choisi 1714 zones, représentant les différentes classes de la zone d'étude et couvrant 185077 pixels homogènes. Ces sites ont été divisés en 2 catégories. La première est utilisée pour la classification, elle est représentée par 1000 sites couvrant 90006 pixels, et la seconde est utilisée pour la validation, elle est représentée par 714 sites couvrant 95071 pixels.

Les sites d'entraînement utilisés pour classifie l'occupation du sol durant les autres années, ont été sélectionné sur la base des anciennes cartes d'occupation du sol de la région en utilisant des repères considérés inchangeables, (fixe au cours du temps), ainsi que l'historique de Google Earth. La figure 4.11 présente la localisation des sites d'entraînements utilisés pour classifier l'occupation du sol de juillet 2017.

Puisque les compositions colorées Landsat fournissent une information appauvrie (trois canaux sur sept) (Scanvic. 1983), et afin de mieux séparer les objets sur les images satellitaires, et minimiser la confusion entre les classes, nous avons appliqué la classification non supervisée « Isodata » de pseudo-bandes (NDVI, ACP) sur les quatre images satellitaires, (Toumi.2013), de la période sèche, (TM1994 ; TM2004 ; ETM 2010 ; OLI 2017), et deux images du période humide, (OLI 2017). Nous avons choisi l'analyse en composantes principale (ACP) et NDVI pour augmenter le contraste sol végétation, et sélectionner les meilleures bandes spectrales, afin de facilité la visualisation et aussi la classification. (Toumi et al. 2013).

Pour expliquer l'occupation du sol et décrire la dynamique spatiale dans le changement de couverture terrestre, les surfaces ont été simplifiées en quatre catégories : forêts et végétations, plans d'eaux, occupations agricoles et sols nus. Huit classes ont été définies pour la classification supervisée des quatre images satellitaires. Ces classes nous a permis de limiter les confusions entre les catégories. (Sammali 2004) Elles ont été choisies selon la réflectance spectrale des objets. (Toumi et al.2013). Le repérage de la végétation et d'autres éléments présents sur les images satellitaires s'est fait à l'aide de l'interprétation visuelle, en utilisant des images Landsat en vraies et fausses couleurs (Provencher et Dubois 2007).

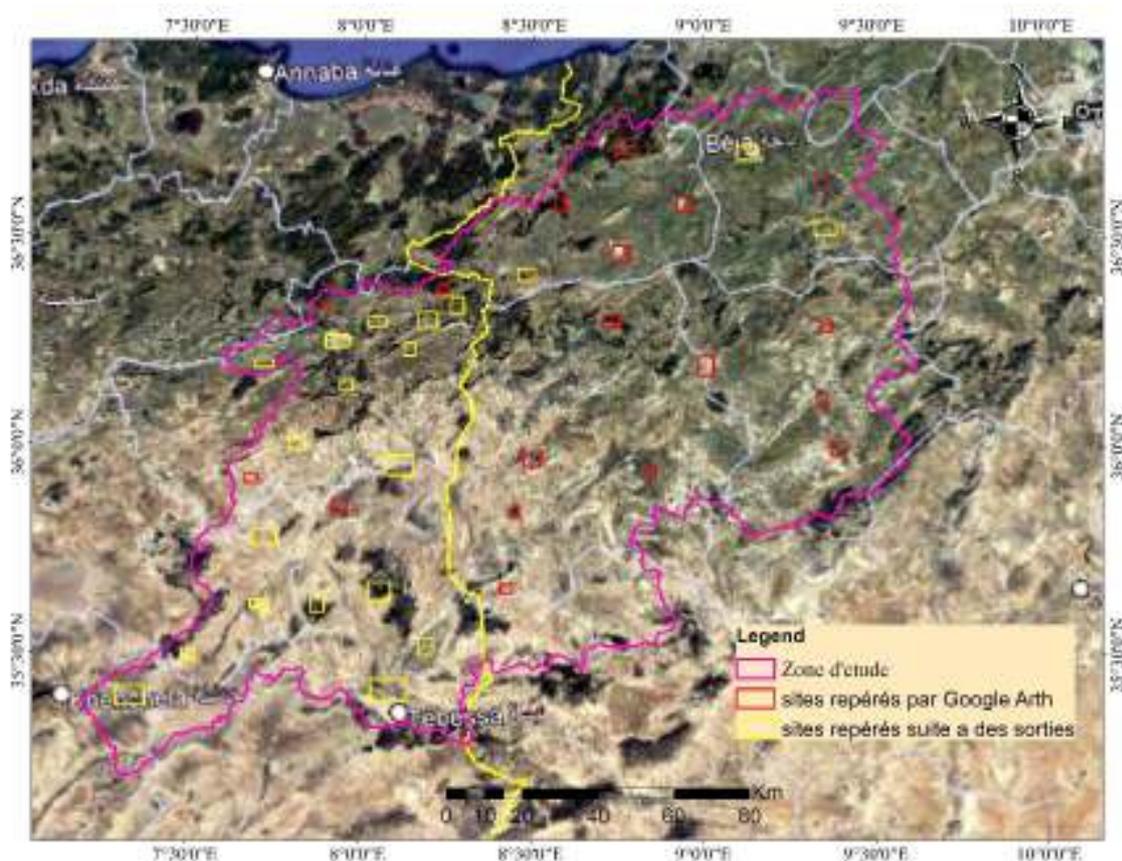


Figure 4.11 Localisation des sites d'entraînements utilisés pour classifier l'occupation du sol de juillet 2017. (En rouge des sites repérés par Google Arth. En jaune des sites repérés suite à des sorties).

### 7.3 Validation des résultats de la classification

La classification a été validée visuellement en comparant les résultats avec d'autres documents, telles que les photos de très haute résolution spatiale (THRS) de Google Earth et les études menées par le bureau d'étude Coyen Et Billier (2011), soit statistiquement, par les matrices de confusion. Cette dernière permet de vérifier si les pixels tests ont été affectés à la bonne classe de sortie, « c'est-à-dire que des pixels correspondant à une unité paysagère se retrouvent classés dans une classe représentative d'une autre unité paysagères » (Robin. 2002).

Les valeurs affichées sur la diagonale de la matrice représentent les pixels bien classés (exprimés en valeur absolue ou en %). Différents indicateurs de précision sont proposés : précision globale. Coefficient kappa. Erreurs d'excédents,...) (Prasannakumar et al. 2011).

Le coefficient de Kappa qui représente un indice statistique variant entre 0 et 1 et qui correspond à une mesure de la précision de la classification est donné par la formule 3. Il évalue dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats de la classification et la réalité sur le terrain. Il est subdivisé en 5 catégories affichées dans le tableau 4.4. La précision globale représente le rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre total de pixels, elle donnée par la formule 4.

$$Kappa = \frac{\sum X_{ii} - \sum (X_{i+} X_{+i})}{N^2 - \sum (X_{i+} X_{+i})} \quad (4.3)$$

$$\text{overall accuracy} = \frac{\sum X_{ii}}{N} \quad (4.4)$$

Avec N: the total number of of samples in confusion matrices.  $X_{ij}$  is the diagonal elements in the confusion matrices.

Tableau 4.4 les classes du coefficient Kappa

Classe	Valeurs
[0,00 ; 0,20]	Accord très faible
[0,21 ; 0,40]	Accord faible
[0,41 ; 0,60]	Accord modéré
[0,61 ; 0,80]	Accord substantiel
[0,81 ; 1,00]	Accord excellent

## 8. Résultats de la classification

### 8.1 Etats d'occupation

Les résultats de la classification sont présentés sous forme des cartes d'occupation de sol, elles montrent l'extraction de 8 classes, regroupés en 4 catégories principales, qui sont représentées par les mêmes couleurs dans le but de faciliter la comparaison entre les résultats obtenus et d'en déduire le changement et l'évolution du paysage de la région entre 1994 et 2017. Il s'agit de la catégorie forêts et végétation ; l'occupation agricole du sol ; plan d'eau ; et sols nus. Le tableau 4.5 représente la superficie occupée par chaque classe et catégories en pourcentages, pour chaque année.

Tableau 4.5 les résultats des classifications exprimées en % de la superficie

catégories	classes	% S	% S	% S	% S
		1994	2004	2010	2017
<b>sols nus</b>	zones urbaines	0,80	0,90	1,10	1,30
	zone touché par incendie	0,40	0,00	0,16	0,26
	badlands	18,84	9,66	14,94	4,91
	<b>total</b>	<b>20,03</b>	<b>10,56</b>	<b>16,19</b>	<b>6,47</b>
<b>forets et végétation</b>	forêt dense	0,70	0,7	0,67	1,04
	forêt moyennement dense	9,65	12,77	12,41	15,64
	Parcours	7,38	20,78	2,25	8,73
	<b>total</b>	<b>17,73</b>	<b>34,25</b>	<b>15,33</b>	<b>25,40</b>
<b>Occupation agricole du sol</b>	cultures annuelles	45,89	46,94	61,02	51,17
	cultures irriguées	16,18	7,88	7,16	16,80
	<b>total</b>	<b>62,02</b>	<b>54,82</b>	<b>68,18</b>	<b>67,69</b>
<b>Eau</b>	plan d'eau	<b>0,18</b>	<b>0,38</b>	<b>0,30</b>	<b>0,17</b>
<b>total</b>		100,00	100,00	100,00	100,00

### 8.1.1 Etat de l'occupation du sol en 1994

En Juillet 1994, d'après la répartition de l'occupation du sol dans la Medjerda, le paysage est occupé en grande partie par les sols sans végétation (65,92 %, entre badlands, zone urbain, zones touchées par l'incendie, et sol agricole en période sèche). Les forêts occupent 17,73% de la superficie totale dont 0,7% sont dense et 9,65% sont moyennement denses. L'eau occupe 0,18% de la zone d'étude équivalant à une superficie de 2,42 Km<sup>2</sup>. Les plantations et les champs de cultures irriguées couvraient environ une superficie de 3354,83 Km<sup>2</sup> soit 16,18% du paysage et sont en majorité présentes le long des routes et autour des zones habitées. La Figure 4.12 permet de caractériser l'état d'occupation du sol en juillet 1994.

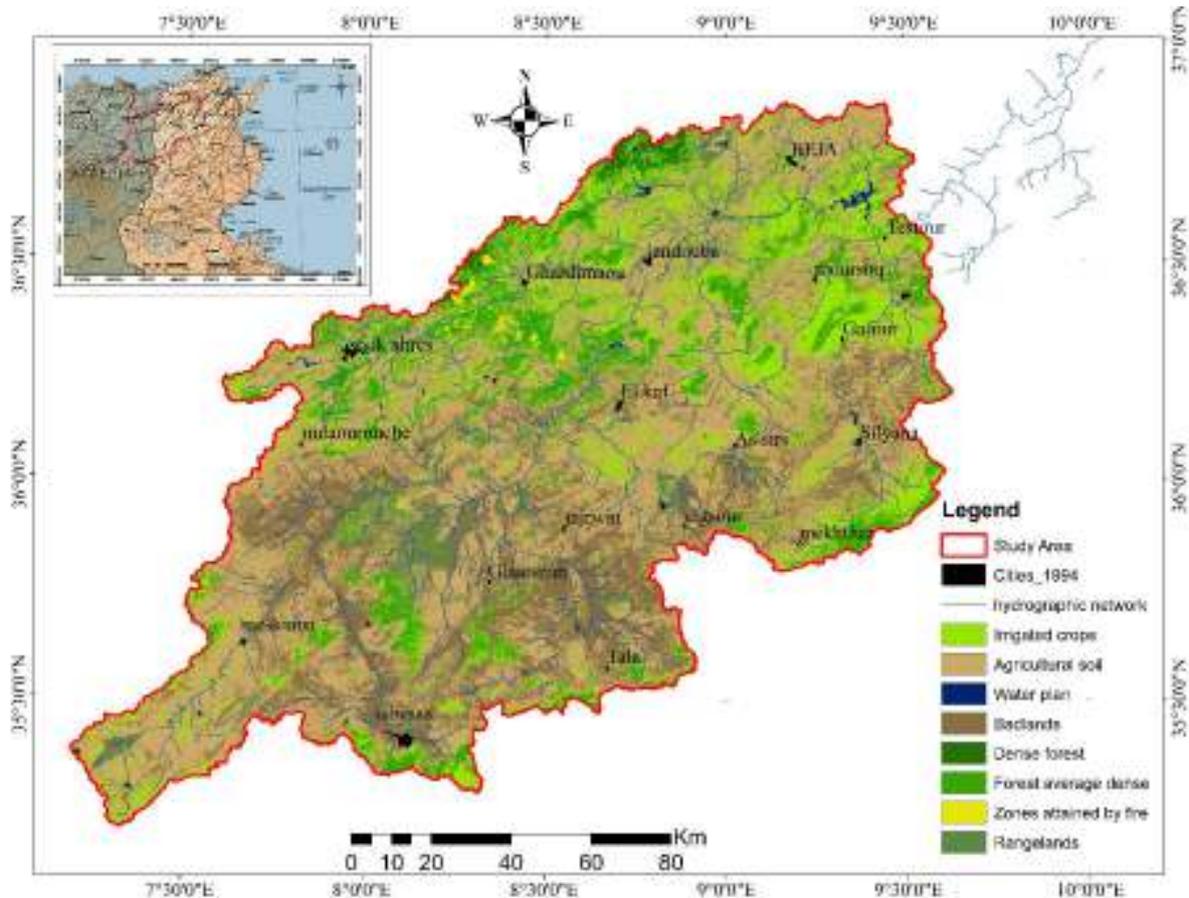


Figure 4.12 carte d'occupation du sol juillet 1994

### 8.1.2 Etat de l'occupation du sol en 2004

En juillet 2004, le paysage est toujours occupé en grande partie par les sols sans végétation (57,5 % entre badlands, zone urbain, zones touchées par l'incendie, et sol agricole en période sèche). Les forêts denses s'étendaient sur 144 Km<sup>2</sup> soit 0,7% de la superficie totale, et les forêts moyennement dense s'étendaient sur 2648,4 Km<sup>2</sup> soit 12,77% de la zone d'étude. L'eau occupe 0,38% de la zone d'étude équivalant à une superficie de 78,3 Km<sup>2</sup>. Les plantations et les champs de cultures irriguées ont subi une baisse de superficie (1634,88 ha) soit 7,88% de superficie. Les zones habitées ont augmenté et occupaient déjà une superficie de 187Km<sup>2</sup> soit 0,9% de la

superficie totale de la zone. La Figure 4.13 permet de caractériser l'état d'occupation du sol en juillet 2004.

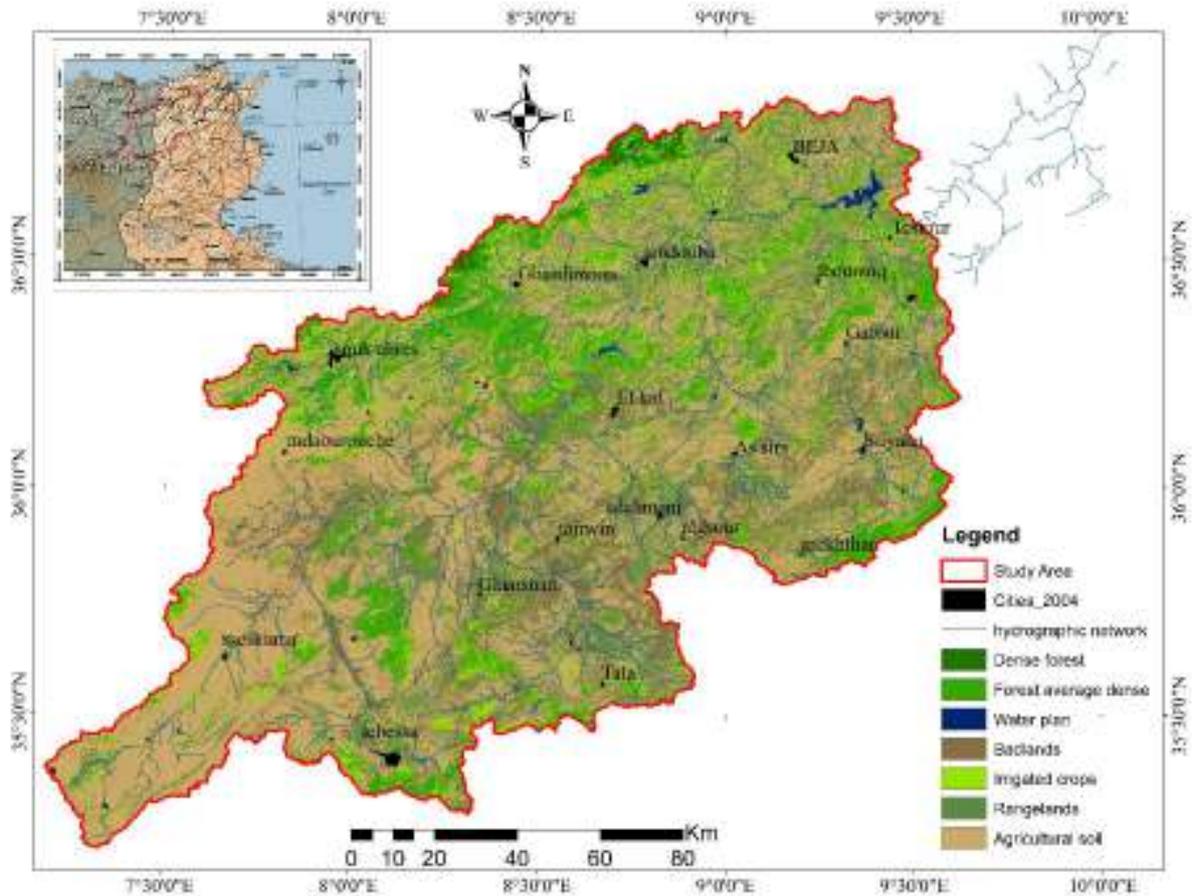


Figure 4.13 carte d'occupation du sol juillet 2004

### 8.1.3 Etat de l'occupation du sol en 2010

En juillet 2010, les badlands, les zones urbaines, et les zones touchées par l'incendie occupent 77,21% de la superficie totale, les forêts denses occupent 0,67% et les forêts moyennement denses occupent 12,41%. Les parcours, les végétations faibles, et les plans d'eaux ont subi une baisse de superficie par rapport au 2004, 467,2 Km<sup>2</sup> pour les parcours et la végétation faible, soit 2,25% de superficie, et 61,8 km<sup>2</sup> pour les plans d'eaux soit 0,3%. Les champs de cultures irriguées couvraient environ une superficie de 1484,8 Km<sup>2</sup> soit 7,16% du paysage et sont présentes le long des routes et autour des zones habitées qui représentaient environ 1,1% de la superficie totale. La Figure 4.14 permet de caractériser l'état d'occupation du sol en juillet 2010.

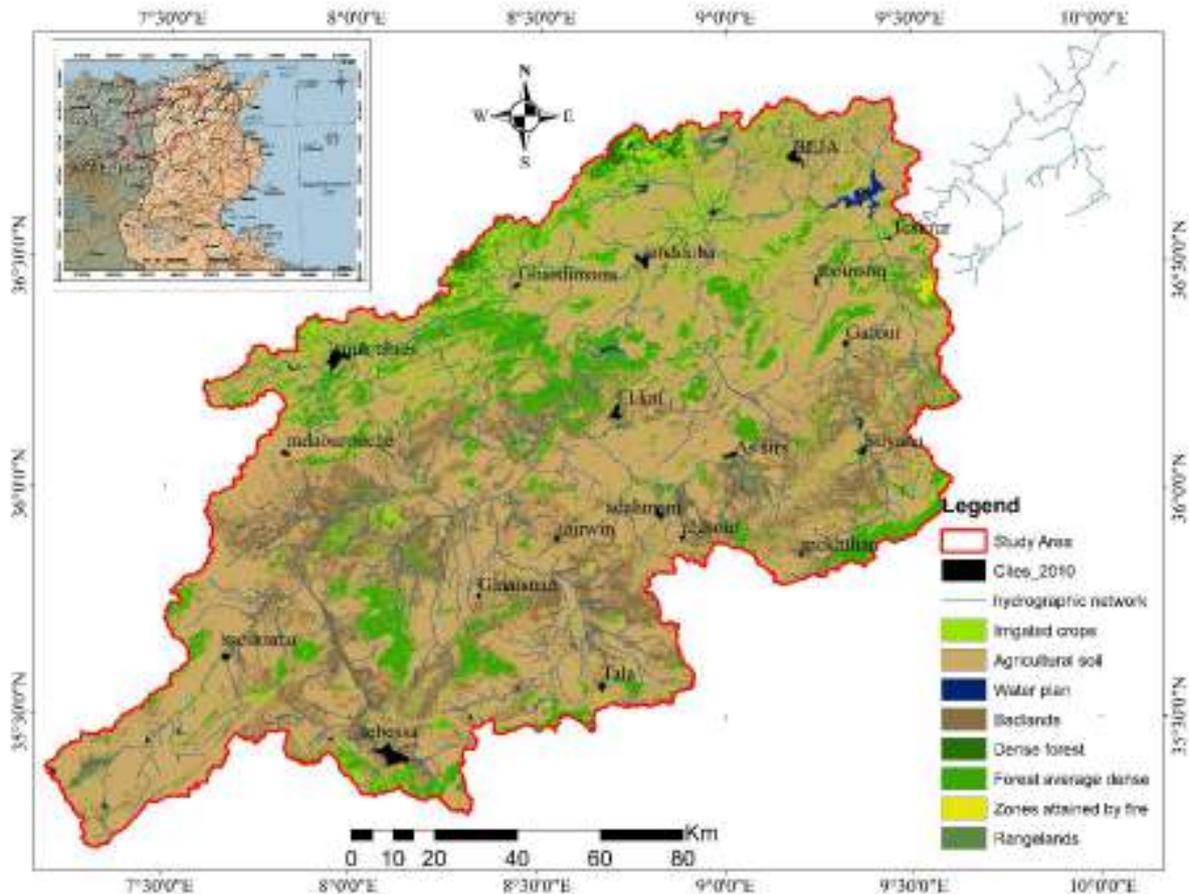


Figure 4.14 carte d'occupation du sol juillet 2010

#### 8.1.4 Etat de l'occupation du sol en 2017

En 2017, Nous avons observé une augmentation considérable des surfaces occupées par les forêts denses (214,7Km<sup>2</sup> soit 1,04%), et moyennement denses (3240,1km<sup>2</sup> soit 15,64%). Les plans d'eaux ont subi une baisse de superficie par rapport à 2010 (34,4 Km<sup>2</sup>, soit 0,17% de superficie). Les sols sans végétation (les badlands, les zones urbaines, et les zones touchées par l'incendie, et le sol agricole en période sèche) occupent 57.64%, par contre les cultures irriguées occupent 16,8% de superficie. Les zones habitées ont augmenté et occupaient une superficie de 270 Km<sup>2</sup> soit 1,3% de la superficie totale de la zone. La Figure 4.15 permet de caractériser l'état d'occupation du sol en juillet 2017.

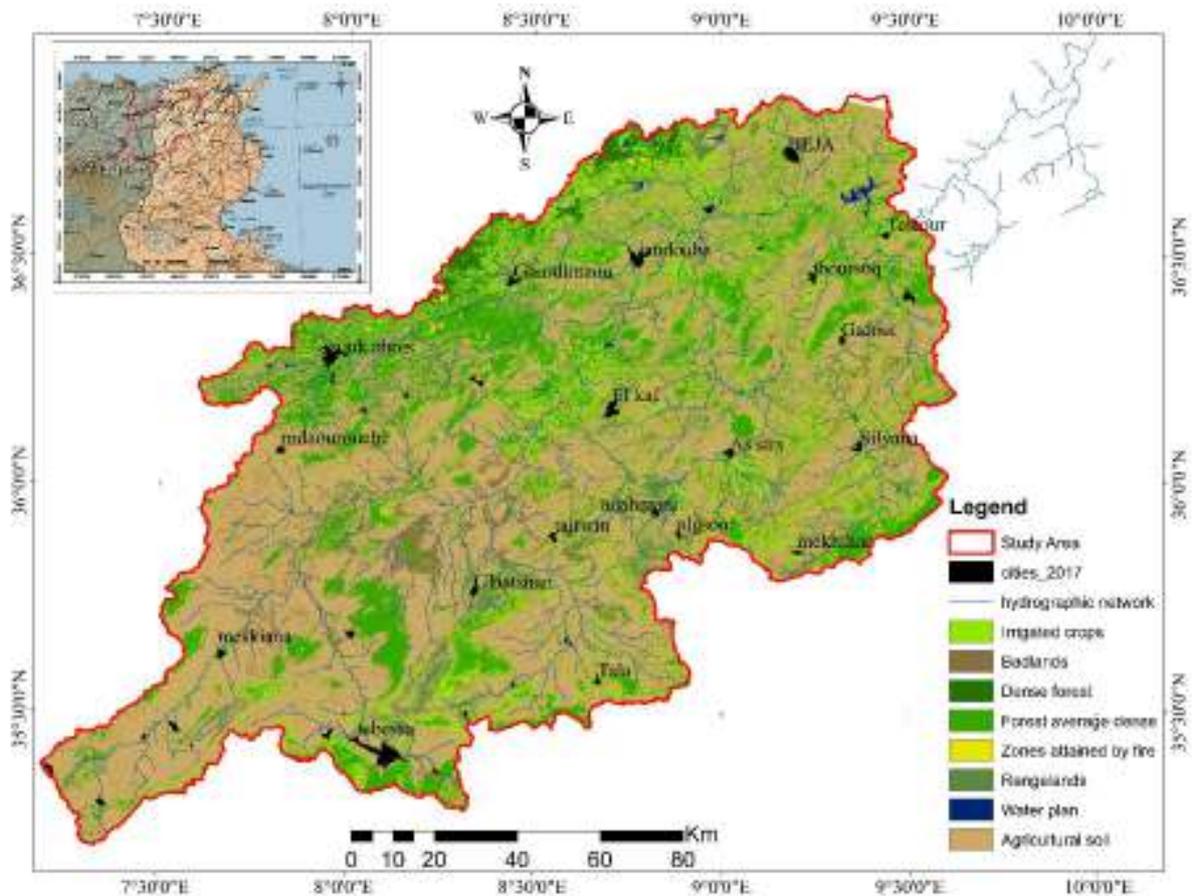


Figure 4.15 carte d'occupation du sol juillet 2017

### 8.1.5 Validation de la classification par la matrice de confusion

La matrice de confusion nous donne une information sur la précision globale de la classification. Le tableau 4.6 relatif à la matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 1994 montre que la précision globale, c'est à dire le rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre total de pixels, est de l'ordre de 76% et le coefficient Kappa est de 0.7. Ceci permet de dire qu'il existe un accord substantiel entre les résultats de la classification et la réalité sur le terrain.

Rappelons que nous avons utilisé des anciennes cartes d'occupation du sol de la région et des repères considéré inchangables (fixe au cours du temps). Le tableau 4.7 relatif à la matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 2004 montre que la précision globale est de l'ordre de 78% et le coefficient Kappa est de 0.7. On déduire qu'il existe un accord substantiel entre les résultats de la classification et la réalité sur le terrain durant cette période.

Le tableau 4.8 montre la matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 2010. Elle montre que la précision globale est de l'ordre de 78% et le coefficient Kappa est de 0.7. On constate qu'une excellence correspondance est existée entre la classification effectuée et la réalité sur le terrain.

Les résultats de la classification sont obtenus après plusieurs essais en utilisant à chaque fois des sites d'entraînement différents afin d'avoir les meilleures échantillons qui représentent les classes choisies pour cette étude. La précision globale de la classification effectuée sur l'image de juillet 2017 est de l'ordre de 91% et le coefficient Kappa est de 0.88 donc la cartographie est correspond à un excellent accord avec la réalité. (Voir tableau 4.9)

Tableau 4.6 matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 1994

Classes	Irrigated crops	Annual crops	Water plan	Badlands	Dense forest	Forest average dense	Zones attained by fire	Rangelands	Total classified	Producer	User
Irrigated crops	10543	3416	0	4	845	3434	84	28	18354	0.33	0.57
Annual crops	15588	50977	0	17	9	814	270	133	67808	0.85	0.75
Water plan	0	0	4947	0	0	0	0	0	4947	1.00	1.00
Badlands	107	348		1507		34	5	70	2071	0.98	0.73
Dense forest	0	0	0	0	14218	1267	0	0	15485	0.87	0.92
Forest average dense	1514	1011	3	1	1220	38726	543	21	43039	0.86	0.90
Zones attained by fire	2	9	0	0	4	32	4974	0	5021	0.84	0.99
Rangelands	4280	4242		16	70	485	19	3638	12750	0.94	0.29
Ref Total pixels	32034	60003	4950	1545	16366	44792	5895	3890	169475		
									<b>OA</b>	<b>76%</b>	
									<b>Kappa</b>	<b>0.7</b>	

Tableau 4.7 matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 2004

Classes	Dense forest	Forest average dense	Water plan	Badlands	Irrigated crops	Rangelands	Annual crops	Zones attained by fire	Total classified	Producer	User
Dense forest	4193	165	0	0	1	0	0	0	4359	0.98	0.96
Forest average dense	83	17590	0	7	102	146	646	0	18574	0.91	0.95
Water plan	0	0	8303	0	0	0	0	0	8303	1.00	1.00
Badlands	0	18	5	3033	1	537	525	0	4119	0.93	0.74
Irrigated crops	20	1389	0	2	1763	22	813	0	4009	0.89	0.44
Rangelands	0	74	0	167	14	5932	12794	0	18981	0.74	0.31
Annual crops	0	138	2	37	92	1423	29925	0	31617	0.67	0.95
Zones attained by fire	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Ref Total pixels	4296	19374	8310	3246	1973	8060	44703	0	89962		
									<b>OA</b>	<b>78%</b>	
									<b>Kappa</b>	<b>0.72</b>	

Tableau 4.8 matrice de confusion de la carte d'occupation du sol du juillet 2010

Classes	Irrigated crops	Annual crops	Water plan	Badlands	Dense forest	Forest average dense	Zones attained by fire	Rangelands	Total classified	Producer	User
Irrigated crops	6443	990	15	0	225	2199	52	0	9924	0.57	0.65
Annual crops	3351	31952	4	45	0	2544	100	6	38002	0.87	0.84
Water plan	224	716	9001	9	0	0	0	0	9950	0.997	0.90
Badlands	0	1202	4	2124	0	269	0	138	3737	0.92	0.57
Dense forest	549	0	0	0	5835	179	0	0	6563	0.96	0.89
Forest average dense	713	1202	0	0	5	41051	31	0	43002	0.89	0.95
Zones attained by fire	76	11	7	0	0	40	940	0	1074	0.84	0.88
Rangelands	13	802	0	119	0	46	0	1651	2631	0.92	0.63
Ref Total pixels	11369	36875	9031	2297	6065	46328	1123	1795	114883		
									<b>OA</b>	<b>86%</b>	
									<b>Kappa</b>	<b>0.81</b>	

Tableau 4.9 Confusion matrix of the classification of the land use map of July 2017.

	Irrigated crops	urban zone	Badlands	Dense forest	Forest average dense	Zones attained by fire	Rangelands	Water plan	Annual crops	Total classified	Producer	User
Irrigated crops	4468	74	0	69	628	4	45	3	773	6064	0.70	0.74
urban zone	102	6647	29	0	94	7	10	0	30	6919	0.89	0.96
Badlands	1	590	442	0	193	0	0	0	2	1228	0.94	0.36
Dense forest	0	0	0	3836	370	0	0	0	0	4206	0.98	0.91
Forest average dense	180	24	0	19	34822	56	1	0	123	34782	0.94	0.99
Zones attained by fire	0	0	0	0	556	2284	0	0	1	2841	0.97	0.80
Rangelands	367	49	0	0	34	1	3007	0	1564	5022	0.91	0.60
Water plan	0	0	0	0	0	0	0	4278	0	4278	1.00	1.00
Annual crops	1053	50	0	0	238	0	222	0	27338	28901	0.91	0.95
Ref Total pixels	6413	7436	471	3924	36696	2352	3291	4281	29968	95071		
										<b>OA</b>	<b>91%</b>	
										<b>Kappa</b>	<b>0.88</b>	

La figure 4.16 représente une comparaison entre la classification des images et les photos de Google Earth TM, elle montre qu'il existe une excellente correspondance avec la réalité du terrain.

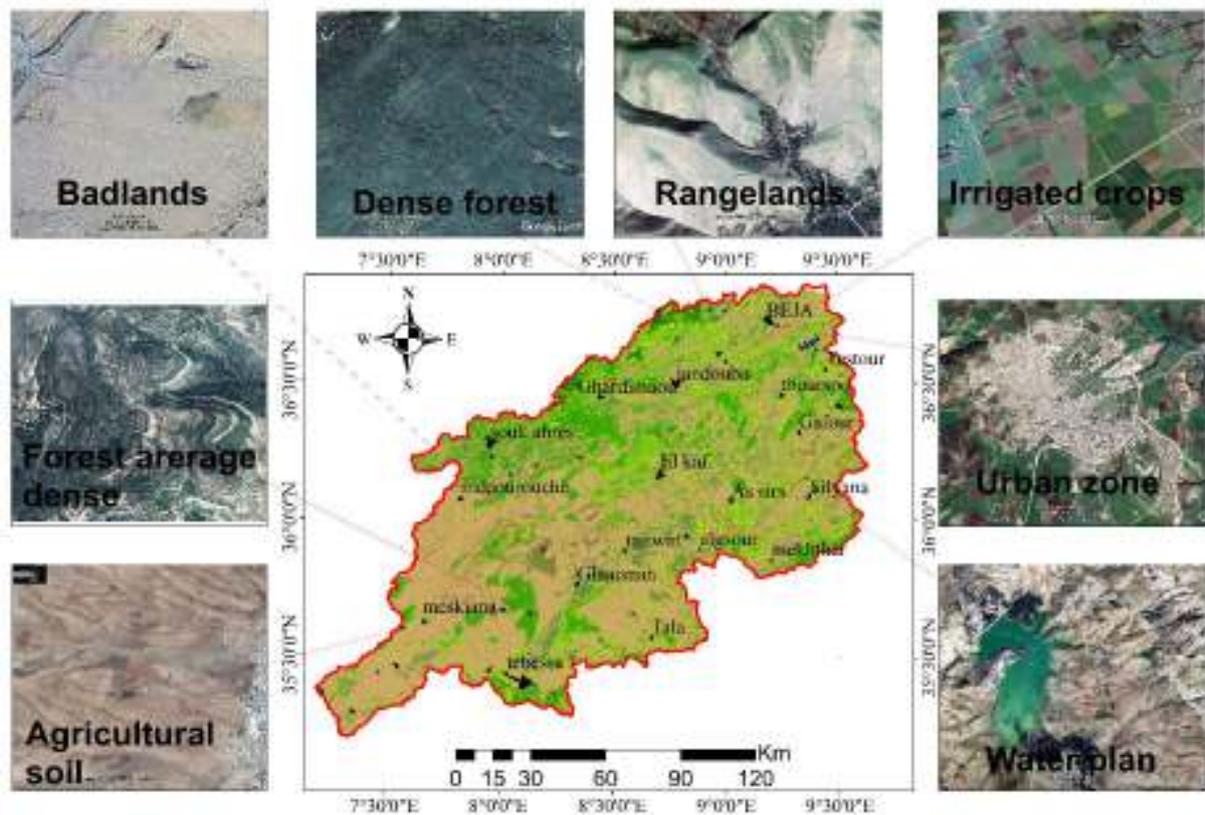


Figure 4.16 Comparison between the classification and photos from Google Earth TM.

### 9. Extraction des zones inutiles (plans d'eaux)

Il est important de masquer certaines parties dans la zone d'étude, c'est parties sont inutiles à l'analyse, l'approche utilisée est basée sur la technique des masques. Nous avons créé deux masques, le premier est pour la zone utile qui représente la partie concernée par l'étude et le deuxième concerne la partie occupée par l'eau. (Parties inutiles. figure 4.17).

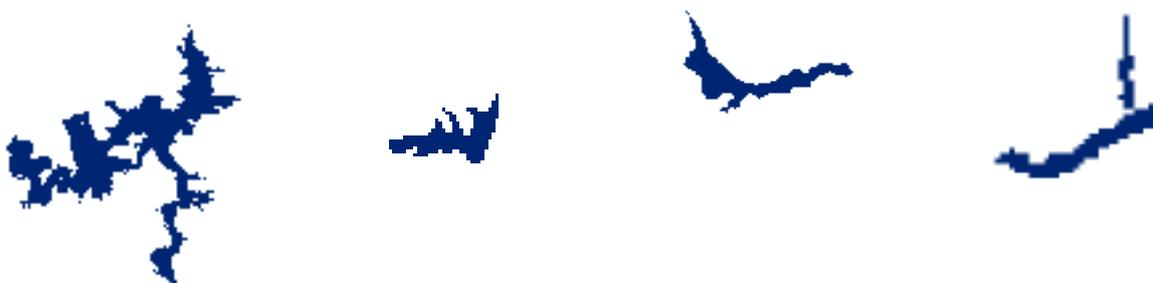


Figure 4.17 Exemples sur des parties inutiles à l'analyse. (Barrages et lacs)

## 10. Conclusion partielle

D'une façon globale, Le paysage dans la zone d'étude (le B.V de la Mejerda) est composé de quatre grands secteurs principaux :

1. les sols agricoles ; se localisent sur les plaines d'Oued Medjerda, oued Mellgues et presque toute la plaine de Meskiana.
2. Les forêts et les parcours ; sont situés sur les massifs de Tébessa et d'Ouenza, les plateaux du Haut Tell, en particulier, au niveau de la rive droite de l'oued Medjerda et localement sur les petits Jbels du sous bassin versant d'oued Chebro.
3. les sols nus ; occupent la partie sud de la région étudiée.
4. Les surfaces en eau, elles désignent les Sebkhha de Meskiana et les aménagements hydrauliques (lacs collinaires et barrages).

# **Chapitre 5**

## **Evolution de l'occupation du sol et estimation du facteur C-RUSLE**

## Chapitre 5 : Evolution de l'occupation du sol et estimation du facteur C-RUSLE

### 1. Introduction

On s'intéresse dans cette partie à la détermination des gains et des pertes de chaque classe d'occupation du sol durant la période 1994-2017. Nous avons étudié la dynamique de la végétation en utilisant l'indice de végétation standard (NDVI) qui représente un outil efficace pour décrire le comportement spectral de la végétation. Les cartes d'occupation de sol préparées dans le chapitre précédant ont été utilisées. La carte de changement d'occupation a été comparée à la carte du risque d'érosion.

### 2. Détection des changements et évolution temporelle et spatiales

#### 2.1 Détection des changements

Dans cette partie, on a tracé les cartes de la couverture du sol pour 4 périodes sèches des années (1994, 2004, 2010, et 2017) et la période humide de l'année (2018) et déterminé les gains et les pertes dans chaque classe (eau, végétation et sol nu) en utilisant le logiciel « Arcgis 10.5 ».

##### 2.1.1 Variation interannuelle

La classification de l'occupation du sol pour les 4 périodes, (1994, 2004, 2010, et 2017), a permis d'étudier l'évolution de la végétation dans la zone d'étude. Pour déterminer les changements entre deux images prises durant deux périodes différentes, deux algorithmes ont été utilisés : le premier est possible grâce à l'utilisation des masques (voir Figure1). Le technique consiste à affecter des codes pour chaque classe d'occupation à l'aide du module spatial analyse Tools du logiciel Arcgis 10.5 et de faire une simple soustraction entre ces codes, pour avoir les zones de régression, de progression ou de stabilité (Samaali 2011, Toumi et al. 2013, Chowdhury et al.2020 ; Menasria et al.2022). Le second utilise les classifications effectuées pour la délimitation des zones de changement et de persistance des objets (Toumi et al 2013 ; Tsewoue et al.2020).

La difficulté de cette méthode est de reproduire exactement la même classification sur chaque image. Les cartes de la couverture du sol pour les quatre périodes (1994, 2004, 2010, et 2017) classifient précédemment ont été utilisées et les gains et les pertes dans chaque classe et catégorie ont été également déterminés. Les paramètres suivants ont été extraits :

- Les changements dans chaque classe en pourcentage de la surface du sol (de chaque catégorie de la couverture du sol)
- Variation nette de chaque catégorie.
- Persistance de chaque classe : la couverture du sol qui n'a pas changé entre les deux dates respectives.

Les résultats de l'étude de variation interannuelle d'occupation du sol sont mentionnés dans la figure 5.1 et tableau 5.1. On constate que les deux classe végétation et sol nu subit un grand changement entre 1994 et 2017. Une amélioration de la superficie végétale a été remarquée entre 1994 et 2004 (soit 4426,43 Km<sup>2</sup>). Cette amélioration est due aux implantations et l'extension des parcours effectuée dans le programme de CES sur la zone d'études dans le but de protéger les bassins contre l'érosion. 2701,15 Km<sup>2</sup> de la végétation a été transformé durant cette période en sol nu, l'extension des villes sur le couvert végétal et l'érosion hydriques sont parmi les causes de cette dégradation.

La majorité de la zone d'étude a été dégarnie de la végétation entre 2004 et 2010 (soit 4894,01 km<sup>2</sup>). Cette dégradation est due à l'activité agricole faible et l'arrêt des opérations d'implantation et aussi l'augmentation de nombres des feux de forêt et l'extension des villes sur le couvert végétal, et beaucoup plus à la diminution de la pluviométrie durant cette période ce qui implique une augmentions des taux d'envasement des barrages et une diminution des superficies des plans d'eaux (soit 3,35km<sup>2</sup> des plans d'eaux a été transformé en sol nu).

Contrairement, entre 2010 et 2017, on remarque une amélioration de la superficie du couvert végétal par rapport à la période 2004-2010, cette amélioration est due aux améliorations des activités agricoles dans la région (7,16% de la superficie totale en 2010 et 16,80% en 2017) et aussi aux extensions des parcours et amélioration de la densité des forêts moyennement denses.

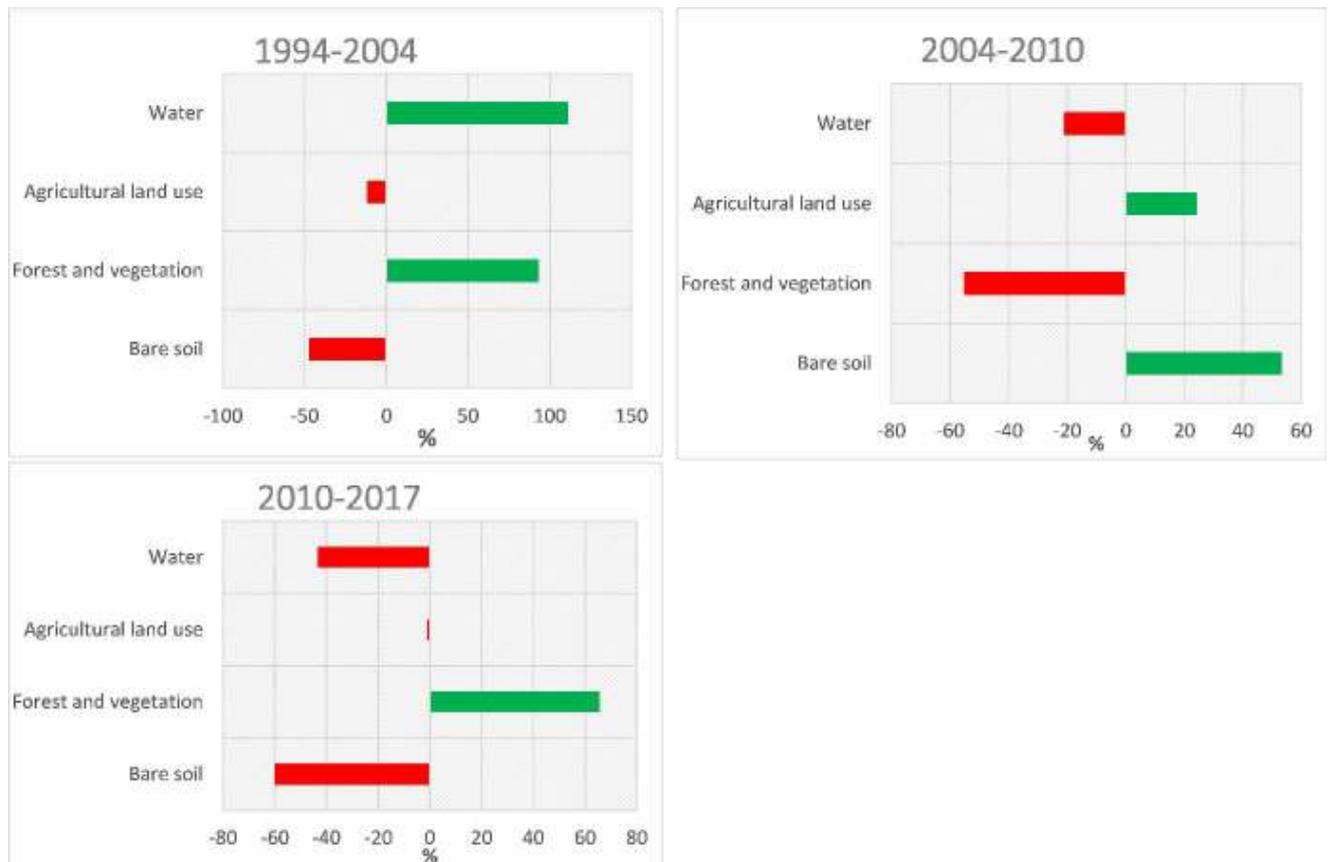


Figure 5.1 les changements de différentes classes d'occupation du sol entre 1994 and 2017

Tableau 5.1 Spécification de changement d'occupation du sol entre 1994 et 2017

Changement	entre	entre	entre
	1994 et 2004	2004 et 2010	2010 et 2017
	(Km <sup>2</sup> )	(Km <sup>2</sup> )	(Km <sup>2</sup> )
Végétation vers eau	22,17	0,9	0,05
Sol nu vers eau	24,54	3,9	0,71
Végétation vers sol nu	2701,15	4894,01	704,93
Eau vers sol nu	2,57	15,97	12,70
Sol nu vers végétation	4426,43	816,3	4770,78
Eau vers végétation	2,19	5,27	15,53



Figure 5.2 Évolution des surfaces occupées par l'eau entre 1994 et 2017. Classification des images satellitaires de 1994 et 2017. Landsat 30m.A/barrage Bouhrthma, B/ barrage Ain Dalia C/ barrage Siliana

### 2.1.2 Variation saisonnières

Pour étudier la variation saisonnière de l'occupation du sol, une classification dirigée a été effectuée sur des images captées en période humide, (Avril 2017), et en période sèche (Juillet 2017). Les images sont acquises à des dates permettant de distinguer facilement les types d'occupation du sol. Nous avons utilisé la classification par maximum de vraisemblance pour identifier la végétation, le sol nu et l'eau pour l'image de la période humide. Par la suite, ces classifications ont été croisées et comparées avec celle obtenue en période sèche, afin d'identifier la végétation annuelle, les Interculture et les badlands (Toumi et al.2013 ; Monroe et al.2020 ; Dicara and Tech 2020). (Figure 5.4)

Les résultats de la variation saisonnière de l'occupation du sol dans la Medjerda sont présentés dans le tableau 2 qui résume les différents types d'occupation, leur superficie ainsi que leurs taux de variation. Nous avons remarqué que 20,73% de la surface totale du bassin versant est occupée par une végétation annuelle (végétation présente toute l'année, forêt, ...) et plus de 50% de la surface totale du bassin est occupée par le sol nu hivernale.

