

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : OUVRAGES HYDRAULIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par: **BENTOUMI Omar**

et

HAMMOU Wali Eddine

Intitulé

**L'apport de la télédétection et des SIG dans l'étude de
l'évolution du couvert végétal du sous bassin Oued
Soummam**

Soutenu devant le jury composé de:

Berghout Ali

Université de M'sila

Président

Merzouk Belkacem

Université de M'sila

Rapporteur

Temim Djamel

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2020 /2021

Remerciements

*Au terme de cette étude, nous tenons à remercier **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à exprimer à Monsieur le **Professeur MERZOUK Belkacem**, notre Directeur de mémoire, notre profonde reconnaissance pour l'encadrement et les conseils qu'il nous a apportés. Il nous a transmis ses connaissances scientifiques et nous a supportés pendant nos travaux en brillant par sa gentillesse, sa générosité et ses encouragements.*

Nous voulons également exprimer toute notre gratitude aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Nos vifs remerciements vont également à tous les enseignants et le personnel du Département d'Hydraulique de l'Université de M'sila.

Dédicace

Nous dédions ce mémoire de fin d'études en signe de reconnaissance et de respect à :

- *Nos très chers parents pour leurs sacrifices qu'ils ont consentis à notre égard*
- *Nos Sœurs et Frères*
- *Toutes nos Familles*
- *Nos ami(e)s sans exception*
- *Tous les étudiants et étudiantes de notre promotion, que chacun trouve à travers ces lignes nos sincères amitiés.*

Résumé

Cette étude avait pour objectif l'étude de l'évolution du couvert végétal et de l'érosion des sols dans le sous bassin versant de l'Oued Soummam, en appliquant l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE) et la télédétection. Les résultats obtenus montrent que :

- Les sols du sous bassin Oued Soummam subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant la dégradation du couvert végétal et le risque érosif, tels que l'importance des pentes, le faible couvert végétal, l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols.
- L'imagerie satellitaire, en particulier les données de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), s'est avérée être un outil très efficace pour surveiller l'évolution de la couverture végétale.
- L'étude de l'évolution du couvert végétal et de l'érosion entre 1995 et 2015 a montré que les deux facteurs augmentent et diminuent selon les zones du bassin.

Mots clés : Bassin versant Oued Soummam, Erosion des sols, RUSLE, Télédétection, NDVI, Couvert végétal.

Abstract

The objective of this study was to study the evolution of land cover and soil erosion in the Oued Soummam sub-watershed, by applying the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and remote sensing. The results obtained show that:

- The soils of the Oued Soummam sub-basin are subject to the effect of several factors favoring the degradation of the land cover and the soil erosion risk, such as the importance of the slopes, the low land cover, the Rainfall erosivity and the Soil erodibility.
- Satellite imagery, in particular data from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), has proven to be a very effective tool for monitoring the evolution of vegetation cover.
- The study of the evolution of plant cover and erosion between 1995 and 2015 showed that the two factors increase and decrease depending on the areas of the basin.

Keywords: Oued Soummam watershed, Soil erosion, Revised Universal Soil Loss Equation, Remote sensing, Normalized Difference Vegetation Index, Land cover.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تطور الغطاء النباتي وتآكل التربة في الحوض الهيدروغرافي لوادي الصومام من خلال تطبيق المعادلة العالمية (RUSLE) والاستشعار عن بعد.

أظهرت النتائج ما يلي:

- تخضع تربة الحوض الفرعي لوادي الصومام لتأثير عدة عوامل تفضي إلى تدهور الغطاء النباتي وخطر التعرية، مثل أهمية المنحدرات والغطاء النباتي الضعيف وشدة الأمطار و نوعية التربة.
- أثبتت صور الأقمار الصناعية، ولا سيما البيانات المأخوذة من (NDVI)، أنها أداة فعالة للغاية لرصد تطور الغطاء النباتي.
- أظهرت دراسة تطور الغطاء النباتي والانجراف بين عامي 1995 و 2015 أن هذين العاملين يزيدان وينقصان حسب مناطق الحوض.

الكلمات المفتاحية: حوض وادي الصومام، الانجراف، RUSLE، الاستشعار عن بعد، NDVI، الغطاء النباتي.

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

N° du tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Classification de l'ORSTOM	9
Tableau I.2	Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié	12
Tableau III.1	Facteur R de l'érosivité des pluies pour chaque station pour la période (1970 - 2018)	27
Tableau III.2	Résultats de calcul des différents facteurs pour différentes périodes étudiées	41

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre	Page
Figure I.1	Les grands sous bassins versants de la Soummam	3
Figure I.2	Réseau hydrographique du sous bassin Oued Soummam	4
Figure I.3	Forme allongée du sous bassin l'Oued Soummam	5
Figure I.4	Courbe hypsométrique de la basse Soummam	7
Figure I.5	Carte des tranches d'altitude de la basse Soummam	7
Figure I.6	Carte des pentes du bassin	10
Figure II.1	Eclatement des agrégats	18
Figure II.2	Détachement par splash	18
Figure II.3	Détachement par ruissellement	19
Figure II.4	Décapage de la surface de sols	20
Figure II.5	Érosion des berges par le cours d'eau d'une rivière	20
Figure II.6	Ensablement des lits de rivière	21
Figure III.1	Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le sous bassin versant de l'Oued Soummam	25
Figure III.2	Carte du facteur (R) sur le bassin	28
Figure III.3	Carte du facteur (LS) sur le bassin	29
Figure III.4	Code Structure (b)	30
Figure III.5	Code de perméabilité (c)	30
Figure III.6	Carte du facteur (K) sur le bassin	31
Figure III.7	Carte du facteur (P)	32
Figure III.8	Diagramme expérimental d'estimation du facteur (C)	34
Figure III.9	Carte des valeurs du NDVI (Juillet 2015)	35
Figure III.10	Carte des valeurs du NDVI (Mars 2016)	35
Figure III.11	Carte des valeurs du NDVI (Avril 2018)	36
Figure III.12	Carte des valeurs du NDVI (Juillet 2019)	36
Figure III.13	Carte des valeurs du NDVI (Juillet 1995)	37
Figure III.14	Carte des valeurs du NDVI (Avril 1995)	37

Figure III.15	Carte du facteur <i>C</i> (Juillet 2015)	38
Figure III.16	Carte du facteur <i>C</i> (Mars 2016)	39
Figure III.17	Carte du facteur <i>C</i> (Avril 2018)	39
Figure III.18	Carte du facteur <i>C</i> (Juillet 2019)	40
Figure III.19	Carte du facteur <i>C</i> (Juillet 1995)	40
Figure III.20	Carte du facteur <i>C</i> (Avril 1995)	41
Figure III.21	Taux annuel des pertes en sol (Juillet 2015) en (t/ha/an)	42
Figure III.22	Taux annuel des pertes en sol (Mars 2016) en (t/ha/an)	42
Figure III.23	Taux annuel des pertes en sol (Avril 2018) en (t/ha/an)	43
Figure III.24	Taux annuel des pertes en sol (Juillet 2019) en (t/ha/an)	43
Figure III.25	Carte du facteur <i>C moyen</i> (2015)	44
Figure III.26	Carte du facteur <i>C moyen</i> (1995)	45
Figure III.27	Carte de Delta <i>C</i>	45
Figure III.28	Taux moyen annuel des pertes en sol (2015) en (t/ha/an)	46
Figure III.29	Taux moyen annuel des pertes en sol (1995) en (t/ha/an)	46
Figure III.30	Taux moyen annuel de Delta <i>E</i> en (t/ha/an)	47

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I: Description du sous bassin Oued Soummam

I.1. Introduction	2
I.2. Situation géographique du sous bassin	2
I.3. Limite géographique et géomorphologique	3
I.4. Réseau hydrographique de la basse Soummam	3
I.5. Caractéristiques morphométriques du sous bassin	4
I.5.1. La surface	4
I.5.2. Le périmètre	4
I.5.3. La forme.....	5
I.5.4. Le rectangle équivalent	6
I.5.5. Altimétrie et courbe hypsométrique	6
I.5.6. Caractéristiques des altitudes	8
I.6. Indices de pente	8
I.6.1. Indice de pente globale (I_g)	8
I.6.2. Dénivelée spécifique (D_S).....	9
I.7. Les caractéristiques du réseau hydrographique	10
I.7.1. Densité de drainage (D_d)	10
I.7.2. Temps de concentration (T_C)	11
I.7.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (v_e)	11
I.7.4. Densité hydrographique (F).....	11
I.8. Conclusion partielle	12

Chapitre II : Le phénomène de l'érosion

II.1. Introduction	14
II.2. Facteurs influençant l'érosion	15
II.2.1. Influence du climat	15
II.2.2. Influence du sol	15
II.2.3. Influence des facteurs topographiques	15
II.2.4. Influence des facteurs géologiques	15
II.2.5. Influence du couvert végétal	15
II.2.6. Les labours inadaptés	16
II.3. Types d'érosion	16

II.3.1. L'érosion éolienne	16
II.3.2. L'érosion aratoire	16
II.3.3. L'érosion hydrique	17
II.4. Les enjeux de la conservation des sols dans le bassin méditerranéen	21
II.4.1. Les enjeux agricoles	21
II.4.2. Les enjeux territoriaux	21
II.4.3. Les enjeux paysagers	22
II.4.4. Les enjeux environnementaux	22
II.5. Lutte contre l'érosion hydrique	22
II.6. Conclusion partielle	23

Chapitre III : Evolution du couvert végétal et de l'érosion

III.1. Introduction	24
III.2. Méthodes d'évaluation de l'érosion	24
III.3. Le modèle RUSLE	25
III.4. Résultats et discussion	26
III.4.1. Calcul de l'érosivité des pluies (R)	26
III.4.2. Détermination du facteur topographique (LS)	28
III.4.3. Détermination du facteur d'érodibilité des sols (K)	29
III.4.4. Détermination du facteur de pratiques anti-érosives (P)	31
III.4.5. Occupation des sols (C)	32
III.4.5.1. Principe de la télédétection	32
III.4.5.2. Définition du NDVI	33
III.4.5.3. Etapes de détermination de l'indice NDVI	33
III.4.6. Taux annuel des pertes en sol (A)	41
III.5. Evolution du couvert végétal et de l'érosion (1995 – 2015)	44
III.6. Conclusion partielle	47
Conclusion générale	48

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

L'érosion du sol est un phénomène naturel ou géologique dans lequel les particules du sol sont détachées et déplacées par plusieurs principaux facteurs qui sont : la pluie, la végétation, le sol, la géomorphologie (pentes en particulier) et les impacts de l'utilisation des sols par l'homme.

La détermination des zones à risque érosif, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et ses caractéristiques sont des tâches complexes, mais pouvant être résolues avec l'intégration de nouvelles méthodes, telles que, la télédétection, le système d'information géographique (SIG) et les enquêtes sur le terrain.

L'un des facteurs influençant l'érosion des sols est le couvert végétal. Ce facteur peut être estimé à partir de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI), déterminé de l'imagerie satellitaire. En fait, la valeur de ce facteur dépend de la nature de la végétation et du pourcentage du couvert végétal.

Le but de cette étude est de suivre l'évolution du couvert végétal et de l'érosion du sous bassin de l'Oued Soummam en utilisant l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE) et la télédétection.

Cette étude est structurée en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre portera sur la présentation de la zone d'étude.
- Le deuxième chapitre donnera un aperçu sur l'érosion et son impact
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de l'évolution du couvert végétal et du risque érosif dans ledit sous bassin.

En fin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus et quelques perspectives utiles pour les travaux futurs.

Chapitre I

Description du sous bassin Oued Soummam

Chapitre I : Description du sous bassin Oued Soummam

I.1. Introduction

Un bassin versant est un territoire dont les limites sont naturelles, dans lequel les écoulements des eaux convergent vers un seul point appelé l'exutoire. Du point de vue hydrologique, cet espace est considéré comme étant isolé, parce que toutes les eaux tombent à l'intérieur des limites du bassin versant. Peu importe l'endroit, elles aboutissent au même exutoire du cours d'eau principal qui draine ce bassin versant.

Le but de ce chapitre est de consentir à une visualisation générale des principales caractéristiques de bassin versant de l'Oued Soummam. Nous allons dépeindre le bassin versant entièrement en le situant géographiquement, en précisant son hydrographie et ses caractéristiques physiographiques et morphométriques.

I.2. Situation géographique du sous bassin

La basse Soummam ou l'Oued Soummam (1510) est une partie intégrante du grand bassin versant de la Soummam qui est considérée parmi l'un des 17 grands bassins versants hydrologiques de l'Algérie. Il porte le N°15 d'après la codification de l'ANRH (Fig. I.1). Il appartient administrativement à la wilaya de Béjaia [1].

La basse Soummam (Sous bassin N° 10) se situe à la partie Nord-Est de l'Algérie entre les méridiens 5.09° Est et 4.57° Ouest et le parallèle 36.76° Nord et 36.48° Sud. La basse Soummam est la partie comprise entre Sidi Aich et l'embouchure et couvre les territoires de 05 Daïras : Sidi Aich à l'Ouest, Adekar au Nord, les Daïras d'Amizour et Tichy du Sud au Sud- Est, la Daïra de Bejaia à la mer. La plaine alluviale de la basse Soummam s'étend sur une longueur d'environ 45 km et sa largeur est comprise entre 700 m et 2000 m.