La végétation annuelle est défavorable à l'érosion hydrique et au ruissellement, elle protège le sol en permanence. Le sol nu hivernale représente la fraction la plus importante, il occupe plus de 50% de la surface totale, ces zones sont dépourvues de toute forme de végétation, surtout en période

humide, et par conséquent sont exposées directement au force d'inertie de la pluie (érosivité de la pluie ). Les sols nus hivernaux occupent beaucoup plus la partie sud et sud-ouest du bassin versant ( exactemet au niveau des bassins Mellgue et Siliana,)

Tableau 5.2 Croisement du sol couvert et sol nu permettant d'identifie la végétation hivernale

Période sèche	Période humide	Type d'occupation du sol	%
Végétation	Végétation	végétation annuelle	20,73
Sol nu	Végétation	Interculture	25,30
végétation	Sol nu	Culture hivernale	8,38
Sol nu	Sol nu	Sol nu	45,42

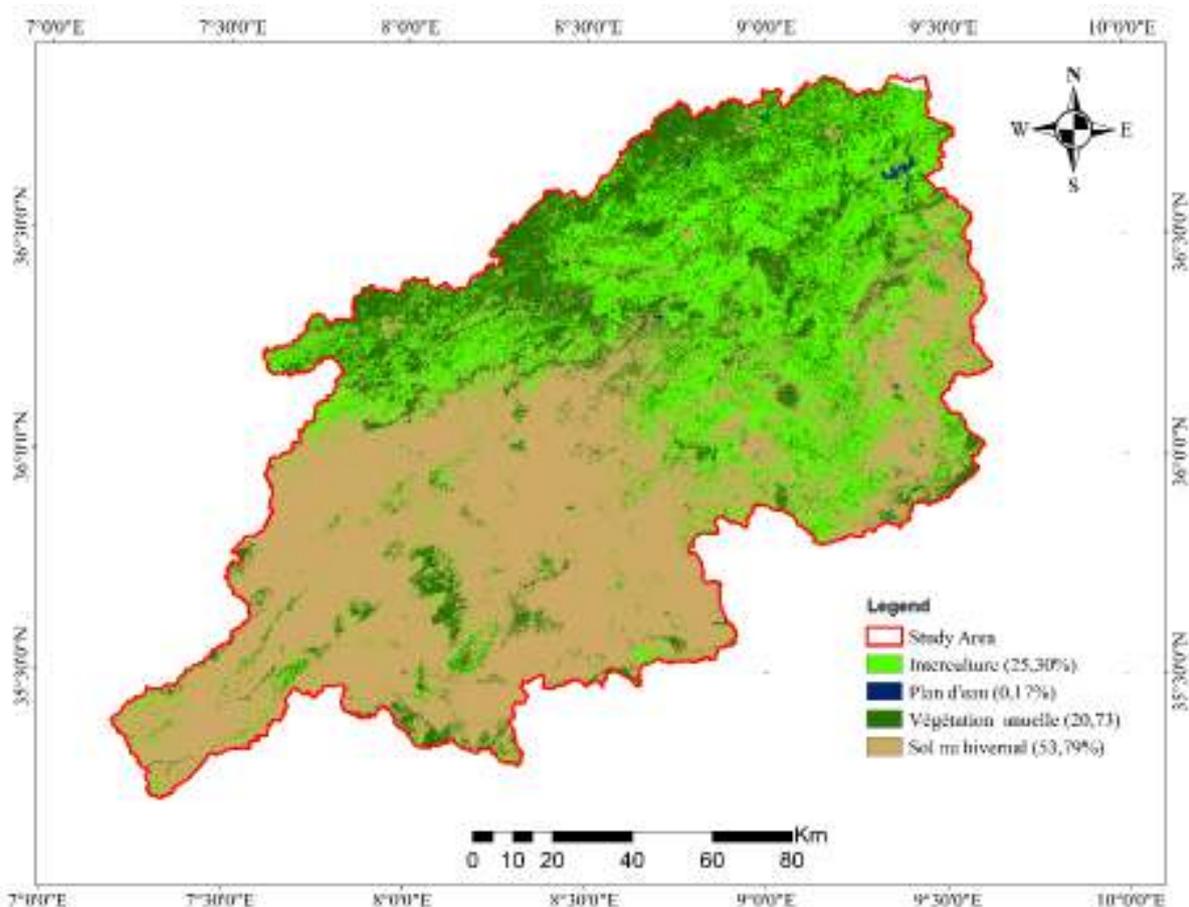


Figure 5.3 Carte de croisement des classes de sols couverts et sol nus entre les deux saisons hivernale et estivale

Les résultats de la classification sont confortables avec la classification de Tricart (1963). Celle-ci, nous a permet de classer la végétation du bassin versant de a Medjerda, dans les catégories suivantes :

- Surfaces protégées en permanence : ce type de surface est défavorable au ruissèlement et à l'érosion, il englobe les forêts, prairies naturelles et artificielles permanentes. Cette classe occupe 21% de la superficie totale du bassin.

- Surfaces protégées incomplètement (Partiellement) : ce type de surface permet aux averses tombant sur les parties nues du sol de provoquer le ruissellement et exercer une érosion hydrique. son degré de protection contre l'érosion dépend d'autres paramètres tels que la morphologie de la zone et les pratiques agricoles utilisées.
- La couverture végétale n'occupant le sol que saisonnièrement (inter-cultures, résidus, culture maraichères ;
- Surfaces mal protégées ou nues : ces surfaces sont favorables au ruissellement et à l'érosion hydrique : terrain dénudé (badlands et steppe).

## 2.2 Etude de la dynamique de la végétation à l'aide de NDVI de SPOT Végétation

Dans cette étude, nous nous proposons d'utiliser l'indice de la végétation normalisé NDVI, qui est un indicateur couramment utilisé pour la cartographie et le suivi de l'évolution de la végétation. En effet, l'indice de végétation normalisé (Rouse et al. 1974) est devenu l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale (Bartholomé, 1993). Cet indice, le plus souvent appelé NDVI selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge R et l'infrarouge IR. Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que d'une part ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge.

Les données du NDVI utilisées sont issues du capteur « VEGETATION » à bord du satellite PROBA-V. Ces capteurs offrent une couverture quotidienne avec une résolution spatiale d'environ 1 km<sup>2</sup>. Le satellite PROBA-V a été placé en orbite le 7 mai 2013 par une fusée Vega pour une mission d'une durée comprise entre deux ans et demie et cinq ans. Après sept ans d'activité, le satellite atteint la fin de sa durée de vie opérationnelle le 30 juin 2020. Sa mission est officiellement terminée fin octobre 2021.

Les données de l'NDVI utilisés sont téléchargées gratuitement à partir du site <http://www.vito-eodata.be> avec une résolution spéciale de 1km. Nous avons préparé une série de 200 images décennales représentant les pixels qui ont des valeurs maximales du NDVI couvrant la zone d'étude entre décembre 2010 et janvier 2017. Les données du NDVI en combinaison avec les données de précipitations ont permis d'identifier les changements subtils associés à la dégradation des terres.

### 2.2.1 Prétraitement des séries temporelles du NDVI

Le NDVI décrit la différence de réponse spectrale de la chlorophylle des végétaux entre le canal rouge et infra-rouge suivant l'équation (1). Les données brutes sont des images en niveau de gris. Les valeurs numériques (CN) des pixels sont converties en indice de végétation selon l'équation (2). Lorsque NDVI est supérieur à 0,1, le type de couverture terrestre est identifié comme couvert végétal, qui est également utilisé pour déterminer la saison de croissance de la végétation (Cuomo et al. 2001 ; Lanfredi et al, 2003).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}} \dots\dots\dots (5.1)$$

Où « PIR » est le canal proche infrarouge et « R » est le canal rouge.

$$\text{NDVI} = \text{DN} \times 0,004 - 0,1 \dots\dots\dots (5.2)$$

Les changements dans le couvert végétal peuvent être déduits du NDVI. Plus la valeur NDVI est élevée plus la végétation est dense. Selon les lois de croissance des plantes et les caractéristiques de variation du NDVI, le maximum annuel du NDVI reflète le meilleur état de la végétation en un an (Huang et al. 2001).

L'utilisation des valeurs maximales du NDVI ( $\text{NDVI}_{\text{max}}$ ) permet de conserver la valeur la plus élevée du NDVI pour chaque pixel au cours d'une période donnée et de produire des images qui sont spatialement continues et relativement sans nuages, avec une résolution temporelle suffisante pour évaluer la dynamique de la végétation (Holben 1986).

Le  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  est défini comme le NDVI maximal pour un intervalle de temps. Le  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  décadaire, mensuel et annuel peut être un indicateur fiable des variations qui peuvent affecter l'état du couvert végétal. Il permet aussi de montrer la nature des variations interannuelles de la végétation et de déterminer le lien entre ces variations et celles des conditions climatiques et/ou encore celles induites par l'homme.

### 2.2.2 Variation interannuelle

Le couvert végétal a changé avec une tendance ondulante durant la période 2010 – 2017, les valeurs maximales du NDVI se sont produits dans les années 2013 et 2014 tandis que les valeurs minimales pourraient être trouvées dans les années 2016 et 2017. La moyenne annuelle de  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  a légèrement diminué entre 2011 et 2017 indiquant une tendance à la baisse de la végétation et de l'activité agricole.

La Figure 5.5 illustre la différence entre deux  $\text{NDVI}_{\text{max}}$  des deux années voisines, les différences entre 2010 – 2011 et 2014- 2015 et 2015- 2016 sont négatives ce qui montre une dégradation de la végétation. Par ailleurs ceux des périodes 2011 2012 et 2012 2013 et 2013 2014 sont positives ce qui montre une augmentation de l'activité agricole pendant ces périodes.

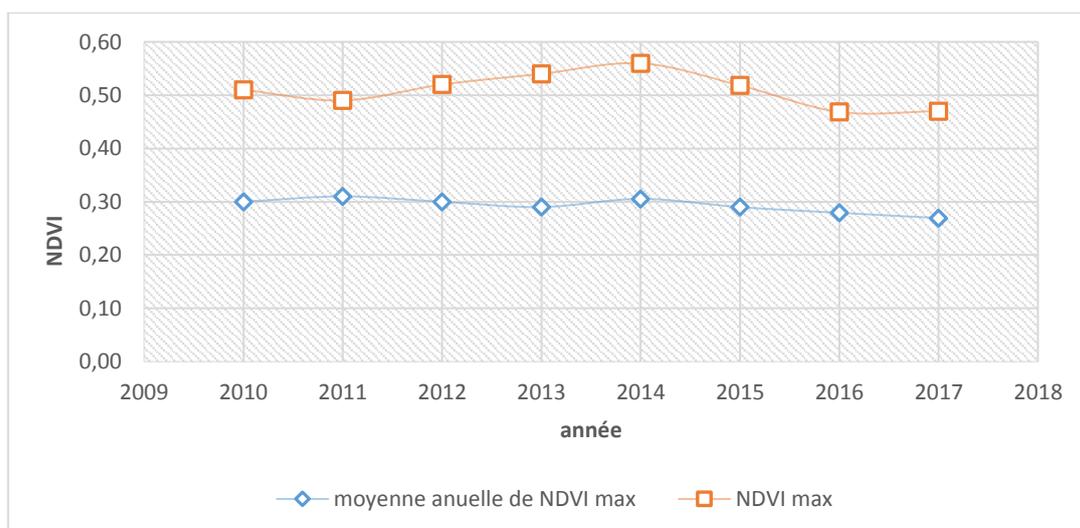


Figure 5.4 variation annuelle du NDVI max et la moyenne annuelle de NDVI max au cours de la période 2010 – 2017

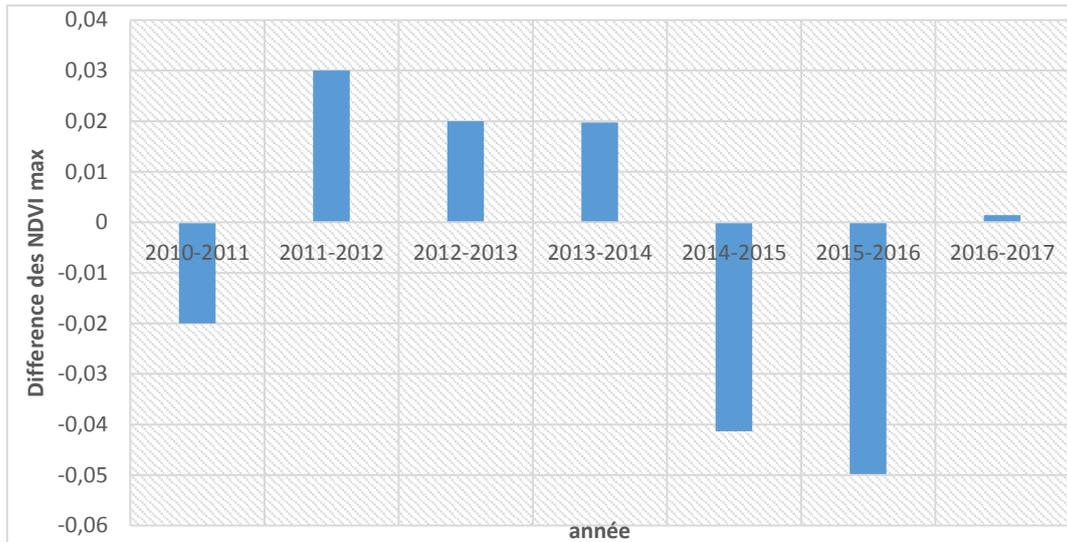


Figure 5.5 Différence de la moyenne du NDVI max entre deux années voisines

### 2.2.3 Variation mensuelle

La figure 5.6 représente la dynamique mensuelle de la végétation au cours des années 2014 2015 2016 et 2017. Nous avons remarqué que les valeurs max de NDVI correspond au pic de la verdure en période humide (durant la fin de l’hiver et le début du printemps), tandis que les valeurs min sont enregistrés pendant la période sèche correspond à la saison estival (entre fin de juillet et début d’aout)

Nous avons remarqué aussi que les valeurs maximales de l’NDVI en hiver et en printemps de l’année 2017 sont inférieures aux valeurs des années 2014 et 2015, ce qui veut dire que l’activité agricole dans la région aurait diminué. L’écart entre 2016 et 2017 est faible par rapport à l’écart entre 2014 et 2015, et 2015,2016 cette amélioration correspond probablement à l’augmentation des précipitations et de l’activité agricole en hiver de 2017.

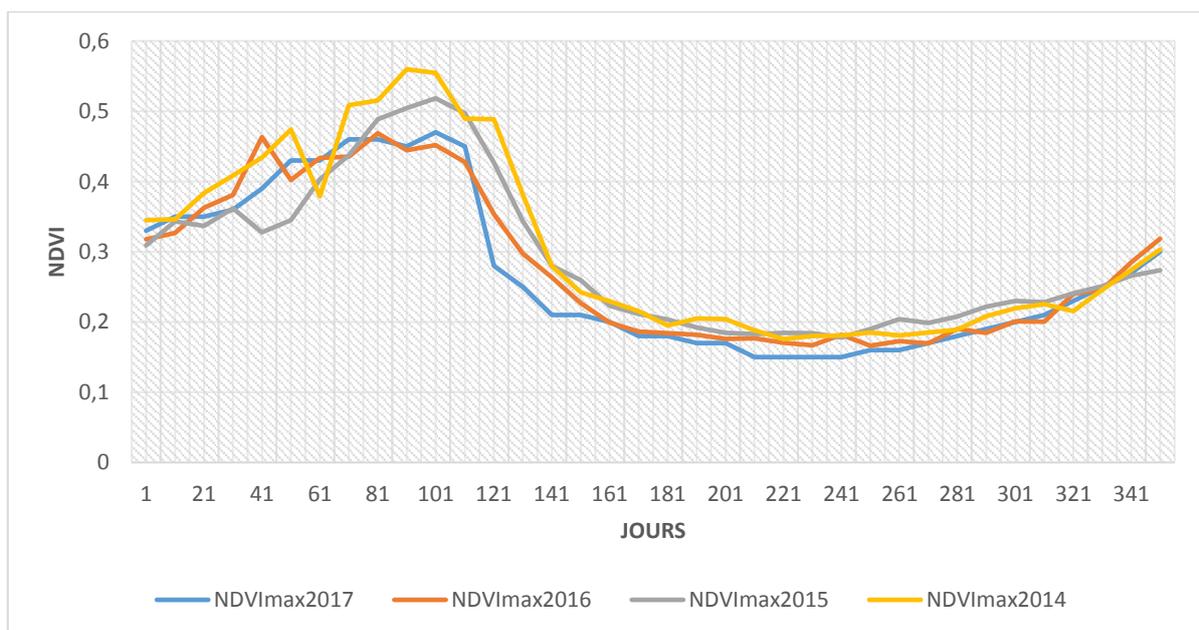


Figure 5.6 variation mensuelle de NDVI max durant la période 2014 – 2017

La figure 5.7 illustre la variation du  $NDVI_{max}$  mensuel et de la précipitation durant la période 2014 – 2017. Le temps de réponse du développement de la végétation est approximativement de 10 à 20 jours (Justice et al.1991).

La précipitation dans la région d'étude a oscillé tout au long des dernières décennies. Les moyennes mensuelles maximales des précipitations sont enregistrées durant la période hivernale tandis que les valeurs minimales sont mesurées durant la période estivale. Durant l'année 2017, les pics des précipitations d'automne coïncident avec les valeurs minimales du NDVI où le sol se trouve nu et plus vulnérable à l'érosion hydrique. On voit nettement que les précipitations et les valeurs de l'NDVI ont une tendance légère à la baisse.

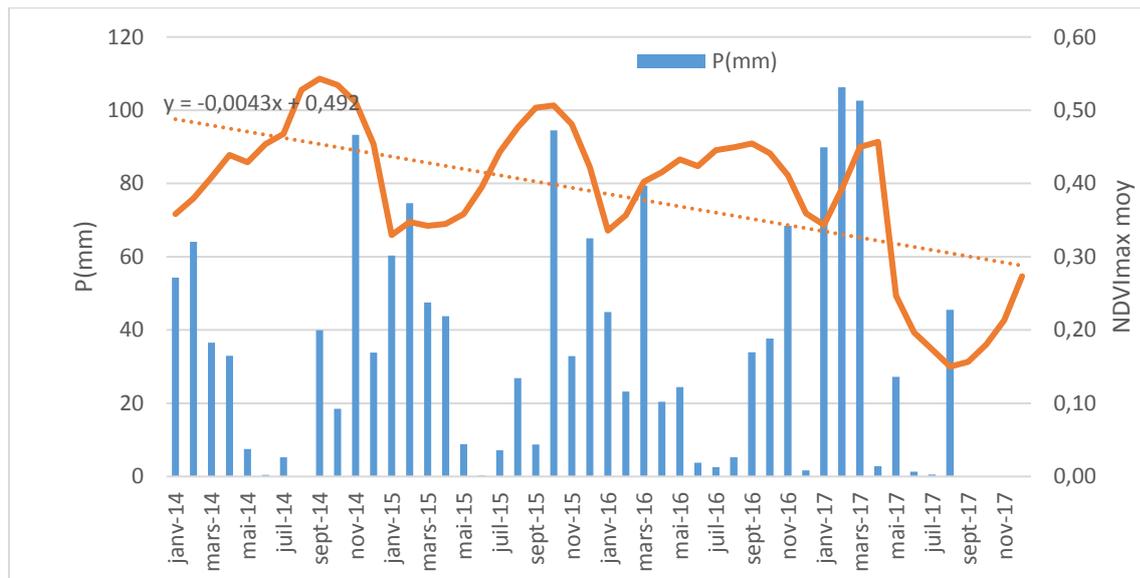


Figure 5.7 Dynamique du NDVI mensuel au cours de la période 2014 – 2017

Les tendances au niveau du  $NDVI_{max}$  résultent de l'interaction de plusieurs facteurs, à savoir certains artefacts sur les données satellitaires, des variations biophysiques et les influences anthropiques (Omuto et al, 2010).

On utilisant la régression linéaire entre les valeurs maximales annuelles du NDVI et les différentes années nous avons déterminé la tendance annuelle de la végétation au cours de la période 2013-2017. Les zones agricoles représentent une faible tendance à la baisse. L'activité agricole s'est améliorée durant la dernière année, avec une augmentation des précipitations. Dès lors, les variations de l'indice de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole.

### 3. Facteur d'occupation du sol (C-RUSLE)

L'occupation du sol est un facteur important pour estimer l'érosion du sol par RUSLE. Le facteur d'occupation du sol (C-factor) combine la couverture, le degré de production de la plante et la technique de culture associée (Farhan 2013 ; Sadiki et al.2004). La détermination du facteur C repose sur la densité de la couverture de la surface du sol par la végétation et sur la hauteur des strates végétales. (Sadiki et al.2004). Il varie entre 1 pour un sol nu et moins de 0.1 pour les forêts denses. La méthode traditionnelle d'estimation spatiale du facteur C consiste à attribuer des valeurs à des classes de couverture terrestre, ces valeurs sont obtenues à partir des tables ou calculés à l'aide d'une observation sur le terrain.

Les chercheurs ont mis au point de nombreuses méthodes pour estimer le facteur C en utilisant le NDVI pour évaluer les pertes de sol avec RUSLE (De Jong et Riezebos, 1997 ; De Jong et al. 1999 ; Lin et al. 2002 ; Markose et Jayappa 2016 ; Uddin et al .2016 ; Ayalew et al.2020). Ces méthodes utilisent un modèle de régression pour effectuer une analyse de corrélation entre les valeurs de facteur C mesurées sur le terrain ou obtenues à partir des tables et les valeurs NDVI dérivées d'images de télédétection. Les valeurs de facteur C inconnues peuvent être estimées à l'aide d'une équation obtenue à partir d'analyses de régression linéaire.

#### 3.1 Estimation des valeurs du facteur C

Dans cette étude, les valeurs de facteur C sont estimées en utilisant les valeurs de la littérature et les valeurs dérivées à partir des valeurs de NDVI.

##### 3.1.1 Estimation du facteur C à partir des valeurs de la littérature

Nous avons élaboré des cartes du facteur C à partir des cartes d'occupation du sol réalisées par la classification supervisée des images satellitaires en attribuant à chaque type d'occupation du sol une valeur du facteur C. Les indices de C retenus sont choisis en se référant aux :

- ❖ Travaux de Cormary and Masson (1971) en Tunisie.
- ❖ Applications du modèle RUSLE.

Ces valeurs ont été obtenu à partir du suivi des parcelles d'érosion des sols sous pluviométrie naturelle dans le nord de la Tunisie, qui est l'approche la plus utilisée dans le monde pour définir le modèle RUSLE (Borrelli et al. 2018 ; Oliveira et al. 2011 ; Zare et al. 2017).

Le tableau 5.3 présente les principales valeurs du facteur C utilisés pour la distribution spatiale ( $C_{lit}$ ).

Tableau 5.3 les principales valeurs du facteur C utilisés pour la distribution (Rapportée par Masson (1971))

Occupation du sol	C annuelle moyen
Terre nue, Jachère nue	1
Cultures annuelles	0.7
Maraichères	0.2
Forêt dense	0.01
Parcours	0.55
Arboricultures	0.15
Forêt claire	0.05

### 3.1.2 Estimation du facteur C à partir des valeurs NDVI

Pour déterminer le facteur C par télédétection, nous avons utilisé deux méthodes largement utilisées, basées sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), en raison de leur facilité d'application et traitement et de la haute disponibilité de l'entrée de données.

La première méthode a été proposée par Van der Knijff et al. (2000) notée ( $C_{VK}$ ), et la seconde a été proposée par Durigon et al. (2014) et adapté par Colman (2018) notée ( $C_{rA}$ ).

$C_{VK}$  est une méthode empirique basée sur une équation de régression exponentielle (Eq 3) dans des conditions climatiques européennes. Elle a été largement utilisée par plusieurs chercheurs pour générer la carte de facteur C afin d'estimer l'érosion hydrique par l'équation fondamentale des pertes en sols (Zhou et al.2008 ; Kouli et al. 2009 ; Markose et Jayappa 2016).

$C_{rA}$  est une méthode empirique basée sur le redimensionnement NDVI dans des conditions climatiques tropicales, avec des précipitations plus intenses, en utilisant une équation de régression linéaire (Eq 4). Cette méthode a été utilisée aussi par plusieurs chercheurs pour estimer le facteur C (Oliveira et al. 2015b ; Colman (2018) ; Sone et al. (2019))

$$C_{VK} = e^{\frac{-(\alpha \cdot NDVI)}{(\beta - NDVI)}} \dots \dots \dots (5.3)$$

$$C_{rA} = 0.1 \left( \frac{-NDVI + 1}{2} \right) \dots \dots \dots (5.4)$$

Où C est le facteur de couverture végétale;  $NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$ ;  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes.

Pour ( $\alpha$  et  $\beta$ ), nous avons choisi les valeurs proposées par Vander Knijff et al. (2000), ( $\alpha = 2$  et  $\beta = 1$ ), Les résultats de l'estimation du facteur C moyen sont mentionnés dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4 les résultats de calcul de validation de l'estimation effectuée

Year	$\overline{C_{lit}}$	$\overline{C_{VK}}$	$\overline{C_{rA}}$	$C_{lit}$		$C_{VK}$		$C_{rA}$	
				min	max	min	max	min	max
<b>2017</b>	0,55	0,56	0,03	0,001	1	0,001	0,99	0,02	0,04
<b>2010</b>	0,66	0,69	0,05	0,001	1	0	0,99	0	0,05
<b>2004</b>	0,61	0,67	0,04	0,001	1	0	0,99	0	0,09
<b>1994</b>	0,67	0,71	0,05	0,001	1	0,01	0,99	0,01	0,09

Le tableau 4.11 montre que :

Pour l'année 2017 :

- ❖ la valeur moyenne du facteur C obtenus de la carte de végétation est de l'ordre de 0,552.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{VK}$  est de l'ordre de 0,562.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{rA}$  est de l'ordre de 0,03.

Pour l'année 2010 :

- ❖ la valeur moyenne du facteur C obtenus de la carte de végétation est de l'ordre de 0,66.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{VK}$  est de l'ordre de 0,69.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{rA}$  est de l'ordre de 0,05.

Pour l'année 2004 :

- ❖ la valeur moyenne du facteur C obtenus de la carte de végétation est de l'ordre de 0,61.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{VK}$  est de l'ordre de 0,67.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{rA}$  est de l'ordre de 0,04.

Pour l'année 1994 :

- ❖ la valeur moyenne du facteur C obtenus de la carte de végétation est de l'ordre de 0,67.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{VK}$  est de l'ordre de 0,71.
- ❖ la valeur moyenne du facteur C estimé par  $C_{TA}$  est de l'ordre de 0,05.

Pour mieux comparer les résultats obtenus et montré la fiabilité des équations d'estimation utilisées, nous avons calculé le coefficient d'efficacité (CE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour les quatre années (1994, 2004, 2010 et 2017) selon les formules 5 et 6.

Un système d'échantillonnage systématique a été utilisé. La réalisation de ce système est basée sur une grille rectangulaire couvrant le bassin versant, qui a été générée à l'aide du module « Feature class » du logiciel ArcGIS 10.5. La résolution du maillage est de 5000 m. 400 points d'échantillonnage ont été générés sur l'ensemble du bassin versant. Les valeurs du facteur C obtenues à partir de la littérature ainsi que les valeurs estimées par  $C_{VK}$  et  $C_{TA}$  ont été attribuées à chaque point d'échantillonnage, selon la classe d'occupation du sol. Les valeurs moyennes du facteur C sont mentionnées dans le tableau 5.5.

$$CE = \frac{\sum_1^n (X_{val_i} - \overline{X_{val}})^2 - \sum_1^n (X_{p_i} - \overline{X_{val}})^2}{\sum_1^n (X_{val_i} - \overline{X_{val}})^2} \dots\dots\dots (5.5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_{p_i} - X_{val_i})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (5.6)$$

Où ( $X_{val_i}$ ) correspond aux valeurs du facteur C Obtenus, ( $\overline{X_{val}}$ ) correspond aux valeurs moyennes du facteur C obtenus et ( $X_{p_i}$ ) correspond aux valeurs estimées

Tableau 5.5 les résultats de calcul de validation de l'estimation effectuée

Year	$\overline{C_{lit}}$	$\overline{C_{VK}}$	CE	RMSE	$\overline{C_{TA}}$	CE	RMSE
<b>2017</b>	0,55	0,56	0,8	0,20	0,03	-1,87	0,6
<b>2010</b>	0,66	0,69	0,8	0,20	0,05	-3	0,7
<b>2004</b>	0,61	0,67	0,62	0,23	0,04	-5,6	0,61
<b>1994</b>	0,67	0,71	0,7	0,21	0,05	-3,35	0,65

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne trouvées pour les deux modèles de  $C_{VK}$  et  $C_{TA}$  variaient respectivement de 0,2 à 0,23 et de 0,6 à 0,7.

En comparant les valeurs du facteur C de la littérature avec celles obtenues à partir de la télédétection, on remarque que le modèle exponentiel ( $C_{VK}$ ) a montré des surestimations acceptables pour les valeurs moyennes de l'ensemble du bassin de Medjerda pour les quatre périodes, Les valeurs de CE trouvées sont proches de 1, ce qui montre que l'estimation est acceptable et que le modèle est valable a utilisé dans la région. Ce fait peut être lié à la similitude entre le climat et la végétation de la zone d'étude avec le climat et la végétation européenne, pour lesquelles la méthode a été développée par Vander Knijff et al. (2000).

$C_{TA}$  a montré des sous-estimations très faibles pour les valeurs moyennes de l'ensemble du bassin de Medjerda pour les quatre périodes. Les valeurs de CE calculées sont négatives et l'erreur quadratique est supérieure à la moyenne totale du bassin. (Tableau 4.14)

Pour toutes les classes d'utilisation des terres,  $C_{TA}$  ne convenait pas pour déterminer le facteur C, présentant des valeurs inférieures à celles de la littérature (Tableau 4.13). Nous expliquons cette remarque par le fait que Durigon et al. (2014) ont estimé le facteur C sur la base de NDVI

en utilisant 22 images Landsat-5 de 1986 à 2009, puis ont calibré les paramètres pour le Brizil, qui présente des caractéristiques climatiques et végétales différentes de celles de notre zone d'étude. Le seul cas où  $C_{rA}$  a mieux performé que la méthode  $C_{vK}$  concerne la couverture en forêt dense. Ce fait peut être lié à la plus similitude de hauteur et de feuillage des arbres des forêts denses avec les forêts des zones pour lesquelles la méthode  $C_{rA}$  a été développée. Les incendies de forêts ont causé une diminution de la couverture végétale et donc un changement du facteur C de 0,01 à 0,44( $\mp 0,09$ ).

La méthode  $C_{vK}$  proposée par van der Knijff et al. (2000) pour déterminer les valeurs du facteur C est considéré la plus précise pour notre zone d'étude (Climat semi-aride). L'utilisation des valeurs de 2 et 1 pour les paramètres a et b, respectivement, convenait pour être utilisée dans le bassin de la Medjerda. La figure 4.18 montre la distribution spatiale des valeurs du facteur C obtenues à partir de la littérature et par télédétection pour le bassin de la Medjerda. Les valeurs d'écart moyen et standard de  $C_{rA}$  et  $C_{vK}$  sont respectivement de  $0,016 \pm 0,01$  et  $0,29 \pm 0,02$ .

Tableau 5.6 Classes d'occupation et leur facteur C moyen et calcul d'erreur

	<b>Clit</b>	<b>C<sub>vK</sub></b>	<b>%</b>	<b>C<sub>rA</sub></b>	<b>%</b>
<b>Cultures irriguée</b>	0,4	0,45	-12,50	0,035	91,25
<b>Sol nu</b>	1	0,62	38,00	0,04	96,00
<b>Fort dense</b>	0,01	0,007	30,00	0,012	-20,00
<b>Incendie</b>	-	0,44	-	0,035	-
<b>Parcours</b>	0,55	0,55	0,00	0,038	93,09
<b>Sol Agricole</b>	0,7	0,6	14,29	0,04	94,29

La distribution des valeurs du facteur C estimé en utilisant le modèle  $C_{vK}$  montre que le maximum de surface est caractérisé par des valeurs comprises entre 0.4 et 0.7 (79%), cette classe est associée aux cultures céréalières et fourragères. La seconde classe en importance est constituée de valeurs variant de 0,2 à 0,4 (17,8%), qui est associée aux reboisements clair (faible), matorral dégradé, et formation de maquis/ garrigue. Les valeurs du facteur C supérieure à 0.7 occupent 3.2% de la totalité de la surface de la zone d'étude, elles sont associées aux terrains nus ou en jachère, les régions pour laquelle se situent cette classe sont généralement localisées au sud-ouest de la zone d'étude, au niveau du bassin d'oued Chabro et les affluents nord de oued Meskiana.

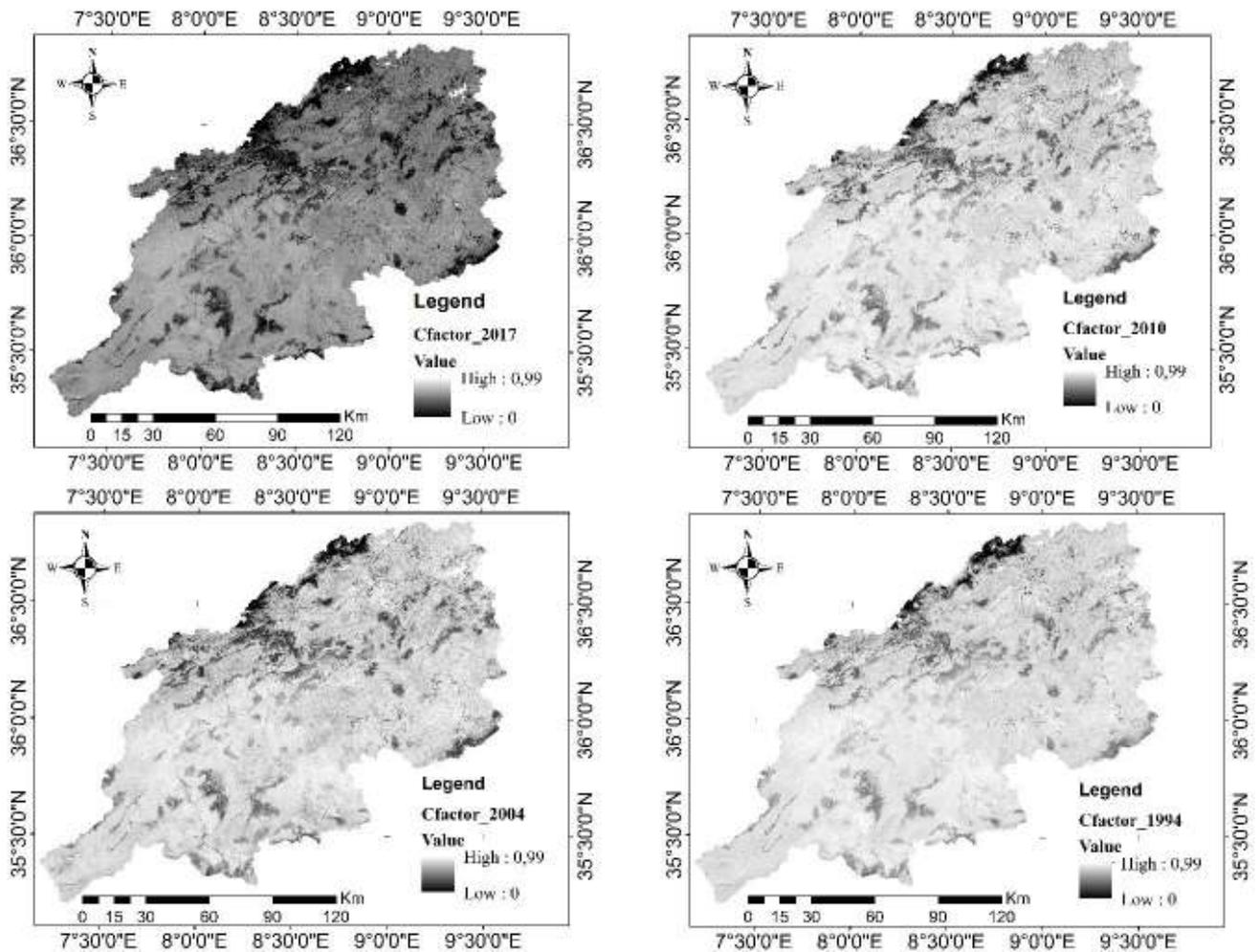


Figure 5.8 cartes de facteur C (générées en utilisant l'écart normalisé de l'indice de végétation (NDVI)).

### 3.1.3 Etude de corrélation entre NDVI et les valeurs du facteur C ( $C_{lit}$ et $C_{VK}$ )

Le tableau 5.7 représente les résultats de l'étude de la corrélation entre les valeurs du facteur C obtenues de la littérature ( $C_{lit}$ ) et les valeurs estimées par ( $C_{VK}$ ) ainsi que les valeurs du NDVI dérivées à partir des images satellitaires. Il montre des corrélations fortes et négatives variant entre -0,6 et -0,68 pour  $C_{lit}$  et -0,82 et -0,97 pour  $C_{VK}$ . Le signe «-» reflète l'effet du couvert végétal sur le processus érosif qui représentent un facteur protecteur contre l'érosion. Les valeurs  $C_{VK}$  estimées présentent plus de cohérence par rapport aux valeurs trouvées dans la littérature, ce qui rend les estimations de la perte de sol au Medjerda plus fiables.

Tableau 5.7 les résultats de l'étude de la corrélation entre les valeurs du facteur C (Clit et CVK) et NDVI.

Année	NDVI.		
		NDVI	C <sub>lit</sub>
2017	NDVI	1	
	C <sub>lit</sub>	-0,68	1
	C <sub>VK</sub>	-0,97	0,67
2010	NDVI	1	
	C <sub>lit</sub>	-0,66	1
	C <sub>VK</sub>	-0,85	0,56
2004	NDVI	1	
	C <sub>lit</sub>	-0,66	1
	C <sub>VK</sub>	-0,9	0,64
1994	NDVI	1	
	C <sub>lit</sub>	-0,67	1
	C <sub>VK</sub>	-0,82	0,51

### 3.1.4 Evolution de l'érosion hydrique en fonction des valeurs du C

Le tableau 5.8 et la figure 5.9 représentent l'évolution des quantités des sédiments mesurées par bathymétrie aux niveaux des barrages de Sidi Salem, Siliana et Mellegue par la DGBGTH (2016) durant la période 1994-2017, et les valeurs moyennes du facteur C estimées en utilisant la méthode (C<sub>VK</sub>).

En analysant la figure 5.8, nous avons remarqué que la variation des deux grandeurs, Erosion et facteur C, est non proportionnelles. L'érosion hydrique augmente durant toute la période sur les deux bassins de Siliana et Sidi Salem, et elle diminue à partir de l'année 2004 sur le bassin d'oud Mellegue. La variation du facteur C est ondulent dans tous les bassins, elle diminue durant les deux périodes 1994-2004 et 2010-2017 et elle augmente durant la période 2004-2010.

A partir de ces remarques nous avons constaté que le facteur C ne représente pas un facteur déterminant de l'érosion hydrique dans la Medjerda et que la végétation de la zone d'étude est insuffisante pour protéger les bassins contre le risque érosif.

Tableau 5.8 les quantités des sédiments mesurées par bathymétrie aux niveaux des barrages de la Medjerda et les valeurs de CVK moyennes. (DGBGTH, 2016).

Année	1994	2004	2010	2017
<b>Mellegue</b>				
<b>E (Mm3)</b>	3,8	3,89	3,84	3,84
<b>Cfactor</b>	0,71	0,67	0,68	0,59
<b>Siliana</b>				
<b>E (Mm3)</b>	0,63	1,05	2,28	2,3
<b>Cfactor</b>	0,61	0,6	0,64	0,53
<b>Sidi Salem</b>				
<b>E (Mm3)</b>	5,2	6,6	6,84	8,31
<b>Cfactor</b>	0,63	0,61	0,63	0,54

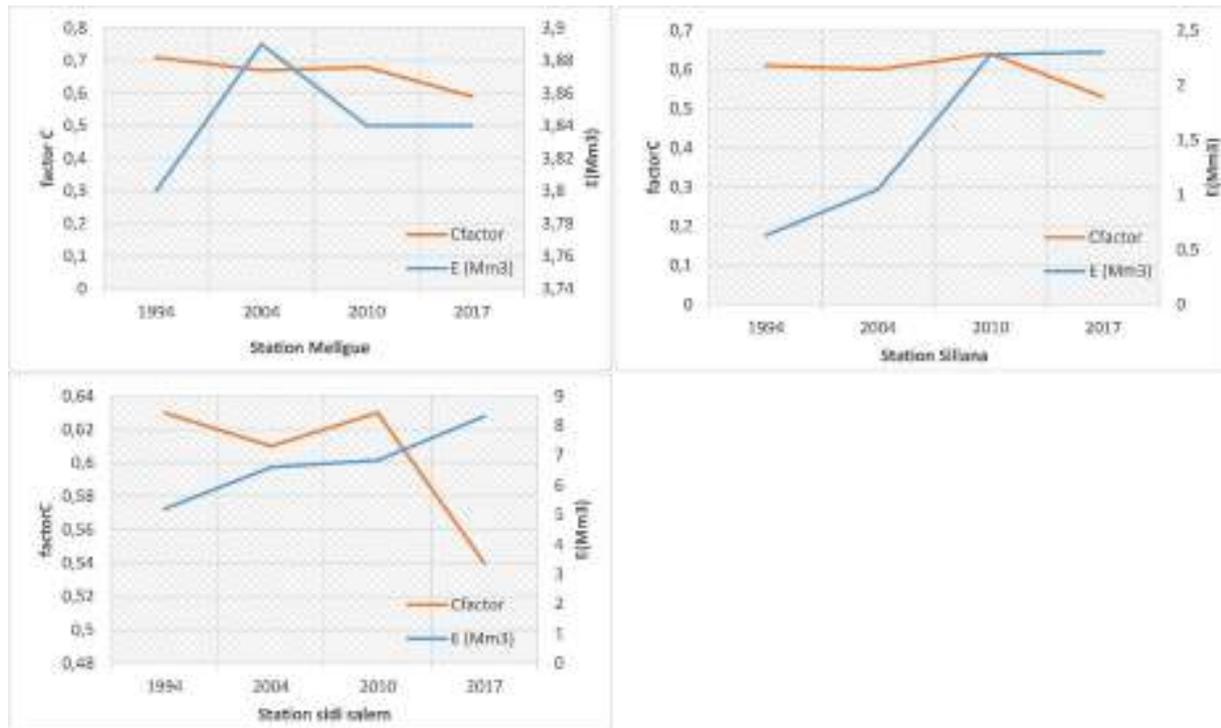


Figure 5.9 Evolution de l'érosion hydrique et le facteur C dans des sous bassins de la Medjerda.

#### 4. Conclusion Partielle

Nous avons utilisé des séries chronologiques de données NDVI de PROBA-V afin de suivre la dynamique temporelle de la végétation à l'échelle du bassin versant de la Medjerda. Au cours de la période 2013-2017, la couverture végétale dans cette région a légèrement diminué avec une tendance ondulante. La moyenne annuelle maximale du NDVI a diminué ce que signifie que la productivité végétale dans la région, a progressivement diminué. La diminution du  $NDVI_{max}$  mensuelle en hiver et en automne des grands périmètres d'irrigation a contribué à La diminution du NDVI annuelle du bassin. Durant la même période (2013-2017), les précipitations des stations analysées présentent une tendance à diminution.

Les résultats de ce travail montrent l'intérêt de l'utilisation de la télédétection et des SIG pour le suivi de la dynamique de l'occupation et l'utilisation du sol. Par ailleurs, le couplage des images satellites avec les statistiques agricoles permet de valider et de comprendre les résultats cartographiques (Toumi et al.2013).

Le risque érosif estimé en utilisant RUSLE représente la potentialité, à long terme, des terrains pour déclencher l'érosion hydrique sans tenir compte de l'évolution ou la variation de l'état de surface. En comparant la carte de l'occupation du sol de juillet 1994 avec celle de juillet 2010, nous constatons une diminution du couvert végétal de l'ordre de 498 km<sup>2</sup>. Ce gain de sol nu va augmenter le risque de la perte en sol. Dans le cas contraire, les régions qui ont subis un accroissement du couvert végétal, le risque de l'érosion diminuera. Ces changements de l'occupation du sol, et en particulier du couvert végétal, sont influencés, d'une façon combinée, par le climat et l'activité agricole. Ainsi, il semble raisonnable de penser que les champs cultivés peuvent contribuer de manière significative à la production des sédiments (Baver 1956, Alejandro et al. 2007).

## **Chapitre 6**

# **Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant le model RUSLE, la télédétection et le SIG.**

## Chapitre 6 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant le model RUSLE, la télédétection et le SIG.

### Objectif

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant de la Medjerda en utilisant l'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE) développée par Renard et al. (1991). L'érosivité de la pluie a été estimée par la méthode de (Blaid 2015) et la méthode de Rango et Arnoldus (1987). Les procédures de la méthodologie développée pour estimer les différents facteurs interagissant l'érosion hydrique a été développée en détails.

### 1. Introduction

L'érosion du sol est un processus diffus qui varie spatialement et temporellement dans un paysage. Ce phénomène est causé par le détachement et l'entraînement des particules du sol par le ruissellement de la surface du sol.

La détection des zones érodées, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et leurs caractéristiques, sont des tâches complexes mais peuvent être résolues avec l'intégration de plusieurs sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain et images satellitaires) dans des systèmes de traitement géo-spatiale, tels que les systèmes d'information géographique (SIG).

Dans la littérature scientifique, différentes approches sont proposées pour estimer, quantifier et prédire l'érosion des sols et le transport des sédiments. Ces approches sont basées sur des observations de terrain, de nombreux concepts de modélisation et parfois les deux. (Djoukbal et al. 2018)

La télédétection a pour rôle de fournir des informations sur le paysage sous la forme des images en utilisant le rayonnement électromagnétique comme véhicule de ces informations (Robin, 2001). L'analyse des images de télédétection a pour but d'interpréter la nature et la fonction des objets positionnés. Le processus d'interprétation qui se fait visuellement ou automatiquement en utilisant le système d'information géographique (SIG) consiste à transformer les données de l'image satellitaire en éléments d'informations spatialement localisées (Bonn et Rochon, 1996). En plus, l'évolution extra rapide des systèmes d'information géographique (SIG) au cours des dernières décennies a encore accentué le retour à l'image pour l'acquisition ou la mise à jour de l'information concernant l'occupation du sol.

## 2. Méthodes utilisées pour étudier l'érosion

Plusieurs modèles empiriques sont disponibles pour estimer le taux d'érosion annuelle, Parmi ces modèles, le modèle RUSLE développée par Renard et al. (1991) sur la base de l'équation de Wichmeier et Smith (1978) a été le plus largement utilisé. Il a été appliqué à l'érosion sur des zones étendues et dans différents contextes (y compris les forêts, les parcours et les zones perturbées). Le modèle RUSLE, ne permet aucune estimation de dépôt et la taille des sédiments ; cependant, il est capable d'évaluer la perte moyenne de sol par an.

La méthode utilisée consiste à cartographier les facteurs déclenchant l'érosion hydrique, en utilisant les images satellitaires et des cartes non-satellitaires, et d'estimer le taux d'érosion annuelle dans les bassins versant des barrages de la Medjerda. Les images utilisées sont des images satellitaires multi bandes issues de radiomètre multi spectrale Oli de satellite Landsat-8, d'une résolution de 30m pour les bandes du visible et de l'infrarouge, et de 15 m pour la bande panchromatique. Ces images ont été téléchargées sous le format TIFF (Tagged Image File Format). Elles ont été projetées en UTM zone 32N en utilisant le WGS 1984. Elles contiennent une bande spéciale qui va servir à améliorer la qualité des images captées. La détection des objets sur les images a été effectuée par des pixels dont la taille est inférieure à celle de l'objet, et l'analyse des images nécessite que ces objets soient couverts par plusieurs pixels. (Toumi, 2013). La méthodologie suivante a été utilisée pour générer les grilles es factures :

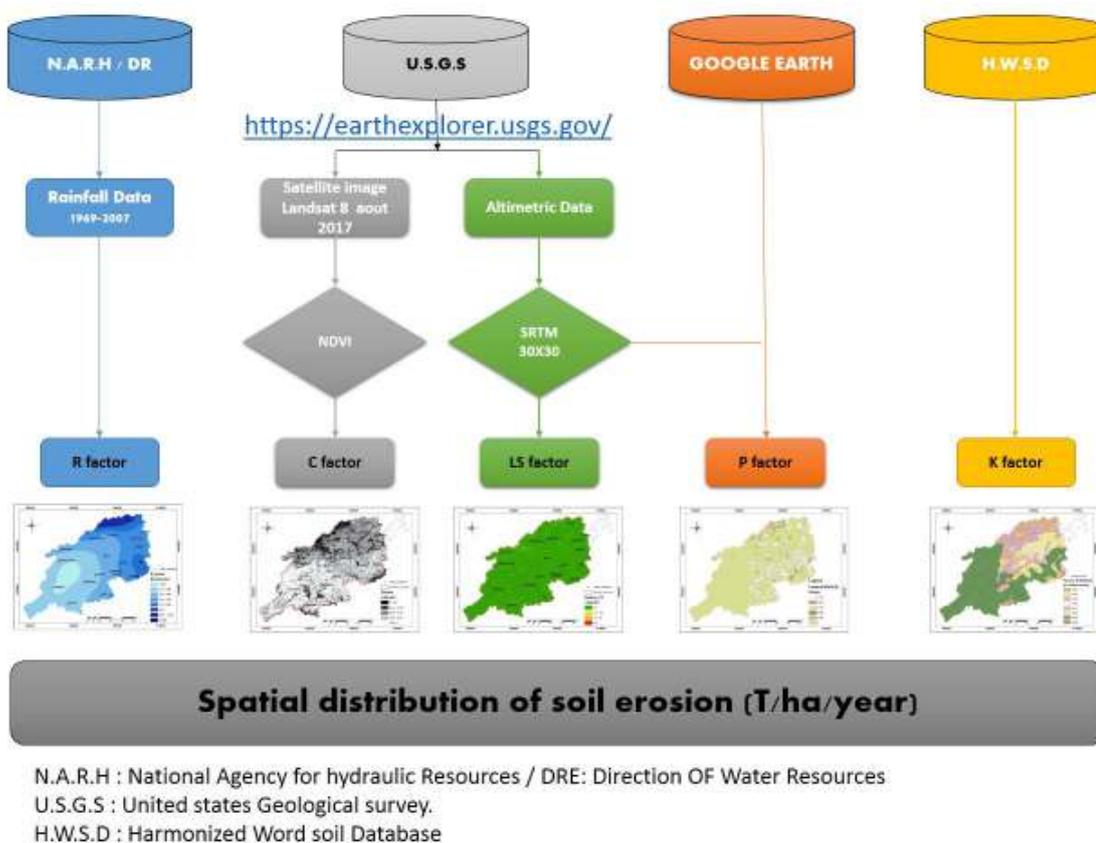


Figure 6.1 Méthodologie suivie pour les modèles (USLE et RUSLE)

### 3. L'agressivité de pluie

L'agressivité de la pluie représente l'effet des gouttes de pluie sur le détachement du sol, c'est l'énergie qui déclenche le processus de destruction des agrégats (Roose et lelong, 1976). Elle est estimée par la formule de Wichmier et Smith (1948) donnée par l'expression suivante :

$$R = MEI_{30} \dots \dots \dots (6.1)$$

Où *M* : coefficient dépendant du système d'unités de mesure. *E* : énergie cinétique de l'intensité pluviométrique moyenne sur 30 minutes. *I*<sub>30</sub> : intensité moyenne sur 30 minutes de chaque averse enregistrée.

Chaque goutte de pluie tombée à une forme bien propre avec une vitesse bien déterminer, si cette forme et cette vitesse sont connues, il est possible de calculer le moment de pluie et même leur énergie cinétique par la sommation des valeurs pour des gouttes individuelle (Belaid, 2015). Mais les forces incluses sont tellement petites, il est vraiment difficile de les mesurés, même avec des instruments très sensibles, c'est pour ça les méthodes de mesure indirect sont les meilleures. Une autre approche a été utilisé, elle consiste à convertir l'énergie cinétique en une autre forme d'énergie facilement mesurable, tel que l'énergie acoustique. cette méthode consiste à prendre le bruit par un microphone et de le converti en impulsions électriques qui alimentent un oscilloscope. Les recherches sur cet axe sont faites par Kinnel (1968) et Forrest (1970) (In Hudson, 1995).

### 4. Des indices qui décrivent l'agressivité de pluie

#### 4.1 Indice de fournier (IF)

C'est un indice proposé par Fournier (1960), noté (IF), il représente une distribution des précipitations. Il a été utilisé dans nombreuses régions du monde (Meddi, 1992; Ferro et al., 1999; Odura-Afrive, 1996) pour estimer les pertes en sol et dans les projets d'aménagement. L'indice de Fournier est un rapport entre les précipitations pour le mois le plus pluvieux de l'année (*P<sub>m</sub>*) et les précipitations annuelles (*P*) en utilisant la formule suivante :

$$FI = \frac{Pm^2}{P} \dots \dots \dots (6.2)$$

#### 4.2 Indice de fournier modifié (IFM)

En 1980, Arnoldus a montré que la corrélation entre l'indice de Fournier IF et EI<sub>30</sub> n'est pas significative (*R*<sup>2</sup>= 0.55), donc il a proposé un autre indice (IFM) qui prend en considération non seulement le mois le plus pluvieux de l'année, mais la pluie de tous les mois dans un but d'avoir un facteur d'érosivité de pluie. Il a obtenu des résultats satisfaisants pour 164 stations aux Etats-Unis et 14 stations en Afrique de l'Ouest.

Le nouvel indice proposé s'appelle Indice de Fournier modifié (IFM), il s'écrit comme suit :

$$IFM = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \dots \dots \dots (6.3)$$

Où les Pi représentent les précipitations mensuelles et P les précipitations annuelles (mm).

Selon Arnoldus (1980), l'IFM constitue une bonne approximation du facteur R de l'équation universelle dont la relation est linéaire. Meddi (2013) a montré la prédominance de l'indice de Fournier modifié (IMF), par rapport à d'autres indices, dans la représentation de l'agressivité des pluies. Cet indice a été utilisé dans les études d'aménagement et pour la régionalisation de l'agressivité des pluies dans de nombreuses régions du monde (De Louis et al, 2010 ; Lujan et Gabriels, 2005 ; Meddi et al, 2013). Les classes de cet indice proposé dans CEC (1992) sont consignées dans le tableau 6.1

Tableau 6.1 Classe de l'indice de Fournier modifié (IMF)

Classe	Description	IFM
01	Très faible	< 60
02	Faible	60 < 90
03	moyen	90 < 120
04	élevé	120 < 160
05	Très élevé	> 160

### 4.3 Indice des concentrations des pluies (PCI)

L'indice de concentration des pluies (PCI), proposé par Oliver en 1980, exprime la variabilité saisonnière et annuelle des précipitations en %. Oliver (1980) et Michiels (1992) ont démontré que le PCI était approprié pour évaluer et comparer la concentration des pluies entre les stations pluviométriques. Les faibles valeurs du PCI indiquent une distribution uniforme des précipitations dans l'année, par contre des valeurs élevées représentent une concentration élevée des pluies mensuelles ou bien une saisonnalité. (Meddi. 2013). Selon (Lujan et al. 2005) les limites théoriques du PCI sont :

- ✚ Lorsque les précipitations de chaque mois de l'année sont les mêmes, cet indice est égal à 8,3.
- ✚ Lorsque toutes les précipitations de l'année se produisent dans un seul mois, le PCI est égal à 100.

Oliver (1980) a dressé les fourchettes suivantes pour caractériser le caractère de répartition des pluies mensuelles dans l'année :

- ✚ Un PCI inférieur à 10 indique une répartition uniforme des pluies dans l'année ;
- ✚ une valeur du PCI entre 11 et 15 représente une répartition saisonnière modérée ;
- ✚ une valeur du PCI variant de 16 à 20 représente une distribution saisonnière ;
- ✚ Un indice supérieur à 20 représente de forts effets saisonniers, avec des valeurs croissantes montrant un accroissement de la concentration mensuelle des pluies.

L'indice de concentration des pluies s'écrit comme suit Où les  $P_i$  représentent les précipitations mensuelles :

$$PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} P_i)^2} \dots \dots \dots (6.4)$$

**4.4 La formule de Renard et al (1996)**

C'est une formule proposé par Renard et al. (1996), en fonction de l'énergie cinétique de la pluie ( $E$ ) et l'intensité maximale de la pluie de durée de 15 min ( $I_{15}$ )

$$R = EI_{15} \dots \dots \dots (6.5)$$

L'énergie cinétique totale c'est la somme des énergies cinétique des pluviophases :

$$E = \sum E_{pi} \dots \dots \dots (6.6)$$

L'énergie cinétique de la pluviophase est le produit de l'énergie spécifique par la hauteur correspondante :

$$E_{pi} = E_{si}h_{si} \dots \dots \dots (6.7)$$

L'énergie spécifique est donnée par la formule :

$$E_{si} = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05I)] \dots \dots \dots (6.8)$$

Où  $E_{si}$  en MJ/ha/mm de pluie ;  $I$  : l'intensité en mm/h.

**4.5 La formule de Rango & Arnoldus (1987)**

C'est une formule alternative qui n'implique que les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R, elle s'écrit comme suit :

$$R = 1.74 \log \sum_{i=1}^{12} P_i^2 / P + 1.29 \dots \dots \dots (6.9)$$

Où ( $P_i$ ) représente les précipitations mensuelles en (mm) et ( $P$ ) les précipitations annuelles en (mm).

**4.6 La formule de Meddi et al (2015)**

Un modèle proposé par Meddi et Toumi en (2015), il a été appliqué sur les stations pluviométriques de l'Algérie du nord, il s'écrit comme suit :

$$R = 0.47IFM^{0.49} X^{0.12} Z^{-0.05} P_{jmax}^{0.99} \dots \dots \dots (6.10)$$

Où ( $IFM$ ) représente l'indice de fournier modifier ; ( $X$ ) représente longitude de la station pluviométrique ;  $Z$  représente l'altitude de la station pluviométrique ; ( $P_{jmax}$ ) Les précipitations journalières maximales en (mm).

**4.7 La formule proposée par Belaid (2015)**

Belaid (2015) a étudié la corrélation entre l'érosivité de la pluie et l'indice de fournier modifié. Il a calculé les valeurs de cet indice en utilisant les données de la station de Zaghouan (Nord-est de la Tunisie) et la proposé une formule pour estimer l'érosivité annuelle de la pluie en utilisant l'indice de fournier modifier. La formule de Belaid (2015) s'écrit comme suit :

$$R = 268,3 e^{0,015IFM} \dots \dots \dots (6.11)$$

Où (IFM) représente l'indice de fournier modifier

### 5 Données de mesure du transport solide

Le transport solide a été évalué à l'exutoire des bassins versants par des mesures régulières de la bathymétrie effectuées par la DGBGTH. A partir de cette évaluation, nous avons déterminé la perte en sol qui arrive à l'exutoire (Mm3/an) en division le transport solide annuel par la superficie du bassin versant. D'après les résultats des différentes campagnes de mesures d'alluvionnement, les volumes moyens annuels de sédiments piégés dans les retenues des barrages de la Medjerda varient de 0,03 Mm3 (Beni M'thir) à 8,31 Mm3 (Sidi Salem). Le tableau 6.2 montre les Caractéristiques et alluvionnement des barrages de la Medjerda

Tableau 6.2 Caractéristiques et alluvionnement des barrages de la Medjerda (DGBGTH, 2016).

Barrages Année de mise en service	SBV (Km <sup>2</sup> )	Capacité initiale (Mm3)	Années des campagnes de mesure de l'alluvionnement	Évolution de l'alluvionnement (Mm3)	Alluvionnement moy. (Mm3 /an)
Mellègue (1954)	10300	306,60	1975, 1980, 1991, 2000, 2013	54,5 ; 90 ; 142 ; 179 ; 188,39	2,59 ; 3,46 ; 3,8 ; 3,89 ; 3,84
Kasseb (1968)	101	81,88	1986, 2013	2,8 ; 4,97	0,15 ; 0,36
Beni metir (1954)	106	61,63	1986, 2013	4 ; 1,24	0,12 ; 0,03
Lakhmass (1966)	133	8,22	1975, 1991, 2000, 2013	2 ; 2,3 ; 3,3 ; 1	0,22 ; 0,048 ; 0,094 ; 0,03
Bou Heurtma (1976)	390	117,50	1993,2013	2 ; 5,46	0,13, 0,19
Sidi Salem (1981)	7950	814,00	1987, 1989, 1991, 1998, 2002, 2016	30,6 ; 47 ; 52 ; 87,5 ; 139, 274,14	5,1 ; 5,87 ; 5,2 ; 5,15 ; 6,6 ; 8,31
Siliana (1987)	1040	70,00	1994, 2002, 2013	4,1 ; 16,9 ; 36,56	0,63 ; 1,05, 2,28
Oldjet el mellegue (2016)	4296	145,4	2017	-	2,5

L'analyse du tableau 6.2 montre que :

- ✚ l'alluvionnement de la retenue du barrage Mellègue a augmenté durant la période (1975-2000), cette augmentation peut être expliquée par le changement du mode d'exploitation de l'eau emmagasinée (transfert des eaux vers la retenue du barrage Sidi Salem) qui s'est traduit par le maintien de la retenue à une cote basse. Durant la période 2000- 2013 le transport solide dans le bassin du Mellègue diminue, cette diminution est due aux aménagements effectués en amont de la retenue du barrage.
- ✚ l'alluvionnement de la retenue du barrage Sidi Salem a augmenté durant la période déficitaire en apports liquides (1987-1990). Cette évolution est due au transfert des

eaux du barrage Mellegue vers la retenue du barrage Sidi Salem (Ben mammou 1998). Une deuxième augmentation durant la période 2002 2016 a été remarqué suite à la crue exceptionnelle de 2003. (Ben Mammou et Louati 2006).L'envasement moyen annuel est passé de 5,1 Mm3 en 1987 à 8,31 Mm3 en 2016.

- ✚ La retenue du barrage Lakhmess affiche une régression de la perte moyenne annuelle au cours du temps (0,22 Mm3/an en 1975 et 0,03 Mm3/an en 2000) (Tableau 24). Cette diminution est liée aux actions de lutte contre l'érosion menées par la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols.
- ✚ l'alluvionnement de la retenue du barrage Siliana a augmenté durant la période (1994-2013) (0,63 Mm3/an en 1994 et 2,28 Mm3/an en 2013). Il en est de même pour la retenue du barrage Kasseb.

Pour notre étude nous avons utilisé les pertes en sol mentionnées dans le tableau 6.3

Tableau 6.3 Mesures bathymétriques (Mm3/an).

Sous bassins/barrages	Erosion observée (Mm3/an)	Erosion du bassin versant (mm/an)
<b>Mellègue</b>	3,84	0,37
<b>Kasseb</b>	0,36	3,52
<b>Beni metir</b>	0,03	0,28
<b>lakhemass</b>	0,03	0,23
<b>Bou Heurtma</b>	0,19	0,48
<b>Sidi Salem</b>	8,31	0,86
<b>Siliana</b>	2,28	2,2
<b>Oldjet el mellegue</b>	2,5	0,58

La figure 6.3 montre l'érosion observée en (Mm3/an) pour chaque barrages de la zone d'étude, nous avons remarqué que les barrages (Sidi Salem, Mellègue, Siliana et Oldjet el Mellègue sont les plus vulnérables).

## 6 Variabilité de la pluviométrie

Dans cette étude, des séries de précipitations homogènes, (exprimées en mm), allant de 1971 à 2007, des 12 stations pluviométriques obtenues auprès de l'Agence nationale des ressources en eau -Algérie (ANRH) et de la Direction générale de l'eau-Tunisie (DRE), ont été utilisées pour estimer l'érosivité. Le climat de la zone est de type méditerranéen semi-aride caractérisé par un hiver humide est doux et un été chaud. La moyenne annuelle des précipitations varie entre 60 mm à Ouenza (bassin versant d'oued Mellegue) et 432mm à Siliana, et peuvent atteindre les 1300 mm à Tebarka. Durant la période d'étude, (allant de 1971 à 2007), les précipitations interannuelles varient entre 250 et 1000mm. Les plus faibles valeurs sont enregistrées au niveau de la station de l'Ouenza (à l'amont du bassin Mellegue). Le nombre de jours de pluie est en moyenne de 55j/an, avec des minima en juillet et août et des maxima en novembre, décembre et janvier.

La répartition des postes pluviométriques suit la division hydrométrique des deux pays (en 3 grands bassins portant des numéros de codification de 3 à 5 pour la Tunisie, et les deux numéros de codification 06 et 12 pour l'Algérie, selon la signification suivantes :

Pour la Tunisie :

- Le bassin 3 : couvre l'Extrême Nord de la Tunisie soit les pays forestiers du nord-ouest et la région des lacs Ichkeul et de Bizerte.
- Le bassin 4 : comprend le bassin versant du Cap Bon et de Miliane.
- Le bassin 5 : correspond au bassin de la Medjerda (Aval).

Pour l'Algérie :

- Le bassin 6 : correspond au chott Melghir.
- Le bassin 12 : correspond au bassin de la Medjerda (Amont).

A l'intérieur de chaque bassin, les postes pluviométriques sont classés par ordre alphabétique et portent des numéros indiquent le N° mécanographique de la station avec comme premier chiffre le N° du bassin auquel appartient le poste.

Tableau 6.4 Les valeurs des pluies moyennes interannuelles des stations pluviométriques en (mm) (1971 à 2007)

Code	Stations	Pays	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	Pmoy interannuelles (mm)
3726822	Tabarka	TUN	477,083	4089,17	165	926,92
5699022	Jendouba	TUN	480,604	4039,43	185	456,65
5361923	Kef	TUN	473,889	4002,67	491	509,33
4783611	Tunis Manoubia	TUN	604,485	4071,6	52	468,26
5676324	Siliana	TUN	531,656	4001,31	431	633,35
5764621	Testour	TUN	540,29	4045,08	112	494,75
120502	Ouenza	ALG	419,793	3991,18	588	249,57
120302	Boukhadara	ALG	416,222	3964,19	602	303,15
120102	Souk Ahres	ALG	401,71	4016,33	852	538,17
120201	Meskiana	ALG	388,936	3952,13	787	340,99
061804	Babar	ALG	327,058	3893,35	1103	304
120315	Tebessa	ALG	415,537	3924,54	776	361,05

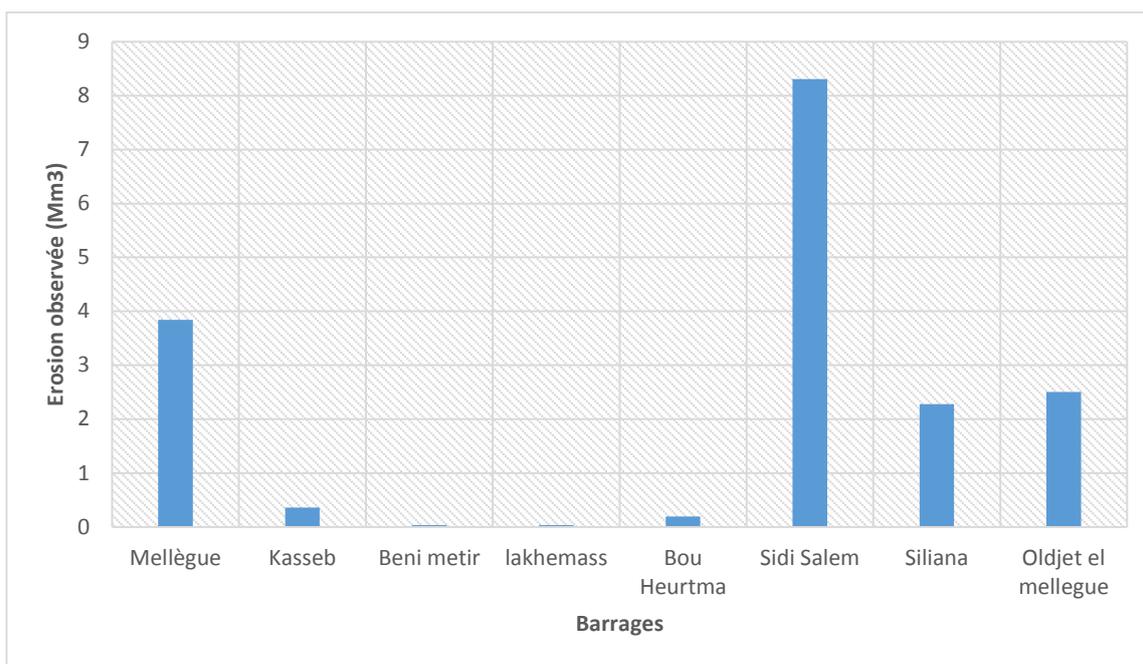


Figure 6.2 les mesures bathymétriques effectuées sur les barrages de la zone d'étude (Mm3/an).

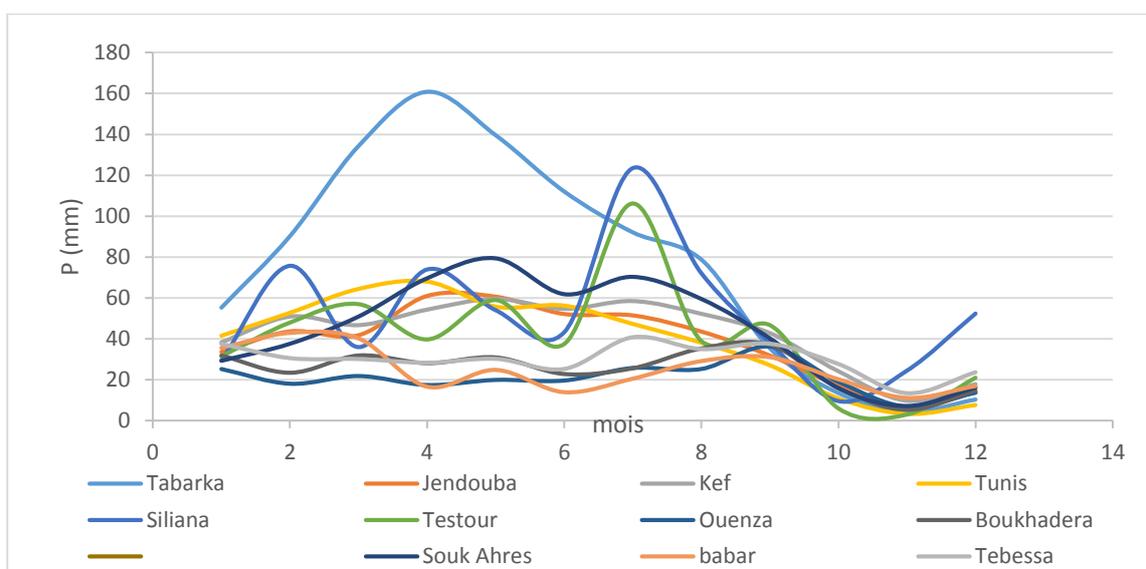


Figure 6.3 la variabilité interannuelle des pluies enregistrées durant la période allant de 1971 à 2007 dans 12 stations pluviométriques sur les sous bassins de la Medjerda.

## 7 Estimation de l'érosion par RUSLE

Le modèle RUSLE est conçu pour estimer des taux annuels d'érosion sur le long terme dans les zones agricoles (Renard et al.1997). Il regroupe toutes les variables sous six facteurs majeurs qui sont l'érosivité (R), l'érodibilité (K), la topographie (LS), la pratique agricole (c), et l'aménagement antiérosif (P). Les résultats présentés montrent en premier lieu le calcul et la spatialisation des différents facteurs de l'équation RUSLE (R, K, LS, C, P) et d'autre part la spatialisation et l'estimation des pertes de sol (A) émises sur les bassins versants de la zone d'étude.

## 7.1 L'érosivité des pluies (R)

L'estimation du facteur d'érosivité de la pluie nécessite la connaissance des énergies cinétiques, et de l'intensité moyenne sur 30 min des gouttes de pluie de chaque averse, sur une longue période pouvant aller jusqu'à 30 ans (Sadiki & al, 2004), ce qui est pratiquement impossible dans une zone dépourvue de ce type de données. A cet effet, plusieurs chercheurs ont développé des formules adaptées aux données mensuelles et annuelles disponibles (Singh et al. 1981; Renard et Freimund 1994; Wang1995; van der Knijff et al. 2000; Parveen et Kumar 2012).

Dans cette partie de l'étude, La carte du facteur R est générée à l'aide du module «Analyse spatiale» d'Arc GIS 10.5. Nous avons appliqué les deux modèle de Blaid (2015) et Rango et Arnoldus (1987) qui n'impliquent que des précipitations annuelles et mensuelles (Eq 11 ; Eq 9).

### 7.1.1 R de Blaid (2015)

Les résultats affichés dans le tableau 6.5 représentent l'indice de l'érosivité moyenne interannuel estimé par le modèle de Blaid (2015) pour la période 1971-2007 et pour chaque station.

Tableau 6.5 L'indice de l'érosivité des pluies de Blaid (2015)

<b>Stations pluviométriques</b>	<b>R (Blaid, 2015)</b>
<b>Tabarka</b>	1361,31
<b>Jendouba</b>	514,87
<b>Kef</b>	531,25
<b>Tunis</b>	551,21
<b>Siliana</b>	737,64
<b>Testour</b>	620,62
<b>Ouenza</b>	370,33
<b>Boukhadera</b>	392,3
<b>Souk Ahres</b>	527,22
<b>Meskiana</b>	396,06
<b>babar</b>	391,12
<b>Tebessa</b>	415,9

La figure 4 illustre la variabilité Spatial de l'érosivité de pluie s'étendant sur la période 1971 jusqu'à 2007. Nous avons constaté que la région de Tebarka est la plus érosive et que la moyenne annuelle de l'indice l'érosivité des pluies au niveau du bassin versant de Medjerda est de l'ordre de 543,26 MJ.mm/ha.h.an.

Durant la période de 1971 à 2007, les valeurs de R sont très variables d'une année à une autre, et d'une station à une autre. Elles varient de 400 MJ mm/ha.h.an au centre-est du bassin à environ 1000MJ.mm/ha.h.an dans le nord-ouest. Un gradient croissant de l'amont du bassin à son exutoire avec une forte augmentation du sud au nord a été remarqué (Voir figure 6.5)

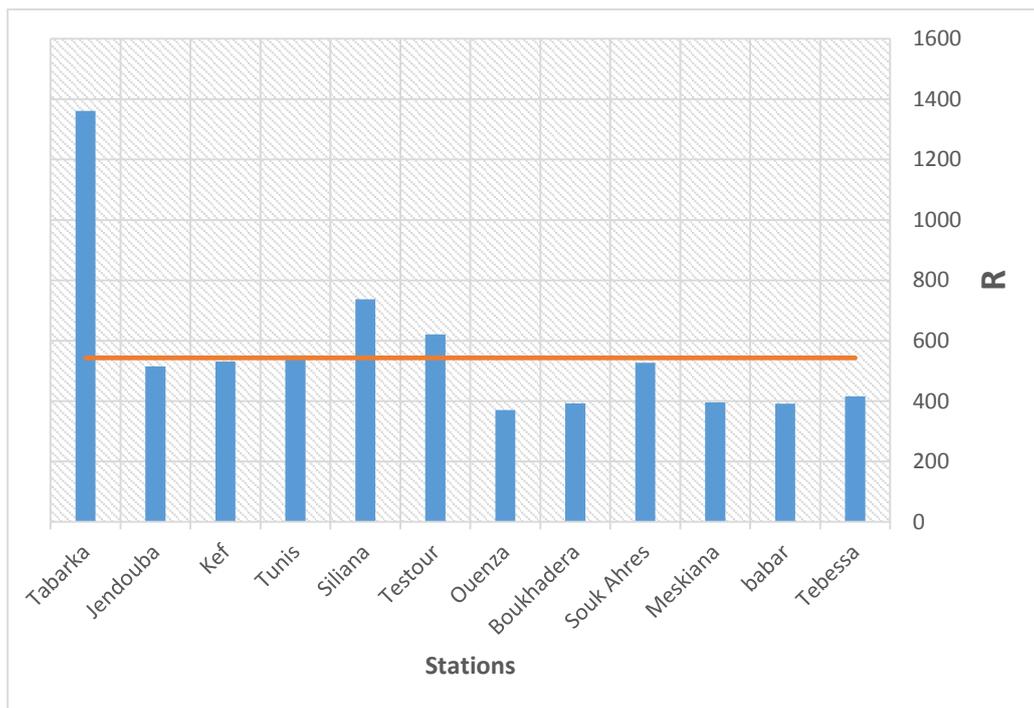


Figure 6.4 Variation spatiale du facteur R de Belaid.

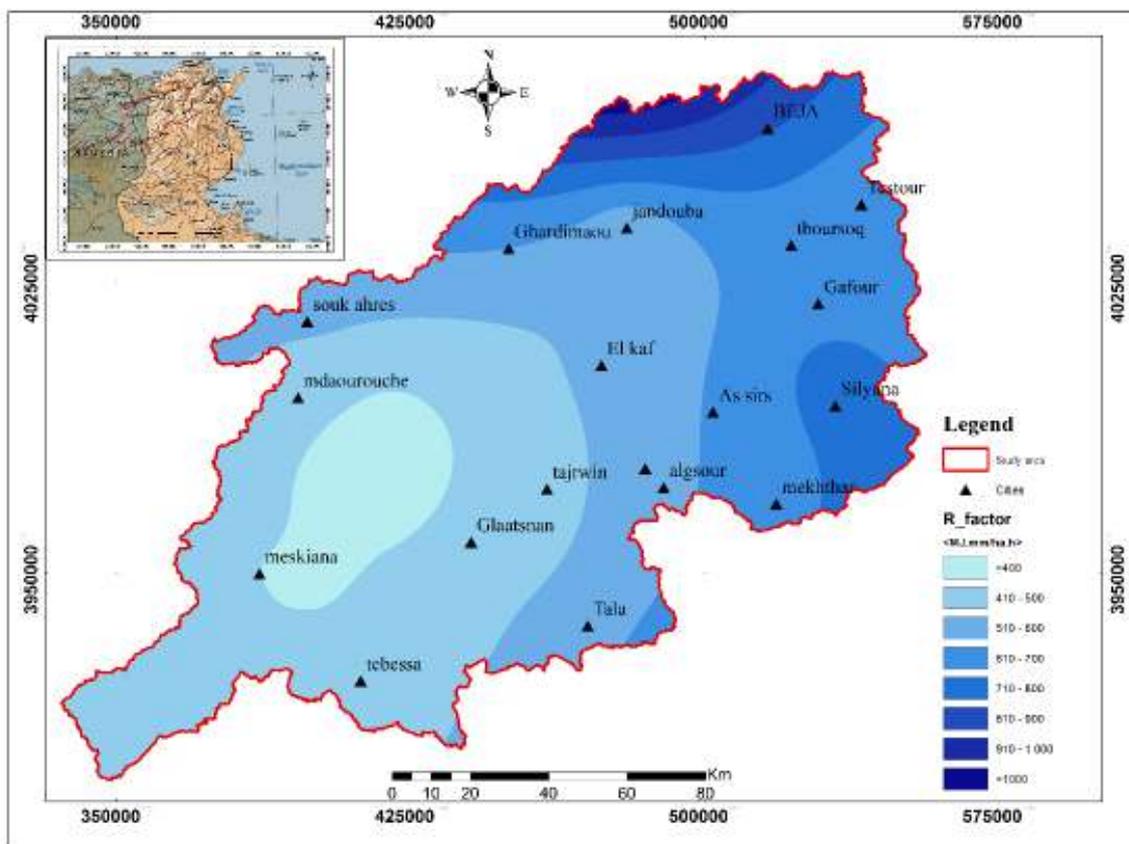


Figure 6.5 Carte du facteur R\_Belaid (2015)

### 7.1.2 R de Rango & Arnoldus (1987)

Dans cette partie, l'érosivité (R) a été calculée en utilisant le modèle de Rango & Arnoldus (1987) qui n'implique que des précipitations annuelles et mensuelles (Eq 10). Ce modèle a été utilisé pour l'étude de l'érosion hydrique par plusieurs chercheurs dans le monde (Toubal et Achite. 2018 ; Hermassi, 2015, Toumi 2013). Les résultats affichés dans le tableau 6.6 représentent l'indice de l'érosivité moyenne interannuel pour la période 1971-2007 pour chaque station.

Tableau 6.6 indices de l'érosivité des pluies de Rango & Arnoldus (1987)

Stations pluviométriques	R (Rango&Arnoldus (1987))
Tabarka	125,22
Jendouba	62,81
Kef	65,08
Tunis	67,72
Siliana	87,54
Testour	76,01
Ouenza	35,64
Boukhadera	41,53
Souk Ahres	75,23
Meskiana	42,56
babar	41,52
Tebessa	44,87

La figure 6.6 illustre la variabilité Spatial de l'érosivité de pluie. Nous avons constaté que les régions de Teberka et Siliana sont toujours les plus érosives et que la moyenne annuelle de l'indice de l'érosivité des pluies au niveau du bassin versant de Medjerda par ce modèle est de l'ordre de 63,81 MJ.mm/ha.h.an.

L'érosivité de la pluie varie de 35 MJ mm/ha.h.an au centre-est du bassin à environ 125 MJ.mm/ha.h.an dans le nord-ouest. Nous avons observé toujours un gradient croissant de l'amont du bassin à son exutoire avec une forte augmentation du sud au nord. (Figure 6.7)

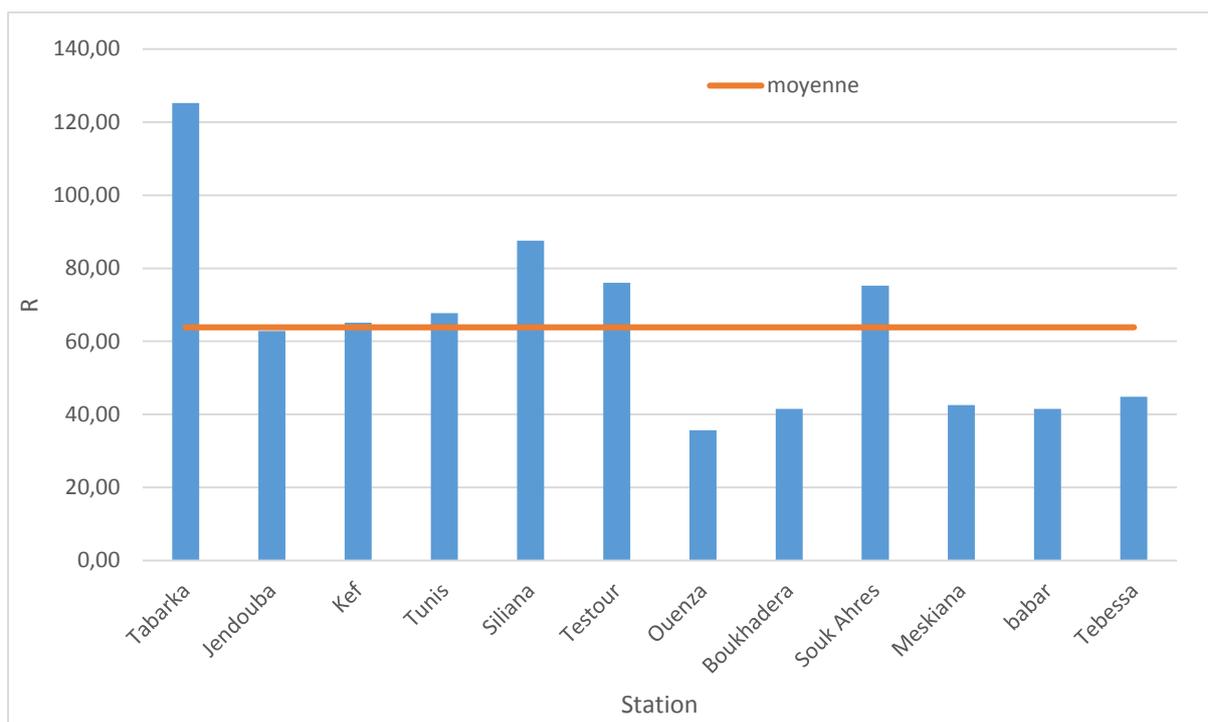


Figure 6.6 Variation spatiale du facteur R de Rango & Arnoldus (1987)

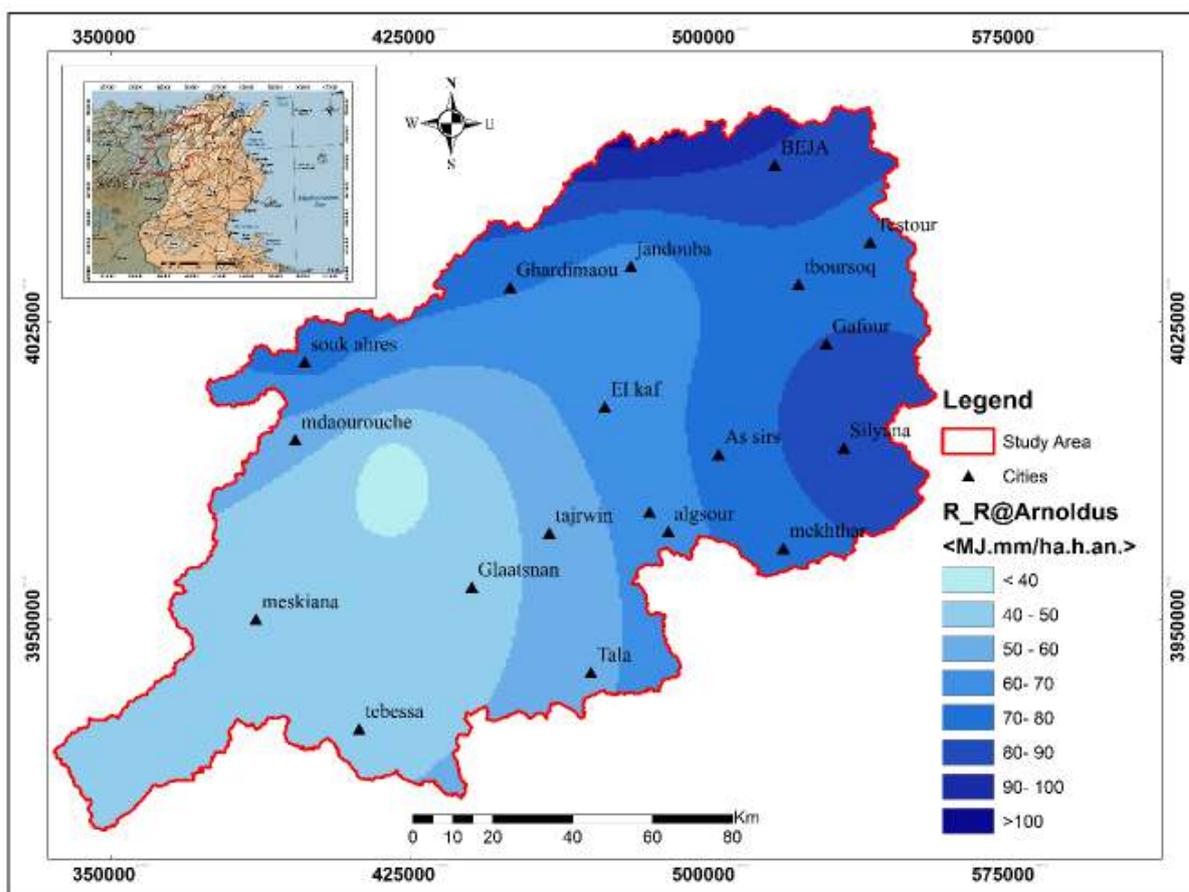


Figure 6.7 Carte du facteur R\_(Rango et Arnoldus (1987)



Tableau 6.7 extrait les valeurs du facteur K de la base Harmonisée mondiale de données sur les sols (HWSD), version 1.2 (FAO / IIASA / ISRIC / ISS-CAS / JRC 2009).

textural class	soil composition			Mean K (based on % Organic material)		
	sand	silt	clay	unknown	<2%	>2%
<b>Clay</b>	0-45	0-40	40-100	0.22	0.24	0.21
<b>Sandy clay</b>	45-65	0-20	35-55	0.2	0.2	0.2
<b>Silty clay</b>	0-20	40-60	40-60	0.26	0.27	0.26
<b>Sandy clay</b>	86-100	0-14	0-10	0.02	0.03	0.01
<b>Sandy loam</b>	50-70	0-50	0-20	0.13	0.14	0.12
<b>Clay loam</b>	20-45	15-52	27-40	0.3	0.33	0.28
<b>Loam</b>	23-52	28-50	7-27	0.3	0.34	0.26
<b>Loamy sand</b>	70-86	0-30	0-15	0.04	0.05	0.04
<b>Sandy clay loam</b>	45-80	0-28	20-35	0.2	0.2	0.2
<b>Silty clay loam</b>	0-20	40-73	27-40	0.32	0.35	0.3
<b>Silt</b>	0-20	88-100	0-12	0.38	0.41	0.37
<b>Silty loam</b>	20-50	74-88	0-27	0.38	0.41	0.37

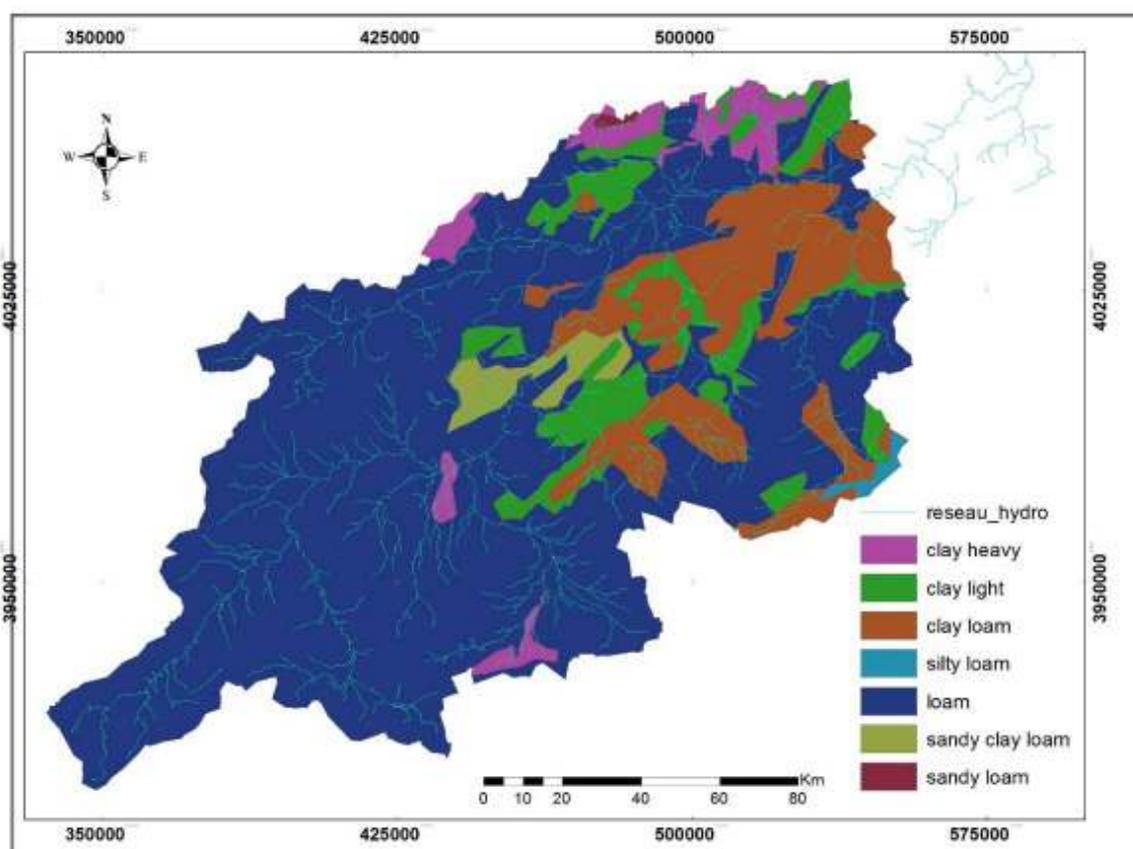


Figure 6.8 le sol de la Medjerda (extrait les valeurs du facteur K de la base Harmonisée mondiale de données sur les sols (HWSD))

Les caractéristiques du sol de la Medjerda selon HWSD et les résultats du facteur K sont illustrées par le tableau 6.8.

Les valeurs d'érodibilité varient de 0,016 (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) à 0.049 (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) avec une moyenne de 0,041 (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1).

La distribution spatiale du facteur K montre que les sols les plus érodables se situent sur les pentes fortes. Les résultats sont montrés sur la figure 6.9.

Tableau 6.8 caractéristiques du sol de la Medjerda selon HWSD et valeurs du facteur K (t.ha.h/ha.MJ.mm

<b>Texture</b>	<b>Echs sols</b>	<b>% Sand</b>	<b>% Silt</b>	<b>% Clay</b>	<b>% OG</b>	<b>K RUSLE</b>
<b>Clay (heavy)</b>	Calcic Vertisols	7	22	71	2,06	0,028
<b>Clay (light)</b>	Calcaric Cambisols	13	33	54	9,60	0,032
<b>Clay (heavy)</b>	Stagnic Luvisols	13	24	63	2,27	0,028
<b>Clay (light)</b>	Luvic Calcisols	20	29	51	2,18	0,028
<b>Silt loam</b>	Calcic Luvisols	26	59	15	2,98	0,049
<b>Clay (light)</b>	Calcaric Cambisols	29	22	49	2,12	0,028
<b>Clay (light)</b>	Calcaric Fluvisols	29	30	41	0,96	0,032
<b>Loam</b>	Calcaric Cambisols	31	50	19	3,46	0,034
<b>Clay (light)</b>	Calcic Vertisols	33	24	43	2,15	0,028
<b>Loam</b>	Calcaric Cambisols	34	40	26	0,95	0,045
<b>Loam</b>	Haplic Gypsisols	36	38	26	2,75	0,034
<b>Clay loam</b>	Calcic Kastanozems	37	25	38	1,08	0,043
<b>Clay loam</b>	Rendzic Leptosols	37	35	28	1,01	0,043
<b>Loam</b>	Calcic Cambisols	38	41	21	1,08	0,045
<b>Loam</b>	Petric Calcisols	39	47	14	3,78	0,034
<b>Loam</b>	Haplic Xerosols	39	40	21	1,20	0,045
<b>Loam</b>	Calcic Xerosols	40	37	23	0,96	0,045
<b>Clay loam</b>	Eutric Gleysols	43	26	31	1,39	0,043
<b>Loam</b>	Eutric Fluvisols	46	33	21	1,12	0,034
<b>Loam</b>	Eutric Leptosols	52	28	20	0,38	0,034
<b>Sandy clay loam</b>	Petric Calcisols	57	15	28	2,65	0,026
<b>Sandy loam</b>	Dystric Planosols	67	24	9	2,96	0,016

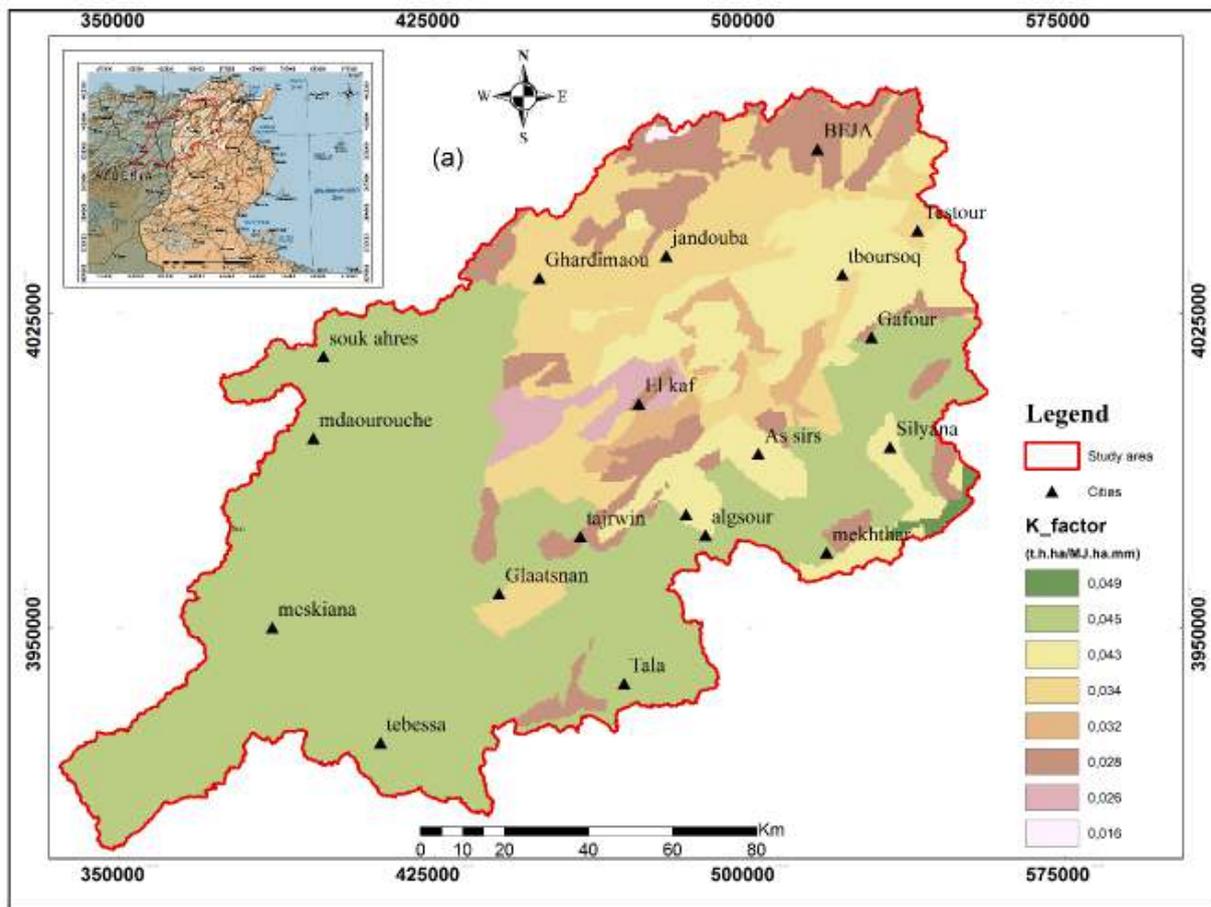


Figure 6.9 Carte du facteur K (RUSLE)

L'analyse de la figure 6.9 nous permet de faire la répartition spatiale illustrée par le tableau 6.9

Tableau 6.9 Répartition spatiale du facteur K\_RUSLE (t.h.h/ha.MJ.mm)

Les valeurs de K_RUSLE (t.h.h/ha.MJ.mm)	Surface en %
0,028	10,10
0,032	2,52
0,043	13,72
0,049	0,42
0,045	55,27
0,026	2,05
0,016	0,13
0,034	16,06

### 7.3 Le facteur topographique LS

Le facteur LS ou le facteur topographique dans RUSLE représente les effets de la longueur et du gradient sur l'érosion du sol (Wischmeier & Smith, 1978). Elle peut être définie comme une relation entre les pertes de sol et leur pente. La longueur de la pente représente le trajet que peut faire l'écoulement depuis le haut de la pente jusqu'à une structure d'interception. (Wischmeier & Smith, 1978).