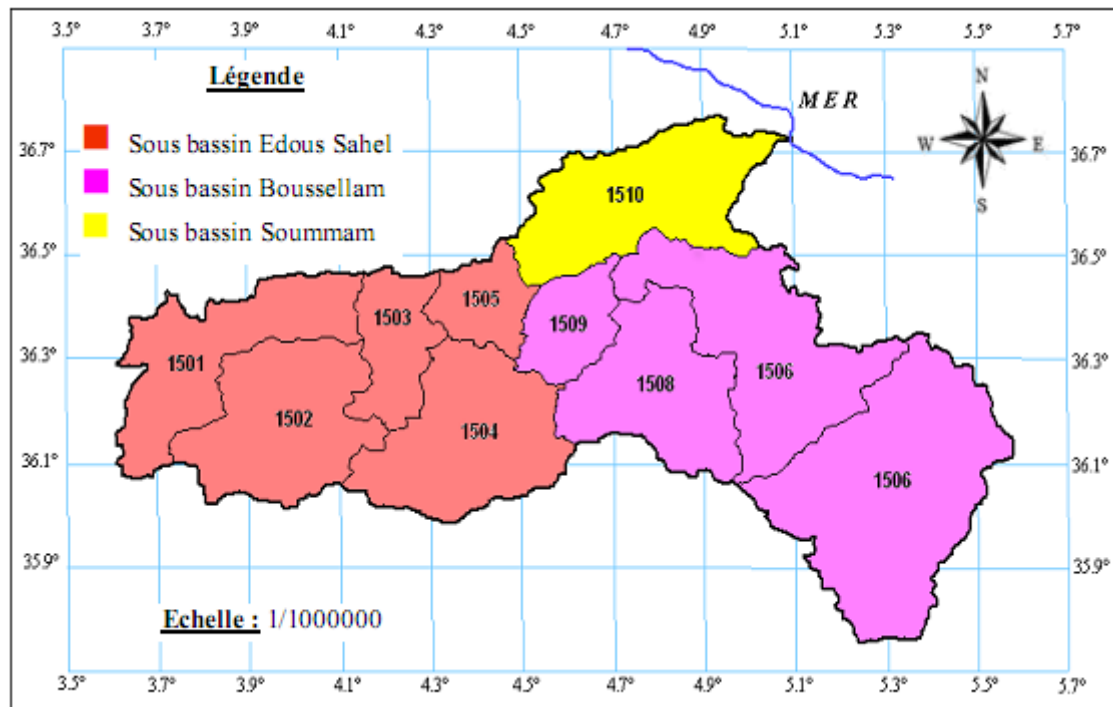


Figure I.1 : Les grands sous bassins versants de la Soummam [1]

I.3. Limite géographique et géomorphologique

Le bassin versant de la basse Soummam est limité par [1]:

- **Au nord** : par un axe orographique orienté Est-Ouest, constitué par les monts d'Akfadou et de Taourirt Ighil à l'Ouest, s'étendant par les montagnes Aghbalou et Gouraya à l'Est.
- **Au sud** : par un second axe orographique disposé parallèlement au premier, constitué par les monts des Babors occidentaux, qui se prolongent plus à l'Est par ceux des Babors orientaux.
- **A l'ouest** : par l'étranglement de la vallée au niveau du seuil hydrogéologique de Sidi Aich.
- **A l'est** : par la mer méditerranéenne.

I.4. Réseau hydrographique de la basse Soummam

Le réseau hydrographique est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels (rivières) ou artificiels (réseaux) drainant un bassin versant.

Selon la répartition du réseau hydrographique du bassin versant de la basse Soummam, on distingue :

Une rivière principale à écoulement permanent, appelée l'Oued Soummam et six affluents, qui se répartissent comme suit :

- Rive gauche : Oued R'mila, Oued El Kseur, Oued Ghir.
- Rive droite : Oued Amassine, Oued Amizour, Oued Tiachiche.

Ces principaux affluents sont caractérisés par un écoulement intermittent. Outre ces affluents de l'Oued de Soummam, il y'a aussi deux Oueds importants qui drainent les plaines côtières de Béjaïa ; Oued Sghir et Oued Djebira.

Le réseau hydrographique du sous bassin Oued Soummam tracé par par ArcGis est représenté sur la figure (I.2).

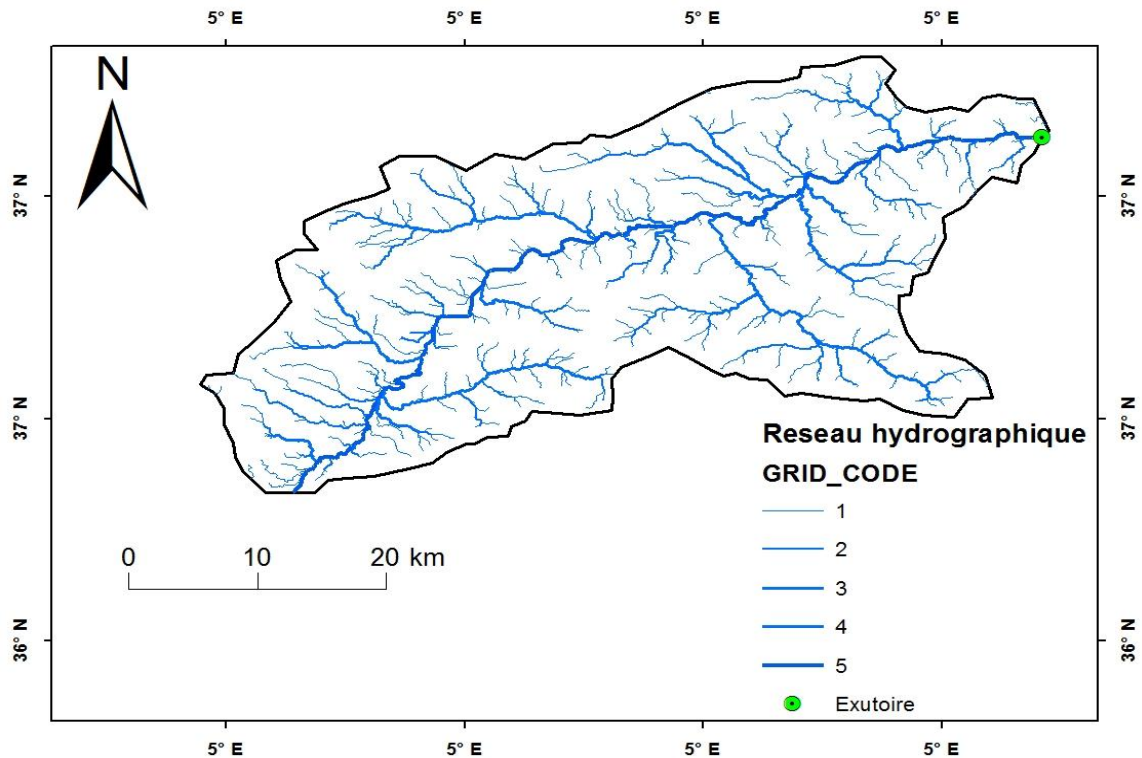


Figure I.2 : Réseau hydrographique du sous bassin Oued Soummam

I.5. Caractéristiques morphométriques du sous bassin

Le bassin versant de la basse Soummam s'appuie sur divers paramètres qui jouent un rôle très important dans l'aspect hydrologique, tel que le relief, la forme, l'altitude, la pente, ...

I.5.1. La surface (A)

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits vont être en partie reliés à sa surface. La surface du bassin versant peut-être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciels ArcGis, Global Mapper, MapInfo ...). La surface du sous bassin versant de l'Oued Soummam est de 1062.21117 km².