La topographie agressive avec un écoulement rapide est l'origine d'une érosion importante selon la géologie de la région et leur couvert végétale. La formule développée par Wischmier et Smith (1978) a été largement utilisée pour calculer et cartographie le facteur LS (Park 2007, Vesena et Bonn 2006, Toumi et al 2015) :

$$LS = \left(\frac{\gamma}{22.1}\right)^m \cdot (0,065 + 0,045s + 0,0065s^2) \dots\dots (6.13)$$

Où  $\gamma$  longueur de la pente de la partie érodée et  $m$  exposant qui dépend du degré de la pente du terrain et  $s$  angle de la pente en %.

La formule a été modifiée par Renard et al. (1991) pour avoir plus de précision pour les pentes non uniformes, Le nouveau modèle s'écrit comme suit :

$$L = \left(\frac{\gamma}{22.1}\right)^m \dots\dots\dots (6.14)$$

$$S = 3(\sin\theta)^{0.8} + 0,56 \text{ if slope} < 5m \dots\dots\dots (6.15)$$

$$S = 10,8 \sin\theta + 0,03 \text{ if slope} > 5m \text{ and } \theta < 9\% \dots\dots\dots (6.16)$$

$$S = 16,8 \sin\theta - 0,05 \text{ if slope} > 5m \text{ and } \theta \geq 9\% \dots\dots\dots (6.17)$$

$$\text{With: } m = \frac{\beta}{(1+\beta)} \text{ and } \beta = \frac{\frac{\sin\theta}{0,0896}}{[3(\sin\theta)^{0.8}+0,56]}$$

On a suivi les étapes suivantes pour élaborer la carte du facteur LS à l'aide du module « spatial analyse » de l'Arcgis10.5 :

1. Détermination de la direction des écoulements (Flow direction) en utilisant le MNT de la région.
2. Détermination de l'accumulation de l'écoulement (Flow accumulation)
3. Le sens d'écoulement a été utilisé comme entréer pour déterminer la longueur de la pente
4. Détermination de l'angle de la pente en degré (slope)
5. Détermination de l'exposant de la longueur (m)
6. Calcul des valeurs du facteur L
7. Détermination du facteur de gradient de la pente S.

Les équations utilisées dans l'ArcGis pour calculer le facteur L et le facteur S sont :

- $F = (\sin(\text{"slope\_degree"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\sin(\text{"slope\_degree"} * 0.01745), 0.8) + 0.56)$
- $m = "F" / (1 + "F")$
- $L = \text{Power}(\text{"FlowAcc"} + Z^2, ("m" + 1)) - \text{Power}(\text{"FlowAcc"}, ("m" + 1)) / \text{Power}(25, ("m" + 2)) * \text{Power}(22.13, "m")$
- $S = \text{Con}(\tan(\text{"slope\_degree"} * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \sin(\text{"slope\_degree"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin(\text{"slope\_degree"} * 0.01745) - 0.5))$ .

La figure 6.10 représente la répartition spatiale du facteur topographique combiné (LS) du bassin versant. Les valeurs de ce facteur varient entre 0 et 90. Sa distribution spatiale montre que 88% du bassin versant est dans la classe inférieure à 5, et 9,58% dans la classe comprise entre 5 et 70. Les terrains avec les valeurs LS supérieures à 70 ne représentent que 1,96% sur l'ensemble du bassin versant.

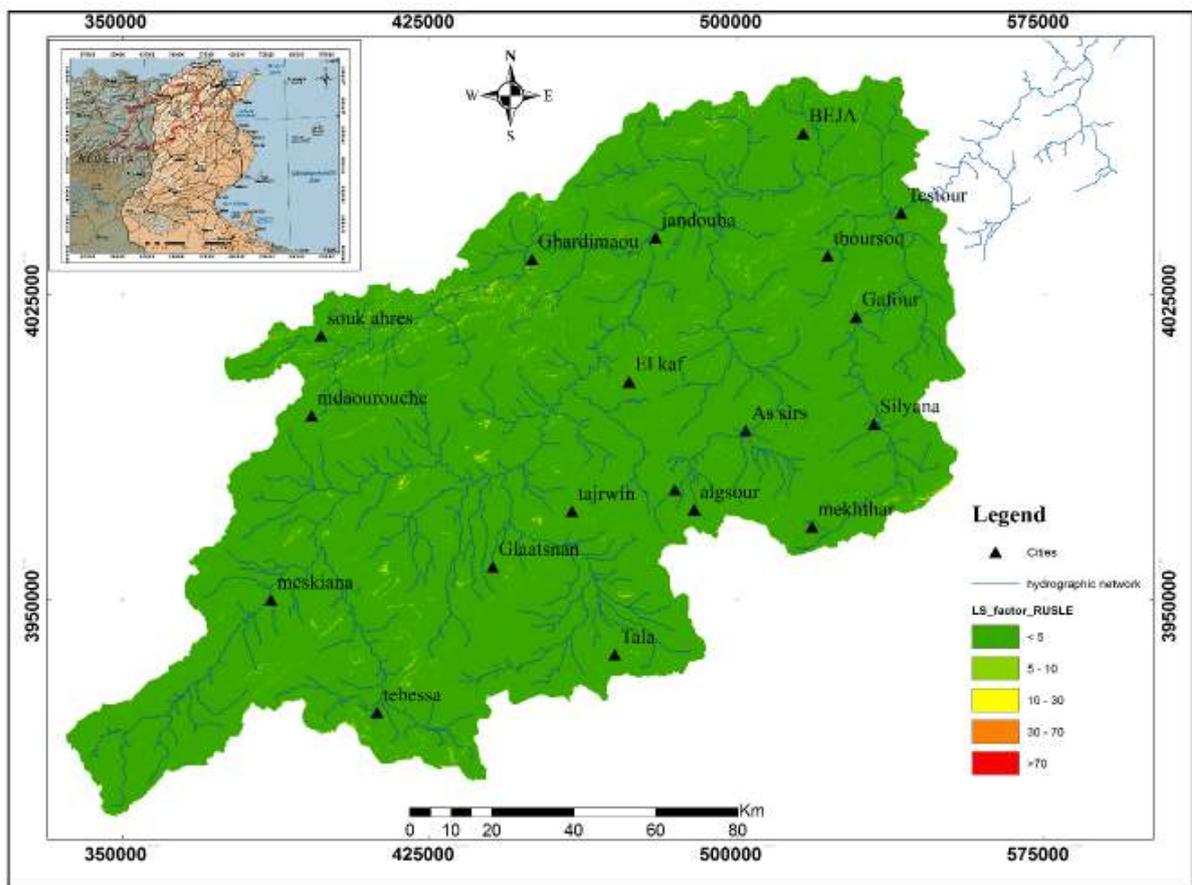


Figure 6.10 Carte du facteur LS

### 7.4 Facteur de couverture et de gestion (C)

La couverture végétale est le facteur le plus important contrôlant le risque d'érosion du sol après la topographie (Renard et al. 2011). Elle est directement liée à d'autres facteurs tels que la topographie, le sol, le climat et surtout les activités humaines (Renard et al. 2011). Elle intervient dans le mouvement des particules sous l'effet de ruissellement. Les valeurs du facteur C varient de 0 pour un sol bien protégé à 1 pour un sol nu. (Wischmeier and Smith. 1965; Cormary and Masson. 1964; Sadiki et al. 2004; Toumi et al. 2013). La carte d'occupation du sol de la zone d'étude a été générée suite à une classification supervisée des images satellitaires captées en période sèche, (Juillet, Aout, Septembre 2017), caractérisée par une faible densité de végétation.

Dans la suite de l'étude nous avons utilisé la carte du facteur C établi dans le chapitre de l'occupation du sol en utilisant le model  $C_{VK}$  sur la base des valeurs de l'NDVI. (Voir figure 6.11).

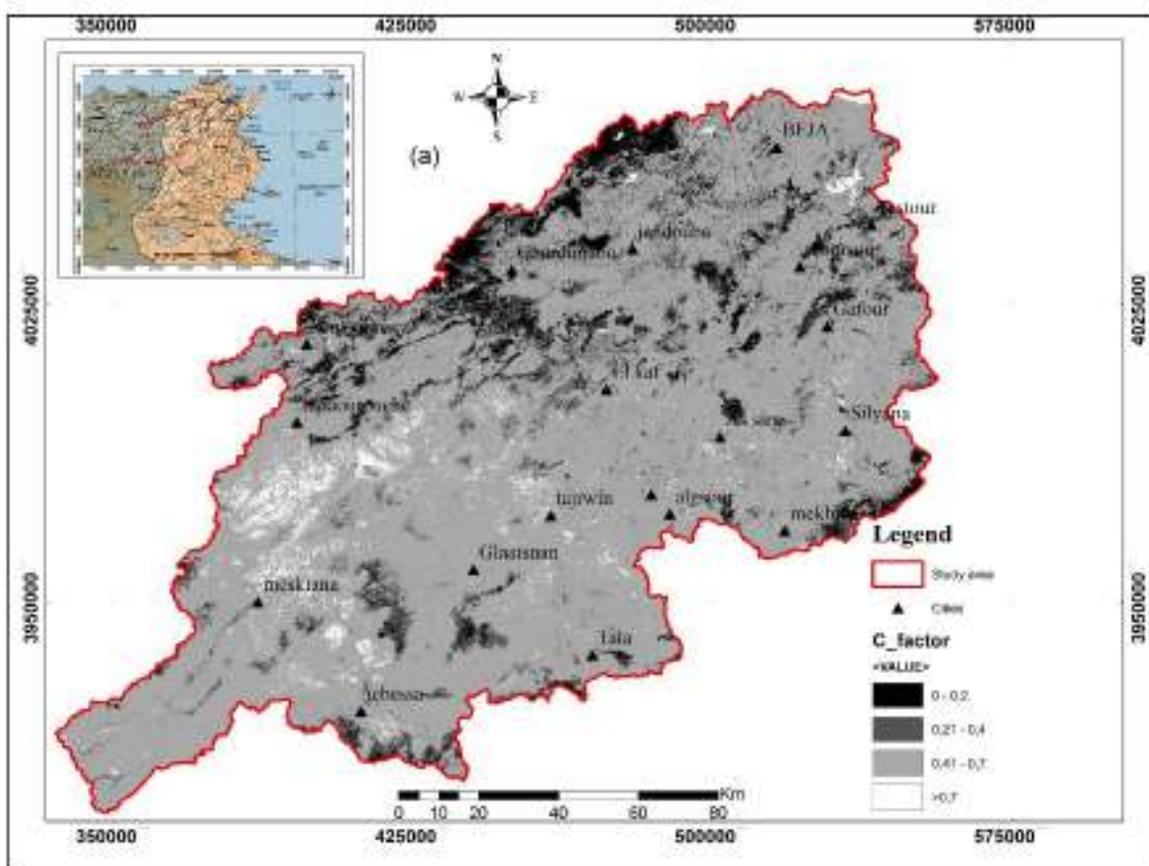


Figure 6.11 Carte du facteur C

### 7.5 Facteur de pratique antiérosive (P)

Le facteur P représente, par définition, le rapport de la perte de sol liée à une pratique de soutien particulière à la perte correspondante liée aux cultures et aux récoltes et ensemencement en amont et en aval de la pente (Wischmeier et Smith 1978). Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le

billonnage sont les pratiques de conservation des sols les plus efficaces (Laouina 2007). Les valeurs du facteur P, le facteur le plus incertain (Renard et al. 1997), varient d'environ «0,2» pour les pentes aménagées à «1» en l'absence de pratiques de contrôle de l'érosion (Wischmeier et Smith 1978). Dans la littérature, il existe divers tableaux et formules proposant des valeurs de P pour différentes pratiques de conservation des sols (Wischmeier et Smith 1978 ; McPhee et Smithen 1984 ; Du et al.1994 ; Morgan 1995 ; Renard et al.1997 ; Shin 1999 ; Foster et al.2002).

Sur la base d'une carte de localisation des installations anti-érosion, établie par la Direction générale de l'aménagement et de la conservation des terres agricoles, ACTA (état 2014) ainsi que des images de haute résolution de Google Earth, nous avons identifié les installations qui sont dans un état acceptable. La carte du facteur P est obtenue en superposant la carte des aménagements existants avec la carte des pentes (Figure 6.12).

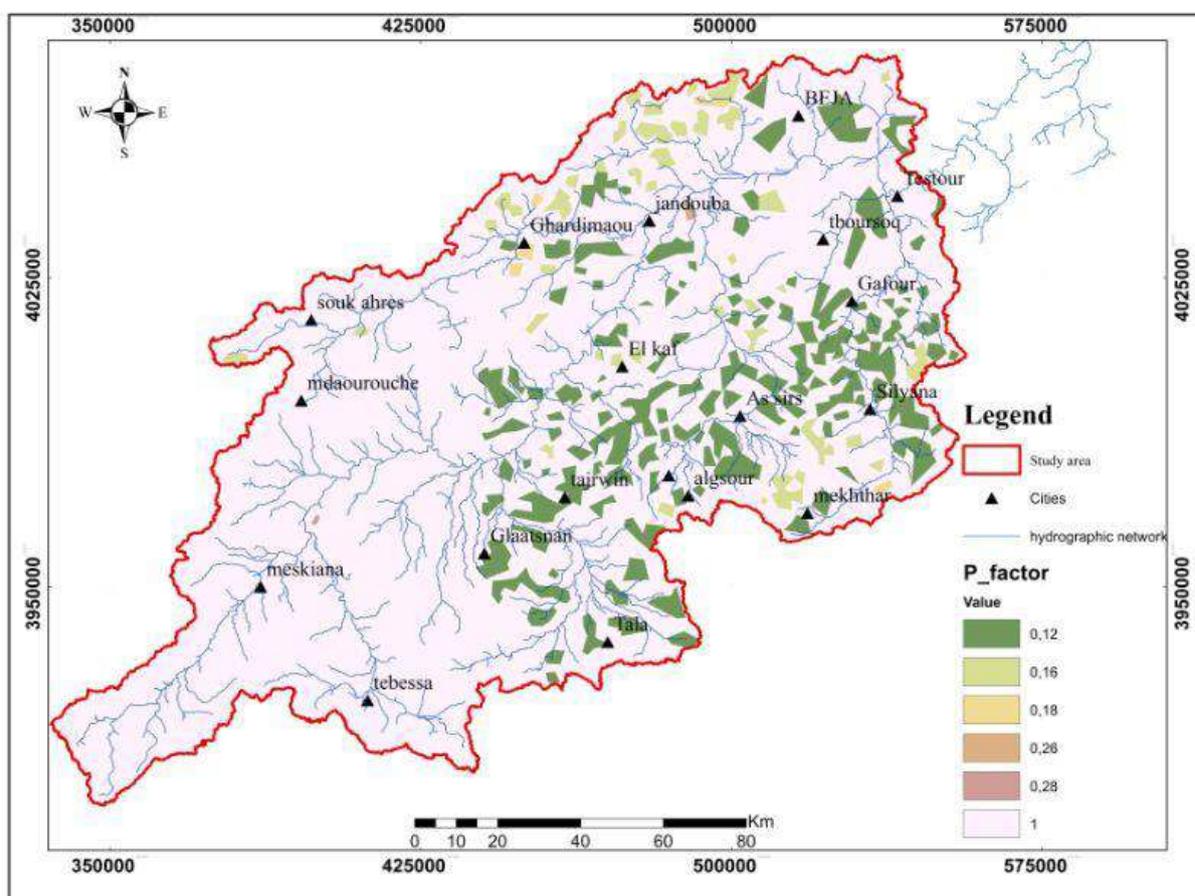


Figure 6.12 Carte du facteur P (RUSLE)

Les valeurs et la répartition spatiale du facteur P sur le bassin de la Medjerda sont indiquées dans le tableau 6.10.

Tableau 6.10 les valeurs et la Répartition spatiale du facteur aménagement antiérosive P

Type d'aménagement	Pente %	P (RUSLE)	% surface
Non Aménagée	-	1	85,62
Banquettes	0- 5	0,12	11,49
	5 – 15	0,16	2,58
	15 – 25	0,18	0,25
	25 – 35	0,26	0,05
	>35	0,28	0,01

### 7.6 Carte de pertes en sols

Le croisement des cartes des principaux facteurs intervenant dans l'érosion hydrique des sols permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant. Les données de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique (facteur topographique et facteur occupation de sol) sont combinées avec les données de l'érosivité de pluie pour avoir la carte du risque érosif.

Le SIG nous a permis d'estimer le potentiel annuel d'érosion de la zone d'étude pixel par pixel. (Toubal et al.2018) Les facteurs déclenchant l'érosion (R, LS, C, K, P) sont représentés dans des couches de 30m de résolution en format matriciel. La carte des risques d'érosion fournit des informations sur les zones critiques de perte de sol. Les valeurs du risque d'érosion ont été regroupées en 5 classes présentées dans le tableau 6.11. La valeur de 7,41 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> a été retenue comme étant la limite moyenne de tolérance du sol à l'érosion (Sadiki, 2004).

Tableau 6.11 les limites moyennes de tolérance des sols à l'érosion hydrique

	Classes	Erosion (T/ha/an)
<b>01</b>	Risque d'érosion tolérable	< 7,41
<b>02</b>	Risque d'érosion faible	7 - 15
<b>03</b>	Risque d'érosion moyen	15 - 30
<b>04</b>	Risque d'érosion fort	30 - 60
<b>05</b>	Risque d'érosion très fort	> 60

#### 7.6.1 Carte des pertes en sols pour R<sub>Belaid</sub> et C<sub>vk</sub>

Le croisement des cartes des facteurs, topographique, pédologique, occupation du sol, et aménagement du modèle RUSLE avec l'érosivité des pluies estimée par le modèle de Blaid (2015) permet d'obtenir la carte des pertes en sols de la figure 5.13.

Les pertes de sol varient entre 0 et 100 t/h/an. La perte moyenne est estimée à 13,27 t/ha/an. La classe d'érosion la plus élevée se situe principalement dans les hauts reliefs du nord-ouest, sur les montagnes de Souk Ahres, au sud-ouest, sur les montagnes de Tebessa, et à l'extrémité sud-est de la zone d'étude, sur les montagnes de Siliana et Kef, qui sont principalement occupées par des parcours, des matorral dégradés et des terres agricoles avec des pentes comprises entre 10 et 66%.

Le tableau 5.12 représente la répartition spatiale des différentes classes de perte de sol adopté, il montre que 62,12% de la zone à une érosion hydrique inférieur à 15 t/ha/an, et 22,13% à une perte comprise entre 15 et 30 t/ha/an, et 13,64% à une perte comprise entre 30 et 60 t/ha/an. Les terres avec des pertes supérieures à 60 t/ha/an ne représentent que 2,11%.

Tableau 6.12 Superficie des classes des pertes de sol

Erosion hydrique (T/ha/an)	A (Km <sup>2</sup> )	A%
<7,41	7411,58	36,21
7,41 - 15	5302,71	25,91
15 - 30	4529,32	22,13
30 - 60	2791,87	13,64
>60	431,24	2,11

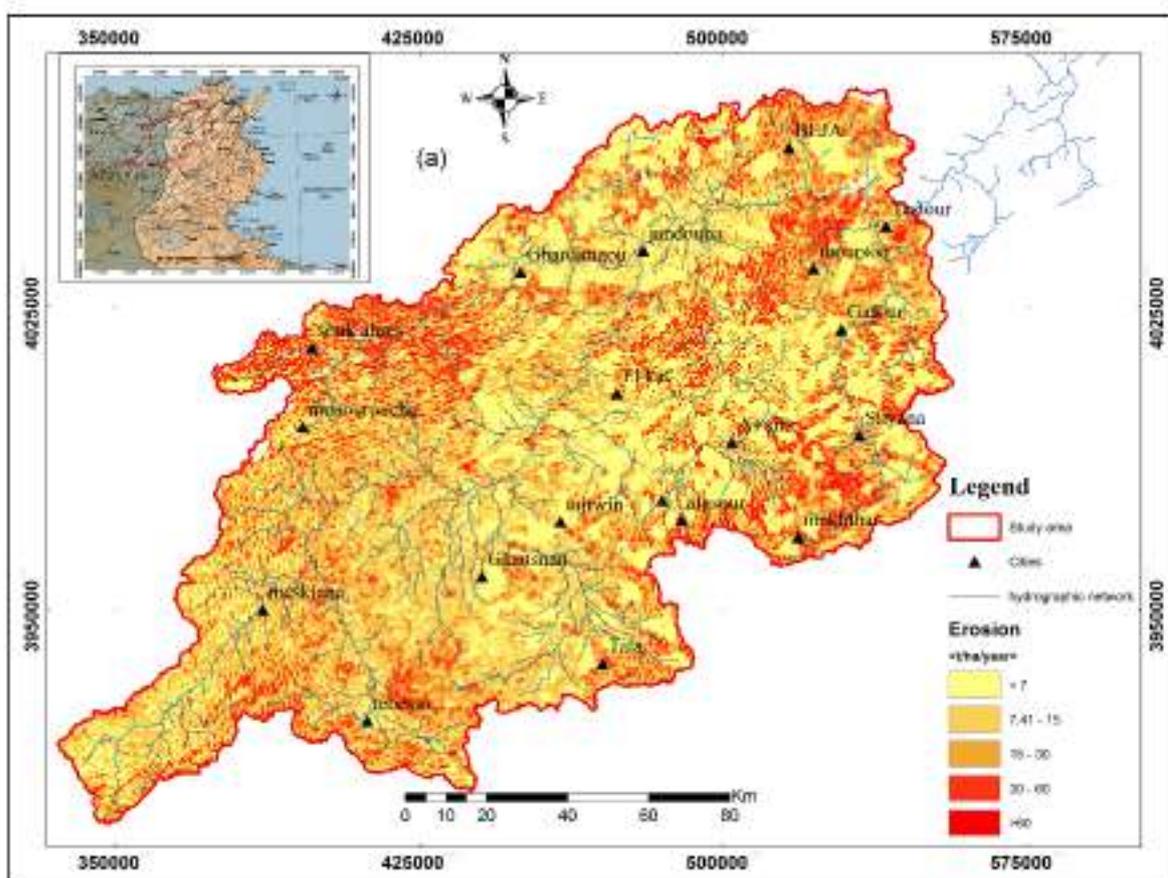


Figure 6.13 Carte de perte de sol déterminée par le modèle RUSLE avec R\_Belaid (2015) et CVK

### 7.6.2 Carte pertes en sols pour R de Rango & Arnoldus (1987) et CVK

Nous avons estimé l'érosion en utilisant l'érosivité par le modèle Rango & Arnoldus (1987) et en appliquant le modèle RUSLE. Les résultats sont présentés par la carte 14.

Selon la carte de la figure 5.14, les parties amont des versants subissent toujours une érosion plus forte, elle est élevée en raison des fortes pentes et des sols marno argileux des djebels délimitant les bassins. Les valeurs les moins élevées se trouvent sur les replats, dans les concavités aval et dans les vallées de Boussalem et de Meskina.

La perte minimale en sols est de l'ordre de 0 t/ha/an et la perte maximale est d'environ 100 t/ha/an. La perte moyenne de sols pour l'ensemble du bassin versant est de l'ordre de 1,54 t/ha/an.

La répartition de la surface sur les classes de perte des sols adoptés est présentée dans le tableau 6.13. Il montre que 98,16% de la zone à une érosion hydrique inférieure à 7,41 t/ha/an, ces terres sont très peu sensible à l'érosion à cause de leur topographie, et son couvert végétal. Tandis qu'environ 1,5 % du bassin ont une perte de sol moyenne de 7,41 à 15 t/ha/an. Alors que 0,26 % du bassin ont une forte perte de sol (supérieur à 30 t/ha/an).

Tableau 6.13 Superficie des classes des pertes de sol estimée par RUSLE avec R de Rango & Arnoldus (1987).

Erosion hydrique (T/ha/an)	A (Km <sup>2</sup> )	A%
<7,41	20018,72	98,16
7,41 - 15	323,65	1,59
15 - 30	35,72	0,18
30 - 60	7,75	0,04
>60	8,18	0,04

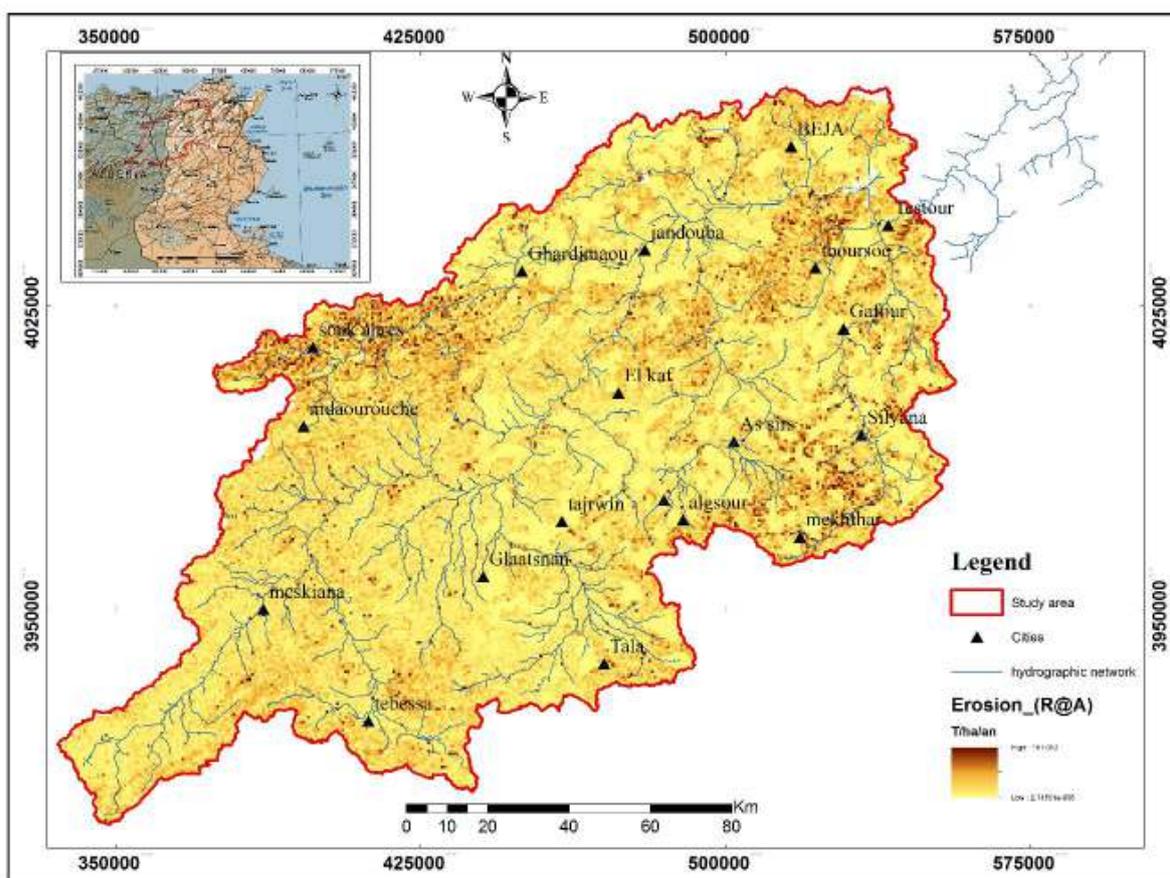


Figure 6.14 Carte de perte de sol déterminée par le modèle RUSLE avec R de Rango & Arnoldus (1987).

### 8. Validation des résultats et comparaison

On s'intéresse à la validation des résultats obtenue par l'application du RUSLE, on les comparant à des mesures bathymétriques effectuées au niveau des barrages de la zone d'étude.

Comme on a dit précédemment, Les facteurs LS, K, C et P sont des facteurs considérés constants pendant la période d'étude. Le facteur d'érosivité des pluies (R) a été estimé par deux modèles empiriques (Belaid (2015) ; Rango & Arnoldus (1987).)

L'étude comparative a été effectuée sur les 8 sous bassins versant des 8 barrages située sur la zone d'étude qui sont : Sidi Salem, Bouherthma, Lakhmess, Beni methir, Kasseb, Mellegue, Siliana et Oldjetmellgue.

Les résultats trouvés sont des valeurs moyennes interannuelles. Le tableau 6.14 et la figure6.15 représentent l'érosion déterminée par bathymétrie et calculée par le modèle RUSLE avec différents R, (RUSLE(B) : érosion estimée par RUSLE avec  $R_{\text{Belaid (2015)}}$ . RUSLE (A) : érosion estimée par RUSLE avec  $R_{\text{Rango \& Arnoldus (1987)}}$ ).

Tableau 6.14 Erosion estimée par le modèle RUSLE et l'érosion observée (Mm3/an).

Sous Bassins/Barrages	Erosion observée (Mm3/an)	RUSLE(B) (Mm3/an)	RUSLE (A) (Mm3/an)
<b>Mellègue</b>	3,84	7,924	0,879
<b>Kasseb</b>	0,36	0,165	0,017
<b>Beni metir</b>	0,03	0,024	0,003
<b>lakhemass</b>	0,03	0,102	0,012
<b>Bou Heurtma</b>	0,19	0,273	0,029
<b>Sidi Salem</b>	8,31	6,763	0,790
<b>Siliana</b>	2,28	1,384	0,159
<b>Oldjet el Mellegue</b>	2,5	4,313	0,467

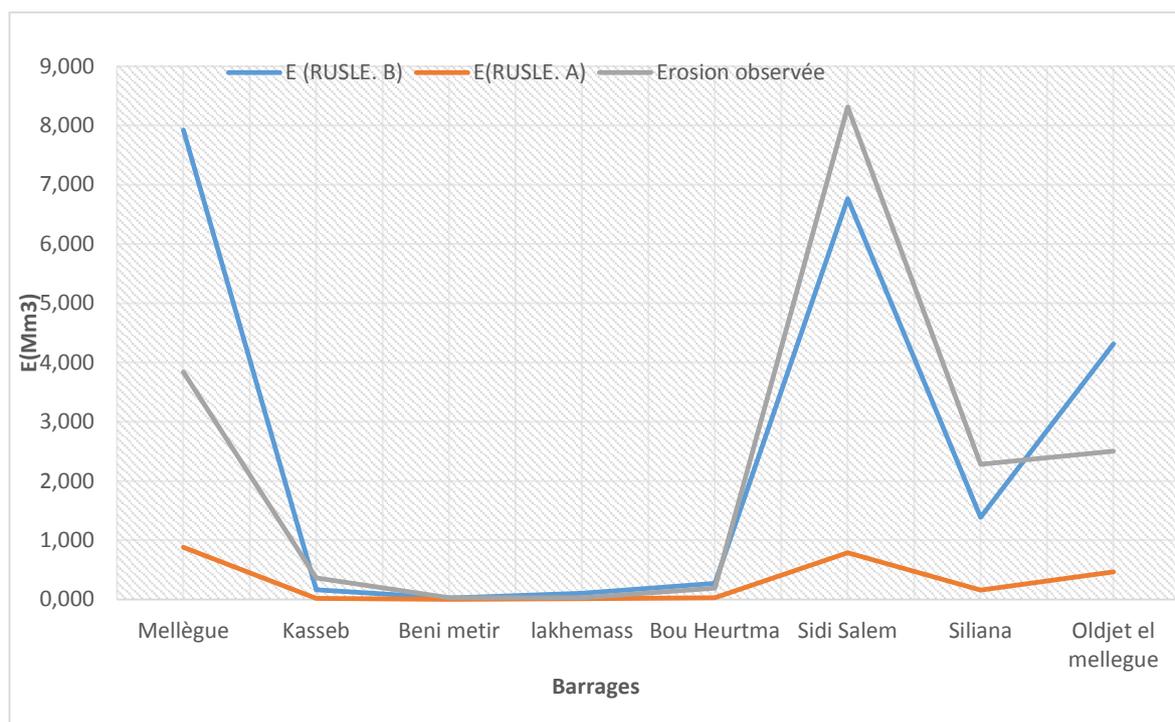


Figure 6.15 Variation moyenne interannuelle de l'érosion (RUSLE) calculée et celle observée.

En comparant les courbes de la figure 6.15 entre eu, nous avons constaté que :

- Toutes les courbes ont les mêmes allures.
- Le modèle RUSLE donne des résultats assez satisfaisants.
- Les pertes de sol calculée à partir de l'érosivité estimée par le modèle de Rango & Arnoldus (1987), sous-estime l'érosion pour toutes les stations.
- Les pertes de sol calculées à partir de l'érosivité estimée par le modèle de Belaid (2015), sont très proches à celles mesurées lors de la bathymétrie.
- Les Barrages de Sidi Salam, Siliana, Mellgue et Oldjet mellegue sont les plus vulnérables.

## 9. Discussion et Conclusion

Le bassin versant de la Medjerda est soumis à une forte agressivité climatique correspondant à une classe de R supérieure à 100MJ.mm/(ha.h.an). L'érosivité pluviale est caractérisée par une irrégularité spatiale, avec une forte augmentation du sud-ouest au nord-est. Nous expliquons cette irrégularité par l'irrégularité interannuelle des pluies (Khedimallah et al. 2020), et la variabilité du vent et du couvert végétal sur la zone d'étude. Les valeurs d'érosivité pour la zone d'étude estimées par la formule de Belaid sont similaires à celles obtenues par Meddi et al. (2016) en utilisant l'indice d'agressivité des précipitations en amont du bassin de la Medjerda pour la période entre 1968 et 2006. Les résultats obtenus par cette étude sont comparables à d'autres études réalisées sur d'autres bassins de climat semi-aride (Voir le tableau 6.15)

L'évaluation du facteur d'érodibilité du sol (facteur K) nécessite une cartographie détaillée du sol, qui n'a pas été réalisée dans cette étude. Les résultats obtenus par cette étude sont comparables à d'autres études réalisées sur d'autres bassins de climat semi-aride. (entre 0,016

et 0,065 th / MJ / mm dans le bassin versant de K'sob à l'est de l'Algérie ( Benkadja et al ., 2015 ); entre 0,021 et 0,039 th / MJ / mm dans le sud du Portugal (Ferreira et al.2015).

Le maximum des valeurs distribuées de Cfactor est associé aux cultures céréalières et fourragères ; la deuxième classe d'importance est associée au reboisement clair (faible) et au matorral dégradé, et la troisième classe est associée aux sols nus ou en jachère. Les valeurs du facteur C estimées par l'équation  $C_{vk}$  sont similaires à celles obtenues par Toumi et al. (2013), dans la région semi- aride du bassin de l'Oued Mina en Algérie en période sèche, et ils sont comparables aux résultats d'autres études réalisées sur d'autres bassins du climat semi-aride. (Voir le tableau 5.15)

La valeur du Pfactor diminue en adoptant des pratiques de conservation des sols, comme l'installation de bancs mécaniques sur les pentes, car ils réduisent le volume et la vitesse de ruissellement et favorisent le dépôt de sédiments à la surface des pentes (Wischmeier et Smith 1978; Renard et al.1997; Terranova et al.2009) .

Le SIG nous a permis d'estimer le potentiel annuel d'érosion de la zone d'étude pixel par pixel. Les figures 13 et 14 n'affichent pas seulement la perte de sol dans chaque pixel, mais fournit également des informations sur les zones critiques contre le risque de perte de sol. La classification adaptée a été établie aux États-Unis sur la base de la tolérance à la perte des sols, et a été utilisée par d'autres études en zone climatique semi-aride (Sediki 2004 ; Sahli et al. 2019). Cela suppose en moyenne que les sols peuvent tolérer des pertes allant jusqu'à 7,41t/ha/an, tout en permettant un niveau élevé de production agricole. Les pertes du sol varient entre 0 et 100 t/h/an et la perte moyenne est estimée à 13,28 t/ha/an, Cette estimation dépasse les limites tolérables estimées par Rojo (1990) dans les environnements méditerranéens, (Entre 2 et 12 t.ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>).

Comme le montre le Tableau 5.12, 36,21% de la zone du bassin versant de la Medjerda ont des valeurs de taux d'érosion comprises entre 0 et 7,41 t/h/an, qui pourraient être classées comme risque tolérable. 25, 91% de la superficie ont des valeurs allant de 7,42 à 15 t/h/an, qui pourraient être classées comme à faible risque, et 22,13% du bassin ont montré des pertes de sol comprises entre 15 et 30 t/h/an, qui peut être considérée comme un risque moyen d'érosion. La zone à haut risque représente 15,75 % du bassin avec une valeur supérieure à 30 t/h/an.

Les faibles valeurs de potentiel occupent les plaines, dans la partie nord-est et sud-ouest du bassin, où les pentes sont inférieures à 5%, tandis que les valeurs fortes se retrouvent à des altitudes plus élevées. Le risque maximal est observé en amont d'Oued Medjerda et dans les hautes altitudes des bassins du Chabro, du Ranem et de la Siliana. Le risque érosif est important dans ces régions en raison des pentes abruptes, (des fortes pentes), et des sols marneux argileux des montagnes délimitant ces bassins, ainsi que des fortes valeurs du facteur R malgré la présence de végétation (facteur de protection). En revanche, la plaine alluviale du bassin de la Meskiana et la plaine de Boussalem présentent un risque beaucoup plus faible.

La superficie maximale touchée par le risque d'érosion est associée à la classe inférieure à 15t/ha/an. Ceci est similaire aux résultats de Roose et al. (2000) qui ont montré que dans les

petites montagnes méditerranéennes, l'érosion en nappe se produit à des taux d'érosion de 0 à 20 t/ha/an.

La classe d'érosion la plus élevée se situe principalement dans les hauts reliefs du nord-ouest, sur les montagnes de Souk Ahres , au sud-ouest, sur les montagnes de Tebessa , et à l' extrémité sud-est de la zone d'étude, sur les montagnes de Siliana et Kef, qui sont principalement occupée par les pâturages, les matorral dégradés , et les terres agricoles avec des pentes comprise entre 10 et 66%. Ces zones montrent l'effet combiné du couvert végétal et celui des pentes raides. Celles-ci nous ont permis de conclure que les pertes dans les sols sont bien corrélées au facteur topographique. Roose (1994) a montré qu'une augmentation de 0,25% au niveau de la pente peut entraîner une augmentation de 11% du débit moyen annuel de ruissellement et une augmentation de 3,6 t/ha/an des pertes, moyennes des sols.

Les résultats obtenus dans cette partie sont proches de ceux obtenus par Chabaan (2016) sur le barrage de Siliana en Tunisie. Ainsi que les résultats obtenus par Ben Cheikha et Gueddari (2008) sur le bassin versant du Jannet à Maktar, (Tunisie), et au bassin versant Ayda en Tunisie par (Chafai et al.2020). Des résultats similaires aussi aux résultats trouvés par Raissouni et al. (2012) sur le bassin versant de Laou au Maroc, et par Sahli et al. (2019) au bassin versant de Soummam en Algérie. (Autres études voir tableau 5.15).

Tableau 5.15 Valeurs du facteur et des paramètres trouvés dans les articles scientifiques traitant l'application du model RUSLE dans les zones semi arides

References	Sites (Country )	R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )		K (t ha MJ <sup>-1</sup> mm <sup>1</sup> )		LS		C		A (t/ha/y)
		min	max	min	max	min	max	min	max	
Blaid, 2015	Sbaihia (Tunisia)	500	1000	0.037	0.073	/	/	/	/	/
Benkaja et al.2015	K'soub (Algeria)	100	500	0.016	0.065	0	55	0.033	1	0 to 1500
Meddi et al.2016	Medjerda (Algeria)	162	510	/	/	/	/	/	/	/
Toubal et al.2015	Wadi Sahouat (Algeria)	324	535.8	0.044	/	0	20	0.002	1	0 to 255
Ferreira et al.2015	Pourtugal	851.7	892	0.021	0.039	0	100	0.035	0.8	> 8
Chafai et al.2020	Ayda river (Tunisia)	245	1239	0.036	0.08	0	32	0.2	1	0 to 330
Chadli et al.2016	Sebou (Moroco)	1527	7963	0,018	0.022	0	29.4	0.001	0.1	10 to 200
Balasubramani et al.2015	(India)	333.6	414.2	0.01	0.1	0	90	0.003	0.5	0 to 100
(Menasria et al.2022)	Medjerda (Algeria)	400	1000	0.016	0.049	0	90	0.001	0.9	0 to 100

En comparant la carte du risque érosif avec celle de l'évolution saisonnière de la végétation figure (6.16), on remarque que les valeurs les plus élevées du risque érosif correspondent aux régions dépourvues de la végétation (sol nu hivernal) et les monts et les altitudes accidentées qui sont occupées par les Interculture représentent un milieu favorable pour l'érosion hydrique.

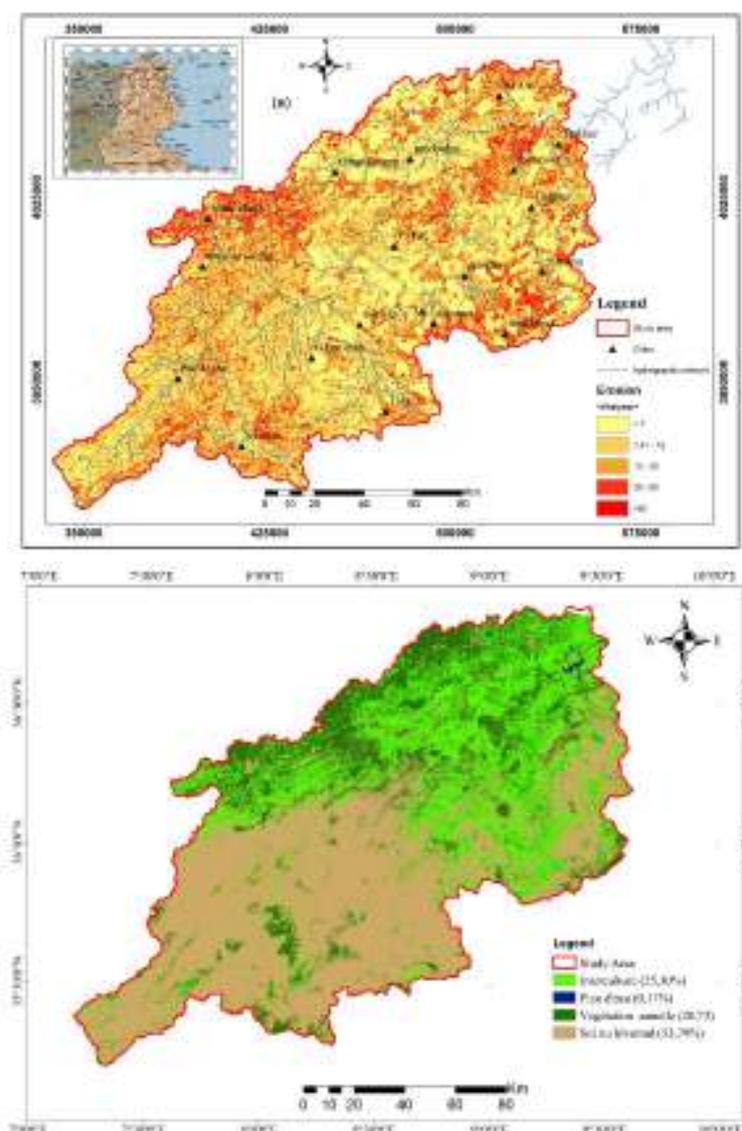


Figure 6.16 Comparaison entre la carte du risque érosif et la carte d'évolution saisonnière de la végétation

La validation sur le terrain et les études citées ci-dessus confirment que l'application de la RUSLE a fourni des résultats fiables, malgré sa limitation à cause de certains points : Tout d'abord, l'équation universelle de perte de sol ne prédit que l'érosion en nappe et l'érosion en rigoles, l'érosion des ravines n'est pas prise en compte. De plus, certains facteurs importants influençant l'érosion des sols ne sont pas pris en compte, comme l'effet des pierres et des fragments de roche. De plus, l'évaluation du facteur d'érodibilité du sol (facteur K) et du facteur d'érosivité des précipitations (facteur R) nécessite une cartographie détaillée du sol et des informations détaillées sur l'intensité moyenne sur 30 minutes de chaque averse enregistrée, ce qui n'a pas été réalisé dans cette étude.

## **Chapitre 7**

# **Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants de la zone d'étude à l'aide de l'USLE et la FAO.**

## Chapitre 7 : Evaluation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants de la zone d'étude à l'aide de l'USLE et la FAO.

### Objectif

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant de la Medjerda. En utilisant le modèle empirique de l'USLE, et le modèle physique de la « FAO ». Nous représenterons les procédures de la méthodologie développée pour l'estimation de différents facteurs interagissant l'érosion hydrique et nous comparerons les résultats trouvés.

### 1. Introduction

Les modèles empiriques sont des modèles hydrologiques basés sur des lois mathématiques appliquées et validés par des expériences au laboratoire ou sur le terrain. Le modèle le plus simple et le très utilisé, qui relie la perte de sol aux précipitations ou au ruissellement, est l'équation universelle de la perte de sol (USLE) menée par (Wischmeier et Smith 1965, 1978). Il a été initialement proposé pour certains systèmes de culture, mais il est également applicable aux conditions non agricoles. Récemment, il a été utilisé avec succès au niveau régional, national et au niveau des bassins versants (Bera 2017 ; Elaloui et al.2017). Le modèle USLE, comme RUSLE, ne permet aucune estimation de dépôt et la taille des sédiments, mais il permis d'évaluer l'érosion du sol et sa distribution spatiale à un coût raisonnable, un temps réduit et une meilleure précision sur de grandes surfaces.

L'utilisation de l'équation universelle de la perte de sol (USLE) pour étudier l'érosion hydrique à des échelles plus grandes que celle de la parcelle nécessite l'utilisation de systèmes d'information géographique et de la télédétection, qui sont devenus d'une utilité énorme pour rassembler, traiter, analyser et superposer des informations spatiales qui décrivent l'environnement du bassin versant, puisque tous les facteurs peuvent être cartographiés. Cela a permis de déterminer les valeurs de chaque facteur d'érosion par unité spatiale déterminée, qui est le pixel (Kinnell 2001).

### 2. Méthodologies utilisées

Le modèle USLE de Wichmeier et Smith (1978) était basé sur des milliers de données expérimentales recueillies par le Service de conservation des sols et la recherche agricole dans 37 États américains. Il représente le risque d'érosion moyen en nappe sur un versant en fonction multiplicative de cinq sous-modèles, érosivité des pluies et quatre facteurs de résistance du milieu (érodibilité du sol, un facteur topographique, le couvert végétal et les pratiques culturelle antiérosives).

La méthode utilisée pour estimer l'érosion par USLE est similaire à celle du RUSLE, elle consiste à cartographier les facteurs de l'érosion hydrique, et à déterminer leurs valeurs par pixel (Kinnell 2001), en utilisant les images satellitaires landsat8 Oli.

Egalement pour la méthode de la FAO, les paramètres de l'érosion qui sont : l'érosivité des pluies, la nature du sol, la pente du terrain et l'occupation du sol ont été cartographiés et représentés sous forme thématiques selon les caractéristiques et les équations de la méthode.

Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre de l'USLE et la FAO et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation dans la grille ArcGIS 10.5. Chaque grille de facteur avait une taille de cellule de 30 m. Toutes les couches ont été projetées en UTM zone 32N en utilisant le WGS 1984.

### 3. Application du modèle USLE

#### 3.1 L'érosivité de la pluie

L'agressivité de pluie tient compte des trois conditions : énergie, intensité et durée des pluies. Elle est calculée par l'équation de Wischmeier et Smith (1978) :

$$R = EI_{30} \dots \dots \dots (7.1)$$

$I_{30}$  intensité maximale de la pluie de durée de 30 min pour l'averse considérée ( $mm h^{-1}$ ).  
E énergie cinétique totale de la pluie ( $MJ ha^{-1}mm^{-1}$ ).

Donc l'estimation du facteur R nécessite la connaissance des énergies cinétiques et de l'intensité moyenne des gouttes de pluie sur 30 min de chaque averse, sur une longue période (jusqu'à 30 ans) (Sadiki et al. 2004). Ce type d'analyse est impossible à faire dans un bassin versant non jaugé pendant une période aussi longue. Pour contourner cette limitation, plusieurs chercheurs ont développé des formules adaptées aux données mensuelles et annuelles disponibles (Singh et al. 1981 ; Renard et Freimund 1994 ; Wang 1995 ; Van der Knijff et al. 2000 ; Parveen et Kumar 2012 ; Meddi 2014 ; Belaid 2015).

Pour l'estimation du facteur R (USLE), nous avons utilisé une valeur moyenne pour chaque station, ces valeurs ont été calculées par le modèle de Belaid (2015). L'interpolation entre les stations a été faite par le module Kriging d'Arcgis 10.5.

La Medjerda est soumise à une forte agressivité climatique correspondant à une classe de R supérieure à  $100MJ.mm/ha.h.an$ . Dans le tableau 1, on donne des valeurs du facteur R annuel calculées par le modèle de Belaid (2015) sur les données des stations pluviométriques de Kef, Jandouba et Tunis pour la période 1991 à 2006.

L'analyse du graphe de la figure 1 qui représente la variabilité temporelle de l'érosivité de la pluie montre qu'elle est très variable d'une année à une autre et d'une station à une autre (une irrégularité temporelle et spatiale).

La distribution spatiale des indices d'érosivité montre une forte augmentation du sud-ouest au nord-est. Ceci peut s'expliquer par l'irrégularité interannuelle des pluies (Khedimallah et al. 2020), et la variabilité du vent et du couvert végétal sur la zone d'étude.

Tableau 7.1 Indice de l'érosivité de pluie Estimé par le modèle de Belaid (2015).

Année	Station kef	Station Tunis	Station jandouba
91/92	1116,42	1210,01	620,78
92/93	604,22	716,63	770,09
93/94	526,60	768,76	541,92
94/95	480,95	532,45	716,94
95/96	600,67	450,45	477,77
96/97	592,86	979,24	415,45
97/98	495,54	551,57	485,07
98/99	572,98	509,24	593,70
99/00	543,22	669,92	568,38
00/01	1056,61	1232,16	637,43
01/02	630,28	2405,28	770,92
02/03	786,12	470,64	1636,59
03/04	1636,59	790,10	881,87
04/05	881,87	1028,51	620,78
05/06	622,16	644,37	554,10
Moyenne	743,14	863,96	686,12

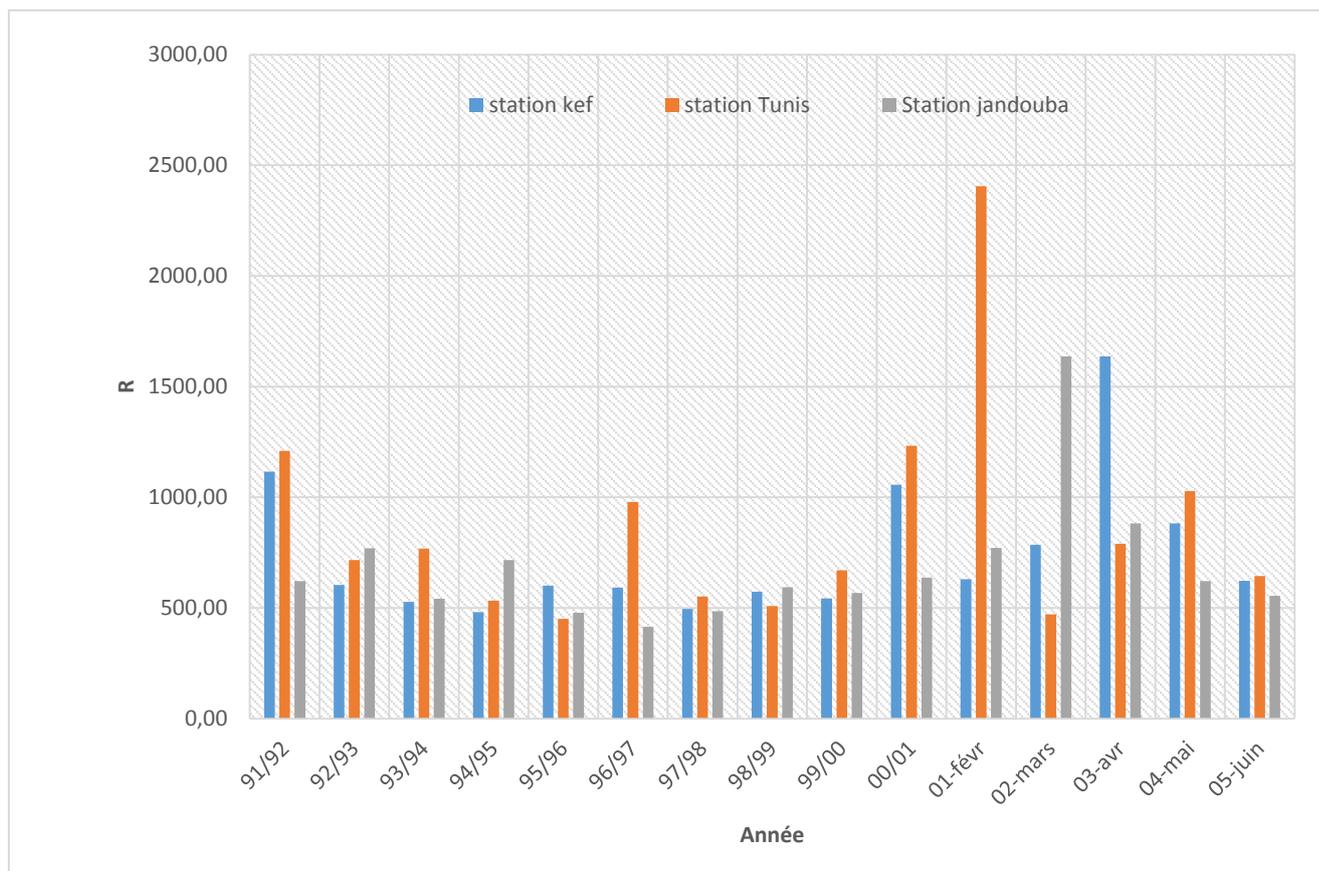


Figure 7.1 Variation du facteur R pour les 3 stations (Kef, Jendouba, Tunis)

### 3.2 Facteur érodibilité de sol. (K)

Le sol peu évolue d'apport forme la grande partie de la couverture pédologique de la zone d'étude. Sur les versants abrupts et les reliefs accidentés du Haut Tell, se rencontrent les lithosols et les rendzines et sur les versants moins abrupts capables de retenir l'eau et sur les hauteurs plus arrosés les cambisols calciques se développent sur marne et argile calcaire. Dans le climat semi-aride, le taux d'érosion varie en fonction du type de sol, pratique agricole utilisée, et la pluviométrie (Roose et al. 1998). Pour avoir la carte d'érodibilité du sol pour le modèle USLE, nous avons utilisé la base Harmonisée mondiale de données sur les sols (HWSD), version 1.2 (FAO / IIASA / ISRIC / ISS-CAS / JRC 2009).

La figure 2 présente la distribution spatiale du facteur érodibilité des sols K, pour le bassin versant de Medjerda. Elle montre que les résultats varient entre 0,12 et 0,37t.ha.h/ha.MJ.mm, et que les sols les plus érodables se situent sur les pentes fortes.

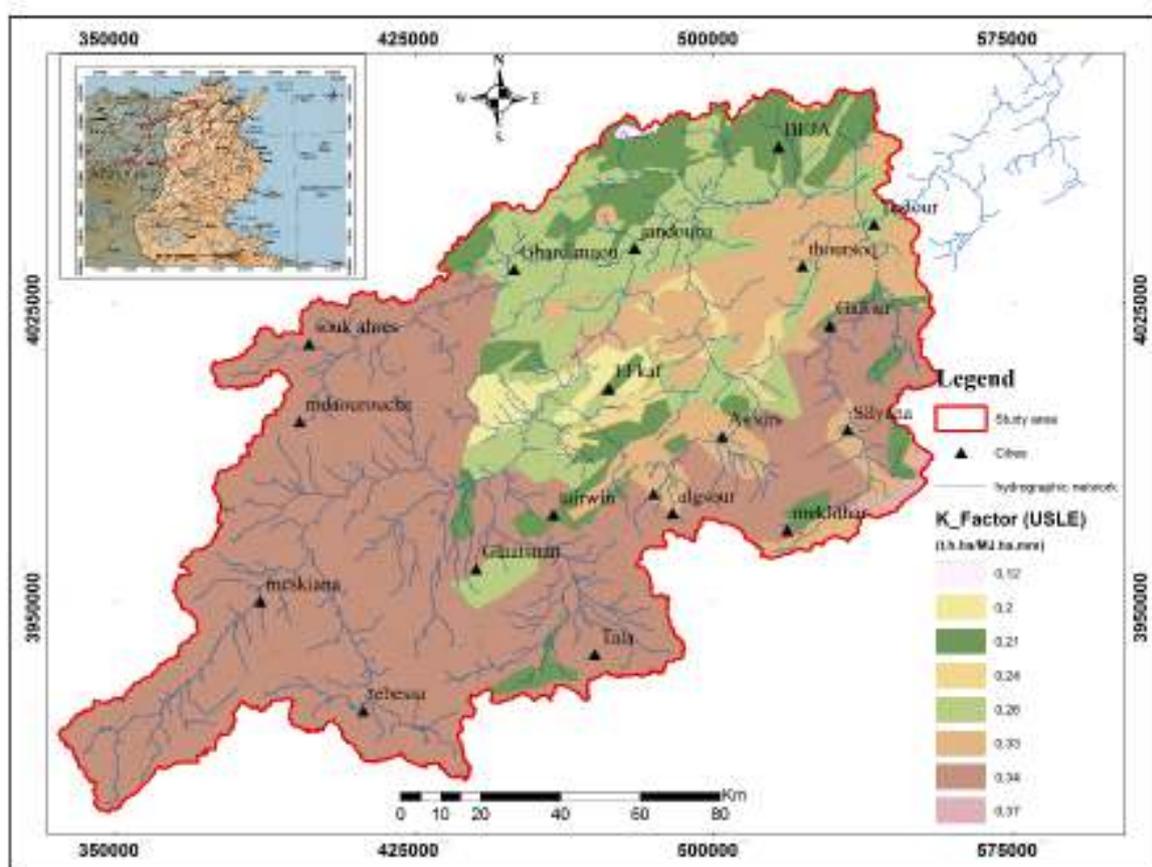


Figure 7.2 carte du facteur K (USLE)

L'analyse de la figure 7.2 nous permet de faire la répartition spatiale illustrée par le tableau 2 :

Tableau 7.2 Répartition spatiale du facteur K\_USLE (t.ha.h/ha.MJ.mm)

Classe (HWSD)	% Surface	K (USLE)
Clay heavy	10,10	0,21
clay light	2,52	0,24
Clay loam	13,72	0,33
Silty loam	0,42	0,37
loam	55,27	0,34
Sandy clay loam	2,05	0,2
Sandy loam	0,13	0,12
loam	16,06	0,26

### 3.3 Le facteur topographique LS

Pour la détermination du facteur topographique LS selon le modèle USLE, nous avons utilisé l'équation de Smith et al. (1996) présenté ci-dessous :

$$LS = 1,4 \times \left(\frac{A_s}{22.1}\right)^{0,4} \times \frac{\sin(\theta \times 0,01745)^{1,4}}{0,09} \dots\dots\dots (7.2)$$

Avec :  $\theta$  : l'angle de la pente en degré, et  $A_s$  : La surface spécifique écrite sous un SIG de la manière suivante (Moore et Burch, 1986): La carte de la surface ( $A_s$ ) est déterminée en multipliant la carte de l'accumulation de ruissellement (*Flow accumulation*) par la taille de pixel (la résolution).

La figure 7.4 représente la répartition spatiale du facteur topographique (LS) estimée selon USLE. Elle montre que les résultats varient entre 0 et 30. Sa distribution spatiale montre que 99,96% du bassin versant est dans la classe inférieure à 5, et 0,04% dans la classe comprise entre 5 et 30. (Voir figure 3)

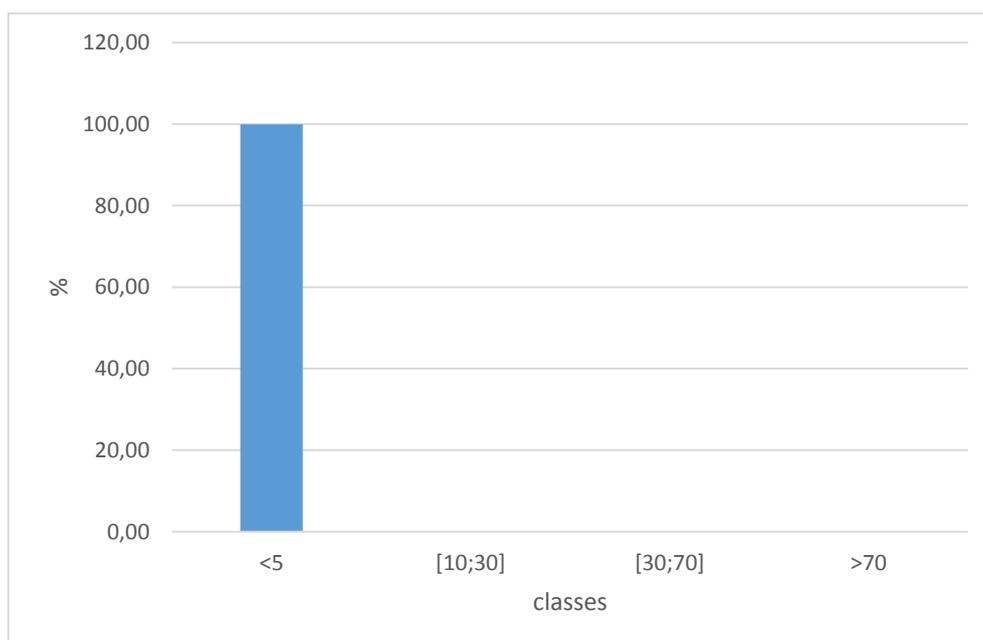


Figure 7.3 Distributions des valeurs du facteur LS (USLE)

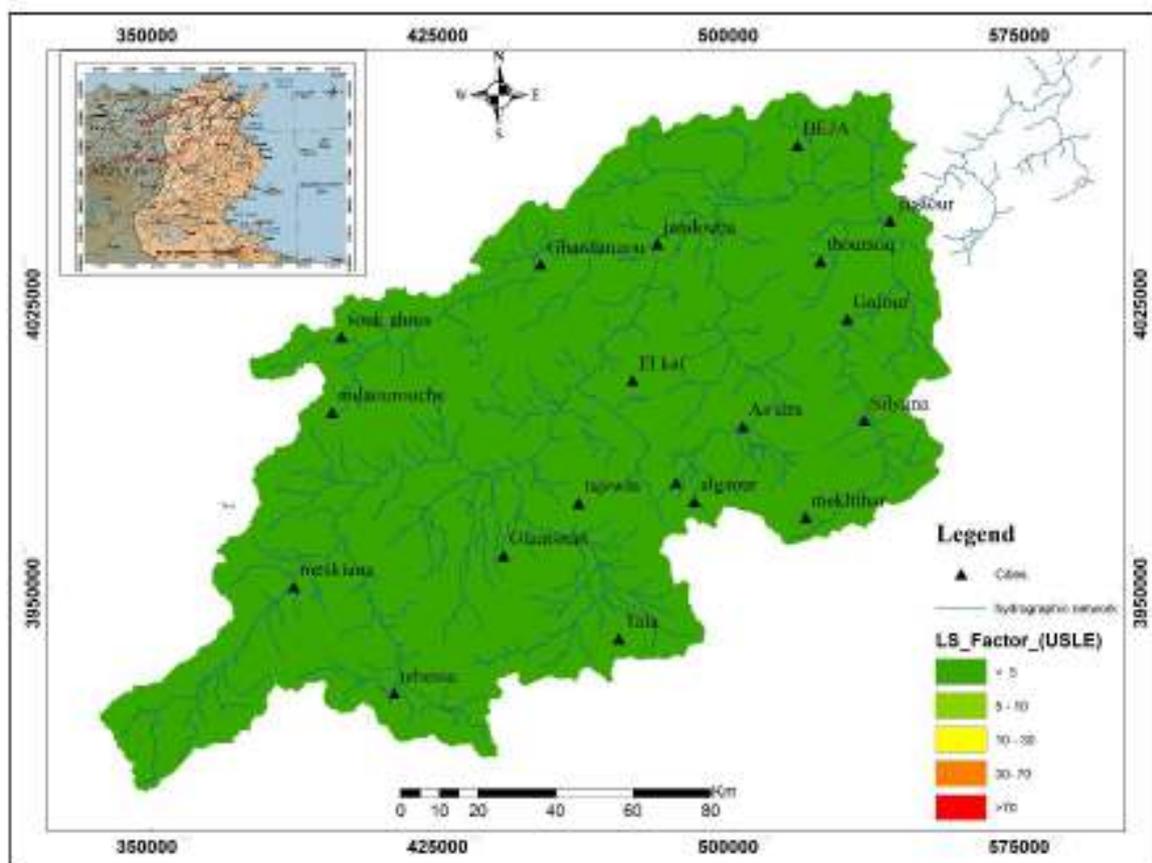


Figure 7.4 carte du facteur LS\_USLE

### 3.4 Facteur de couverture et de gestion (C)

Le facteur C combine la couverture, le degré de production de la plante et la technique de culture associée (Farhan 2013).

Selon Roose (1996) et Al-Zitawi (2006), le facteur C varie entre 1 pour un sol nu et moins de 0.1 pour les forêts denses. Pour la détermination du facteur C\_USLE nous avons utilisé la même approche utilisée précédemment (Pour RUSLE).

### 3.5 Facteur de pratique antiérosive (P)

Les aménagements antiérosifs rencontrés sur la Medjerda sont principalement des banquettes de rétention. En superposant les cartes des aménagements antiérosives avec la carte des pentes, nous avons obtenu la carte du facteur P de la figure 7.5.

Les valeurs et la répartition spatiale du facteur P sur le bassin de la Medjerda sont indiquées dans le tableau 7.3.

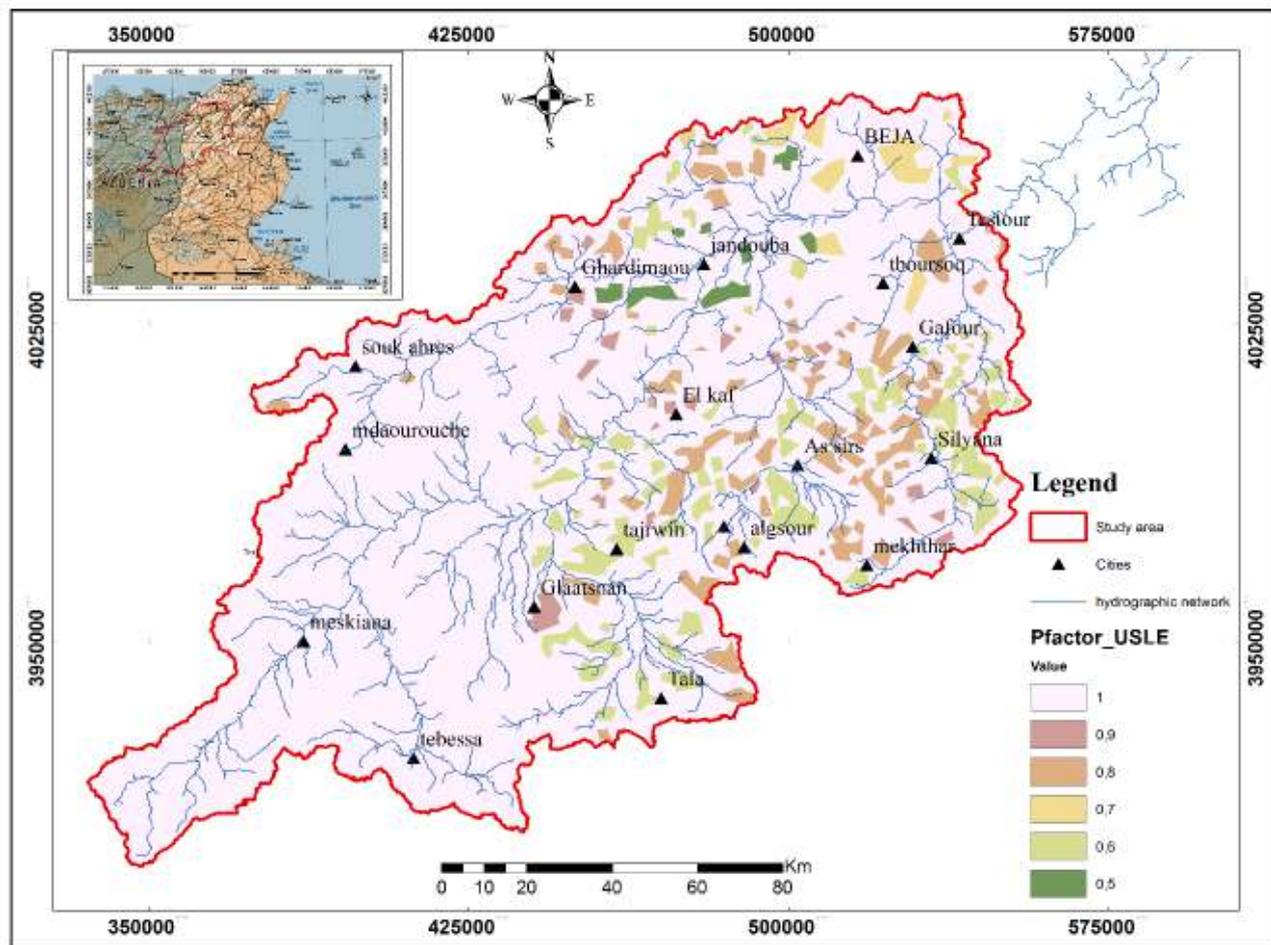


Figure 7.5 carte du facteur P\_USLE

Tableau 7.3 Les valeurs et la Répartition spatiale du facteur aménagement antiérosive P

Type d'aménagement	Pente %	P (USLE)	% surface
	-	1	85,62
Banquettes	1- 2	0,6	6,17
	2 – 7	0,5	2,4
	7 – 12	0,7	2,34
	12 – 25	0,8	2,04
	>25	0,9	1,44

### 3.6 Carte des pertes en sols (selon USLE)

Le SIG estime le potentiel annuel d'érosion pixel par pixel. La Figure 7.6 montre la perte de sol dans chaque pixel et fournit des informations sur les zones critiques contre le risque de perte de sol. La classification adaptée a été établie aux États-Unis sur la base de la tolérance à la perte des sols, et a été utilisée par d'autres études en zone climatique semi-aride (Sediki 2004 ; Sahli et al. 2019). Cela suppose en moyenne que les sols peuvent tolérer des pertes allant jusqu'à 7,41 t/ha/an.

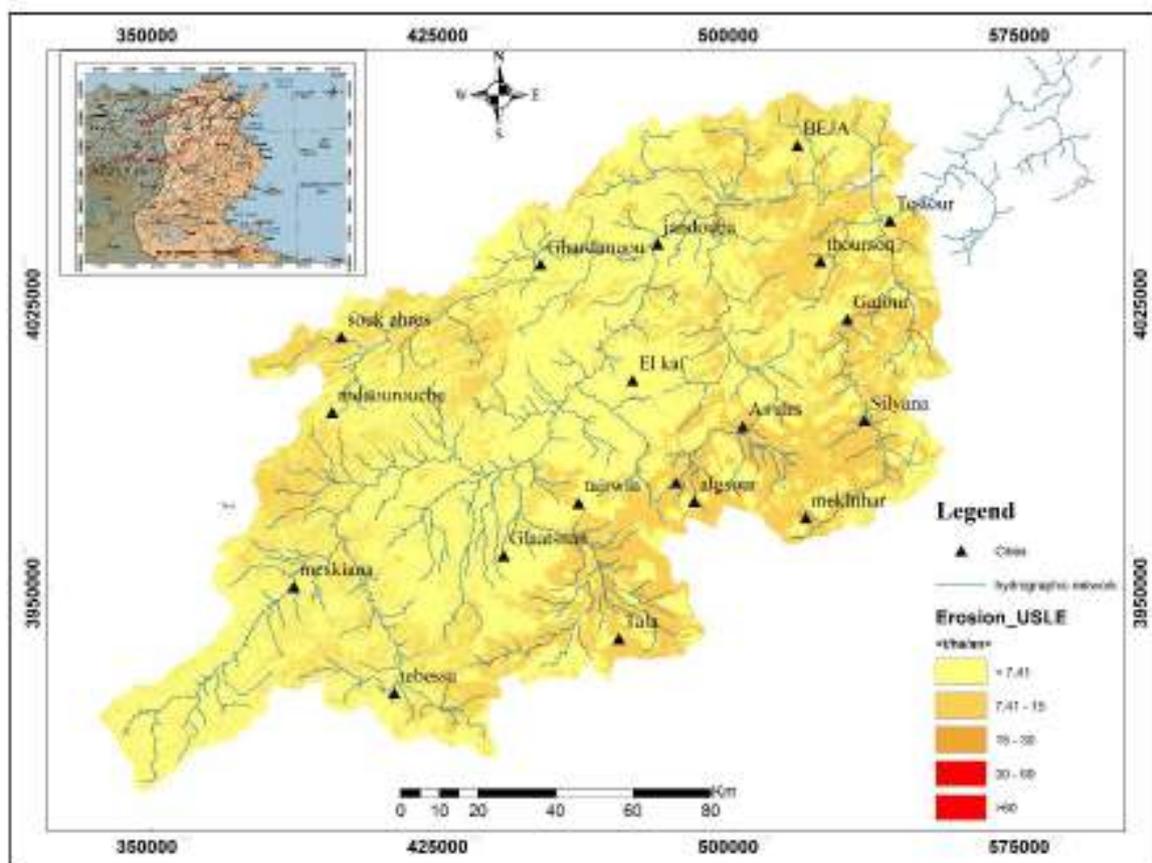


Figure 6 Carte de perte de sol déterminée par le modèle USLE

L'analyse de la figure 6 montre que les pertes en sols varient entre 0 et 100 t/ha/an. Les fortes pertes se localisent au niveau des altitudes élevées. Tandis que les faibles pertes se trouvent au niveau des zones de basse altitude et au niveau des plaines.

La répartition spatiale des différentes classes de perte de sol est présentée dans le tableau 7.4. Il montre que 65,26% de la zone à une érosion hydrique inférieure à 7,41 t/ha/an. Tandis qu'environ 33,11 % du bassin ont une perte de sol moyenne de 7,41 à 15 t/ha/an. Alors que 1,64% du bassin ont une forte perte de sol (supérieur à 30 t/ha/an).

Tableau 7.4 Superficie des classes des pertes de sol

Erosion hydrique (T/ha/an)	A (Km <sup>2</sup> )	A%
<7,41	13318,71	65,26
7,41 - 15	6757,41	33,11
15 - 30	207,69	1,02
30 - 60	70,42	0,35
>60	55,89	0,27

#### 4. Application du modèle de la FAO

On s'intéresse maintenant à estimer le taux d'érosion par la méthode de la FAO. C'est une méthodologie à l'échelle nationale à la fois paramétrique et empirique développée par le service de la conservation des eaux et du sol de la FAO en 1979 sur la base de l'USLE. Elle est validée en Tunisie. Elle dépend des caractéristiques suivantes : l'érosivité des pluies, la nature du sol, la pente du terrain et l'occupation du sol.

La méthode de la FAO donne le taux spécifique annuelle d'érosion  $E_s$  (en t/ha/an) selon la relation suivante :

$$E_s = F_m * C_1 * C_2 * C_3 \dots\dots\dots (7.3)$$

Avec :  $F_m$  : *indice de Fournier modifié caractérisant l'érosivité des pluies* ;  $C_1$  le coefficient de texture des sols, compris entre 0,5 et 1,2 selon la nature du sol,  $C_2$  le coefficient topographique variant de 0,5 à 1,5 selon la pente du terrain,  $C_3$  le coefficient d'exploitation des sols variant de 0,4 à 1 selon l'occupation des sols.

##### 4.1 Facteur d'érosivité des pluies (Indice de Fournier modifié)

L'érosivité de la pluie dans le modèle de la FAO est estimée par l'indice de Fournier modifié. Cet indice, IFM, prend en considération la pluie de tous les mois de l'année, et la pluie annuelle il s'écrit comme suit :

$$IFM = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \dots\dots\dots (7.4)$$

Où les  $P_i$  représentent les précipitations mensuelles et  $P$  les précipitations annuelles (mm).

Pour l'estimation de l'indice IFM, nous avons utilisé une valeur moyenne pour chaque station pluviométrique, ces valeurs ont été calculées par l'équation 4 en utilisant des séries de précipitations homogènes allant de 1971 à 2007. L'interpolation entre les stations de la zone d'étude a été faite par le module Kriging de l'Arcgis 10.5.

Les résultats de calculs de l'indice IFM sont donnés dans le tableau 7.5 et la distribution spatiale des valeurs est illustrée sur la figure 7.7.

Dans le tableau 7.6 on donne des valeurs de l'indice IFM calculés pour les données trois stations pluviométriques de Jandouba, Kef et Tunis pour la période 1991 à 2006.

Les valeurs de l'indice IFM sont très variables d'une année à une autre, et d'une station à une autre. Elles varient de moins de 20 MJ mm/ha.h.an à plus de 80MJ.mm/ha.h.an dans le nord-ouest, avec une moyenne de 43,84 MJ.mm/ha.h.an. Nous avons observé un gradient croissant de l'amont du bassin à son exutoire avec une forte augmentation du sud au nord.

Tableau 7.5 résultats de calcul de l'Indice de Fournier modifié

Stations pluviométriques	IFM
Tabarka	108,27
Jendouba	43,45
Kef	45,54
Tunis	48,00
Siliana	67,42
Testour	55,93
Ouenza	20,52
Boukhadera	25,13
Souk Ahres	55,17
Meskiana	25,96
babar	25,13
Tebessa	27,85

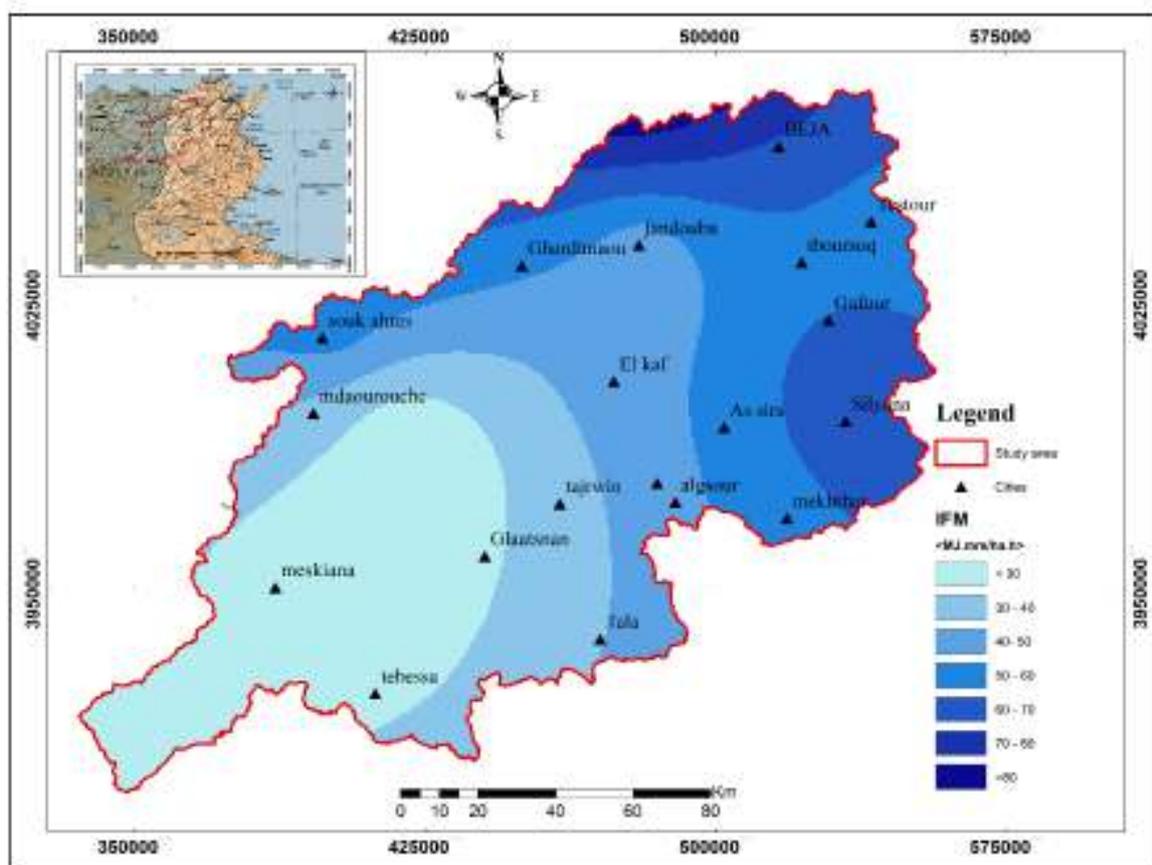


Figure 7.7 Facteur d'érosivité de pluie (indice de Fournier modifié).

Tableau 7.6 Indice de Fournier modifié pour les trois stations (Kef, Jendouba, Tunis)

Année	Station Kef	Station Tunis	Station Jendouba
91/92	95,05	100,42	55,93
92/93	54,12	65,5	70,29
93/94	44,96	70,18	46,87
94/95	38,91	45,7	65,53
95/96	53,73	34,54	38,47
96/97	52,86	86,31	29,15
97/98	40,9	48,04	39,48
98/99	50,58	42,72	52,95
99/00	47,02	61	50,05
00/01	91,38	101,63	57,69
01/02	56,94	146,22	70,37
02/03	71,66	37,47	120,55
03/04	120,55	72	79,33
04/05	79,32	89,58	55,93
05/06	56,07	58,41	48,35
Moyenne	63,60	70,65	58,73

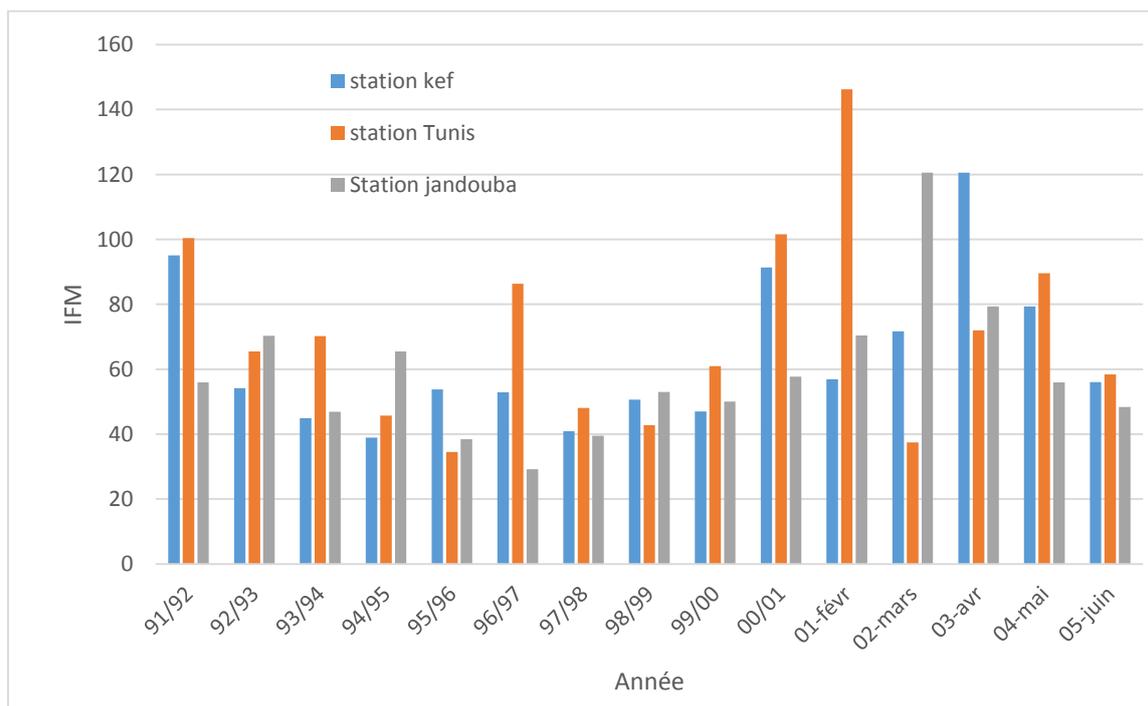


Figure 7.8 Variation de l'indice IFM pour les 3 stations (Kef, Jendouba, Tunis) durant la période 1991-2006

### 4.2 Facteur pédologique (coefficient pédologique $C_1$ )

C'est un coefficient déterminé à partir de la carte pédologique du bassin versant selon la nature du sol. Nous avons toujours utilisé les données de la base Harmonisée mondiale de données sur les sols (HWSD), version 1.2 (FAO / IIASA / ISRIC / ISS-CAS / JRC 2009). Nous avons utilisé les valeurs de  $C_1$  proposées par Chérif et al. (1995) selon la texture du sol. La carte de répartition du facteur  $C_1$  (figure 7.9) a montré la sensibilité des différentes natures du sol vis-à-vis les processus érosifs. La répartition spatiale du coefficient topographique  $C_1$  est présentée par le tableau 7.7.

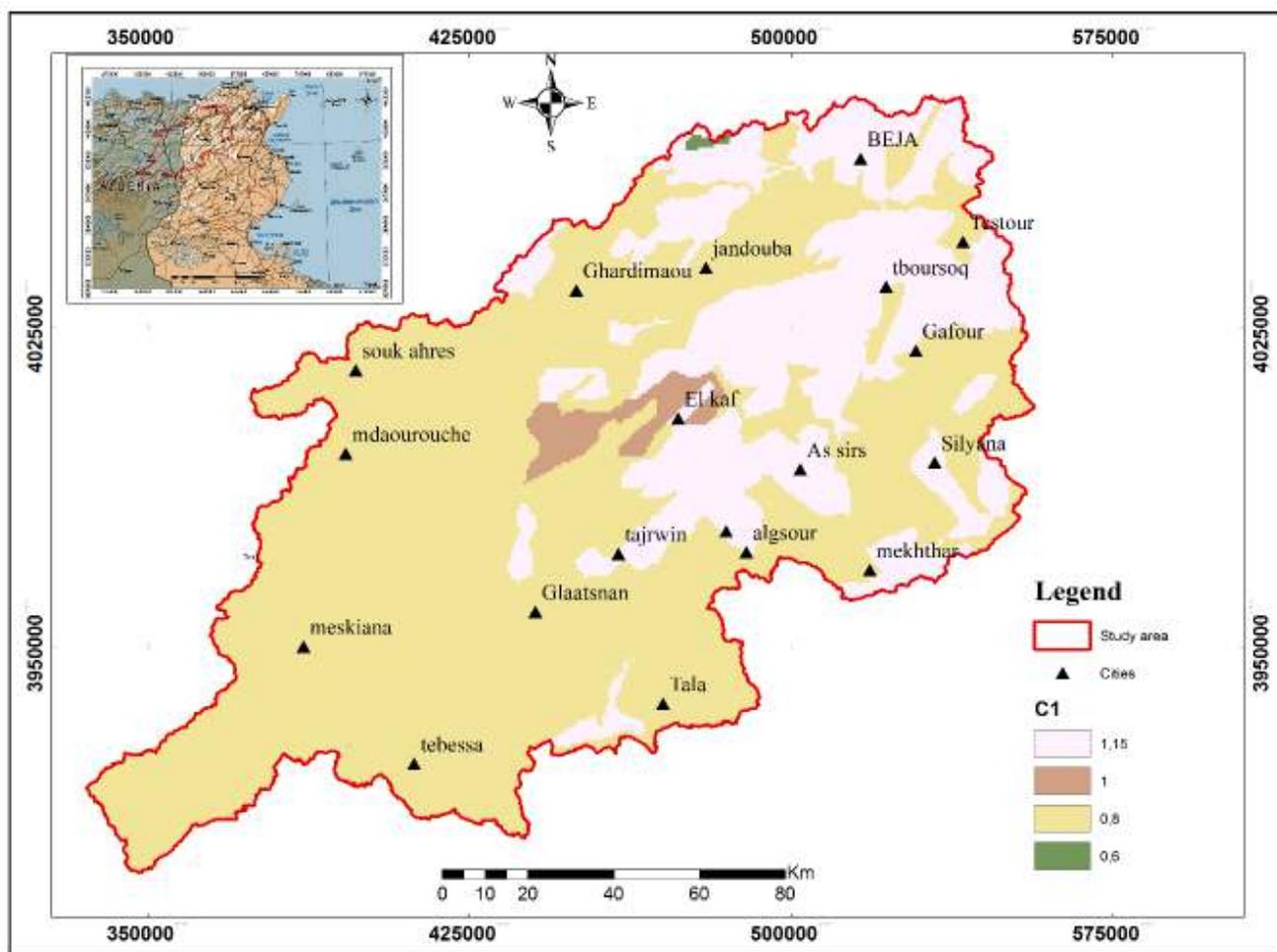


Figure 7.9 Carte du facteur topographique  $C_1$  (coefficient pédologique  $C_1$ ).

Tableau 7.7 Valeur du coefficient  $C_1$  (Chérif et al. 1995)

Soil	Nature du sol	Coefficient $C_1$	% Surface
Loam Sandy	Sablo-limoneux	0,6	0,12
Loam	Limoneux	0,8	71,90
Clay Loam	Limoneux-argileux	1	2,06
Clay	Argileux	1,15	25,92

### 4.3 Facteur topographique (coefficient topographique $C_2$ )

C'est un coefficient déterminé à partir du modèle numérique de terrain, il varie de 0,5 à 1,5 selon la pente du terrain. Nous avons toujours utilisé les valeurs proposées par Chérif et al. (1995) selon la pente. La carte de répartition du facteur  $C_2$  est illustre sur la figure 7.10.

La zone d'étude est caractérisée par une pente assez forte en amont qu'en aval, elle a une tendance à s'allonger de sa naissance vers son exutoire. La répartition spatiale de l'occupation du sol est présentée par le tableau 7.8.

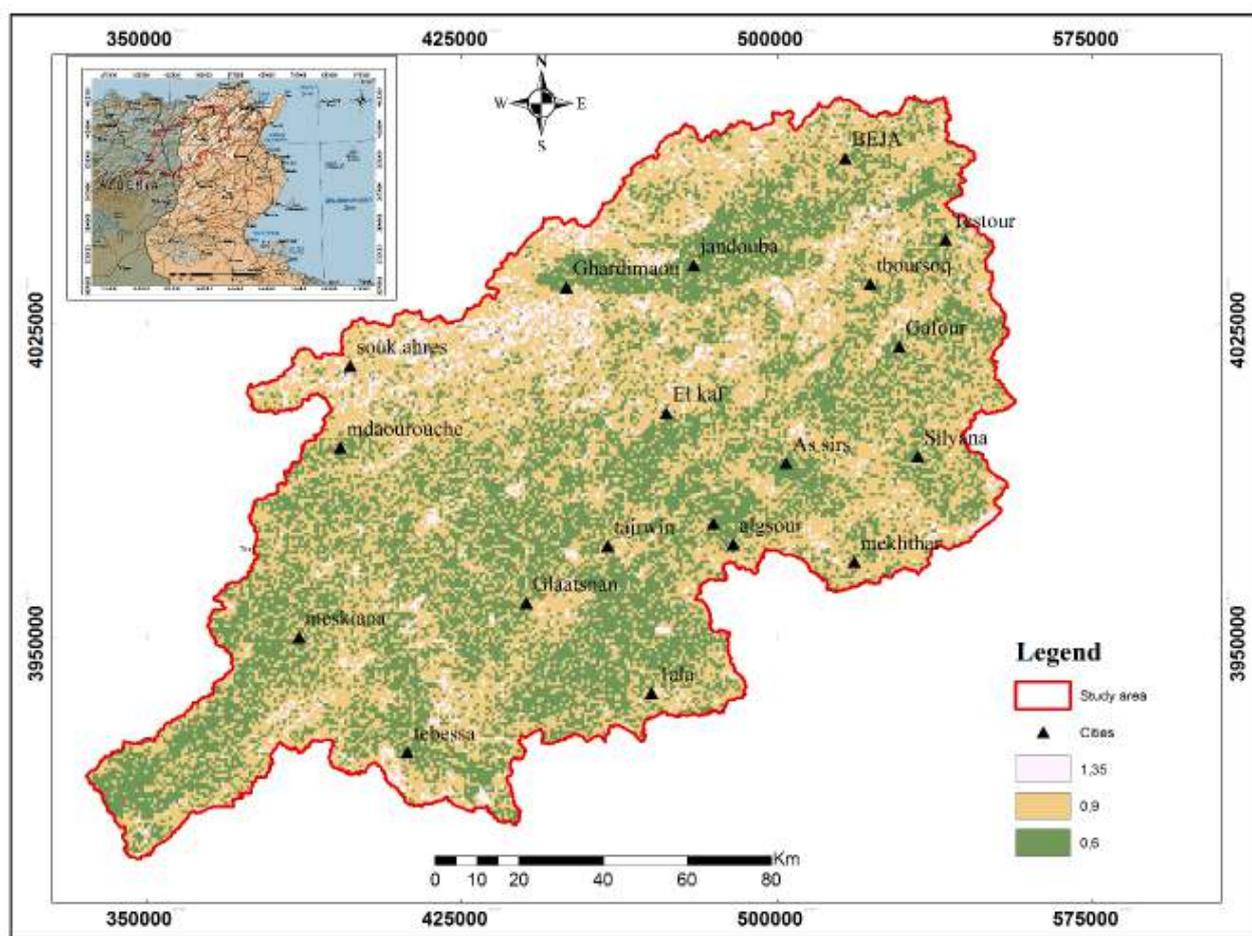


Figure 7.10 Carte du facteur topographique  $C_2$  (coefficient topographique  $C_2$ ).

Tableau 7.8 Valeur du coefficient  $C_2$  (Chérif et al. 1995)

Classe de pente	$C_2$	% Surface
0 – 8 %	1.35	6,99
8 – 30 %	0.9	53,22
> 30 %	0.6	39,79

#### 4.4 Facteur d'occupation de sol (coefficient $C_3$ )

$C_2$  est le coefficient d'exploitation des sols, il varie entre 0,4 et 1 selon l'occupation des sols, déterminé à partir de la carte d'occupation du sol. Nous avons toujours utilisé les valeurs proposées par Chérif et al. (1995) selon l'occupation du sol. La carte de répartition du facteur  $C_3$  (figure 7.11) montre la sensibilité des différents types d'occupation du sol vis-à-vis des processus érosifs. La répartition spatiale du coefficient topographique  $C_2$  est présentée par le tableau 7.9.

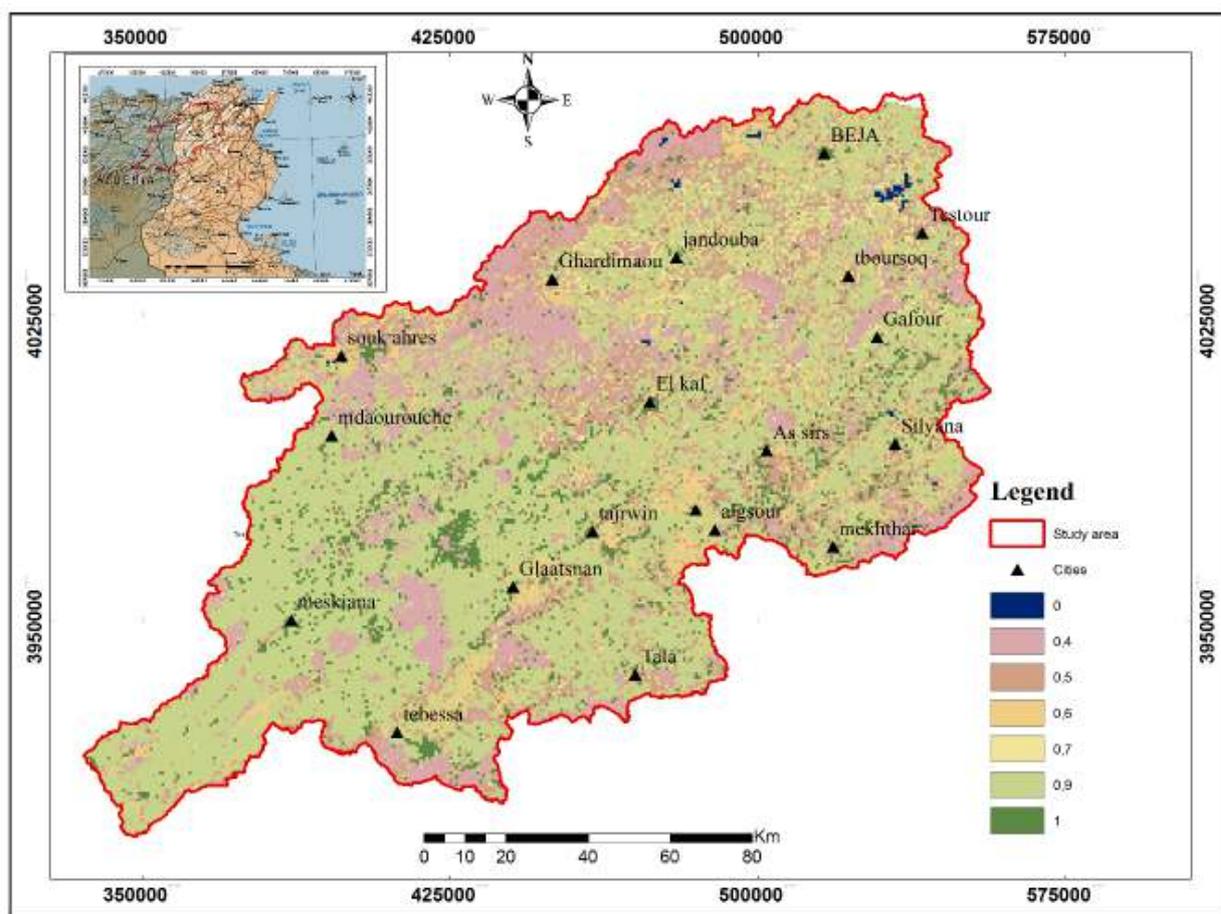


Figure 7.11 Carte du facteur d'occupation  $C_3$  (coefficient d'exploitation des sols  $C_3$ ).