I.5.2. Le périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est exprimé en *km*. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant.

Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre du sous bassin d'étude est de 173,631829 km.

1.5.3. La forme

L'indice le plus utilisé pour déterminer la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de *Gravelius* (K_G). La forme d'un bassin a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau, et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin (P) à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Cet indice est donnée par la relation suivante (Roche, 1963) [1-3] :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec,

K_G : Indice de compacité de *Gravelius*

P : Périmètre de sous bassin versant en (km)

A : surface de sous bassin en (km²)

- Si K_G est proche de 1, le bassin versant est de forme quasiment circulaire
- Si K_G est supérieur à 1, le bassin versant est de forme allongée.

Pour notre cas, $A = 1062.21117 \text{ km}^2$; $P = 173,631829 \text{ km}$

$K_G \Rightarrow K_G = 1.49 \Rightarrow$ Notre bassin versant est de forme allongée (Fig. I.3).

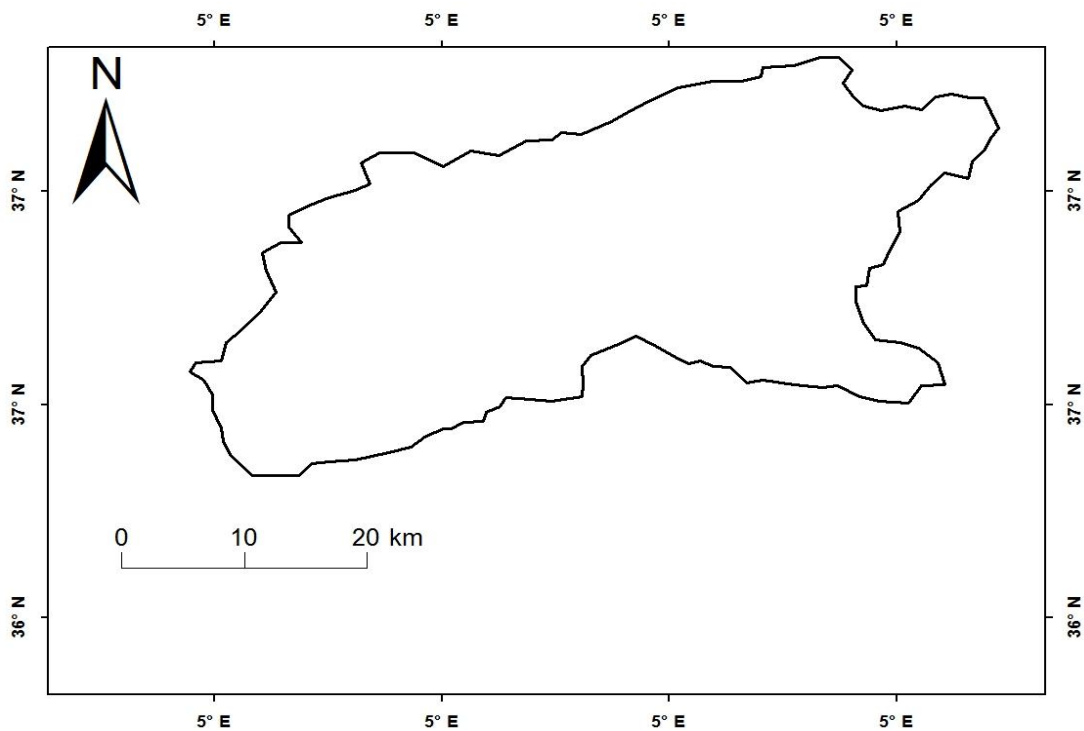


Figure I.3 : Forme allongée du sous bassin l'Oued Soummam

1.5.4. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent permet de rendre une forme quelconque d'un bassin versant à une forme rectangle ayant le même périmètre, la même superficie et le même indice de Gravelius (K_G) afin de comparer les bassins entre eux à propos de la différence de leurs paramètres géométriques sur l'écoulement. Il s'exprime par la combinaison de ces relations.

$$K_G = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$A = L * l$$

$$P = 2 (L + l)$$

Sachant que :

L : la longueur du rectangle équivalent (Km) ; l : largeur du rectangle équivalent (Km)

Les formules empiriques :

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

$$l = \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right] \frac{K_G \sqrt{A}}{1.128}$$

Les dimensions du rectangle équivalent sont :

$$L_r = 65.0762 \text{ km} ; \quad l_r = 21.7397 \text{ km}$$

1.5.5. Altimétrie et courbe hypsométrique

Le relief influe sur l'écoulement par divers paramètres hydrométéorologiques variant avec l'altitude (précipitations, température,...) et la morphologie du bassin. Par ailleurs, la pente influe sur la vitesse d'écoulement [3].

Les fréquences altimétriques sont représentées par la courbe hypsométrique et celle des altitudes (Figs. I.4 et I.5).

La courbe hypsométrique est la répartition de la surface du bassin versant ou le pourcentage de surface en fonction de son altitude. Elle est tracée à partir du cumul de l'histogramme d'altitudes. Cette courbe permet de faire des recherches sur le niveau de maturité d'un cours d'eau.

Son but est de comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elle permet aussi de calculer l'altitude moyenne, l'altitude la plus fréquente et l'indice de pente global du bassin [4].

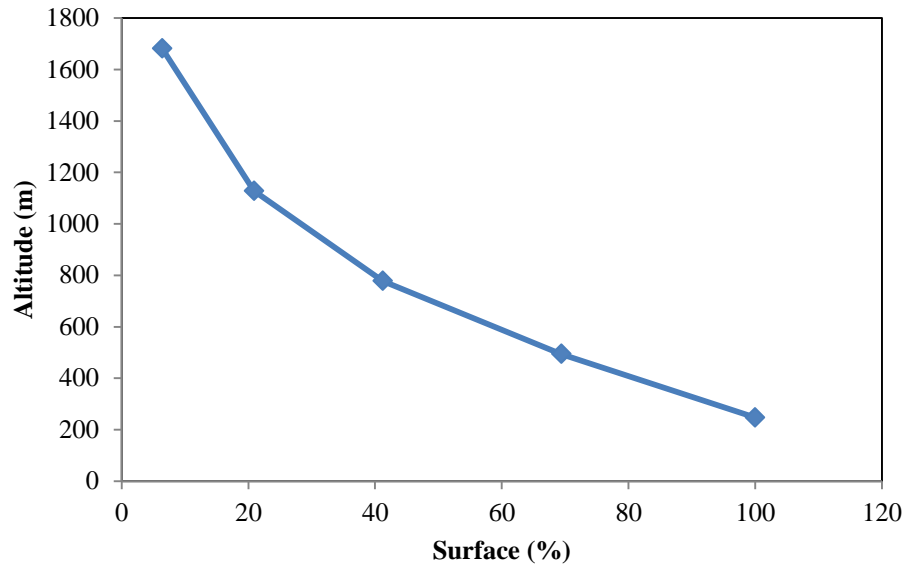


Figure I.4: Courbe hypsométrique de la basse Soummam

D'après la courbe hypsométrique, on distingue trois zones :

- La première zone avec une pente relativement forte due aux reliefs
- La deuxième zone avec une pente douce due aux piémonts
- La troisième zone à faible pente relative à la dépression.