Tableau 7.9 Valeur du coefficient  $C_3$  (Chérif et al. 1995)

Occupation du sol	$C_3$	% Surface
Culture céréalière	0,9	51,59
Arboriculture	0,7	2,37
Parcours	0,6	8,37
Culture irriguée	0,5	16,34
Forêts	0,4	14,52
Sol nu	1	6,28



Tableau 7.10 Superficie des classes des pertes de sol

Erosion hydrique (T/ha/an)	A (Km <sup>2</sup> )	A %
<7,41	631,5174	3,08
7,41 - 15	5550,516	27,07
15 - 30	9519,5664	46,42
30 - 60	4438,2411	21,64
>60	366,4116	1,79

### 5. Validation des résultats et comparaison

On s'intéresse maintenant à la validation des résultats obtenue par l'application des modèles (USLE, FAO), on les comparant à des mesures bathymétriques effectuées au niveau des barrages de la zone d'étude.

L'érosion totale des bassins versant est composée de deux formes : l'érosion en nappe estimée par les modèles empiriques, et l'érosion par ravinement estimée à partir de l'érosion en nappe sur la base de la nature du sol du bassin versant. (Hadjji 2016).

L'étude comparative a été effectuée sur les 8 sous bassins versant des 8 barrages situées sur la zone d'étude qui sont Sidi Salem, Bouherthma, Lakhmess, Beni Methir, Kasseb, Mellegue, Siliana et Oldjet el Mellgue.

#### 5.1 Validation des résultats du modèle USLE

Le tableau 7.11 et la figure 7.13 représentent l'érosion calculée par le modèle USLE et déterminée par des mesures bathymétriques.

Les résultats présentés ci-dessus sont des valeurs moyennes interannuelles. Les facteurs LS, K, C et P sont des facteurs considérés constants pendant la période d'étude. Pour le facteur d'érosivité des pluies (R) nous avons utilisé une valeur moyenne interannuelle pour chaque station.

Tableau 7.11 Erosion estimée par le modèle USLE et l'érosion observée (Mm3/an).

Sous bassins/barrages	Erosion observée (Mm3/an)	USLE (Mm3/an)
Mellègue	3,84	4,88
Kasseb	0,36	0,05
Beni metir	0,03	0,01
lakhemass	0,03	0,05
Bou Heurtma	0,19	0,13
Sidi Salem	8,31	3,98
Siliana	2,28	0,69
Oldjet el mellegue	2,5	2,18

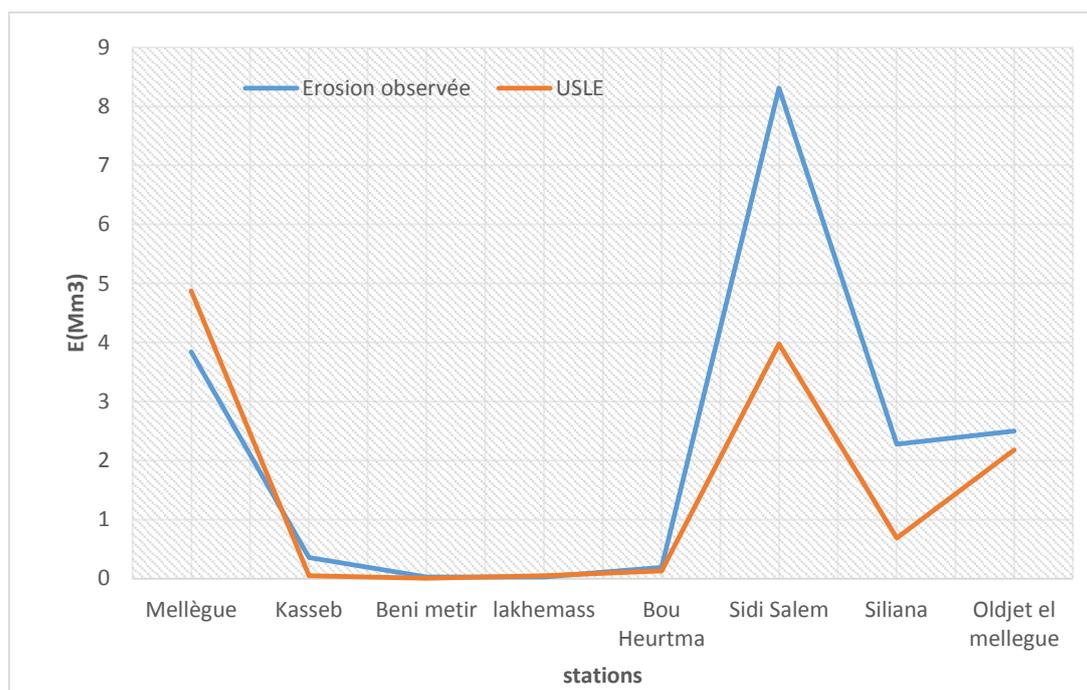


Figure 7.13 Variation moyenne interannuelle de l'érosion (USLE) calculée et celle observée.

En comparant les deux courbes de la figure 7.13, nous avons constaté que :

- Les courbes qui représentent l'érosion mesurée par bathymétrie et l'érosion estimée par USLE ont les mêmes allures.
- Les Barrages de Sidi Salam, Siliana, Mellgue et Oldjet Mellegue sont les plus vulnérables.
- Les mesures bathymétriques sont supérieures à celle estimées par le modèle USLE.
- le modèle USLE donne des résultats assez satisfaisants.

## 5.2 Validation des résultats du modèle de la FAO

Pour validé les résultats de la simulation par le modèle de la FAO, nous avons les comparé à des valeurs d'érosion observées au niveau des barrages. Le tableau 7.12 et la figure 7.14 représentent l'érosion calculée par le modèle de la FAO et celle déterminée à partir de l'envasement mesuré.

Tableau 7.12 Erosion estimée par le modèle FAO et l'érosion observée (Mm3/an).

Sous bassins/barrages	Erosion observée (Mm3/an)	E(FAO) (Mm3/an)
<b>Mellègue</b>	3,84	11,79
<b>Kasseb</b>	0,36	0,29
<b>Beni metir</b>	0,03	0,22
<b>lakhemass</b>	0,03	0,29
<b>Bou Heurtma</b>	0,19	0,85
<b>Sidi Salem</b>	8,31	15,40
<b>Siliana</b>	2,28	2,35
<b>Oldjet el mellegue</b>	2,5	4,02

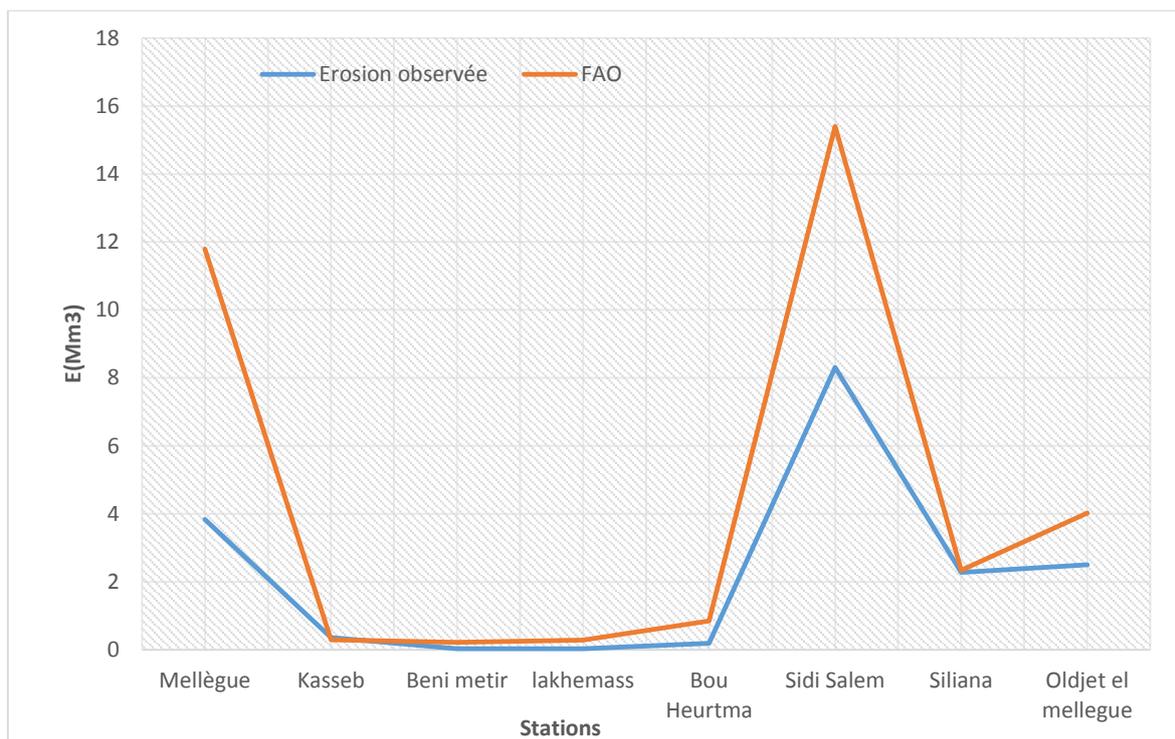


Figure 7.14 Variation moyenne interannuelle de l'érosion (FAO) calculée et celle observée.

On comparant les deux courbes de la figure 7.14, nous avons constaté que :

- Toutes les courbes ont les mêmes allures.
- Le modèle de la FAO surestime le taux érosif.
- Toujours les Barrages de Sidi Salam, Siliana, Mellgue et Oldjet Mellegue sont les plus vulnérables.

## 6. Etude comparative

Dans cette partie nous avons, comparé les résultats obtenus par les différents modèles USLE, RUSLE et FAO aux taux d'érosion obtenu à partir des mesures bathymétriques.

Le tableau 13 et la figure 15 représentent l'érosion calculée par les modèles empiriques (USLE, RUSLE, et la FAO) et celle déterminée à partir de l'envasement mesuré.

L'analyse de la figure 15 montre que les courbes d'érosion déterminées par les modèles utilisés possèdent la même allure que celle effectuée lors des mesures bathymétriques. Les modèles RUSLE (B) et USLE donnent une meilleure estimation de l'érosion que celui de la FAO.

Tableau 7.13 Comparaison des taux d'érosion calculée par rapport à celle mesurée (Mm3/an).

Sous bassins/barrages	Erosion observée (Mm3/an)	E RUSLE(B) (Mm3/an)	E RUSLE(A) (Mm3/an)	E (USLE) (Mm3/an)	E (FAO) (Mm3/an)
Mellègue	3,84	7,924	0,879	4,88	11,79
Kasseb	0,36	0,165	0,017	0,05	0,29
Beni metir	0,03	0,024	0,003	0,01	0,22
Lakhemass	0,03	0,102	0,012	0,05	0,29
Bou Heurtma	0,19	0,273	0,029	0,13	0,85
Sidi Salem	8,31	6,763	0,790	3,98	15,40
Siliana	2,28	1,384	0,159	0,69	2,35
Oldjet el mellegue	2,5	4,313	0,467	2,18	4,02

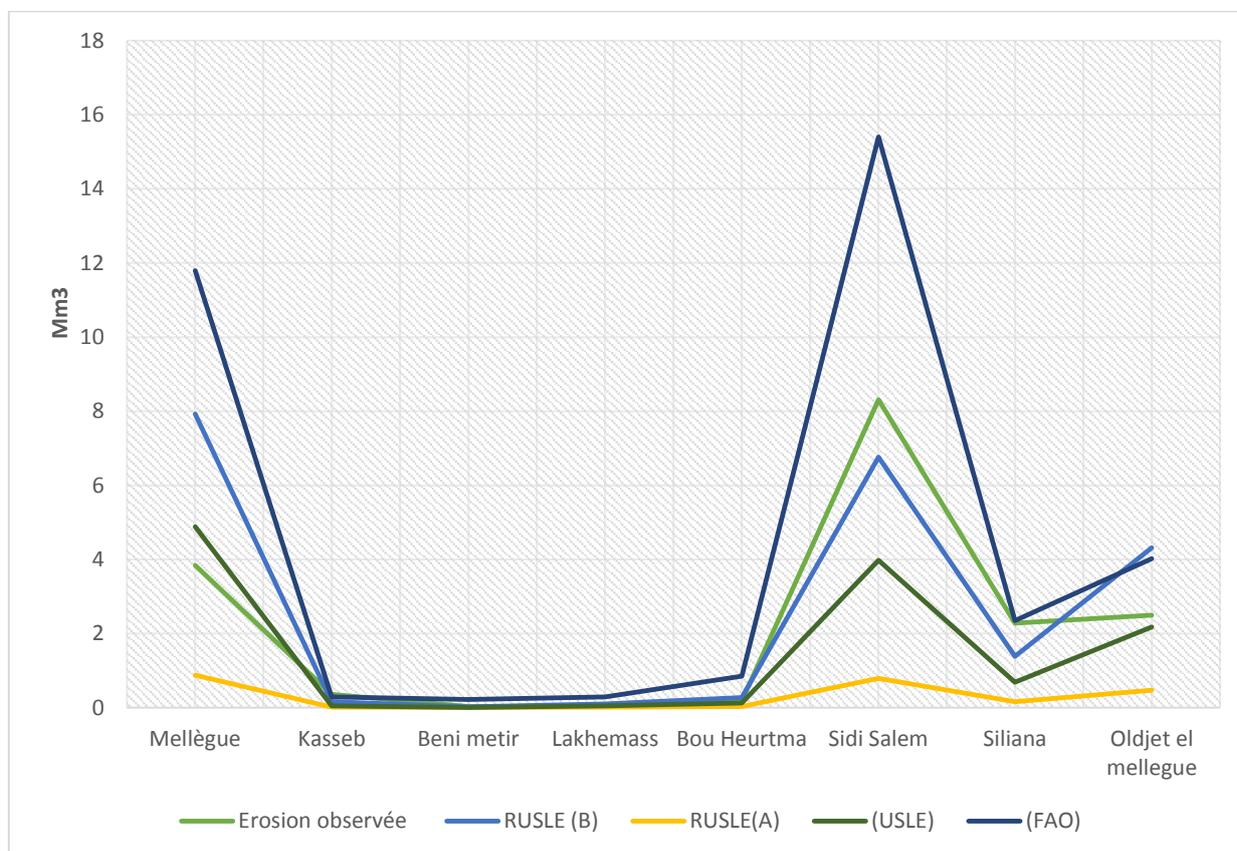


Figure 7.15 Variation de l'érosion calculée par les 3 modèles et de l'érosion mesurée (Mm3).

Pour mieux comparer les érosions obtenues par les différentes équations, nous avons calculé l'écart quadratique ( $\sigma$ ), qui est l'écart entre les valeurs calculées et mesurées ou observées de l'érosion, pour chaque modèle :

$$\sigma = \frac{\sum(E_i - E_{mes})^2}{8} \dots\dots\dots (7.5)$$

Les résultats de calcul de l'écart quadratique sont affichés dans le tableau 7.14

Tableau 7.14 Variation de l'écart quadratique.

<b>Erosion</b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>RUSLE (B)</b>	2,90
<b>RUSLE (A)</b>	9,26
<b>USLE (B)</b>	2,82
<b>FAO</b>	14,54

D'après les résultats du tableau 7.14, nous avons constaté que :

- Les modèles USLE et RUSLE donnent une bonne estimation de l'érosion pour le bassin versant de Medjerda.
- Le modèle RUSLE (B) donne une bonne estimation de l'érosion pour les sous bassins versant de Medjerda.
- Le modèle de la FAO surestime l'érosion dans les sous bassins de la Medjerda.
- Le modèle RUSLE (A) sous-estime l'érosion dans les sous bassins de la Medjerda.

# **Chapitre 8**

## **Etude statistique des scénarios d'érosion en utilisant RUSLE et SIG**

## Chapitre 8 : Etude statistique des Scénarios d'érosion en utilisant RUSLE et SIG

### Objectif

La quantification des taux de sédiments est indispensable pour élaborer un plan d'aménagement afin de protéger les sols et les infrastructures hydrauliques contre l'érosion. On s'intéresse dans ce chapitre à estimer le taux d'érosion des sols des sous bassins de la Medjerda et le Mellègue, au nord-est de l'Algérie, en utilisant le modèle SDR, (Taux de livraison des sédiments), le plus adéquate et de mettre en évidence à la fois l'intensité croissante des processus érosifs, conséquence des incendies de forêt, et l'efficacité de certaines techniques antiérosives en comparant les scénarios, (incendie et projet) obtenus par des mesures et actions préventives.

### 1. Introduction

La quantité de sédiments arrivant au cours d'eau (sediment Yield) est à différencier de la quantité de sédiments au niveau de la parcelle (Formulation Wischmeier classique). Entre les versants et les cours d'eau, des creusements se développent, des dépositions se produisent, conduisant à une accentuation des taux d'érosion si l'érosion linéaire est active, ou bien à des dépôts solides le long des cours d'eau. (Hajji 2016).

Les incendies d'origine naturelle et humaine ont un effet négatif sur le sol et les ressources en eau, l'un de ces résultats négatifs, largement reconnu par les scientifiques, est l'érosion hydrique (Terranova et al. 2009). L'ampleur de l'érosion hydrique peut être augmentée par la gravité des incendies de forêt. Lorsqu'un grave incendie de forêt se produit, une grande quantité de cendres est créée, composée de particules très fines, des températures élevées endommagent la structure du sol. La destruction du sol consiste en : (i) la perte de fusion de matière organique, de sable, de limon et de particules d'argile sous forme d'agrégats ; (ii) une augmentation de la densité apparente du sol (DeByle 1981), et une réduction de la porosité du sol en raison de l'impact de la quantité de cendres créées et des gouttes de pluie tombées sur le sol nu, (Wells et al. 1979 ; Ralston et Hatcher 1971). La réduction de la porosité du sol réduit l'infiltration et favorise le ruissellement et augmente donc le risque d'érosion (DeBano et al. 1998 ; Neary et al. 2005). Le bassin versant de la Medjerda est le plus touché par les risques d'incendie. Les gouvernorats de Jendouba, Siliana, Le Kef et Béja sont les plus vulnérables. Dans le gouvernorat de Jendouba, dont la superficie couverte couvre 227 000 ha (dont 120 000 ha de forêts et 107 000 ha de pâturages), 1 700 incendies ont été enregistrés entre 1986 et 2012.

Le présent chapitre est subdivisé en deux parties. Dans la première partie, nous proposons de comparer des scénarios d'érosion en intégrant le modèle RUSLE dans une plateforme SIG, pour mettre en évidence à la fois : (1) l'intensité croissante des processus érosifs en raison des feux de forêt. (2) L'efficacité de certaines techniques antiérosives. Dans la deuxième partie, nous proposons de déterminer le coefficient SDR le plus adéquate en intégrant le modèle RUSLE

dans une plateforme SIG et en utilisant plusieurs modèles empiriques, pour déterminer la quantité de sédiments arrivant aux exutoires des bassins versants (Sediment Yield).

## **2. Effet de couvert végétal sur l'érosion**

La végétation peut intervenir contre l'érosion hydrique de surface de deux manières principales : d'une part, elle peut empêcher l'ablation du substrat, d'autre part, elle peut favoriser la sédimentation, en retenant les sédiments érodés plus à l'amont. L'effet de la couverture végétale sur l'érosion peut être expliqué par l'essentiel point suivant :

### **2.1 Réduction de l'énergie d'érosivité de pluie**

La couverture végétale joue un rôle d'interception des gouttes de pluie en fonction de la densité de couvert, lorsque la densité augmente l'interception augmente aussi, elle permet de réduire l'énergie d'érosion et l'effet de « Splash », surtout grâce aux litières et buissons. (Geddes, 1999). En forêt, les précipitations inférieures à 2 mm en 24 h sont presque entièrement interceptées ; au-delà, l'interception diminue lorsque l'intensité de la pluie augmente. (Giordano)

### **2.2 Réduction de l'énergie du ruissellement**

La couverture végétale favorise l'infiltration de l'eau, et améliore les propriétés physiques et chimiques de sol, elle permet donc de lutter contre le ruissellement et de minimiser le transport des sédiments, elle forme des barrières, brise les cheminements des filets d'eau.

### **2.3 Maintien des sols**

La végétation permet de maintenir les sols grâce aux systèmes racinaires. Les végétaux permettent, en effet, d'améliorer la cohésion des sols et donc de renforcer leurs propriétés mécaniques. La végétation peut exercer un effet favorable sur la sédimentation des particules, grâce à des processus de piégeage et de rétention d'une partie des sédiments érodés à l'intérieur d'un bassin versant. Lee et al. (1999) ont montré qu'il existe un effet de filtration des écoulements à travers de la végétation. Ces écoulements déposent les sédiments par suite de la réduction de leur énergie de transport. Bien que Beuselinck et al. aient montré que la végétation est davantage susceptible de piéger les sédiments fins, d'autres études ont montré que les sédiments grossiers pouvaient également être piégés par des obstacles végétaux.

L'effet de la couverture végétale sur l'érosion hydrique de surface a pu être mis en évidence par comparaison entre des terrains diversement végétalisés. Il est souvent admis que, sur un versant partiellement végétalisé, les zones dénudées peuvent être soumises à l'érosion, alors que les zones végétalisées sont protégées. Des études menées à l'échelle du bassin versant ont montré qu'en général l'érosion diminue quand la couverture végétale augmente.

Nous avons étudié l'évolution de l'érosion hydrique et le taux d'envasement des barrages de la zone d'étude en fonction de la répartition de la végétation. Le taux de la couverture végétale a été déterminé pour chaque sous bassin versant en utilisant les résultats de la classification effectuée précédemment. La délimitation des sous bassins versants a été effectuée par le module HEC GEO HMS sur la base du MNT de la zone d'étude. Elle montre 30 sous bassins versants avec des superficies différentes, et huit sous bassins versants des 8 barrages utilisés dans l'étude.

Le tableau 1 représente les résultats de l'estimation de l'érosion hydrique et la valeur moyenne de chaque facteur du RUSLE dans chaque sous bassin délimité.

La variation de l'érosion hydrique et l'occupation du sol est illustré sur la figure 2. Le taux d'érosion moyen annuel dans les sous bassins varie entre 7,89 et 54,84 t/ha/an, et le couvert végétal occupe 3,35 à 69,53% de la surface totale.

Tableau 8.1 Les résultats de l'application du modèle RUSLE sur les sous bassins délimités

Sous bassins	Superficie (km2)	Es (estimée)	LS	R	K	C	%Occupé par végétation	Es (Multi)	Erreur %
1	835,08	19,14	2,38	857,39	0,03	0,34	68,32	20,91	9,257
2	1979,51	23,05	1,77	690,23	0,04	0,53	26,17	24,68	7,042
3	541,53	7,89	2,56	481,88	0,01	0,47	43,28	8,48	7,450
4	831,55	21,97	1,61	597,94	0,04	0,58	20,19	22,48	2,322
5	1331,09	15,93	1,30	528,22	0,04	0,57	20,36	16,01	0,520
6	897,14	10,39	1,50	405,17	0,03	0,56	23,83	11,08	6,708
7	496,50	15,83	1,35	430,41	0,04	0,66	3,35	15,28	3,461
8	800,30	19,89	1,96	439,16	0,04	0,54	29,64	19,28	3,037
9	700,79	17,80	2,90	503,22	0,03	0,44	51,74	18,82	5,728
10	516,61	16,86	1,51	642,48	0,04	0,53	25,43	18,28	8,443
11	2571,71	12,94	1,48	407,67	0,03	0,60	15,04	12,39	4,244
12	407,75	17,47	1,67	570,14	0,04	0,56	20,46	17,66	1,040
13	677,41	16,20	2,87	609,33	0,04	0,31	69,53	18,60	14,828
14	324,87	18,84	2,81	566,18	0,04	0,38	58,26	20,39	8,234
15	257,79	18,82	1,77	399,36	0,04	0,64	7,05	19,03	1,156
16	725,86	10,17	1,71	392,42	0,03	0,60	14,41	10,67	4,933
17	78,20	35,00	1,44	391,52	0,04	0,64	3,68	16,10	54,000
18	288,97	11,71	1,38	419,41	0,04	0,59	18,72	11,98	2,249
19	725,91	14,87	1,45	470,04	0,04	0,62	14,51	16,60	11,649
20	263,43	13,31	1,36	444,79	0,04	0,64	10,25	13,41	0,789
21	490,05	15,54	1,73	442,19	0,04	0,57	22,11	15,00	3,475
22	264,31	9,79	1,25	484,49	0,03	0,58	15,69	9,99	2,003
23	561,17	13,41	1,59	509,84	0,04	0,55	27,66	14,74	9,927
24	921,30	21,07	2,25	522,99	0,04	0,46	40,95	20,04	4,886
25	1216,32	18,86	1,96	601,73	0,04	0,46	38,01	20,97	11,189
26	71,24	54,84	1,52	720,21	0,04	0,46	32,57	20,80	62,073
27	635,56	19,53	1,85	772,58	0,03	0,48	39,23	22,10	13,204
28	465,50	26,03	2,05	721,68	0,04	0,48	29,57	24,65	5,302
29	533,55	24,23	2,03	648,84	0,04	0,47	34,28	24,53	1,264
30	216,89	22,67	2,01	629,63	0,04	0,46	40,76	24,13	6,434

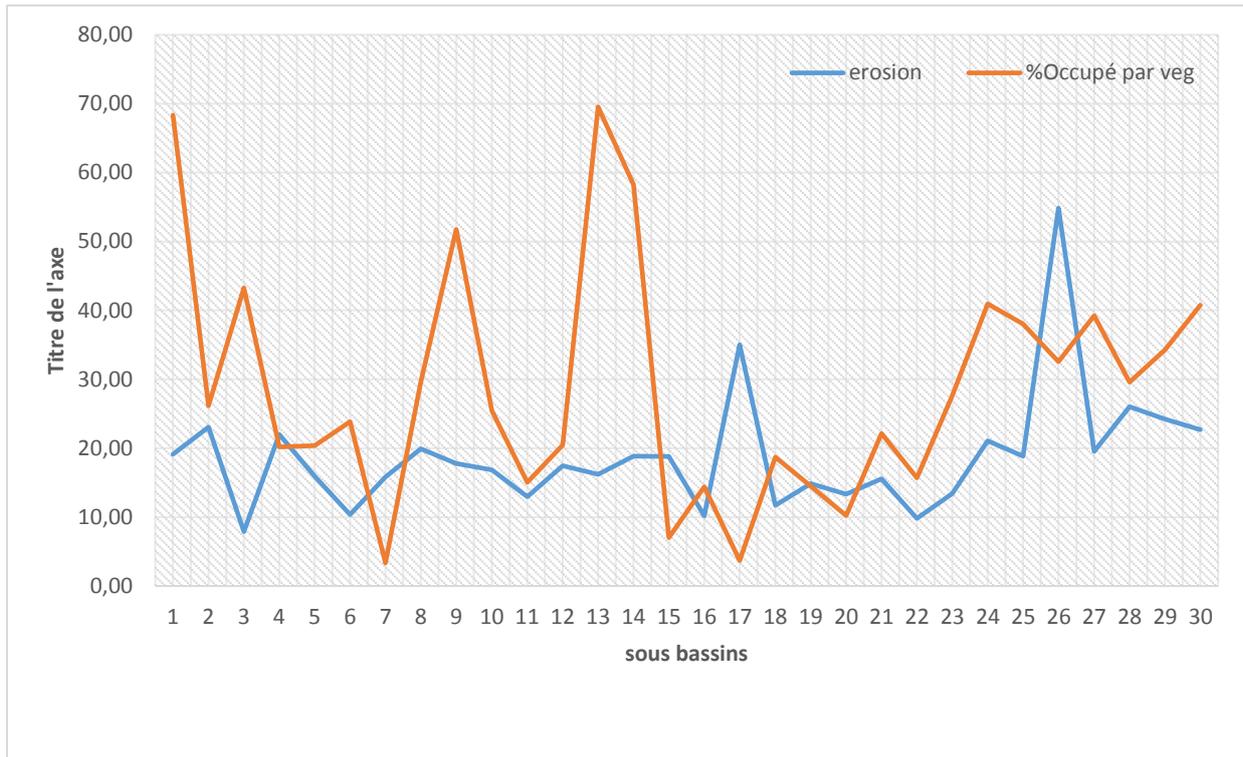


Figure 8.1 Evolution de la couverture végétale et l'érosion hydrique

On comparant les deux courbes de la figure1, nous avons constaté que :

- Les courbes qui représentent l'érosion estimée par RUSLE et l'occupation du sol ont des allures inversées.
- A l'échelle du bassin versant, l'érosion hydrique diminue quand la couverture végétale augmente.
- Le taux d'érosion max ne correspond pas au taux de végétation min, ce qui montre qu'il y a d'autres paramètres plus importants dans le processus érosif (Topographie, pédologie).

Les quantités de sédiment mesurées par bathymétrie au niveau des deux barrages de Kasseb et Beni Mtir sont présentées dans le tableau 2. L'étude du tableau 2 montre que le barrage Kasseb est le plus envasé, la quantité de sédiment qui arrive à sa cuve est plus grande 12 fois que le Beni Mtir. Leurs bassins versant ont les mêmes caractéristiques morphologiques et lithologiques. L'agressivité de la pluie est la même, par contre le bassin versant de barrage Kasseb est plus protégé en couverture végétale que le bassin de Beni Mtir (94%, 48% respectivement).

Tableau 8.2 Les quantités de sédiment mesurées au niveau des de Barrage, Kasseb et Beni Mtir

Barrage	Date de mise en service	occupation de sol	R	C	P	K	LS	Sédiment Mesurée Mm3/an	Taux d'érosion estimé par RUSLE (T/ha/an)	Envasement de barrage %
Kasseb	1968	48%	951,62	0,41	0,83	0,031	3,1	0,36	21,11	6,08
Beni Metir	1954	90%	977,1	0,057	0,9	0,025	2,63	0,03	2,74	2,01

### 3. Analyse statistique des facteurs de production d'érosion

L'analyse statistique des différents facteurs du modèle RUSLE montre une variabilité du facteur topographique LS (avec un coefficient de variation égal à 2,57) tandis que R, P, C et K maintiennent une petite variabilité spatiale (un coefficient de variation ne dépasse pas le 0,35) (Voir tableau 8.3).

Tableau 8.3 Les paramètres statistiques des différents facteurs du modèle RUSLE de la zone d'étude

	R	K	C	LS	P	E
Min	370	0,016	0,001	0	0,12	0
Max	1076	0,049	1	90	1	100
Signifier	543,62	0,041	0,52	1,16	0,87	13,2 8
St	129,99	0,006	0,16	2,98	0,30	28,26
CV	0,24	0,14	0,31	2,57	0,34	2,12

Le tableau 8.4 présente les résultats de l'étude de corrélation entre les paramètres qui déclenchent le processus d'érosion et la carte des risques d'érosion de la zone d'étude.

Tableau 8.4 Résultats de l'étude de corrélation entre les paramètres qui déclenchent le processus d'érosion et la carte des risques d'érosion de la zone d'étude.

Couche	E	R	LS	C	K	P	NDVI
E	1						
R	0,01	1					
LS	0,75	0,05	1				
C	0,07	-0,35	-0,14	1			
K	0,1	-0,42	-0,007	0,2	1		
P	0,2	-0,22	0,01	-0,02	0,18	1	
NDVI	-0,02	-0,29	0,13	-0,72	-0,21	0,01	1

L'analyse du tableau 4 montre une corrélation positive significative de la perte de sol avec le facteur topographique (LS) ( $R^2 = 0,75$ ), et une corrélation relativement faible avec l'érodibilité du sol (K) ( $R^2 = 0,1$ ). Alors que l'érosivité des précipitations (R) et le facteur de couverture (C) sont indépendants de la perte de sol.

L'indépendance du facteur d'érosivité pluviométrique peut être s'expliquer par la vaste étendue du bassin versant et la longue distance entre les stations pluviométriques utilisés. D'après les tableaux 3 et 4, nous avons constaté que le facteur topographique (LS) a le plus grand rôle dans le déclenchement de l'érosion hydrique et que la variabilité de la perte annuelle de sol entre les bassins est principalement due à ce facteur (facteur LS). Ceci est similaire aux résultats de Markos et Jayappa (2016) ; Toubal et al.(2018) ; Baiamonte et al. (2019) dans les zones semi-arides.

#### 4. Utilisation du RUSLE pour l'étude des scénarios

Les scénarios de risque d'érosion des sols proposés dans cette étude correspondent aux situations suivantes :

1. Le scénario d'érosion sans aménagement anti érosif.
2. Scénario d'incendie, où les zones actuellement couvertes par les forêts sont supposées être affectées par le feu, en influençant les valeurs des facteurs K et C (Curran et al.2006 ; Larsen et Mac Donald, 2007 ; Terenovas et al. 2015). L'étude a été menée selon deux propositions : dans la première, nous avons supposé une forte réduction du couvert végétal causée par des incendies de forêt agressifs s'étendant sur 346 730 ha. Dans la deuxième proposition, nous avons supposé une petite réduction de la végétation causé par un feu faible.

Le scénario d'érosion actuel a été considéré comme une référence pour la comparaison avec le scénario d'incendie.

3. Le scénario «Projet», où les variations concernant l'agriculture et les facteurs de pratiques antiérosifs. Cette partie concerne l'adoption de mesures et d'actes de réduction de l'érosion hydrique par : (i) L'installation des banquettes sur les versants où la pente est inférieure à 25%. (ii) Utilisation des méthodes de culture anti érosion minimales (labour dans le sens des courbes de niveau). (iii) Augmentation des superficies de couverture végétale par l'amélioration de la densité des forêts et l'extension des parcours.

L'érosion estimée sans aménagement antiérosif a été considérée comme une référence pour la comparaison avec le scénario du projet

##### 4.1 L'érosion actuelle

L'érosion actuelle à Medjerda a été estimée en utilisant le modèle RUSLE avec une érosivité moyenne calculée par la formule de Blaid (2015). Les pertes potentielles d'érosion du sol varient entre 0 et 100 t/h/an et la perte moyenne est estimée à 13,28 t/ha/an. La distribution spatiale montre que 62,12% de la superficie à une érosion hydrique inférieure à 15 t/ha/an, et 13,64% à une perte de sol comprise entre 15 et 30 t/ha/an. Les terres avec des pertes supérieures à 60 t/ha/an ne représentent que 2,11% de la superficie. (Plus de détaille voir Chapitre 6)

##### 4.2 Scénario d'érosion sans aménagements antiérosifs

Le scénario d'érosion sans aménagement a été estimé en utilisant les facteurs d'érosivité, topographique et pédologique utilisée pour l'évaluation de l'érosion actuelle. Le facteur aménagement antiérosif (P) a été considéré égal à 1.

La perte minimale en sols est de l'ordre de 0 t/ha/an et la perte maximale est d'environ 100 t/ha/an. La perte moyenne de sols pour l'ensemble du bassin versant est de l'ordre de 1,54 t/ha/an.

La répartition de la surface sur les classes de perte des sols adoptés est présentée dans le Tableau 5. Il montre que 25,6% de la zone à une érosion hydrique inférieur à 7,41 t/ha/an. Tandis qu'environ 28,95 % du bassin ont une perte de sol moyenne de 7,41 à 15 t/ha/an et 26,38% ont

une perte de 15 à 30 t/ha/an. Alors que 19,08 % du bassin ont une forte perte de sol (supérieur à 30 t/ha/an).

Tableau 8.5 Superficie des classes des pertes de sol (cas sans aménagement)

Erosion hydrique (T/ha/an)		% Surface
<b>Risque d'érosion tolérable</b>	<b>0 -7,41</b>	25,60
<b>Risque d'érosion faible</b>	<b>7,41 - 15</b>	28,95
<b>Risque d'érosion moyen</b>	<b>15 - 30</b>	26,38
<b>Risque d'érosion fort</b>	<b>30 - 60</b>	16,48
<b>Risque d'érosion très fort</b>	<b>&gt; 60</b>	2,60

### 4.3 Scénario d'érosion avec incendie (scénario d'incendie)

Les incendies d'origine naturelle ou humaine sont caractérisés par des effets négatifs sur les sols et les ressources en eau, L'un de ces effets est l'érosion hydrique. Des couches de cendres épaisses, la formation de croûtes et de boue, ainsi que le colmatage superficiel des pores, se produisent à la suite d'un incendie, augmentant le ruissellement et l'érosion. (Terranova et al.2009). Les incendies de forêt réduisent le couvert végétal, et la capacité d'absorption de l'eau par le sol, ce qui provoque un ruissellement plus important qui peut déclencher des glissements de terrain à grande échelle, en particulier sur les pentes très raides.

D'après Terranova et al. (2009), Les incendies de forêt n'affectent pas le facteur d'érosivité des précipitations, alors les valeurs de R restent inchangées (Terranova et al.2009). Le facteur topographiques LS et considérer aussi inchangeable.

Pour le facteur érodibilité de sol, (facteur K), Miller et al. (2003) ont proposé d'augmenter les valeurs dans les zones forestières italiennes brûlées de  $0,016 \text{ Mg hMJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  au cours de la première année après le brûlage. Étant donné que les valeurs initiales de K dans ces zones variaient de  $0,008$  à  $0,025 \text{ Mg hMJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , cela a augmenté les valeurs de K par 1,6 à 3,0 fois pendant la première année après le brûlage.

Pour étudier l'effet de l'incendie sur le bassin de la Calabre (sud de l'Italie), Terranova et al. 2009 ont multiplié le facteur K par 2, 1,8 ou 1.6 en fonction de la gravité de la simulation d'incendie (niveau «élevé», «moyen» ou «faible gravité» respectivement.

Un incendie de forte intensité devrait augmenter le facteur C à cause de la perte de couvert végétal, et de la matière organique de la surface peu profonde, ainsi que d'une réduction de la rugosité de la surface (Terranova et al.2009). Une hypothèse habituelle est de supposer une valeur du facteur C de  $\sim 1,0$  dans les zones récemment touchées par de graves incendies (Larsen et MacDonald, 2007).

Notre objectif dans cette partie est d'étudier l'effet de l'incendie de forêts sur l'érosion hydrique, en comparant les estimations effectuées en fonction de la gravité de la simulation. La cartographie de la végétation dense et moyennement dense (forêts) a été effectuée grâce à une classification supervisée établi suite à un traitement des images satellitaires captées en juin et juillet 2017.

L'étude a été effectuée selon deux propositions, dans la première nous avons supposé une forte réduction de la couverture végétale causée par des feux de forêt agressifs diffuse sur une extension totale de 346 730 ha, et dans le deuxième nous avons supposé une faible réduction de la végétation causée par un faible incendie.

La variation des résultats trouvés par rapport à la moyenne de l'érosion actuelle est calculée par la formule suivante :

$$PV = \frac{(E_{sc(i)} - E_{sc(cu)})}{E_{sc(cu)}} \times 100 \dots\dots\dots (8.1)$$

With:  $E_{sc(i)}$  : érosion de  $i_{scenarior}$  ;  $E_{sc(cu)}$  : érosion actuelle

Les modifications effectuées sur les facteurs du modèle RUSLE sont comme suit :

**Facteur R** : Les incendies de forêt n'affectent pas le facteur d'érosivité des précipitations, de sorte que les valeurs R restent inchangées pour le scénario d'incendie. Ces notes ont été utilisées pour l'étude de scénarios d'érosion par (Miller et al. 2003 ; Terranova et al. 2009).

**Facteur C** : En se référant à la première année après le brûlage et aux classes de gravité pertinentes, les valeurs suivantes de C ont été supposées : C = 0,2 pour la végétation dense fortement brûlée, C = 0,05 pour les zones modérément brûlées et C = 0,01 pour les zones qui avait brûlé à faible gravité. Ces modifications ont été utilisées pour l'étude des scénarios d'érosion par ( Miller et al. 2003 ; Terranova et al. 2009).

**Facteur LS et facteur P** : Le facteur topographique (LS) et le facteur aménagement anti érosif (P) sont considéré inchangeable pour le scénario d'incendie.

**Facteur K** : Nous avons proposé de multiplier le facteur K du scénario actuel de 1,6 et 2 en fonction de la gravité de la simulation (« faible gravité» ou «gravité élevé», respectivement). Ces valeurs ont été utilisées par Miller et al. (2003) pour étudier l'effet de l'incendie sur l'érosion dans le bassin de Cerro Grande, et par Terranova et al. (2009) dans le bassin le bassin de Calabre (sud de l'Italie).

#### 4.3.1 Résultats des modifications des facteurs du modèle RUSLE (Cas d'incendie)

##### Facteur C

Dans le cas d'un incendie faible, les mêmes valeurs que le scénario actuel ont été retrouvées. Dans le cas d'un incendie fort, la distribution spatiale du facteur C montre que 9,8% du bassin versant ont des valeurs comprises entre 0,2 et 0,4. 90,01% ont des valeurs comprises entre 0,4 et 0,7 et 3.19% ont des valeurs supérieures à 0,7. Les résultats sont présentés dans la Figure 2.

##### Facteur K

Les valeurs du facteur K varient de 0,016 (t. Ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) à 0,097 (t.ha.h. ha<sup>-1</sup>. MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>) avec une moyenne de 0,047 (t.ha.h. ha<sup>-1</sup>. MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>) en cas d'incendie fort et de 0,016 (t. ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) à 0,078 (t.ha.h. ha<sup>-1</sup>. MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>) avec une moyenne de 0,041

( $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ) en cas d'incendie faible. La distribution spatiale des valeurs de K est illustré sur la figure 3.

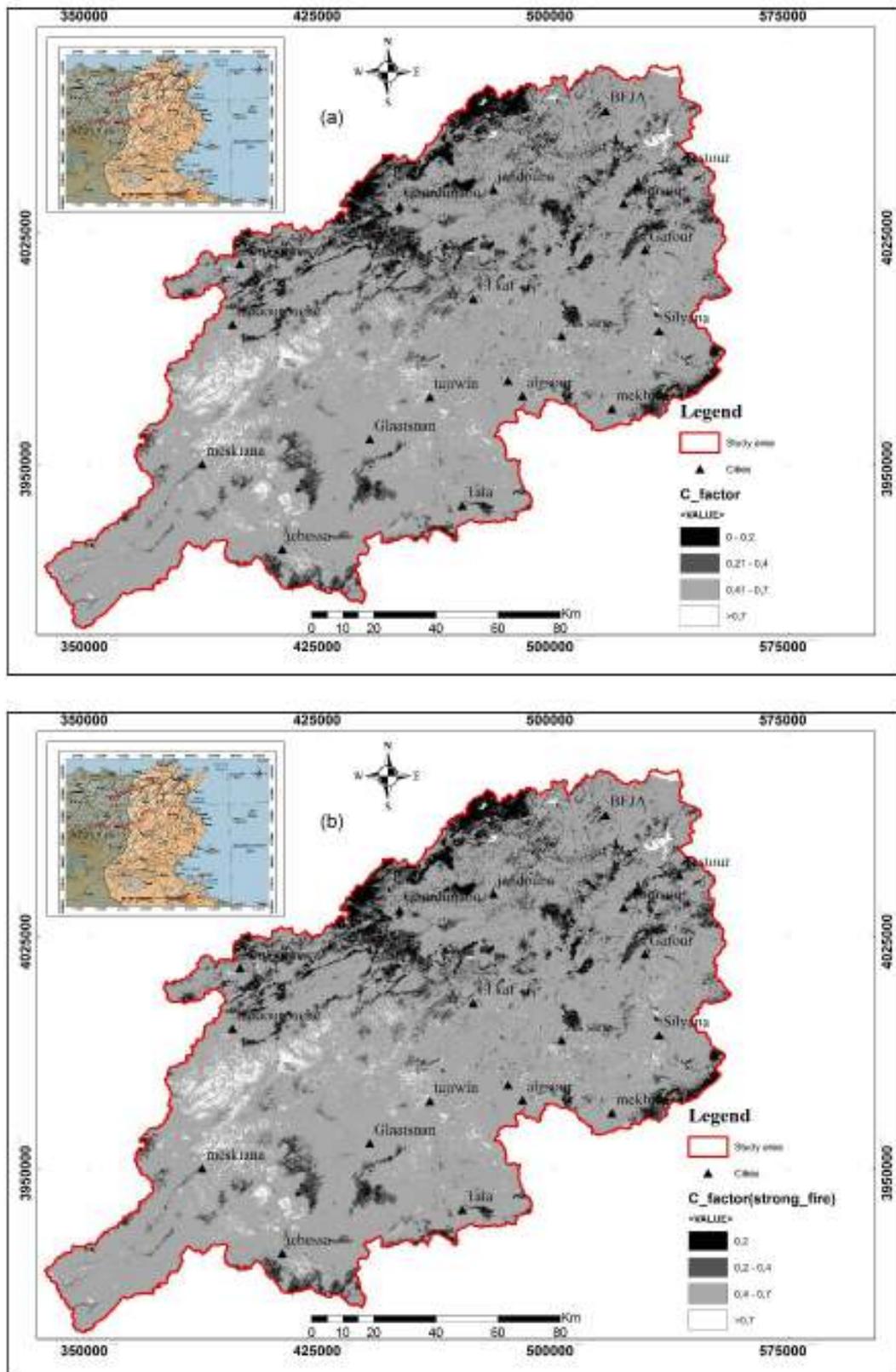


Figure 8.2 Cartes du facteur C dans le cas d'incendie. a/ incendie faible. b/ incendie fort.

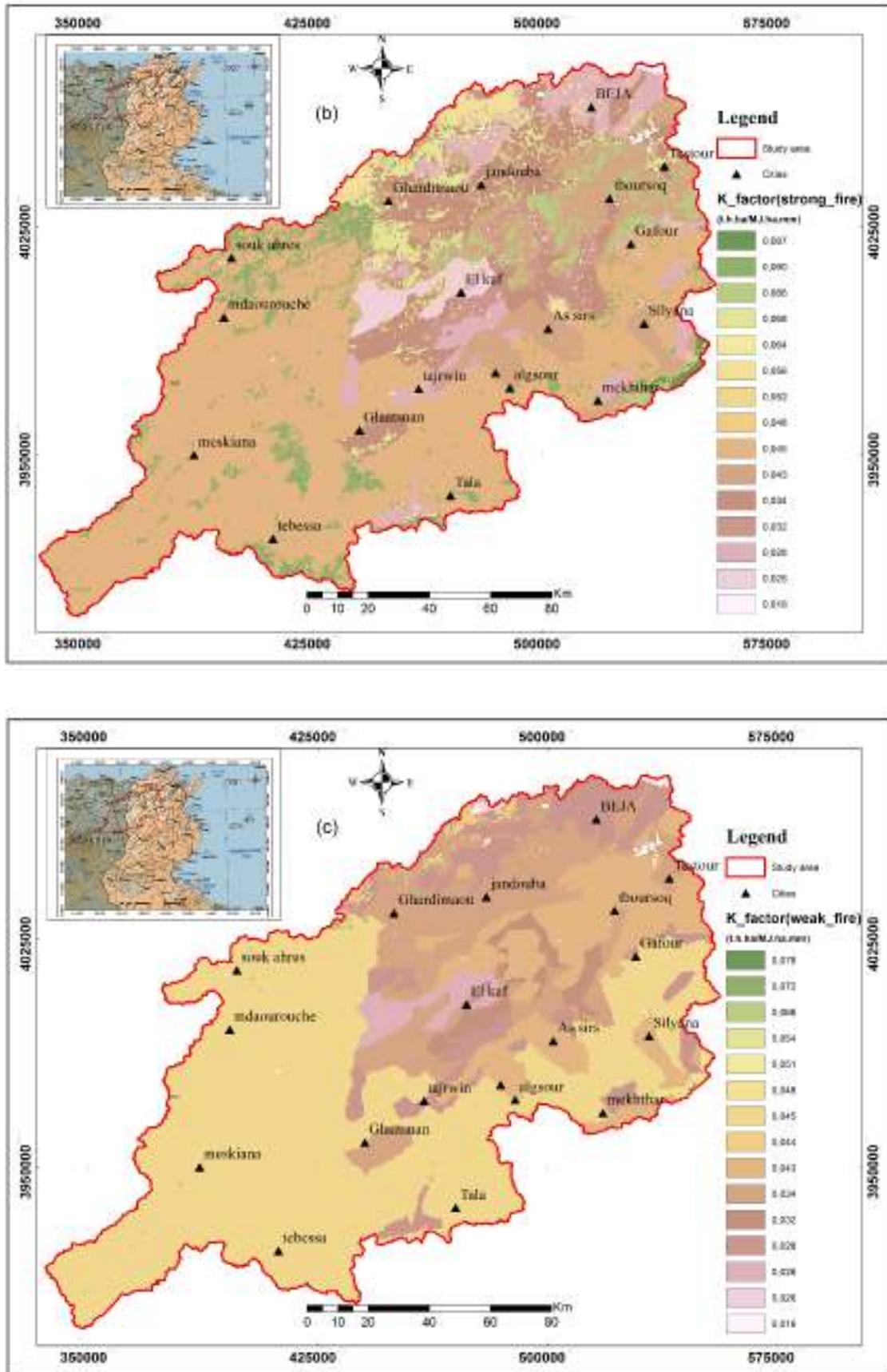


Figure 8.3 Cartes des facteurs K dans le cas d'incendie. b /incendie fort. c/ incendie faible

### 4.3.2 Pertes en sols (cas d'incendie)

Le scénario d'incendie a été défini en considérant une réduction du couvert végétal causée par les incendies de forêt. L'étude a été réalisée sous deux propositions :

Dans la première, nous avons supposé une forte réduction du couvert végétal causée par de forts incendies de forêt s'étendant sur 346 730 ha en choisissant les données historiques moyennes du facteur R, nous avons estimé un taux d'érosion moyen de l'ordre de 14,27 t/ha/an.

Dans la deuxième proposition, nous avons supposé une petite réduction de la végétation causée par un feu faible. L'érosion moyenne est estimée à 13,27 t/ha/an, et la répartition spatiale des classes est similaire à l'érosion actuelle (sans incendie).

Par rapport à l'état actuel, on observe une augmentation de l'extension de la zone affectée par «forte risque» et «Très forte risque» d'érosion. En effet, l'extension de la surface totale affectée par une forte érosion ( $E > 30$  t / ha / an) est égale à 21,72% dont 16,45% appartient à une classe «à haut risque» et ~ 5% appartient à une Classe «à très haut risque».

Les résultats de la simulation sont présentés dans la Figure 4.

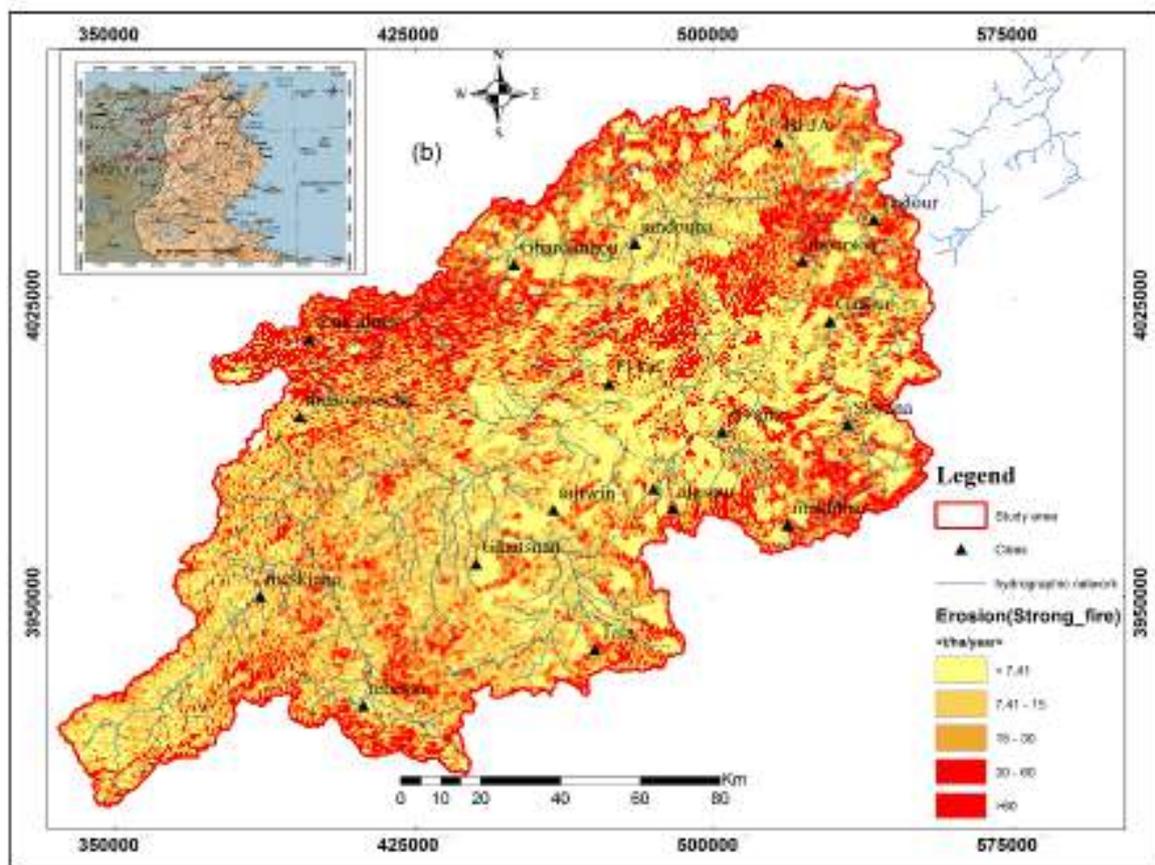


Figure 8.4 carte des pertes en sol (Cas d'un fort incendie)

Le tableau 8.6 représente les superficies des classes observées après la simulation. Il montre que le taux d'érosion moyen a augmenté de 8% par rapport à l'état actuel (sans incendie). Cette augmentation se fait au détriment de la classe d'érosion définie comme Tolérable (entre 0 et 7,41 t/ha/an), qui est passée de 36,21% de la région, (scénario actuel), à 30,85%.

Comme indiqué par Terranova et al. (2009), les plus grandes variations sont clairement concentrées dans les zones initialement couvertes par les forêts.

Tableau 8.6 Superficie des classes des pertes de sol (cas incendie)

Erosion hydrique (t/ha/an)		Erosion actuel	Faible incendie	Fort incendie
		% Surface	% Surface	% Surface
<b>Risque d'érosion tolérable</b>	<b>0 -7,41</b>	36,21	36,17	30,85
<b>Risque d'érosion faible</b>	<b>7,41 - 15</b>	25,91	25,91	24,97
<b>Risque d'érosion moyen</b>	<b>15 - 30</b>	22,13	22,15	22,46
<b>Risque d'érosion fort</b>	<b>30 - 60</b>	13,64	13,65	16,45
<b>Risque d'érosion très fort</b>	<b>&gt; 60</b>	2,11	2,11	5,27

La figure 8.5 illustre la distribution de la variation de l'érosion dans le cas d'un fort incendie par rapport à l'érosion moyenne actuelle en%. Elle montre que 10% de la région présentent des variations entre une et cinq fois le taux moyen du scénario actuel ( $100\% < PV < 500\%$ ). Tandis qu'environ 77,8% du territoire présentent des variations entre 0 et 5%.

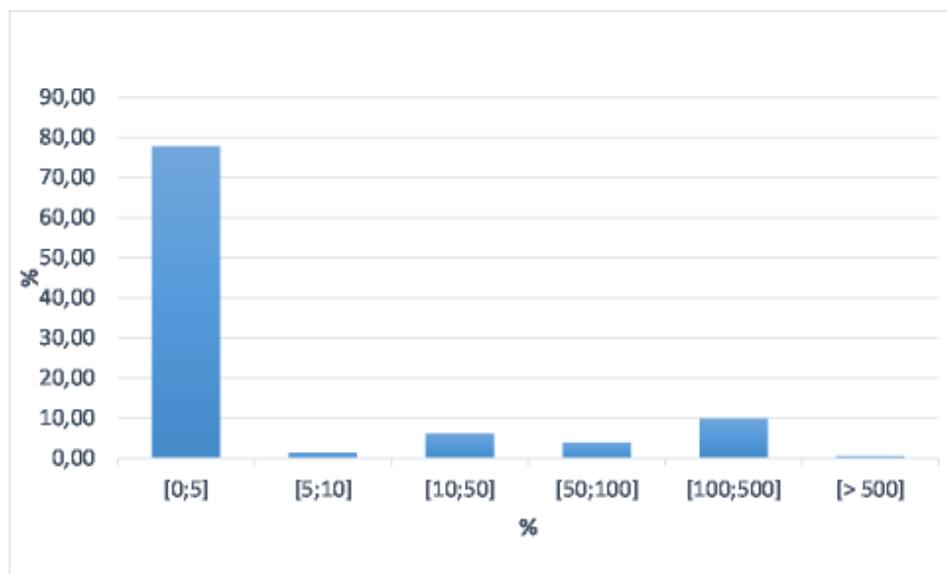


Figure 8.5 la distribution de la variation de l'érosion dans le cas d'un fort incendie par rapport à l'érosion moyenne actuelle en%.

La figure 8.6 représente une comparaison graphique entre l'évolution de l'érosion hydrique simulée par RUSLE dans le bassin de la Medjerda après un incendie et la superficie de l'incendie d'une part et la superficie du bassin versant d'autre part. Elle montre que le risque d'érosion est remarquable dans les petits bassins versants, même si la zone d'incendie est petite.

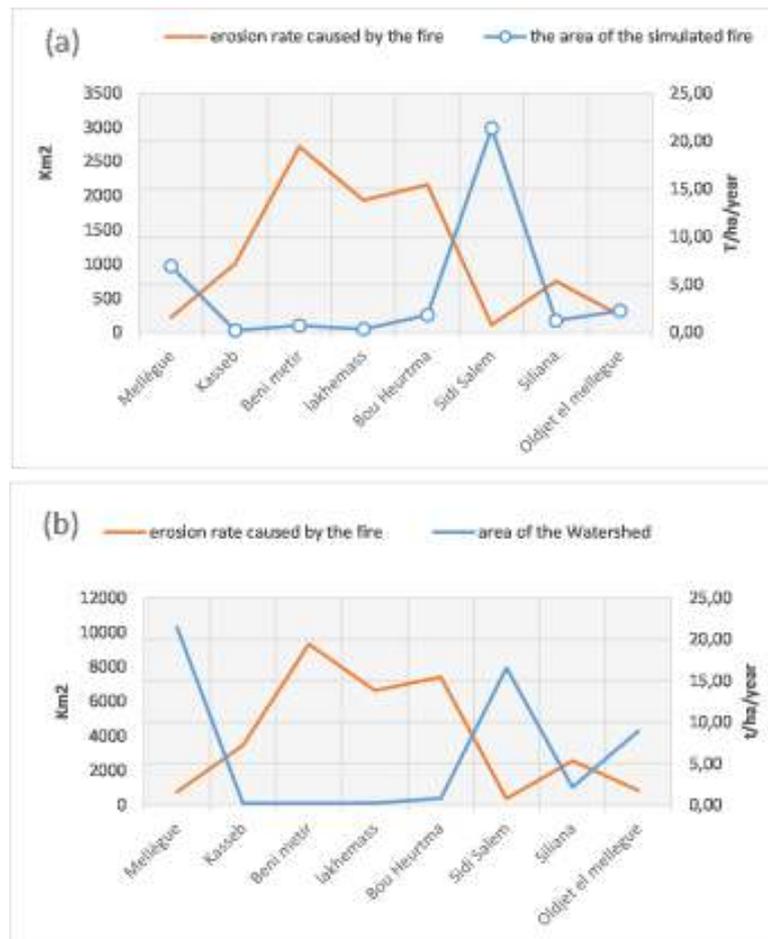


Figure 8.6 une comparaison graphique entre l'évolution de l'érosion hydrique simulée par RUSLE dans le bassin de la Medjerda après un incendie et a/ la superficie du feu. b/la superficie du bassin versant.

#### 4.4 Scénario d'érosion avec proposition d'aménagement (scénario de projet)

La valeur du facteur P, (facteur aménagements antiérosifs), diminue en adoptant des pratiques de conservation de sol, telle que l'implantation des banquettes mécaniques sur les versants, car elles réduisent le volume et la vitesse du ruissellement et encouragent le dépôt de sédiments sur la surface des pentes (Wischmeier et Smith, 1978 ; Renard et al, 1997 ; Terranova et al, 2009).

Les valeurs du facteur P, le facteur le plus incertain (Renard et al, 1997), varient d'environ 0,2 pour les versants aménagés à 1 en l'absence de pratiques de contrôle de l'érosion (Wischmeier et Smith, 1978). Dans la littérature, divers tableaux et formules proposant des valeurs de P pour les différentes pratiques de conservation de sol (Wischmeier et Smith 1978 ; McPhee et Smith en 1984 ; Du et al.1994 ; Morgan 1995 ; Renard et al. 1997 ; Shin 1999 ; Foster et al. 2002).

Pour le scénario projet, nous avons proposé d'adopter des mesures et d'actes de réduction de l'érosion hydrique par :

- (i) L'installation des banquettes sur les versants où la pente est inférieure à 25%.
- (ii) Utilisation des méthodes de culture anti érosion minimales (labour dans le sens des courbes de niveau).
- (iii) Augmentation des superficies de couverture végétale par l'amélioration de la densité des forêts et l'extension des parcours.

Pour simuler les actions mentionnées ci-dessus, nous avons appliqué les modifications suivantes :

- ✚ Pour la première mesure (i), les valeurs proposées par Wischmeier et Smith (1978) ont été utilisés. La simulation consiste à remplacer les valeurs du facteur P par 0,5 pour les versants < 2%, et par 0,6 pour les pente comprise entre 2 et 7%, et par 0,7 pour les pentes comprise entre 7 et 12%, et par 0,8 pour les pentes comprise entre 12 et 18%, et par 0,9 pour les pente comprise entre 18 et 25%. Le choix de ces valeurs est basé sur les travaux de Wischmeier et Smith (1978).
- ✚ Pour la deuxième mesure (ii) (labourer dans le sens des courbes de niveau), nous avons proposées de multiplier les superficies qui représentent les terrains agricoles par 0,75 (Rosse et al.2012).
- ✚ Pour la troisième mesure (iii), nous avons proposé d'augmenter les zones de la couverture végétale en améliorant la densité des forêts et l'extension des parcours. La simulation consiste à remplacer le facteur C des sols nus par 0,4 et des forêts par 0,001. Le choix de ces valeurs est basé sur les travaux de Cormary et Masson (1964).

#### 4.4.1 Résultats des modifications des facteurs du modèle RUSLE (scénario de projet)

En appliquant la mesure (iii), nous avons remarqué que les valeurs du facteur C varient entre 0 et 0,74. 22% de la surface totale du bassin versant est caractérisé par des valeurs inférieures à 0,2. 2,46% des terres ont des valeurs comprises entre 0,2 et 0,4 et 76% ont des valeurs entre 0,4 et 0,7 et seulement 0,06% des terres ont des valeurs supérieures à 0,7. La distribution spatiale des valeurs du facteur C est illustrée dans la figure 8.7.

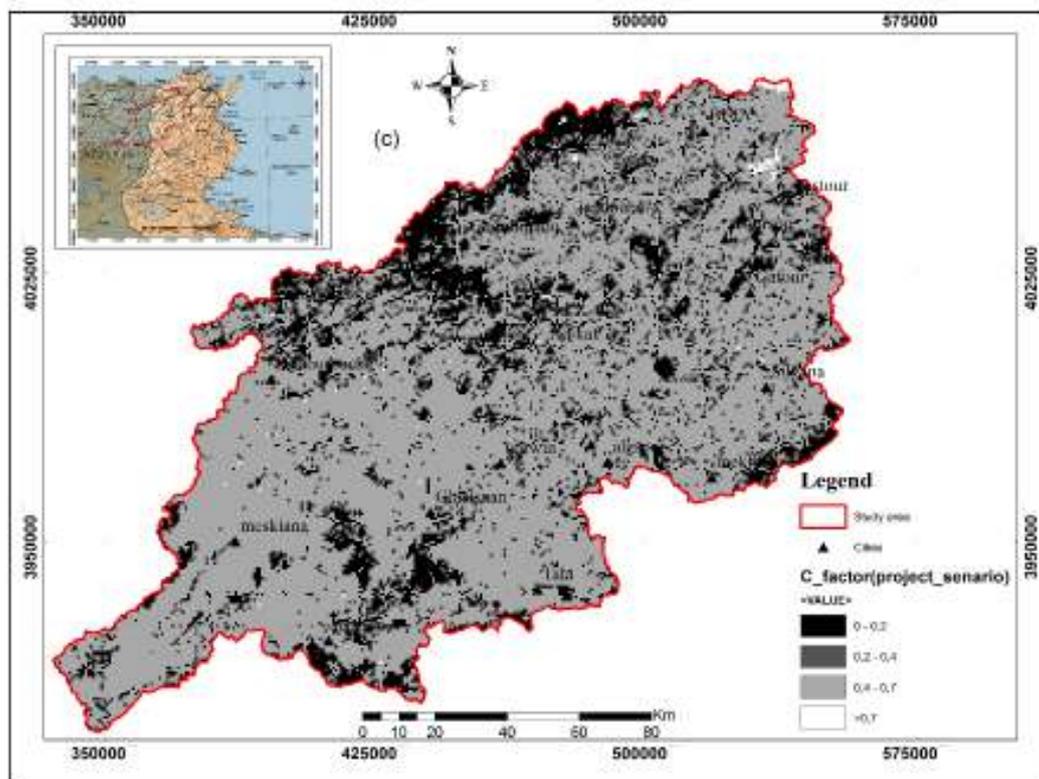


Figure 8.7 Carte du facteur C dans le cas d'aménagement antiérosif. (Scénario de projet, mesure iii).

#### 4.4.2 Pertes en sols (scénario de projet)

Le scénario du projet permet une évaluation quantitative de l'adoption de mesures et de comportements simples pour réduire l'érosion des sols. L'érosion estimée sans aménagement antiérosif a été considérée comme une référence pour la comparaison avec le scénario du projet. Le tableau 7 représente les pourcentages des superficies affectées par l'érosion selon les différentes mesures et actes de réduction de l'érosion hydrique adoptée dans cette étude.

La valeur moyenne de l'érosion est passée de 14.91 t/ha/an, en l'absence de gestion antiérosif, à 10.27 t / ha / an en présence de banquettes. En effet, on constate une augmentation de 71% des zones où le taux d'érosion est inférieur à 7 t/ha/an et une diminution de 17,14% des zones avec un taux d'érosion compris entre 7 et 30 t /ha/an ainsi qu'une diminution de 45% des zones avec un taux d'érosion supérieur à 30 t/ha/an. (Voir la figure 8.8a).

Pour la méthode de culture anti-érosion (labour dans le sens des courbes de niveau), la valeur moyenne de l'érosion est passée de 14,91 t/ha/an à 13,17 t/ha/an. Nous avons constaté une diminution de 1% des superficies qui ont un taux d'érosion entre 7 et 30 t/ha/an et une diminution de 17% des superficies avec un taux d'érosion supérieur à 30 t/ha/an et une augmentation de 14% des superficies où l'érosion est inférieure à 7 t/ha/an. (Voir la figure 8.8b).

Concernant l'amélioration de la densité des forêts et l'extension des parcours (reboisement), nous avons montré qu'il y avait une augmentation de 82% des superficies avec une érosion spécifique inférieure à 7 t/ha/an et une diminution de 25% des surfaces avec une érosion spécifique comprise entre 7 et 30 t/ha /an. Les zones avec un taux d'érosion supérieur à 30 t/ha/an ont également été réduites de 39%. La valeur moyenne de l'érosion est passée de 14,91 t / ha / an à 8,98 t / ha / an. (Voir la figure 8.8c).

Tableau 8.7 Pourcentages des superficies affectées par l'érosion selon les différentes mesures et actes de réduction de l'érosion hydrique.

Scénarios Classe de risque d'érosion (t/ha/an)		absence de gestion anti-érosion %	Scénario Projet		
			(i)	(ii)	(iii)
Risque d'érosion tolérable	<b>0 -7,41</b>	25,60	43,71	29,23	46,68
Risque d'érosion faible	<b>7,41 - 15</b>	28,95	25,73	29,13	23,14
Risque d'érosion moyen	<b>15 - 30</b>	26,38	20,12	25,79	18,48
Risque d'érosion fort	<b>30 - 60</b>	16,48	9,17	13,81	10,25
Risque d'érosion très fort	<b>&gt; 60</b>	2,60	1,27	2,04	1,45

En comparant les résultats de la simulation effectuée dans le cas du scénario de projet nous avons constaté que :

- L'installation des banquettes mécaniques à un effet moyen sur la variation du taux d'érosion au niveau des différentes classes,
- Les aménagements disponibles sur le terrain minimisent 11% du taux d'érosion moyenne.
- L'amélioration de la densité de la végétation par la combinaison du reboisement et de l'extension des parcours a un impact remarquable et efficace sur le taux d'érosion par rapport à d'autres techniques de gestion.

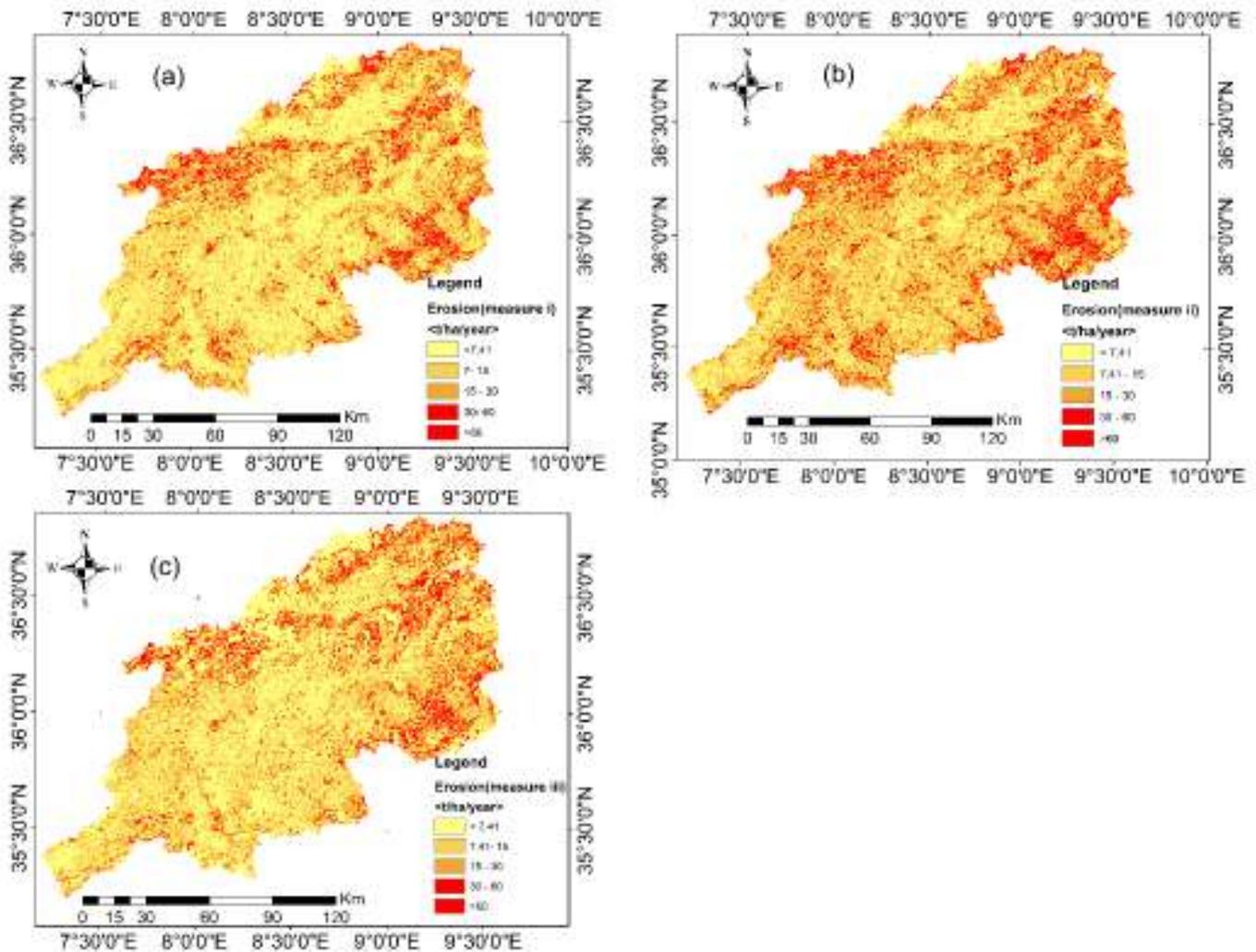


Figure 8.8 cartes des pertes en sol dans le cas d'un scénario du projet

### 5. Rapport de la livraison de sédiment (Sediment delivery ratio, SDR.)

Dans les bassins versant, seulement une fraction du sol atteindra l'exutoire du système, cette partie de sédiment est désignée sous le nom du rapport de la livraison de sédiment, (Sediment delivery ratio, SDR) (Lim et al. 2005). Actuellement, Les modèles de prédiction ne sont généralement pas applicables à un bassin versant particulier (Ouyang et Bartholic, 1997). Les bassins versants avec une grande zone de drainage et les champs très éloignés des cours d'eau présentent un faible taux de sédimentation (Ouyang et Bartholic, 1997).

Les études de Maner (1958) suggèrent que le SDR est mieux corrélé avec le relief et la longueur maximale d'un bassin versant, exprimé en tant que rapport relief-longueur (R/L), à d'autres facteurs.

Renfro et al. (1975) ont développé une équation reliant le SDR au bassin versant sur la base de l'équation de Maner (1958) et les quantités des sédiments mesurés par bathymétrie dans 14 bassins versants de la région des prairies Backland au Texas. Cette équation a une corrélation plus forte entre les valeurs de SDR et la zone de drainage ( $R^2 = 0,97$ ) elle s'écrit comme suit :

$$\log (SDR) = 2,94259 + 0,82362 \log \left(\frac{R}{L}\right) \dots \dots \dots (8.2)$$

Où, R représente le relief d'un bassin versant, défini comme la différence d'altitude entre l'altitude moyenne du bassin versant et la sortie des bassins versants. L est la longueur maximale d'un bassin versant, mesurée approximativement parallèlement au drainage principal.

Un modèle plus généralisé a été développé par Vanoni (1975). Il a utilisé des données de 300 bassins versants à travers le monde en fonction de la fonction de puissance, ce modèle peut s'écrire comme suit :

$$SDR = 0,42 A^{-0,125} \dots \dots \dots (8.3)$$

Où, A, la zone de drainage en miles carrés.

Une autre méthode, appelé la méthode du potentiel d'érosion (EPM), a été utilisé par plusieurs chercheurs pour estimer la quantité de sédiments au niveau des exutoires des bassins versants (Salajeghe 2011 ; Belkendil 2016 ; Habi 2016). Ce modèle prend en compte le périmètre et la longueur du bassin versant, et la différence entre l'altitude moyenne et l'altitude de l'exutoire.

Dans cette partie d'étude, nous avons essayé d'obtenir un modèle empirique valable pour calculer le SDR sans des mesures bathymétriques. Les modèles SDR suivants ont été utilisés : Maner (1958), Vanoni (1975), Renfero et Waldo (1975), et EPM (Voir tableau 5). De plus, le SDR observé (SDR<sub>o</sub>) (eq.13), a été utilisé pour choisir le modèle SDR le plus approprié en se concentrant sur les méthodes comparatives entre les quantités de sédiments mesurées par bathymétrie au niveau de 08 barrages de la zone d'étude et les valeurs simulées par RUSLE en utilisant l'erreur standard (SE) (eq.14) et le coefficient de variation (CV) (eq.15 ) (Belkendil et al., 2016 ; Boufeldja et al., 2020).

$$X_0 = SDR_0 = \frac{Q_{obs}}{Q_{sim}} \dots \dots \dots (8.4)$$

$$SE = \sqrt{\frac{(X_e - X_0)^2}{X_0}} \dots \dots \dots (8.5)$$

$$CV = \frac{SD}{X_0} \times 100 \dots \dots \dots (8.6)$$

Where, SE erreur standard ; CV coefficient de variation ; X<sub>0</sub>, SDR observe (SDR<sub>o</sub>) ; X<sub>e</sub> SDR estimé (SDR<sub>e</sub>) ; Q<sub>obs</sub> c'est le débit observé ; Q<sub>sim</sub> c'est le débit estimé par RUSLE.

Tableau 8.8 Les équations de base des modèles utilisés pour calculer le SDR

Model	Equations	Reference
Vanoni	$SDR = 0,42 A^{-0,125}$	Vanoni (1975)
Renfro and Waldo	$\log (SDR) = 2,94259 + 0,82362 \log \left(\frac{R}{L}\right)$	Renfro (1975)
Maner	$\text{Log} (SDR) = 1.8768 - 0.4191 \text{Log} (10A)$	Maner (1958)
R <sub>u</sub> of EPM	$R_u = 4 \times \frac{(P \times D)^{0.5}}{(L + 10)}$	

### 5.1 Application du modèle de Maner (1958)

Les valeurs de SDR trouvée en appliquant le modèle de Maner (1958) sont mentionnées dans le tableau 8.9

Tableau 8.9 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de Maner (1958)

Le sous bassin	Surface (Km <sup>2</sup> )	SDR <sub>0</sub>	Manner (1958)		
			SDR	SE	CV
Mellègue	10300	0,32	-0,05	0,66	55,25
Kasseb	101	1,45	0,79	0,55	31,85
Ben Metir	106	0,80	0,78	0,02	17,30
Lakhmess	133	0,19	0,74	1,28	81,48
Bou Heurtma	376	0,48	0,55	0,10	10,33
Sidi Salem	17934	0,36	-0,15	0,85	56,18
Siliana	1040	1,10	0,37	0,70	38,88
Oldjet mellgue	4296	0,39	0,11	0,45	40,66
Moyenne		0,4	0,39	0,58	0,66

L'analyse du tableau 8.9 montre que :

- Les valeurs de SDR varient entre -0,15 et 0,79.
- Le modèle de Maner n'est pas applicable sur les grands bassins versant.
- Le coefficient de variation moyen est estimé à 41,49 %.

L'étude de corrélation entre les quantités du sédiment mesurée et simulée est illustrée sur la figure 9. Elle montre que le coefficient de corrélation est de l'ordre de  $R^2 = 0,57$ .

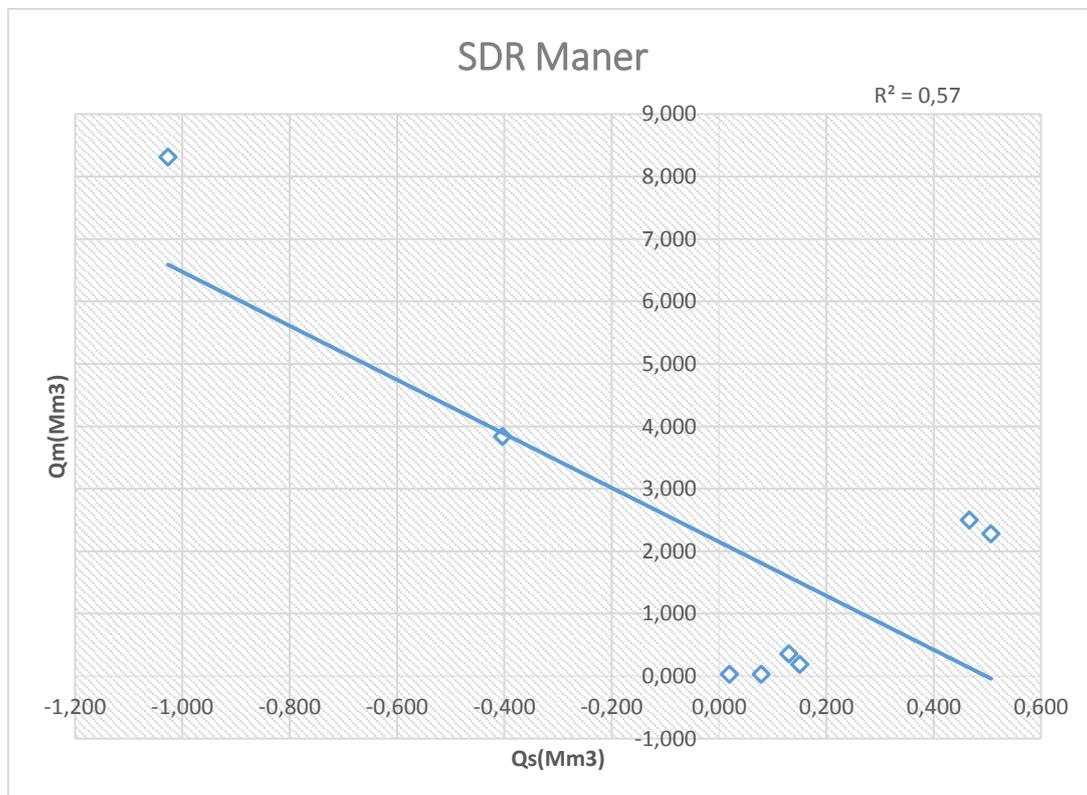


Figure 8.9 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle de Maner.

## 5.2 Application du modèle de Renfro (1975)

Les valeurs de SDR trouvée en appliquant le modèle de Renfro (1975) sont mentionnées dans le tableau 8.10

Tableau 8.10 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de Renfro (1975)

Le sous bassin	Surface (Km <sup>2</sup> )	SDR <sub>0</sub>	Renfro (1975)		
			SDR	SE	CV
Mellègue	10300	0,32	0,24	0,14	17,64
Kasseb	101	1,45	0,51	0,78	45,91
Ben Metir	106	0,80	0,43	0,41	32,13
Lakhmess	133	0,19	0,47	0,65	106,14
Bou Heurtma	376	0,48	0,43	0,07	6,93
Sidi Salem	17934	0,36	0,22	0,24	27,69
Siliana	1040	1,10	0,33	0,74	49,76
Oldjet mellgue	4296	0,39	0,26	0,20	22,45
Moyenne		0,4	0,36	0,40	38,58

L'analyse du tableau 8.10 montre que :

- Les valeurs de SDR varient entre 0,24 et 0,51.
- Le coefficient de variation moyen est estimé à 32.35%.

L'étude de corrélation entre les quantités de sédiment mesurée et simulée en utilisant le modèle de Renfro (1975) est illustrée sur la figure 8.10. Elle montre que le coefficient de corrélation est de l'ordre de  $R^2 = 0,65$ .

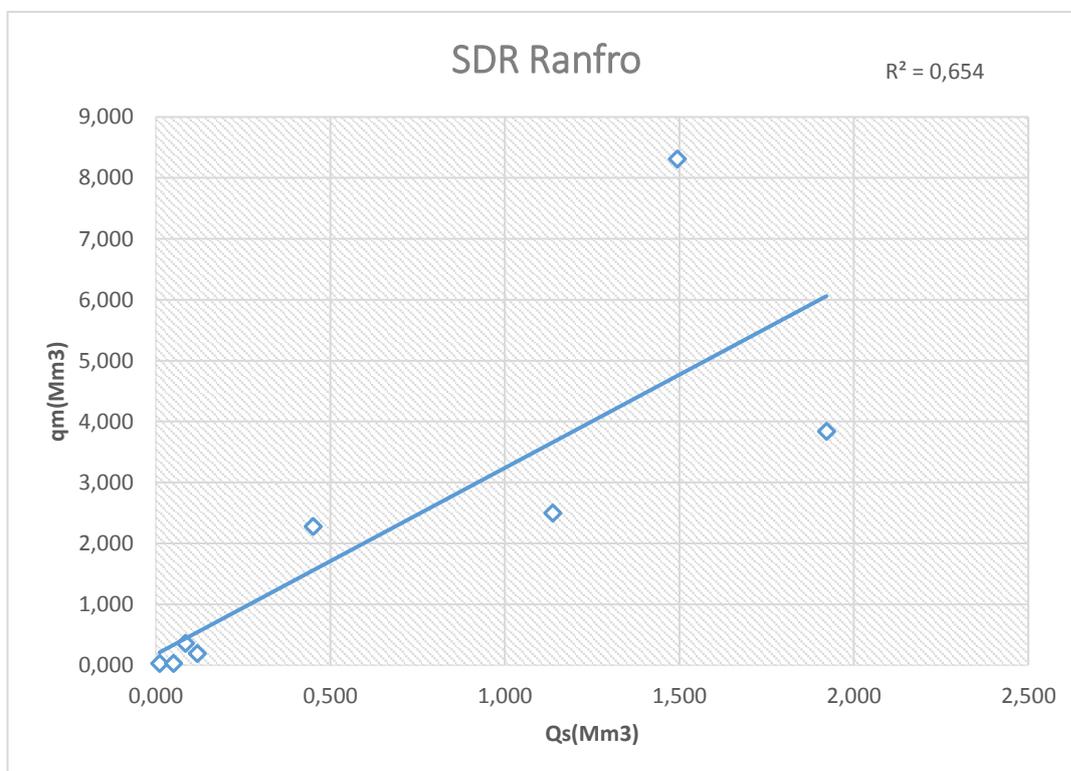


Figure 8.10 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle de Renfro (1975).

### 5.3 Application du modèle de Vanoni (1975)

Les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de Vanoni (1975) sont mentionnées dans le tableau 8.11

Tableau 8.11 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de Vanoni (1975)

Le sous bassin	Surface (Km <sup>2</sup> )	SDR <sub>0</sub>	Vanoni (1975)		
			SDR	SE	CV
Mellègue	10300	0,32	0,15	0,31	38,09
Kasseb	101	1,45	0,27	0,98	57,78
Ben Metir	106	0,80	0,26	0,60	47,29
Lakhmess	133	0,19	0,26	0,16	25,94
Bou Heurtma	376	0,48	0,23	0,37	37,56
Sidi Salem	17934	0,36	0,14	0,37	43,63
Siliana	1040	1,10	0,20	0,86	57,93
Oldjet mellgue	4296	0,39	0,17	0,35	40,29
Moyenne		0,4	0,21	0,50	43,56

L'analyse du tableau 8.11 montre que :

- Les valeurs de SDR varient entre 0,14 et 0,26.
- Le coefficient de variation moyen est estimé à 32.35%.

L'étude de corrélation entre les quantités de sédiment mesurée et simulée en utilisant le modèle de Valonin (1975) est illustrée sur la figure 8.11. Elle montre que le coefficient de corrélation est de l'ordre de  $R^2 = 0,66$ .

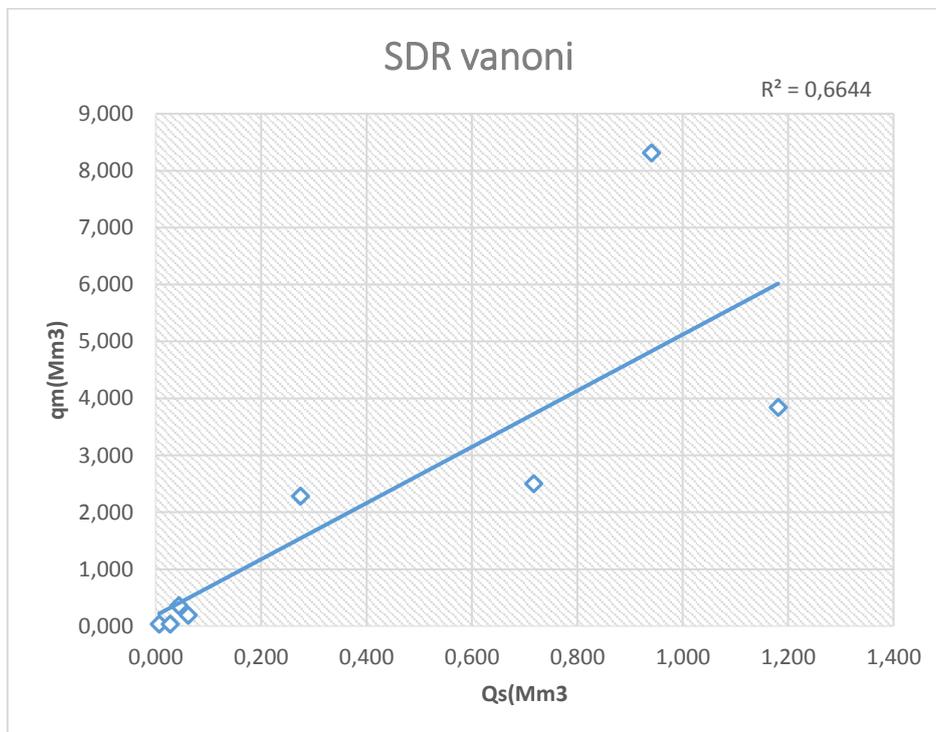


Figure 8.11 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle de Vanoni (1975).

### 5.4 Application du modèle EPM

Les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle EPM sont mentionnées dans le tableau 8.12.

Tableau 8.12 les valeurs de SDR trouvées en appliquant le modèle de EPM

Le sous bassin	Surface (Km <sup>2</sup> )	SDR <sub>0</sub>	EPM		
			SDR	SE	CV
Mellègue	10300	0,32	0,45	0,22	27,78
Kasseb	101	1,45	0,73	0,60	35,17
Ben Metir	106	0,80	0,65	0,16	13,06
Lakhmess	133	0,19	0,53	0,79	128,83
Bou Heurtma	376	0,48	0,87	0,56	57,24
Sidi Salem	17934	0,36	0,4	0,06	7,18
Siliana	1040	1,10	0,51	0,56	37,88
Oldjet mellgue	4296	0,39	0,51	0,20	22,62
Moyenne		0,4	0,58	0,39	41,22

L'analyse du tableau 8.12 montre que :

- Les valeurs de SDR varient entre 3,84 et 43,50%.
- Le coefficient de variation moyen est estimé à 23.78%.

L'étude de corrélation entre les quantités de sédiment mesurée et simulée en utilisant le modèle EPM est illustrée sur la figure 8.12. Elle montre que le coefficient de corrélation est de l'ordre de  $R^2 = 0,63$ .

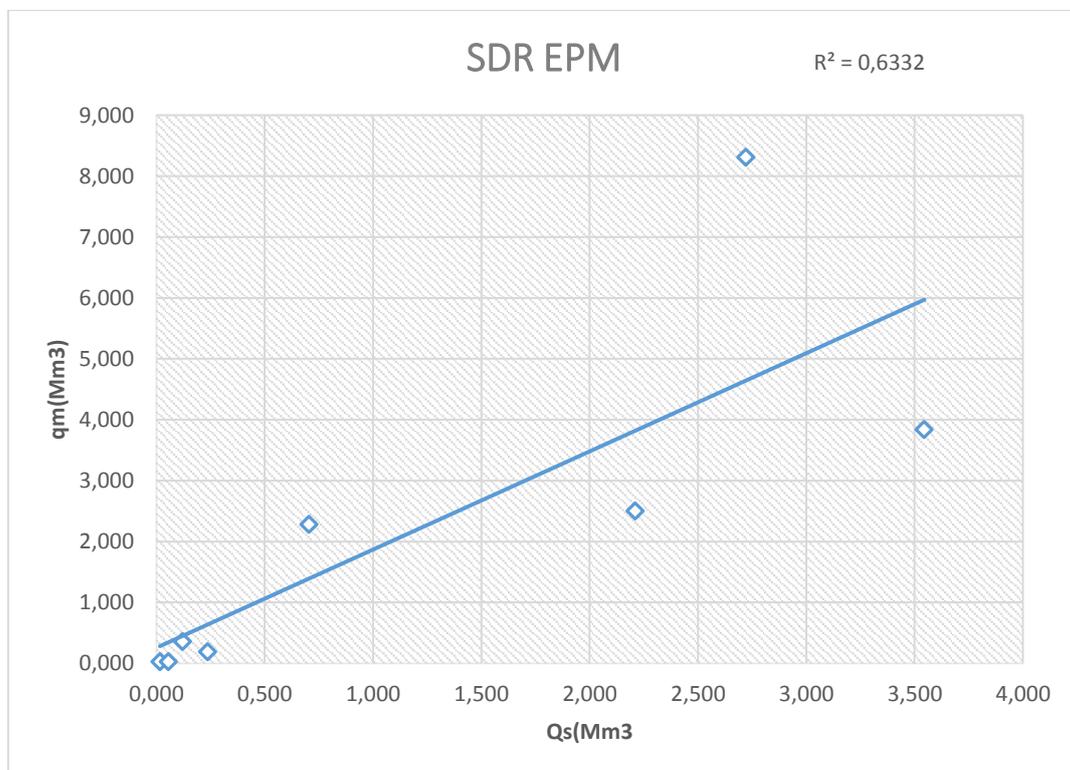


Figure 8.12 Corrélation entre les quantités de sédiments mesurées et simulées par RUSLE en utilisant le modèle EPM

### 5.5 Etude comparative

Dans cette partie nous avons, comparé les résultats de la simulation obtenus en utilisant les différents modèles de SDR (Maner ; Ranfro ; Valonin ; EPM), aux taux d'érosion obtenu à partir des mesures bathymétriques.

Le tableau 8.13 et la figure 8.13 représentent l'érosion estimée en utilisant les modèles SDR et celle déterminée à partir de l'envasement mesuré.

L'analyse de la figure 8.13 montre que :

- Les courbes d'érosion déterminées en utilisant les modèles d'SDR de Ranfro ; Valonin et EPM possèdent la même allure que celle effectué lors des mesures bathymétriques.
- Les allures obtenues à partir de l'utilisation des modèles EPM et Renfro sont très proches à celle obtenu à partir des mesures bathymétriques.
- L'allure obtenue à partir de l'utilisation du modèle de Maner est complètement différente à celle obtenu à partir des mesures bathymétriques.

Tableau 8.13 Comparaison des taux d'érosion calculée par rapport à celle mesurée en utilisant les modèles d'SDR (Mm<sup>3</sup>/an).

Sous Bassins/barrages	Erosion observée (Mm <sup>3</sup> /an)	E SDR Manner (Mm <sup>3</sup> /an)	E SDR Ranfro (Mm <sup>3</sup> /an)	E SDR Valonin (Mm <sup>3</sup> /an)	E SDR EPM (Mm <sup>3</sup> /an)
Mellègue	3,84	-0,403	1,921	1,181	3,545
Kasseb	0,36	0,131	0,084	0,044	0,121
Beni metir	0,03	0,020	0,011	0,007	0,016
Lakhmass	0,03	0,079	0,050	0,027	0,056
Bou Heurtma	0,19	0,151	0,119	0,062	0,237
Sidi Salem	8,31	-1,027	1,494	0,940	2,721
Siliana	2,28	0,507	0,450	0,275	0,704
Oldjet el mellegue	2,5	0,467	1,137	0,717	2,210

Dans cette étude, quatre modèles de SDR ont été utilisés : Maner (1958) ; Vanoni (1975) ; Renfro et Waldo (1975) et EPM. De plus, le SDR<sub>0</sub> a été utilisé pour choisir le meilleur modèle. Les résultats d'estimation montrent que le coefficient moyen de variation par rapport au SDR de base (SDR<sub>0</sub>) est estimé à 33,92 % pour celui de Vanoni (1975) ; et 6,62 % pour celui de Renfro and Waldo (1975) et 32,04% pour EPM. Le SDR estimé par le modèle de Maner (1958) est négatif. (Voir tableau 8.14)

Tableau 8.14 comparaison des résultats évaluées en utilisant les modèles SDR

Model	Q <sub>mes</sub> Mm <sup>3</sup> /an	Q <sub>sim</sub> Mm <sup>3</sup> /an	SDR <sub>0</sub>	SDR	SD	SE	CV %	Rank
Maner (1958)				< 0	-	-	-	-
Vanoni (1975)				0.21	0.14	0.30	33.92	3
Renfro and Waldo (1975)	17,54	44,16	0,4	0.36	0.03	0.06	6.62	1
EPM				0,58	0,13	0,29	32,04	2

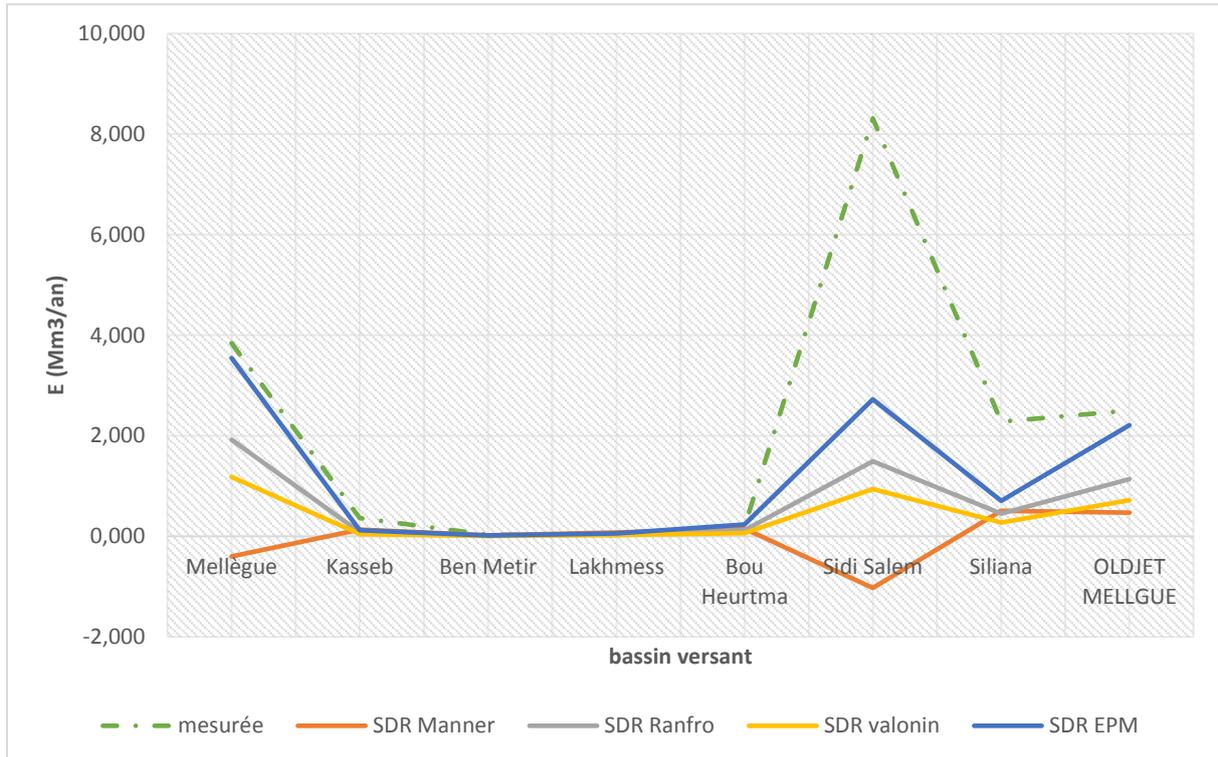


Figure 8.13 Comparaison des taux d'érosion calculée par rapport à celle mesurée en utilisant les modèles d'SDR (Mm3/an).