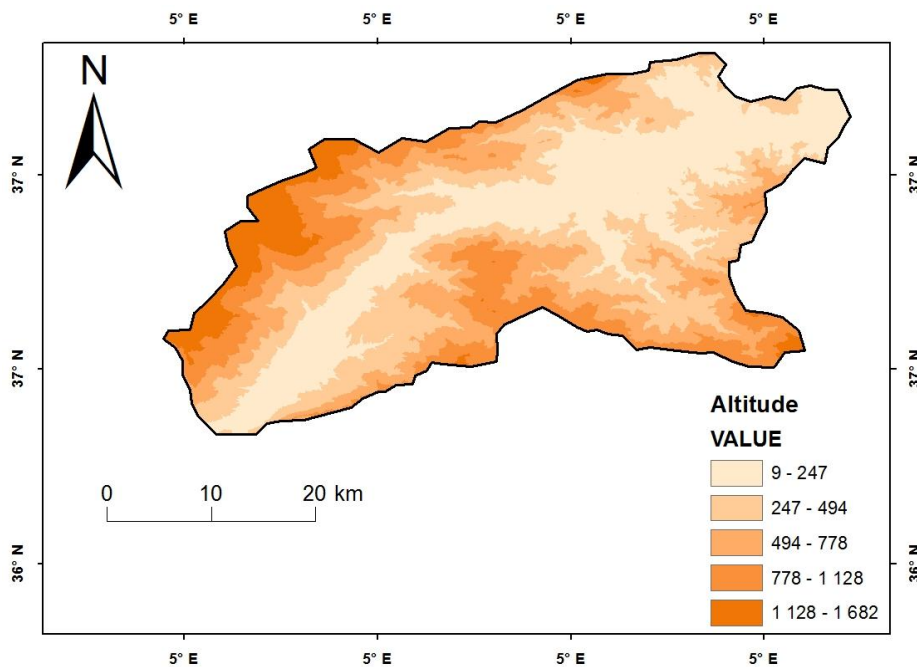


Figure I.5: Carte des tranches d'altitude de la basse Soummam

Cette représentation montre que la classe d'altitude la plus élevée (1128 - 1682 m) ne représente que 67.95 Km², soit environ 6.39 % de la surface totale du bassin. 30.6 % de la surface du

bassin se trouve entre 9 et 247 m d'altitude, 28.15 % entre 247 et 494 m, 20.35 % entre 494 et 778 m d'altitude.

1.5.6. Caractéristiques des altitudes

1) Altitudes maximale et minimale : ce sont les points culminants et les plus bas au niveau de l'exutoire du bassin versant. Elles sont obtenues directement à partir de la courbe hypsométrique.

$$H_{min} = 9 \text{ m}$$

$$H_{max} = 1682 \text{ m}$$

2) Altitude moyenne : L'altitude moyenne est lue directement de la courbe hypsométrique. Elle correspond au rapport du volume montagneux ($V = \sum H_i \cdot A$) du bassin versant par sa surface totale.

Elle s'exprime par la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i H_i}{A_t}$$

Avec,

H_i : Altitude moyenne de chaque classe en mètre

A_i : Surface partielle des tranches d'altitude en km^2

A_t : Surface totale sous bassin en km^2 .

$$\Rightarrow H_{moy} = 789.24 \text{ m}$$

I.6. Indice de pente globale (I_g)

1.6. Indices de pente

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications. On trouve généralement :

1.6.1. Indice de pente globale (I_g)

L'indice de pente globale est déterminé à partir de la courbe hypsométrique en éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90 % de l'aire du sous bassin. Cet indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = D / L_r$$

Avec :

D : Dénivelée simple en m ; **L_r** : Longueur du rectangle équivalent (km).

A partir de la courbe hypsométrique, on obtient :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1700 - 290 = 1410 \text{ m}$$

$$\Rightarrow I_g = 0.0292$$

$I_g < 0.002$ relief très faible

$0.002 < I_g < 0.005$ relief faible

$0.005 < I_g < 0.010$relief assez faible

$0.010 < I_g < 0.020$ relief modéré

$0.020 < I_g < 0.050$ relief assez fort

D'après la classification du relief par L'ORSTOM (*Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer*), I_g étant compris entre 20 et 50 m/km, le sous bassin versant présente un relief assez fort.

1.6.2. Dénivelée spécifique (D_s)

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification d'ORSTOM (Tableau I.1). L'indice I_g décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité d'introduire le paramètre (D_s).

$$D_s = I_g * [A]^{1/2} \Rightarrow D_s = 703.69 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM, la dénivelée spécifique du BV se trouve dans la classe R7, caractérisée par un relief très fort.

Tableau I.1 : Classification de l'ORSTOM [1,4]

R1	Relief très faible	$05 < D_s < 10 \text{ m}$
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25 \text{ m}$
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50 \text{ m}$
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100 \text{ m}$
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250 \text{ m}$
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500 \text{ m}$
R7	Relief très fort	$500 < D_s < 750 \text{ m}$

Le bassin versant de l'Oued Soummam présente la carte des pentes ci-après.

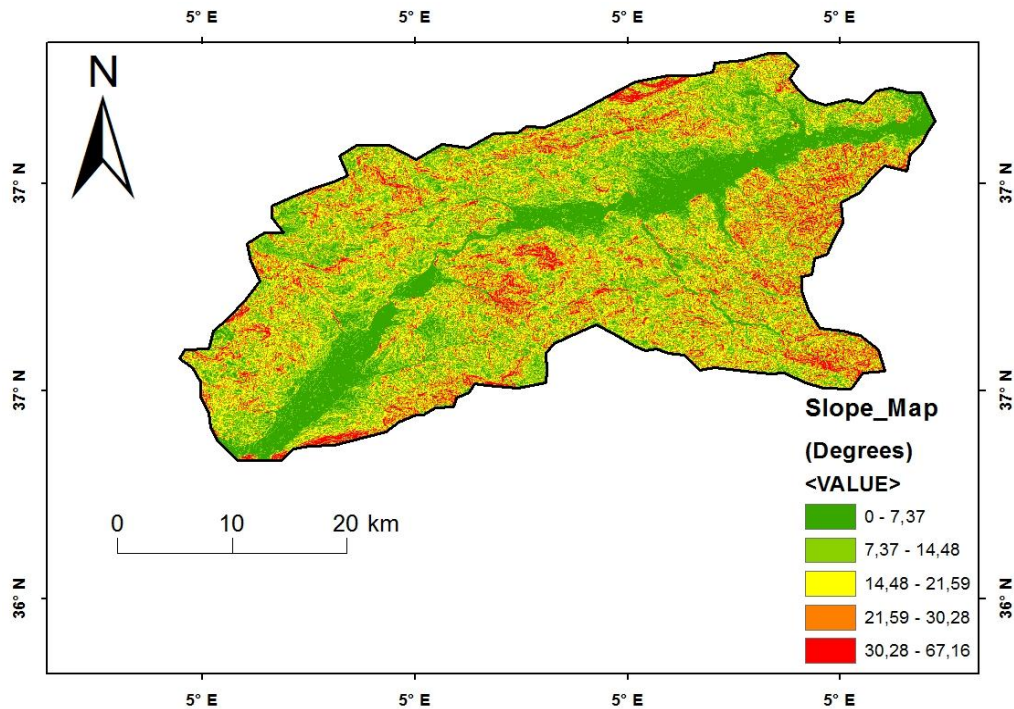


Figure I.6: Carte des pentes du bassin

La carte de pente du bassin Oued Soummam montre que 77.085 % de la surface totale du bassin ont des pentes inférieures à 21.59°, 16.71 % entre 21.59° et 30.28° et 6.2 % entre 30.28° et 65.16°.

I.7. Les caractéristiques du réseau hydrographique

I.7.1. Densité de drainage (D_d)

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité, et se trouve centralisé ; ces valeurs dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon *Shum*, la valeur inverse de la densité de drainage, ($C = 1/D_d$), s'appelle "*constante de stabilité du cours d'eau*". Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau). La densité de drainage est définie par :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \quad (\text{km/km}^2)$$

Où :

L_i : Longueur des talwegs en km $\Rightarrow D_d = 0.877$ (km/km²).

I.7.2. Temps de concentration (T_c)

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe dans le point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Il est exprimé par la formule de *Giandotti* ci-après.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.54 * L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

L_p = Longueur du talweg principal (km)

$$\Rightarrow T_c = 10.33 \text{ h}$$

I.7.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (v_e)

Elle est donnée par l'expression suivante.

$$v_e = \frac{L_p}{T_c} \dots \dots (m/s)$$

$$v_e = 0.64 \text{ m/s}$$

I.7.4. Densité hydrographique (F)

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

Elle est donnée par la relation:

$$F = \sum \frac{N_i}{A} \dots \dots (Km^{-2})$$

N_i : nombre de cours d'eau = 1210

$$\Rightarrow F = 1.1353 \text{ km}^{-2}$$

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales du bassin versant de l'Oued Soummam.

Tableau I.2: Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Aire	A	km ²	1062.2
Périmètre	P	km	173.63
Indice de compacité	K _G	/	1.49
Altitude maximale	H _{max}	m	1682
Altitude minimale	H _{min}	m	9
Altitude moyenne	H _{moy}	m	789.24
Indice de pente globale	I _g	%	0.0292
Largeur du rectangle équivalent	l _r	km	21.99
Longueur du rectangle équivalent	L _r	km	188.72
Dénivelée	D	m	1410
Dénivelée spécifique	D _s	m	703.69
Altitude à 5%	H _{5%}	m	1700
Altitude à 95%	H _{95%}	m	290
Densité de drainage totale	D _d	km/km ²	0.877
Temps de concentration	T _c	heures	10.33
Classification de Horton	Ordre	/	7
Densité hydrographique	F	1/km ²	1.1353
Vitesse d'écoulement de l'eau	(v _e)	m/s	0.64

I.8. Conclusion partielle

Les caractéristiques du bassin versant de la basse Soummam nous a permis de tirer les synthèses suivantes :

- Le bassin versant de la basse Soummam a une forme allongée et très irrégulière. Il est considéré comme la région la plus arrosée en Algérie. Lorsque ce bassin n'est pas bien entretenu, donc il subit de fortes probabilités d'inondation.
- Le climat de la basse Soummam est méditerranéen.

- Le réseau hydrographique est un réseau très développé et d'après la répartition de la basse Soummam on distingue que l'Oued Soummam contient six affluents qui sont caractérisés par un écoulement permanent et intermittent.

Chapitre II

Le phénomène de l'érosion

Chapitre II : Le phénomène de l'érosion

II.1. Introduction

L'érosion du sol est un phénomène naturel ou géologique dans lequel les particules du sol sont détachées et déplacées par plusieurs principaux facteurs qui sont : la pluie, la végétation, le sol, la géomorphologie (pentes en particulier) et les impacts de l'utilisation des sols par l'homme. L'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion en nappe ou en rigoles et l'érosion linéaire ou racinaire, et elle a de graves conséquences sur notre environnement, sur nos activités et peut causer des dommages importants.

Les mesures de perte en sols sont exprimées localement comme la masse nette du sol perdu pendant une certaine période pour une surface donnée (échelle parcellaire). La production en sédiment, quant à elle, est définie comme la masse de sédiment émise par un bassin versant de taille quelconque pendant une période donnée.

L'érosion du sol, soit le mouvement du sol d'un lieu vers un autre, survient sous l'effet de trois principaux phénomènes [5-8].

- Elle se produit naturellement sur les terres agricoles par l'action du vent et de l'eau, et peut être accélérée par certaines activités agricoles (lesjachères, les cultures en rang).
- Elle est aussi provoquée directement par la méthode de travail du sol, qui entraîne un mouvement progressif du sol vers le bas des pentes, donnant ainsi lieu à une perte de sol au sommet
- Accumulation à la base des pentes.

L'érosion des sols est un terme commun qui est souvent confondu avec la dégradation des sols dans son ensemble, mais, qui en fait ne concerne que les pertes absolues de sol en termes de couche arable et d'éléments nutritifs. C'est l'effet le plus visible de la dégradation des sols, mais cela ne couvre pas l'ensemble de ses aspects. L'érosion des sols est un processus naturel dans les zones montagneuses, mais elle est souvent amplifiée par de mauvaises pratiques de gestion [9,10].

II.2. Facteurs influençant l'érosion

En plus des factures géologiques et topographiques, plusieurs agents influent directement ou indirectement sur le processus de l'érosion des bassins versants. La pluie torrentielle est l'agent principal du phénomène, l'irrégularité des pluies est liée à des intensités très élevées qui peuvent engendrer des pertes en sols considérables. La multiplicité des factures qui causent l'érosion exigent une prise de connaissance de leurs effets directs sur le processus de l'érosion [11,15].

II.2.1. Influence du climat

Le climat est un facteur important qui influe sur l'érosion hydrique par la nature des précipitations et des températures. Un climat agressif comme celui des régions arides et semi-arides est caractérisé par des pluies de grandes intensités pendant un temps court, et de longues périodes de sécheresses. Les deux éléments accentuent remarquablement l'érosion, les températures élevées permettent d'assécher et de fissurer le sol qui augmente sa vulnérabilité à l'érosion et les fortes pluies viennent avec des énergies cinétiques élevées pour détacher et emporter un maximum de sol déjà très faible.

II.2.2. Influence du sol

Il est caractérisé par son type, sa texture et son état. En saison sèche, l'humidité du sol est presque nulle, ce qui favorise l'érosion hydrique lors des premières pluies. Il influe de même sur le ruissellement par ses capacités d'infiltration et de rétention.

II.2.3. Influence des facteurs topographiques

Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, le relief, la densité de drainage, l'importance des vallées et des plaines d'inondation, l'orientation et la taille du bassin. Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont généralement à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la géologie des sols et la protection du couvert végétal.