Pour mieux comparer les résultats obtenus, nous avons calculé l'écart quadratique ( $\sigma$ ), qui est l'écart entre les valeurs calculées et observées de l'érosion, pour chaque modèle :

$$\sigma = \frac{\sum(E_i - E_{mes})^2}{8} \dots\dots\dots (8.7)$$

Les résultats de calcul de l'écart quadratique sont affichés dans le tableau 8.15

Tableau 8.15 Variation de l'écart quadratique.

Sous bassins/barrages	Surface (Km <sup>2</sup> )	$\sigma$ SDR Maner (Mm3/an)	$\sigma$ SDR Ranfro (Mm3/an)	$\sigma$ SDR vanoni (Mm3/an)	$\sigma$ SDR EPM (Mm3/an)
<b>Mellègue</b>	10300	18,0037	3,6816	7,0702	0,0871
<b>Kasseb</b>	101	0,0526	0,0761	0,0999	0,0571
<b>Beni metir</b>	106	0,0001	0,0004	0,0005	0,0002
<b>Lakhmass</b>	133	0,0024	0,0004	0,0000	0,0007
<b>Bou Heurtma</b>	376	0,0015	0,0051	0,0165	0,0022
<b>Sidi Salem</b>	17934	87,1723	46,4560	54,3105	31,2350
<b>Siliana</b>	1040	3,1430	3,3477	4,0212	2,4828
<b>Oldjet el mellegue</b>	4296	4,1327	1,8566	3,1788	0,0838
<b><math>\sigma</math> moyen</b>		14,0635	6,9280	8,5872	4,2436

D'après les résultats du tableau 8.15, nous avons constaté que :

- Les bassins versants avec une grande zone de drainage, et les champs très éloignés des cours d'eau présentent un faible taux de sédimentation, ce qui est semblable aux remarques d'Ouyang et Bartholic, (1997).
- Le modèle de Maner, Vanoni et Ranfro donnent des valeurs acceptables pour les petits bassins versants, pour lesquels le drainage principal est court.
- Les modèles de Maner, Valonin et Ranfro sous-estiment les quantités des sédiments dans le cas des grands bassins versants.
- Dans le cas des grands bassins versants ( $S > 1000 \text{ km}^2$ ), où le drainage est long, le modèle EPM est le meilleur.

## 6. Conclusion partielle

L'étude de corrélation montre que le facteur topographique (LS) a le plus grand rôle dans le déclenchement de l'érosion hydrique et que la variabilité de la perte annuelle de sol entre les bassins est principalement due à ce facteur (facteur LS). Ceci est similaire aux résultats de Markos et Jayappa (2016) ; Toubal et al. (2018) ; Baiamonte et al. (2019) dans les zones semi-arides. L'indépendance du facteur d'érosivité pluviométrique (Indiqué dans le tableau 8.4) peut s'expliquer par la vaste étendue du bassin versant et la longue distance entre les stations pluviométriques. Les feux de forêt réduisent le couvert végétal et la capacité d'absorption d'eau par le sol, ce qui provoque des ruissellements plus importants pouvant déclencher des glissements de terrain à grande échelle, en particulier sur les pentes très raides. En comparant les résultats obtenus à partir de l'application du modèle RUSLE avec les mesures bathymétriques effectuées dans les barrages de la région, nous avons remarqué que les quantités de sédiments qui atteignent les exutoires des bassins représentent 40% de la quantité estimée par RUSLE. Ces résultats sont similaires aux quantités estimées par les modèles SDR de Renfro and Waldo (1975). Cette valeur pourrait être de 63 % en cas d'incendie intense.

## Conclusion Générale

## CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, nous avons utilisé la télédétection et le SIG pour évaluer et montrer la gravité de l'érosion et réaliser sa cartographie dans les bassins de la Medjerda et de le Mellegue, ainsi que pour comparer des scénarios d'érosion pour mettre en évidence à la fois : l'intensité croissante des processus érosifs à cause des incendies de forêt, et l'efficacité de certaines techniques antiérosives. Nous avons proposé aussi d'estimer le taux d'érosion des sols des sous bassins versant en utilisant le modèle SDR, (Taux de livraison des sédiments), le plus adéquate. Et de réaliser une étude diachronique de l'occupation du sol du bassin versant de la Medjerda, durant la période 1994 – 2017, en utilisant des images satellitaires de Landsat et d'obtenir des cartes d'occupation de sol qui seront utilisée pour cartographie le facteur C.

La Medjerda est soumise à une forte agressivité climatique correspondant à une classe d'érosivité supérieure à 100MJ.mm/ha.h.an. L'érosivité des pluies est caractérisée par une irrégularité spatiale et temporelle, avec une forte augmentation du sud-ouest au nord-est. La zone d'étude est caractérisée par une topographie très variée, des plaines, des collines, ensemble de Jbels, formations de pentes et des dépressions allongées et étroites. La lithologie est essentiellement argileuse ou lumineuse avec une couverture végétale très faible ce qui le rend très vulnérable à l'érosion. Le SIG a permis d'estimer le potentiel annuel d'érosion de la zone d'étude pixel par pixel. Les facteurs déclenchant l'érosion (R, LS, C, K, P) sont représentés dans des couches de 30m de résolution en format matriciel. La carte des risques d'érosion fournit des informations sur les zones critiques de la perte de sol.

La carte des risques d'érosion obtenue ainsi constitue un document d'aide à la décision, qui peut contribuer à l'utilisation rationnelle du territoire dans la région. La mise à jour de la base de données peut permettre le suivi et la surveillance des zones à risque. Les valeurs d'érosivité de la zone d'étude estimées par la formule de Belaid de 2015 sont similaires à celles obtenues par plusieurs chercheurs dans les régions semi-arides et donnent des taux d'érosion acceptables à l'aide du modèle RUSLE. Les comparaisons des différents scénarios d'érosion hydrique ont permis d'identifier les zones à haut risque et de mettre en œuvre des mesures de prévention et de contrôle pour limiter les dommages environnementaux et les coûts associés.

Pour le scénario actuel, le facteur R de la RUSLE a été calculé en utilisant une relation expérimentale ajustée à la Tunisie sur la base des précipitations annuelles et mensuelles. Le facteur C a été évalué par une relation expérimentale basée sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Le facteur K a été tiré de la base de données mondiale harmonisée sur les sols (HWSD). Le facteur LS a été estimé selon les équations du modèle de RUSLE. Pour les scénarios d'incendie et de projet, les facteurs de RUSLE ont été ajustés en fonction des données expérimentales et de la littérature.

Dans cette région, l'érosion moyenne déterminée par RUSLE est de 13,27 t/ha/an sur la totalité du bassin versant de la Medjerda et peut atteindre 14,91 t/ha/an en l'absence de gestion antiérosive. Par conséquent, l'étendue de l'érosion apparaît cohérente avec les résultats obtenus sur le même bassin versant à l'aide de mesures bathymétriques effectuées dans les barrages de la région. Les résultats montrent que 36,21% de la zone d'étude peuvent être considérés comme

« à risque tolérable », 25,91 % comme « à faible risque », et 22,13% du bassin peuvent être considérés comme « à risque moyen ». La zone à haut risque représente 15,75% du bassin avec une valeur supérieure à 30t/ha/an.

Cette étude a également mis en évidence l'efficacité de certaines pratiques antiérosives et l'augmentation probable du risque d'érosion due aux feux de forêt. Les valeurs obtenues par l'application du modèle RUSLE ont souligné que la gestion territoriale utilisant des mesures et des actions de réduction de l'érosion, a conduit à des réductions notables des taux d'érosion, passant de 14,91 à 8,98 t/ha/an. L'amélioration de la densité de la végétation par la combinaison du reboisement et de l'extension des parcours a noté le meilleur impact d'amélioration sur le taux d'érosion par rapport à d'autres techniques.

Les feux de forêt réduisent le couvert végétal et la capacité d'absorption d'eau par le sol, ce qui provoque des ruissellements plus importants pouvant déclencher des glissements de terrain à grande échelle, en particulier sur les pentes très raides. Les résultats obtenus à partir de la simulation des feux de forêt, (correspondant aux valeurs historiques moyennes de R), indiquent que si les mesures de lutte contre les incendies sont négligées, le taux d'érosion moyen augmente de 8% par rapport à l'état sans feu. Cette augmentation se fait au détriment de la classe d'érosion définie comme tolérable, qui est passée de 36,17 % de la région pour le scénario actuel à 30,85%.

Dans les bassins versants, seule une fraction du sol atteindra la sortie du système, cette partie du sédiment est appelée le ratio de livraison des sédiments (SDR). En comparant les résultats obtenus à partir de l'application du modèle RUSLE avec les mesures bathymétriques effectuées dans les barrages de la région, nous avons remarqué que les quantités de sédiments qui atteignent les exutoires des bassins représentent 40% de la quantité estimée par RUSLE. Ces résultats sont similaires aux quantités estimées par les modèles SDR de Renfro and Waldo. Cette valeur pourrait être de 63 % en cas d'incendie intense.

La télédétection et le système d'information géographique ont une grande utilité pour étudier les changements dans la couverture terrestre et détecter les changements. L'évaluation des cartes d'occupation du sol à l'aide de la classification des images Landsat (TM, ETM et OLI-TIRS) a permis de mettre en évidence les changements d'occupation du sol et de déterminer la régression, la progression ou la stabilité des zones de la Medjerda de 1994 à 2017.

L'évolution interannuelle de la végétation est influencée par des facteurs climatiques et anthropiques. L'irrégularité des précipitations entraîne une variabilité dans le changement du couvert végétal au cours de la période d'étude. L'augmentation des feux de forêts et l'extension des villes sur le couvert végétal sont parmi les causes de la dégradation du couvert végétal.

L'analyse des résultats de la classification réalisée sur les données satellitaires Landsat couvrant le bassin versant de la Medjerda de 1994 à 2017 a permis d'identifier quatre grandes catégories d'occupation du sol qui sont : les sols nus « fortement dégradés », la végétation, les sols agricoles et les plans eaux. L'étude diachronique de l'occupation du sol de 1994 à 2017 indique une modification du milieu avec une augmentation de la végétation (+ 43 %) et une diminution des zones dénudées (65 %). Une extension des sols fortement érodés (Badlands et Water land)

a été remarquée de 2004 à 2010, environ 2426,59 km<sup>2</sup> terres couvertes de végétation sont devenues des terres nues en raison des incendies de forêt, du surpâturage et de la sécheresse.

Le modèle de régression exponentielle et l'indice de végétation normalisé permettent d'estimer facilement le facteur C et donnent des valeurs acceptables et utilisables pour l'estimation de l'érosion hydrique dans la Medjerda. La comparaison entre l'érosion hydrique et la variation du facteur C au cours de l'étude montre que le facteur d'occupation du sol (facteur C) ne représente pas un facteur déterminant de l'érosion hydrique dans la Medjerda et la végétation est insuffisante pour protéger les bassins contre les risques d'érosion hydrique.

La validation sur le terrain et les études citées ci-dessus confirment que l'application a fourni des résultats fiables, malgré sa limitation à cause de certains points : Tout d'abord, l'équation universelle de perte de sol ne prédit que l'érosion en nappe et l'érosion en rigoles, l'érosion en ravines n'est pas prise en compte. De plus, certains facteurs importants influençant l'érosion des sols ne sont pas pris en compte, comme l'effet des pierres et des fragments de roche. De plus, l'évaluation du facteur d'érodibilité du sol (facteur K) et du facteur d'érosivité des précipitations (facteur R) nécessite une cartographie détaillée du sol et des informations détaillées sur l'intensité moyenne sur 30 minutes de chaque averse enregistrée, ce qui n'a pas été réalisé dans cette étude.

Le couvert végétal a évolué avec une tendance vallonnée de 1994 à 2017. Son amélioration est due à l'implantation et à l'extension des parcours. Cela a été fait afin de protéger les bassins de l'érosion. La végétation s'est formée, généralement, au niveau des Oueds et des barrages (prairies). La densité de la végétation atteint son maximum en hiver

Les résultats simulés par chacun des deux modèles, USLE-R-blaid et RUSLE-R-blaid, sont pratiquement identiques. L'usage de l'un ou de l'autre est conditionné par la nature des données disponibles. Nous pouvons également conclure que les modèles d'érosion des sols USLE, RUSLE ont produit des résultats relativement similaires est bonnes, et que le modèle de la FAO a surestimé l'érosion dans la zone d'étude. La formule de Rango & Arnoldus sous-estime l'érosivité de la pluie et son utilisation nous donne des taux d'érosion très faibles par rapport à celle mesurées par bathymétrie.

A partir de ce travail nous avons constaté que les zones considérées à faible risque d'érosion ce sont les plaines et les plateaux caractérisés par un couvert végétal faible. Les zones considérées à fort risque d'érosion sont les altitudes et les terrains accidentés et nus. Nous proposons d'améliorer les résultats trouvés en utilisant un modèle numérique de terrain plus détaillé, des données satellitaires qui ont de meilleures caractéristiques spectrales et une information plus détaillée sur le sol.

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol a fourni des informations additionnelles concernant l'impact du changement climatique et surtout du changement de l'état de surface sur l'érosion. L'analyse des changements, qui peuvent être dus aux activités agricoles, ne permet pas que de localiser les sites d'intervention, elle permet aussi de déterminer les

scénarios de gestion de l'occupation et l'utilisation du sol à long terme pour le but de minimiser l'érosion hydrique.

Nous avons utilisé des séries chronologiques de données NDVI de PROBA-V afin de suivre la dynamique temporelle de la végétation à l'échelle du bassin versant de la Medjerda. Au cours de la période 2013-2017, la couverture végétale dans cette région a légèrement diminué avec une tendance ondulante. La moyenne annuelle maximale du NDVI a diminué ce que signifie que la productivité végétale dans la région, a progressivement diminué. La diminution du  $NDVI_{max}$  mensuelle en hiver et en automne des grands périmètres d'irrigation a contribué à la diminution du NDVI annuelle du bassin. Durant la même période (2013-2017), les précipitations des stations analysées présentent une tendance à la diminution.

Les résultats de ce travail montrent l'intérêt de l'utilisation de la télédétection et des SIG pour le suivi de la dynamique de l'occupation et l'utilisation du sol. Par ailleurs, le couplage des images satellites avec les statistiques agricoles permet de valider et de comprendre les résultats cartographiques. En comparant la carte du risque érosif avec celle de l'évolution saisonnière de la végétation, on remarque que les valeurs les plus élevées du risque érosif correspondent aux régions dépourvues de la végétation (sol nu hivernal).

Les résultats de cette étude aident les décideurs à comprendre le scénario de changement d'occupation de sol et à planifier les mesures préventives nécessaires pour protéger l'environnement et les infrastructures hydrauliques.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- Al Ali, Y., Touma, J., Zante, P., Nasri, S., & Albergel, J. (2008). Water and sediment balances of a contour bench terracing system in a semi-arid cultivated zone (El Gouazine, central Tunisia). *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 883-892.
- Alam, A., Bhat, M.S., & Maheen, M. (2020). Using Landsat satellite data for assessing the land use and land cover change in Kashmir valley. *GeoJournal* 85, 1529–1543,
- Alejandro M. et K. Omasa, (2007). Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 62 (2007) 309–324
- Allili, A. C., Laignel, B., Adjeroud, N., Bir, H., Madani, K., “Particulate flow at the mouth of the Soummam watershed (Algeria)” *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(1), 204-211, 2016 <https://doi.org/10.1002/ep.12210>
- Almagro, A., Thais, C. T., Carina, B. C., Rodrigo, B. P., José M. J., Dulce, B. B. R., & Paulo, T. S. O. (2019). Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions, *International Soil and Water Conservation Research*, Volume 7, Issue 4, 2019, Pages 325-334, ISSN 2095-6339, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.08.005>
- Amani, M., Kakooei, M., Moghimi, A., Ghorbanian, A., Ranjgar, B., Mahdavi, S., & Mohammadzadeh, A. (2020). Application of Google Earth Engine Cloud Computing Platform, Sentinel Imagery, and Neural Networks for Crop Mapping in Canada. *Remote Sensing*, 12(21), 3561, <https://doi.org/10.3390/rs12213561>
- Amri, R. (2013). Estimation régionale de l'évapotranspiration sur la plaine de Kairouan (Tunisie) à partir de données satellites multi-capteurs, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 176 p.
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235).
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J. R., “Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89, 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Ayalew, D. A., Deumlich, D., Šarapatka, B., & Doktor, D. (2020). Quantifying the Sensitivity of NDVI-Based C Factor Estimation and Potential Soil Erosion Prediction Using Spaceborne Earth Observation Data. *Remote Sensing*, 12(7), 1136, <https://doi.org/10.3390/rs12071136>.
- Baiamonte, G.I., Minacapilli, M., Novara, A., Time Scale Effects and Interactions of Rainfall Erosivity and Cover Management Factors on Vineyard Soil Loss Erosion in the Semi-Arid Area of Southern Sicily. *Water* (11)978, 2-14, 2019
- Balasubramani, K., Veena, M., Kumaraswamy, K., “Estimation of soil erosion in a semi-arid watershed of Tamil Nadu (India) using revised universal soil loss equation (rusle) model through GIS” *Modeling Earth Systems and Environment* (1)10, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0015-4>
- Bartholomé, E., (1993). Télédétection et cartographie. Éd. AUPELF-UREF. Les Presses de l'Université du Québec. 1993. p. 187-201
- Baver, L.D., (1956). *Soil Physics*, third ed. John Wiley & Sons Inc., New York

Beasley, D.B., Huggins, L. F., Monke, A., "ANSWERS: A model for watershed planning" Transactions of the ASAE, 23(4), 938-0944, 1980.

Belaïd, H., 2015 "Contribution à l'étude des processus de l'érosion hydrique en milieu semi-aride tunisien" PhDthesis, Agronomic sciences, National Agronomic Institute, University of Carthage, Tunisia. pp30-36.

Belkendil, A., Haddad, S., Hamouine, A., "Contribution to the solid transport study of the lower Guir watershed, South-West of Algeria" International Journal of Scientific & Engineering Research, 7(8), 2016.

Ben Cheikha, L., Gueddari, M., "Le bassin versant du Jannet (Tunisie): évaluation des risques d'érosion hydrique, Mappemonde 90, 1-15, 2008.

Benest, M. (1985). Évolution de la plate-forme de l'Ouest algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire (fascicule 1). Travaux et Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon, 95(1), 3-367.

Benhadj, I. (2008). Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech. Thèse de l'Université de Toulouse, 296 p.

Benkadja, R., Boussag, F., & Benkadja, A. (2015). Identification et évaluation du risque d'érosion sur le bassin versant du K'sob (Est Algérien). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74:91–102, <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0611-y>

Berghout, A., Meddi, M., "Sediment transport modelling in wadi Chemora during flood flow events" Journal of Water and Land Development, 31(1), 23-31, 2016. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0033>

Bonn, F. (1996). Précis de télédétection (Volume 2, Applications thématiques). Universités francophones.

Bou Kheir, R., Girard, M. C., Khawlie, M., Abdallah, C., "Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens". Étude et gestion des sols, 8(4): 231-245, 2015.

Boufeldja, S., Hamed, K. B., Bouanani, A., Belkendil, A., "Identification of zones at risk of erosion by the combination of a digital model and the method of multi-criteria analysis in the arid regions: case of the Bechar Wadi watershed" Applied Water Science, 10(5), 1-18, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01191-6>.

Boulaassal, H., Anaki, S., Yazidi, O. A., Maatouk, M., & Wahbi, M. (2020). Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 2002 et 2016 à partir des images Landsat. Cas de la région Tanger Tetouan Al-Hoceima (Maroc). African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences, 3(2), 14-31.

Bradford, J. M., & Huang, C. H. (1996). Splash and detachment by waterdrops. Soil erosion, conservation and rehabilitation., 61-76.

Brahim, B., Meshram, S. G., Abdallah, D., Larbi, B., Driss, S., Khalid, M., & Khedher, K. M. (2020). Mapping of soil sensitivity to water erosion by RUSLE model: case of the Inaouene watershed (Northeast Morocco). Arabian Journal of Geosciences, 13(21), 1-15.

Braiki, H. (2018). *Construction d'une démarche participative pour améliorer la gestion de l'eau et du sol. Une application aux politiques des aménagements de conservation des eaux et des sols en Tunisie Centrale* (Doctoral dissertation, Agro Paris Tech ; Institut national agronomique de Tunisie).

Cabrera-Bosquet, L., Molero, G., Stellacci, A.M. et al. (2015). NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *CEREAL RESEARCH COMMUNICATIONS* 39, 147–159 (2011), <https://doi.org/10.1556/CRC.39.2011.1.15>

Caloz, R., & Collet, C. (2001). Précis de télédétection-Volume 3: Traitements numériques d'images de télédétection (Vol. 3). PUQ.

Cap Transformation Based On Landsat 7 At-Satellite Reflectance. Raytheon ITSS, USGS EROS Data Center Sioux Falls, SD 57198, USA.10 pages

Castany, G. (1954). Les grands traits structuraux de la Tunisie. *Bulletin de la Société géologique de France*, 6(1-3), 151-173.

Certini, G., "Effects of fire on properties of forest soils: a review" *Oecologia*, 143(1), 1-10, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>

Chabaan, C., 2016 "Modélisation de l'érosion hydrique par le modèle SEAGIS. Cas du bassin versant du barrage Siliana", Research Master, El Manar University, Tunisia,

Chadli, K., "Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco)", *Model. Earth Syst. Environ.* (2)51, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>

Chafai, A., Brahim, N., Shimi N. S., "Mapping of water erosion by GIS/RUSLE approach: watershed Ayda. *Arabian Journal of Geosciences*" (13)810, 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05774-0>

Charlotte, P. (2017). Cartographie de l'occupation des sols à partir de séries temporelles d'images satellitaires à hautes résolutions Identification et traitement des données mal étiquetées. Thèse de l'Université de Toulouse, 4 p

Chebbani, R., Djilli, K., & Roose, E. (1999). Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bulletin ORSTOM, Réseau Erosion*, 19, 85-95.

Chowdhury, M., Hasan, M. E., & Abdullah-Al-Mamun, M. M. (2020). Land use/land cover change assessment of Halda watershed using remote sensing and GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(1), 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.11.003>

Chriha, S., Sghar, I.A., "Les incendies de forêt en Tunisie" *Méditerranée*. pp 87-93, 2013.

Christine, A., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*, 7(3), 203-225.

Chuenchum, P., Xu, M., & Tang, W. (2020). Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang–Mekong River by using the modified RUSLE model. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.006>

Claverie, M., Demarez, B., Duchemin, O., Hagolle, D., Ducrot, C., Marais Sicre, J.F., & Dejoux, M. (2012). Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 124:844-857.

Cormary, Y., & Masson .J. (1964). Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherches du Génie Rural de Tunisie: application à un projet-type de la formule de perte de sols de Wischmeier. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie* 2(3): 3-26.

Coyen & Billier. (2011). Etude d'avant-projet détaillée du barrage de OuldjetMellegue, wilaya de tebessa. MISSION 11, Rapport 11378-RP-1101.

Cros-Cayot, S. (1996). Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure Agronomique).

Cuomo V., Lanfredi M. et Lasaponara R .et.al., (2001). Detection of inter-annual variation of NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development. 10 pages.

Curran, M. P, Chapman, B., Hope, G. D., 2006, "Large-scale Erosion and Flooding after Wildfires: Understanding the Soil Conditions" Technical Report 030, Ministry of Forests and Range, Research Branch, Victoria, British Columbia, pp24.

David, L. (1956). Etude géologique des monts de la haute Medjerda (Doctoral dissertation, Paris).

De Jong, S. M., & Riezebos, H. T. (1997). SEMMED: a distributed approach to soil erosion modelling. Remote sensing, 96, 199-204.

De Jong, S. M., Paracchini, M. L., & Bertolo, F. (1999). Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data, Catena 37, (3-4): 291-308. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00038-7)

De Jong, S. M., Riezebos, H. T., "SEMMED: a distributed approach to soil erosion modelling", Remote sensing, 96, 199-204. 1997.

De Jong, S. M., "Application of Reflective Remote Sensing for land degradation studies in a Mediterranean environmen" Netherlands Geographical Studies. 177, University of Utrecht, the Netherlands, p240. 1994.

DeByle, D., 1981 "Clearcutting and fire in the larch Douglas-fir forests of western Montana a multifaceted research summary", General Technical Report, INT-99.U.S.D.A. Forest Service Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, UT. pp73

Demmak, A., 1982 "Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale", Thèse de Doctorat. Ing. Paris

Di Piazza, G. V., Di Stefano, C., Ferro, V., "Modelling the effects of a bushfire on erosion in a Mediterranean basin", Hydrological Sciences Journal, 52(6), 1253-1270, 2007. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1253>

Dicara, B., & Tech, G. A. B. (2020). Suivi par télédétection de la saisonnalité de la végétation et du climat dans la zone de transition forêt-savane en République Centrafricaine. <http://hdl.handle.net/2268.2/8725>

Djoukbala, O., Hasbaia, M., Benselama, O., Mazour, M., "Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of WadiGazouana (NW of Algeria)". Modeling Earth Systems and Environment, 5(2), 725-743, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6>

Du, R. H., Shi, D. M., Yuan, J., "The impact of soil and water losses upon ecosystem and environment in the Three Gorge area of the Yangtse river". Since Press, Beijing, China. pp252, 1994.

Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., ... & Simonneaux, V. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely sensed vegetation indices. Agricultural Water Management, 79(1), 1-27.

- Dutil, P. (1984). L'érosion en grande culture, revue technique des agriculteurs dynamique.
- Eerens, H., Derone, G., & Van Rensbergen, J. (2000). A new vegetation map of central Africa update of the JRC-TREES map of 1992 with SPOT-VEGETATION imagery of 1998
- Efthimiou, N., Psomiadis, E., & Panagos, P. (2020). Fire severity and soil erosion susceptibility mapping using multi-temporal Earth Observation data: The case of Mati fatal wildfire in Eastern Attica, Greece. *Catena*, 187, 104320.
- Elhafid, D., Gille, E., Akdim, B., "Echelle spatiale et genèse des risques hydro-logiques en milieu urbain et péri-urbain, cas de la ville de Oujda" *Geomagreb*, 2, pp 1-10. 2004.
- Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Mearns, L. O., Buja, L. E., Meehl G. A., & Washington, W. M. (2005). The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science*, 310(5754):1674–1678.
- Fernández, C., Vega, J. A., Vieira, D.C., "Assessing soil erosion after fire and rehabilitation treatments in NW Spain: performance of RUSLE and revised Morgan–Morgan–Finney models". *Land degradation & development*, 21(1), 58-67. <https://doi.org/10.1002/ldr.965>, 2010.
- Ferreira, V., Panagopoulos, T., Cakula, A., Andrade, R., & Arvela, A. (2015). Predicting soil erosion after land use changes for irrigating agriculture in a large reservoir of southern Portugal. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 40-49.
- Foley, M. M., Bellmore, J. R., O'Connor, J. E., Duda, J. J., East, A. E., Grant, G. E., ... & Wilcox, A. C. (2017). Dam removal: Listening in. *Water Resources Research*, 53(7), 5229-5246.
- Foster, G. R., Yoder, D. C., Weesies, G. A., McCool, D. K, McGregor, K. C., Bingner, R. L., User's guide-Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE 2). USDA - Agricultural Research Service, Washington, DC, pp 1–76. 2002.
- Fournet, A. (1969). Etude pédologique de la Dorsale tunisienne (transversale Kébir-Bargou-Serdj-Ousseltia).
- Fox, D. M., Maselli, F., Carrega, P., "Using SPOT images and field sampling to map burn severity and vegetation factors affecting post forest fire erosion risk" *Catena*, 75(3), 326-335. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.08.001>
- Gao, J., Wang, H., "Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion: a case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China. *Catena* (172): 369–377. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.035>.
- Gavrilovic, S., "A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion," *Bullet. Faculty Forestry* 26, 151–168, 1962.
- GCOS. (2016). the global observing system for climate: Implementation needs. *Global Climate Observing System Implementation Plan 2016*.
- Ghosal, K., Das Bhattacharya, S., "A Review of RUSLE Model", *J Indian Soc Remote Sens* 48, 689–707. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>
- Giménez, R., & Govers, G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), 1475-1483.,

Guellala, R., Inoubli, M. H., & Amri, F. (2008). Nouvelles données géologiques sur la plaine de la Haute vallée de la Mejerda, Tunisie (New geological data on the plain of the high valley of Mejerda, Tunisia). *Serv Geol Notes Tunisia*, 76, 103-113.

Guellala, R., Inoubli, M. H., & Amri, F. (2009). Nouveaux éléments sur la structure de l'aquifère superficiel de Ghardimaou (Tunisie): contribution de la géophysique électrique/New elements on the structure of the Ghardimaou superficial aquifer (Tunisia): electrical geophysics results. *Hydrological sciences journal*, 54(5), 974-983.

Hermassi, T., Cherif, M. A., Habaieb, H., "Solid transport study at the Merguellil watershed, central Tunisia: case study of Ettiour and Rajela watersheds" *Houille Blanche-Revue Internationale De L'Eau*. (4), 88-96, 2014. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014043>

Heusch, B. (1986). Cinquante ans de banquettes de DRS-CES en Afrique du Nord: un bilan. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 22(2), 153-162.

Holben B., 1986. Characteristics of maximum value composite images for temporal AVHRR, *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1417-1437

Horrliche, F. J., & Besbes, M. (2008). Rationalisation du réseau piézométrique du système aquifère du Sahara septentrional. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 19(3), 163-171.

Houghton, R. A., House, J. I., Pongratz, J., Van der Werf, G. R., DeFries, R. S., Hansen, M. C., et al. (2012). Carbon emissions from land use and landcover change. *Biogeosciences*, 9(12):5125–5142.

Huang, C., B., Wylie, L., Yang, C., Homer, et G., Zylstra, (2001). Derivation Of A Tasseled

Inglada, J. A., Vincent, M., Arias, B., Tardy, D., & Rodes, I. (2017). Operational high resolution land cover map production at the country scale using satellite image time series. *Remote Sensing*, 9(1):95.

IPCC. (2000). Intergovernmental panel on climate change. *Climate change*, 2014.

Jauzein, A. (1967). Contribution à l'étude géologique des confins de la dorsale tunisienne (Tunisie septentrionale). République tunisienne, Secrétariat d'état au plan et à l'économie nationale, Division de la production industrielle.

Jensen, J. R. (2005). *Digital image processing: a remote sensing perspective*. Upper Saddle River, NJ: sPrentice Hall.

Justice, C.O., G., Digdale, J.R.G., Townshend, A.S., Narracott and M., Kumar, (1991). Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development. 10 pages.

Karameouti, M., Petropoulos, G. P., Papanikolaou, I. D., Kairis, O., Kosmas, K., "Erosion rate predictions from PESERA and RUSLE at a Mediterranean site before and after a wild fire: comparison & implications", *Geoderma*, 261,44-58, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.025>

Khedimallah, A., Meddi, M., Mahé, G., "Characterization of the interannual variability of precipitation and runoff in the Cheliff and Medjerda basins (Algeria)" *Journal of Earth System Science*, 129, 1-25. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01385-1>

Khemiri, K., Jebari, S., "Évaluation de l'érosion hydrique dans des bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un Système d'information géographique" *Cahiers Agricultures*, 30, 7, 2021. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020048>

Kim, H. S., Julien, P. Y., "Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on the IMHA Watershed. *Water Engineering Research*, 7(1), 29-41, 2006.

Kingumbi, A., Bargaoui, Z., Ledoux, E., Besbes, M., & Hubert, P. (2007). Modélisation hydrologique stochastique d'un bassin affecté par des changements d'occupation: cas du Merguellil en Tunisie centrale/Hydrological stochastic modelling of a basin affected by land-use changes: case of the Merguellil basin in central Tunisia. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(6), 1232-1252.

Knijff, J.M., Jones, R.J.A., Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk assessment in Europe Joint Research Centre, European Commission, EUR 19044 EN (2000).

Koirala, P., Thakuri., Joshi, S., Chauhan, R., "Estimation of Soil Erosion in Nepal Using a RUSLE Modeling and Geospatial Tool". *Geosciences*, 9, 147, 2019. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040147>

Kouli, M., Soupios, P., Vallianatos, F. (2009). Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology*, 57(3): 483-497. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1318-9>

Kouli, M., Soupios, P., Vallianatos, F., "Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece" *Environmental Geology*, 57(3): 483-497, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1318-9>

Lanfredi M., Simoniello T. and Lasaponara R. et.al., (2003). Multiresolution spatial characterization of land degradation phenomena in Southern Italy from 1985 to 1999 using NOAA-AVHRR NDVI data, *Geophysical Research Letter*, 30, pp. 1069

Laouina, A., "Gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc : la diversité des réponses paysannes à la dégradation des terres, Publication of FLSH", University of Mohammed V Agdal, Rabat, p172. 2007.

Larsen, I. J., Mac Donald, L. H. Predicting post-fire sediment yields at the hillslope scale: testing RUSLE and disturbed WEPP. *Water Resources Research* 43(11): 412, 2007. <https://doi.org/10.1029/2006WR005560>

Leduc, C., Ammar, S. B., Favreau, G., Beji, R., Virrion, R., Lacombe, G., ... & Zouari, K. (2007). Impacts of hydrological changes in the Mediterranean zone: environmental modifications and rural development in the Merguellil catchment, central Tunisia/Un exemple d'évolution hydrologique en Méditerranée: impacts des modifications environnementales et du développement agricole dans le bassin-versant du Merguellil (Tunisie centrale). *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(6), 1162-1178

Lefay, O. (1986). Contribution à l'étude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie (Médéa: zone de l'Atlas tellien central): rapport de stage.

Li, D., Tian, P., Luo, H., Hu, T., Dong, B., Cui, Y., & Luo, Y. (2020). Impacts of land use and land cover changes on regional climate in the Lhasa River basin, Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 742, 140570. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140570>

Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., 2005 "GIS-based sediment assessment tool". *Catena* 64(1) : 61-80.

Lin, C. Y., Lin, W.T., Chou, W, C., "Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience" *Soil and Tillage Research*. 68(2): 143-152 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00114-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00114-9)

Lin, C. Y., Lin. W. T., Chou. W. C. (2002). Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil and Tillage Research*, 68(2): 143-152. [https://doi.org/10.1016/S01671987\(02\)001149](https://doi.org/10.1016/S01671987(02)001149)

- Liu, J., Gao, G., Wang, S. et al. (2018). The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics. *J. Geogr. Sci.* 28, 59–78. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1459-z>
- Lunetta, R.S., Knight, J.F., Ediriwickrema, J., Lyon, J.G., & Worthy L.D. (2006). Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data *Remote Sensing of Environment*, 105. pp. 142-154 <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2006.06.018>
- Maner, S.B, (1958) “Factors Affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. *Trans Am Geophys Union* 39(4), 669–675 1958.
- Markose, V. J, Jayappa, K. S., “Soil loss estimation and prioritization of sub-watersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS” *Environmental Monitoring and Assessment*, 188-225, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5218-2>
- Markose, V. J., & Jayappa, K.S. (2016). Soil loss estimation and prioritization of sub-watersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188-225. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5218-2>
- Marondedze, A. K., Schütt, B., “Assessment of Soil Erosion Using the RUSLE Model for the Epworth District of the Harare Metropolitan Province, Zimbabwe”. *Sustainability*, 12, 8531, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12208531>
- Mazour, M. (1992). Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser, Tlemcen, Algérie. *Bulletin-réseau Erosion*, (12), 300-313.
- McPhee, P., Smithen, A., “Application of the USLE in the Republic of South Africa. *Agricultural Engineering in South Africa* 18(1): 5–13, 1984.
- Meddi, M., Toumi, S., & Assani, A. (2016). Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 9(4): 282. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2303-8>
- Meddi, M., Toumi, S., Assani, A., “Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria” *Arabian Journal of Geosciences* 9(4): 282, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2303-8>
- Meddi, M., Toumi, S., “Spatial variability and cartography of maximum annual daily rainfall under different return periods in Northern Algeria. *Journal of Mountain Science*, 12(6), 1403-1421. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3084-3>
- Menasria, A., Meddi, M., & Habaieb, H. (2022). Diachronic Study of Land Cover of the Medjerda Watershed and Estimation of RUSLE-C Factor Using NDVI-Based Equation, Remote Sensing, and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-18.
- Meusburger, K., Bänninger, D., & Alewell, C. (2010). Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of QuickBird imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12 (2010), pp. 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.009>
- Miller, J. D., Nyhan, J. W., Yool, S. R., “Modeling potential erosion due to the Cerro Grande fire with a GIS-based implementation of the Revised Universal Soil Loss Equation” *International Journal of Wildland Fire* 12, 85–100, 2003. <https://doi.org/10.1071/WF02017>

Mjejra, M. (2015). Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie): apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique : thèse de doctorat, université de Medjaz el bab. Tunisie. pp 47-55.

Mokhtari, E. H., 2017, "Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement du barrage Ghrib, PhDthesis, University of chlef. Algeria. (Doctoral dissertation, ReminiBoualem ;Hamoudi Saeed Abdelaamir).

Monroe, A. P., Aldridge, C. L., O'Donnell, M. S., Manier, D. J., Homer, C. G., & Anderson, P. J. (2020). Using remote sensing products to predict recovery of vegetation across space and time following energy development. *Ecological Indicators*, 110, 105872. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105872>

Morgan, R., P, Quinton., J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J, W., Auerswald, K., Styczen, M. E., "The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments" *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(6), 527-544, 1998.

Morgan, R., 1995 "Soil Erosion and Conservation". Second Edition. Longman, Essex, UK, pp198.

Nasri, S., Albergel, J., Cudennec, C., & Berndtsson, R. (2004). Hydrological processes in macrocatchment water harvesting in the arid region of Tunisia: the traditional system of tabias/Processus hydrologiques au sein d'un aménagement de collecte des eaux dans la région aride tunisienne: le système traditionnel des tabias. *Hydrological Sciences Journal*, 49(2).

Naveh, Z and Lieberman, A.S (1984), *Landscape Ecology. Theory and application*. Springer verlag. New York.

Neary, D., Ffolliott, P., Landsberg, J., 2005 "Fire and stream flow regimes. In: Neary D G et al. (eds.), *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Soil and Water*" General Technical Report RMRS-GTR-42-4. USDA, Forest Service, Ogden, UT, USA, pp 107–118.

Niu, X., Tang, J., Wang, S., & Fu, C. (2019). Impact of future land use and land cover change on temperature projections over East Asia. *ClimDyn* 52, 6475–6490 <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4525-4>

Oldeman, L. R. (1992). Global extent of soil degradation. In *Bi-Annual Report 1991-1992/ISRIC* (pp. 19-36). ISRIC.

Omuto, C.T., R.R., Vargas, M.S., Alim et P., Paron, 2010. Mixed-effects modelling of time series NDVI-rainfall relationship for detecting human-induced loss of vegetation cover in drylands; *Journal of Arid Environments*; pp. 1552-1563

Parveen, R., Kumar, U., "Integrated approach of universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel basin, Jharkhand". *Journal of Geographic Information System*, 4, 588–596.2012. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46061>

Pham, T.G., Degener, J., & Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research* .Volume 6, Issue 2, June 2018, Pages 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>.

Pielke, R. A. (2005). Land use and climate change. *Science*, 310(5754):1625–1626.

Pijl, A., Quarella, E., Vogel, T. A., D'Agostino, V., & Tarolli, P. (2020). Remote sensing vs. field-based monitoring of agricultural terrace degradation. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.09.001>

Prabhakara, K., Dean Hively, W., & McCarty G.W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Volume 39, 2015, Pages 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>.

Prasannakumar, V., Shiny, R., Geetha, N., & Vijith, H. J. E. S. (2011). Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India. *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 965-972.

Probst, J. L., and Suchet, A.P., "Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa)" *Hydrological Sciences Journal* 37: 621-637, 1992. <https://doi.org/10.1080/02626669209492628>

Provencher, L., & Dubois, J. M. M. (2007). *Précis de télédétection-Volume 4 (Vol. 4)*. Puq.

Quinton, J. N., Edwards, G. M., & Morgan, R. P. C. (1997). The influence of vegetation species and plant properties on runoff and soil erosion, Results from a rainfall simulation study in south east Spain. *Soil Use and Management*, 13(3): 143-148.

Raissouni, A., Issa, L., Arrim, A., Maâtouk, M., Passalacqua, R., "GIS-Based Model to Assess Erosion Sensitivity in Northern Morocco. Laou Watershed Case Study" *International Journal of Geosciences*, 3(3), 610-626. 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.33061>

Ralston, C., Hatcher, G., (1971). "Effects of prescribed burning on physical properties of soil. Prescribed Burning Symposium Proceedings, April 14-16., Charleston, SC. USDA. Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville NC, USA, pp 68-85,

Remini, B., and Hallouche, W., (2007) "Studying sediment", *International Water Power and Dam Construction*. 59. 42-45.

Renard, K. G., Foster, G. R., Wessies, G. A., Porter, J. P., "Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30-33. (1991).

Renard, K. G., Freimund, J. R., "Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157 : 287-306. 1994. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)

Renard, K. G., Yoder, D., Lightle, D., (2011) "Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation" *Handbook of erosion modelling Oxford: Blackwell Publ*, 137-167.

Renard, K.G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Porter, J. P., 1997 "Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)" Washington, DC: USDA Agricultural Research Services, Agriculture handbook n703.

Rodier, J., Colombani, J., Claude, J., & Kallel, R. (1981). *Le bassin de la mdjerdah. Monographie hydrologique N6 PARIS: OROSTOM*. pp 4-66.

Rojo, L., 1990 "National plan for hydrological-forest restoration and erosion control", Volume I. Memory, 2.

Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 55(2), 95-107.

Roose, E., 2000. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols*. ORSTOM, France.

Roose, E., and Lelong, F., (1976) "Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropicale. Études sur petites parcelles expérimentales de sol" *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 18(4): 365-374.

Roose, E., Sabir, M., Arabi, M., Boutkhal, M., Mazour, M. (2012) "Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb", *Géographie et physique et environnement* 6, 43-69. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2319>

Roose, E., Sarrailh, J. M., 1990 "Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles, Cahiers de l'ORSTOM.

Roose, J.W., R.H., Haas, D.W., Deering, J.A., Schell, et J.C., Harlan, (1974). "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation». Greenbelt, Maryland, NASA/GSFC, 371 p

Rulli, M.C., Offeddu, L., Santini, M., "Modeling post-fire water erosion mitigation strategies." *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6), 2323-2337. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2323-2013>, 2013.

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*, 26(2004) : 69-79.

Sahli, Y., Mokhtari, E., Merzouk, B., Laignel, B., Vial, C., Madani, K., "Mapping surface water erosion potential in the Soummam watershed in Northeast Algeria with RUSLE model." *Journal of Mountain Science* 16(7), 1606-1615. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5325-3>.

Salajeghe, N. R., "Selecting the best model of sediment delivery ratio estimation in Ilam dam basin." *Advances in Environmental Biology* 5(5) :795-802.2011.

Samaali, H. (2011). Etude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et SIG. domain\_other. Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis. Français. tel-00612952v1

Scanvic, J. Y. (1983). Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre (No. 528.8 SCA).

Schwertmann, U., Vogl, W., Kainz, M. (1987). *Bodenerosion durch Wasser - vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

Seo, B., Lee, J., Lee, K. D., Hong, S., & Kang, S. (2019). Improving remotely-sensed crop monitoring by NDVI-based crop phenology estimators for corn and soybeans in Iowa and Illinois, USA. *Field crops research*, 238, 113-128. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.015>

Sepuru, T. K., Dube, T., "An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring." *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 9, 1-9, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.005>

Shin, G., 1999 "The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Gang-won National University, Republic of Korea.

Singh, G., Chandra, S., Babu, R. 1981 "Soil loss and prediction research in India." *Central Soil and Water Conservation Research Training Institute, Bulletin N°T-12/D9*.

- Stoian, A., Poulain, V., Inglada, J., Poughon, V., & Derksen, D. (2019). Land cover maps production with high resolution satellite image time series and convolutional neural networks: Adaptations and limits for operational systems. *Remote Sensing*, 11(17), 1986. <https://doi.org/10.3390/rs11171986>
- Swarnkar, S., Malini, A., Tripathi, S., Sinha, R., "Assessment of uncertainties in soil erosion and sediment yield estimates at ungauged basins: an application to the Garra River basin, India." *Hydrol Earth SystSci* 22:2471–2485, 2018. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2471-2018>
- Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R., Laquinta, P., "Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: an application model for Calabria (southern Italy)." *Geomorphology* 112(3-4): 228-245, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.009>
- Touaibia, B., & Achite, M. (2003). Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *Hydrological sciences journal*, 48(2): 235-242. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.2.235.44691>.
- Toubal, A. K., Achite, M., Ouillon, S., & Dehni, A. (2018). Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, North-West of Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z>
- Toumi, S., Meddi M., Mahé G., & Brou, Y. T. (2013). "Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG." *Hydrological sciences journal* 58(7): 1542-1558. (In French). <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>
- Tricart, J. (1963). Oscillations et modifications de caractère de la zone aride en Afrique et en Amérique latine lors des périodes glaciaires des hautes latitudes. In *Changes of climates* (pp. 415-419).
- Tsewoue, M. R., Tchamba, M., Avana, M. L., & Tanougong, A. D. (2020). Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le Moungo, Région du Littoral, Cameroun: influence sur l'expansion des systèmes agroforestiers à base de bananiers. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(2), 486-500. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i2.15>
- Uddin, K., Murthy, M. S. R., Wahid, S. M., & Matin, M. A. (2016). Estimation of soil erosion dynamics in the Koshi basin using GIS and remote sensing to assess priority areas for conservation. *PloS one*, 11(3), e0150494. [ps://doi.org/10.1371/journal.pone.0150494](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150494)
- Valero, S., Morin, D., Inglada, J., Sepulcre, G., Arias, M., Hagolle, O., et al. (2016). Production of a dynamic cropland mask by processing remote sensing image series at high temporal and spatial resolutions. *Remote Sensing* 8(1):55.
- Van der Knijff, J. M. F., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk assessment in Europe. *European Soil Bureau Research Report EUR 19044 ENp*, p34. .
- Van Rompaey, A. J., Bazzoffi, P., Jones, R. J., Montanarella, L., Govers, G., 2003, "Validation of Soil Erosion Risk Assessments in Italy." *European Soil Bureau Research Report No.12, EUR 20676EN*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. p25.
- Vatandaşlar, C., & Yavuz, M. (2017). Modeling cover management factor of RUSLE using very high-resolution satellite imagery in a semiarid watershed. *Environmental Earth Sciences*, 76(2), 65. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6388-0>
- Vezena, K., Bonn, F., 2006, "Modélisation et analyse de la dynamique spatio-temporelle des relations société – érosion et pollution diffuse en milieu agricole– étude de cas en Vietnam et au Québec." *Interaction Nature-Société, analyse et modèles. UMR6554 LETG, La Baule.*

Wang, G., Wentz, S., Gertner, G. Z., Anderson, A., "Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images." *International Journal of Remote Sensing*. 23(18): 3649-3667, 2002. <https://doi.org/10.1080/01431160110114538>.

Wang, W. Z., "Study on rainfall erosivity in China". *Journal of Soil and Water Conservation*, 9(4): 5-18. 1995.

Wells, C. G., Campbell, R. E., DeBano, L.F., Lewis, C.E., Fredericksen, R.I., Franklin, E.C., 1979, "Effects of fire on soil: a state-of-knowledge review. General Technical Report WO-7. USDA Forest Service, Washington, DC, USA. pp34.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*, Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Wischmeier, W. H., Smith, D. D., "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(2): 285-291, 1958.

Wischmeier, W. H., Smith, D. D., 1965 "Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the rocky mountains." *Agricultural Handbook No. 282*. Washington, DC: US Department of Agriculture.

Young, R. A., 1987, "AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model: a watershed analysis tool". *Conservation research report (USA)*. no.35.

Zahar, Y., Ghorbel, A., Albergel J., "Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: Aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia)". *Journal of Hydrology* 351, 318– 330, 2008.

Zhang, M., Yuan, X., & Otkin, J.A. (2020). Remote sensing of the impact of flash drought events on terrestrial carbon dynamics over China. *Carbon Balance Manage* 15, 20. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-00156-1>

Zhong, Z., Han, X., Xu, Y., Zhang, W., Fu, S., Liu, W., et al. (2019). Effects of land use change on organic carbon dynamics associated with soil aggregate fractions on the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 30(9), 1070-1082. <https://doi.org/10.1002/ldr.3294>.

Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3): 319-325. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010>.