II.2.4. Influence des facteurs géologiques

Ce sont les facteurs relatifs aux roches de surfaces. Si les roches sont exposées à la pluie, au vent et aux forces de gravité, il peut y avoir une désagrégation de la répartition granulométrique des sols, leur perméabilité, la présence de certains éléments chimiques et matières organiques conditionnent l'érodibilité des sols.

II.2.5. Influence du couvert végétal

Un bon couvert végétal limite l'érosion en dissipant l'énergie de pluie. Il favorise l'infiltration et s'oppose à toute forme d'érosion.

II.2.6. Les labours inadaptés

Le travail du sol présente deux effets antagonistes vis-à-vis de l'érosion hydrique. D'une part, il limite l'érosion en augmentant la perméabilité et la capacité de rétention du sol, et d'autre part, il favorise en diminuant la cohésion et la stabilité structurelle du sol pour les faibles pluies (ou la première phase des grosses pluies). Un labour bien fait limite considérablement le phénomène de l'érosion hydrique.

II.3. Types d'érosion

II.3.1. L'érosion éolienne

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire sub -horizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou se dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière [11,15].

L'érosion éolienne prend de l'importance en Afrique de l'Ouest dans les zones tropicales sèches, là où la pluviosité annuelle est inférieure à 600 mm, où la saison sèche s'étend sur plus de six mois et où la végétation de type steppique laisse de larges plaques de sol dénudé. Ailleurs, elle peut aussi se développer dans des conditions de préparation du sol qui amènent une pulvérisation importante des matériaux superficiels secs.

II.3.2. L'érosion aratoire

Ce phénomène d'érosion n'est pas dû à l'intervention de l'eau, c'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose soit en bas de parcelle, soit en talus.

II.3.2.1. Facteurs d'érosion mécanique

Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont :

- Le type d'outil
- La fréquence des passages
- La pente, plus la pente est forte plus les mottes de terres détachées, roulent vers le bas.

C'est ce qui explique que les sommets des collines sont souvent décapés.

II.3.2.2. L'orientation du travail du sol

Celui-ci peut être orienté soit en courbes de niveaux, soit du haut de la parcelle vers le bas (Ce qui est le cas pour les tracteurs travaillant sur des pentes supérieures à 15 %), soit du bas de la parcelle vers le haut (pour le travail manuel notamment). Il est très rare que la terre soit remontée par les outils. Par contre, il arrive qu'en montagne et dans les zones où la terre est rare, que l'on récupère mécaniquement ou dans des petits paniers de la terre dans la plaine pour la remonter dans la montagne, c'est le cas sur les vignes. On constate aussi que l'aller et le retour des outils peuvent réduire considérablement la vitesse du décapage par l'érosion mécanique sèche [12].

II.3.3. L'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, qui menace particulièrement les potentialités en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt. Donc, les trois étapes par lesquelles passe l'érosion sont le détachement, le transport et la sédimentation. Cependant, il est à signaler que la pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées. L'érosion hydrique du sol peut être définie comme le détachement et la translocation des particules de sol en le déplaçant par l'eau à partir de leur emplacement d'origine à de nouvelles zones de dépôt. L'érosion des sols est communément reconnue par des incisions ou des sédimentations qui se forment à la surface de la terre. L'érosion hydrique du sol peut se définir comme étant le phénomène par lequel le sol perd, sous l'action de l'eau, certaines ou toutes ses particules [10,15].

II.3.3.1. Mécanisme de l'érosion hydrique

Les principaux mécanismes conduisant à l'érosion hydrique sont :

a) Le détachement

a.1) L'humectation par l'effet de l'impact des gouttes de pluies

Les quatre processus qui peuvent être identifiés comme responsables de la désagrégation sont :

- L'éclatement, correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation (Fig. II.1). L'intensité de l'éclatement dépend entre autres, du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité.

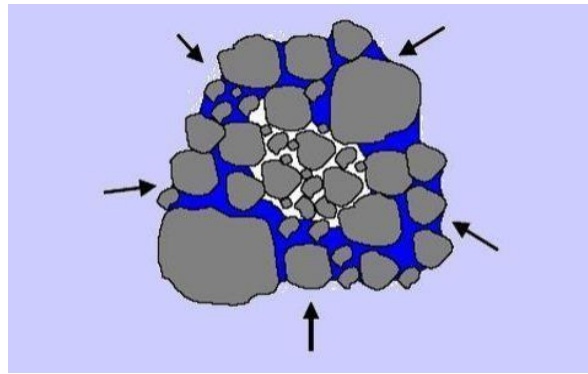


Figure II.1 : Eclatement des agrégats

- Le gonflement différentiel. Ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats. L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols.
- La dispersion physico-chimique. Elle correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation. Elle dépend de la taille et la valence des cations (particulièrement du sodium) pouvant lier les charges négatives dans le sol.
- La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie (*Détachement par splash*) (Fig. II.2). L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats et surtout détacher les particules de leur surface.

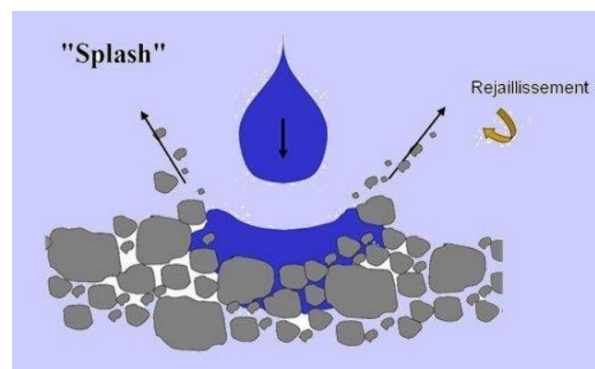


Figure II.2 : Détachement par splash

a.2) Le ruissellement

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de sols. Ce refus du sol d'absorber les eaux apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe.

Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents.

Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui

se combinent dans le temps et dans l'espace pouvant donner naissance à une érosion diffuse et/ou à une érosion concentrée.

Il est donc à noter qu'il y a détachement par ruissellement (Fig. II.3) lorsque la force de friction de l'eau sur les particules du sol est supérieure à la résistance du sol au cisaillement comme schématisé sur la figure ci-après.

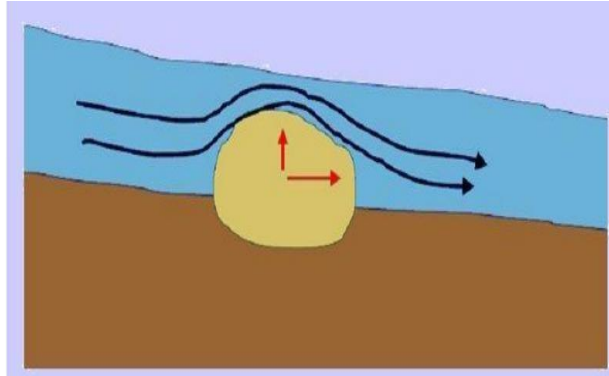


Figure II 3 : Détachement par ruissellement

b) Le transport

Il est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie (*effet splash*) et aux eaux de ruissellement. Ainsi, le transport est assuré par ces eaux. Cependant, il est à signaler que le mode de transport par effet splash est généralement négligeable sauf sur pente forte. Alors que les eaux de ruissellement sont les plus responsables du transport des particules du sol détachées.

c) La sédimentation

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval, en fonction de:

- leur dimension
- leur densité
- la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau. Les particules se déposent dans l'ordre suivant : Sable - Sable fin - Limon.

Les argiles et les colloïdes sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où ils se déposent soit après évaporation de l'eau, soit après floculation.

II.3.3.2. Exemples de dégâts causés par l'érosion hydrique

a) Sur site

- Pertes en terre et en éléments nutritifs (Fig. II.4) : les griffes, fines rigoles formées par l'eau, particulièrement en haut des pentes, sur le bord des pistes ou dans les champs

sillonnés par les labours, elles deviennent des ravines par élargissement dû à la concentration de ruissellement excessif.

- Pertes d'engrais et de matière organique.
- Destruction de la structure du sol.
- L'érosion des rives (Fig. II.5) entraîne non seulement le recul des rives des cours d'eau, mais également une augmentation de la charge particulaire des eaux du fleuve [10].



Figure II .4 : Décapage de la surface de sols



Figure II.5: Érosion des berges par le cours d'eau d'une rivière

a) Hors site

- Charger les rivières en matières en suspension causant ainsi une augmentation de la turbidité des eaux qui modifie l'équilibre trophique.
- Inondations boueuses.
- Ensablement des lits des rivières.



Figure II.6: Ensablement des lits de rivière

II.4. Les enjeux de la conservation des sols dans le bassin méditerranéen [9,13]

Du fait que la dégradation des sols affecte leur capacité à remplir leurs fonctions écologiques et les usages socio-économiques qui en dépendent, leur conservation est un enjeu politique et social. Les mesures susceptibles d'être prises pour répondre à cet enjeu sont très diverses.

II.4.1. Les enjeux agricoles

L'activité agricole est d'une importance économique majeure dans la plupart des pays méditerranéens, et s'accompagne d'une importante industrie agro-alimentaire, en amont et en aval. Elle constitue ainsi une source d'emplois considérable, surtout dans les régions où elle reste, encore aujourd'hui, l'activité la plus importante. La conservation du potentiel agricole méditerranéen constitue donc un enjeu pour le maintien de la structure sociale et économique des sociétés.

II.4.2. Les enjeux territoriaux

L'équilibre entre les activités économiques des différentes régions d'un pays dépend, entre autre, de l'état de son économie agricole et rurale. La dégradation des sols peut donc devenir la cause de déséquilibres territoriaux importants. La dégradation des terres marginales peut mener à leur abandon, et à la migration de populations rurales vers les villes, ce qui pose de graves problèmes économiques et sociaux en termes d'aménagement du territoire et d'emplois. Dans le contexte d'une croissance démographique soutenue des pays du Sud et de l'Est méditerranéen, il est nécessaire de maintenir des espaces ruraux capables de faire vivre une population importante dans des conditions économiques et sociales satisfaisantes.

II.4.3. Les enjeux paysagers

L'agriculture joue un rôle fondamental dans la gestion des ressources naturelles, des espaces et des paysages méditerranéens. Or, l'abandon de certains territoires très anciennement aménagés (terrasses, systèmes de gestion des eaux) peut mener, à leur dégradation irréversible. Dans ces cas, la dégradation des sols est liée à la disparition de certains caractères typiques des espaces méditerranéens.

II.4.4. Les enjeux environnementaux

Les sols constituent un compartiment fondamental des écosystèmes : leur dégradation a donc, en général, des impacts majeurs sur tous les autres compartiments, et porte gravement atteinte à la composition et à la diversité de la flore et de la faune, ainsi qu'aux cycles de l'eau et des nutriments. Le maintien de la diversité biologique du milieu méditerranéen passe par l'intégration de considérations écologiques dans la planification du développement agricole et de l'urbanisation. Il faut en particulier veiller à ce que l'artificialisation du territoire ne vienne pas détruire de façon irréversible des écosystèmes précieux.

II.5. Lutte contre l'érosion hydrique

L'adoption de certaines pratiques de conservation, comme les cultures intercalaires, la mise en place de bassins de rétention d'eau et la construction de terrasses peuvent permettre de réduire l'érosion des sols. Cependant, ces mesures ne peuvent être efficaces que si on détermine les régions exposées aux risques d'érosion des sols. Une approche quantitative est donc nécessaire pour mieux définir ces zones aux fins de l'amélioration de la gestion des terres. L'élaboration et le perfectionnement de méthodes d'analyse des sources et du suivi des sédiments sont importants pour déterminer les zones dans lesquelles l'érosion des sols et la production de sédiments sont critiques [12,13].

Pour être efficaces, ces moyens de lutte doivent se situer dans deux zones distinctes :

- Une zone émettrice de ruissellement,
- Une zone sensible accumulant les précipitations.

Deux aspects sont donc à prendre en compte :

- L'aspect agronomique (préventif) qui englobe les techniques culturales: Couverture du sol, Structure du sol.
- L'aspect hydraulique (curatif) : aménagements divers (Banquettes, Terrasses ...).

II.6. Conclusion partielle

Le phénomène d'érosion est une partie de l'évolution géologique du paysage sous l'effet de l'eau, du vent. L'érosion de la surface du globe s'est poursuivie à travers les âges. L'entraînement, le transport et le départ des matériaux sont des phénomènes naturels visibles en tout temps et tout lieu. Les agents de l'érosion considérés comme les plus efficaces sont la pluie, les écoulements et le vent. L'action des vagues, du gel et des glaciers est limitée à des régions d'étendue restreinte, mais elle est importante dans les zones côtières et dans les régions glaciaires. Le phénomène de l'érosion hydrique commence avec l'impact de la goutte de pluie initiale. Cela occasionne de nombreux dégâts environnementaux et aura de grosses répercussions sur nos activités.

Chapitre III

Evolution du couvert végétal et de l'érosion

Chapitre III: Evolution du couvert végétal et de l'érosion

III.1. Introduction

La dégradation des sols se définit comme étant un processus qui réduit le potentiel de production des sols ou la qualité des ressources naturelles. L'érosion hydrique constitue le principal facteur de la dégradation des sols.

La détection des zones érodées, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et leur caractéristiques, sont des tâches complexes mais pouvant 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-spatiaux, tels que les systèmes d'information géographique (SIG).

Ce chapitre a pour but de décrire et d'appliquer l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE) afin d'estimer les pertes en sols sur le bassin versant de l'Oued Soummam, et l'utilisation de la télédétection pour suivre l'évolution du couvert végétal.

III.2. Méthodes d'évaluation de l'érosion

Parmi les méthodes les plus utilisées dans l'estimation du taux d'érosion des sols, on trouve deux modèles. Le modèle R.U.S.L.E (Revised Universal Soil Loss Equation : *Equation Universelle Révisée des Pertes en Sol*) et le modèle de *Gravilovic* (Erosion Potential Method) [14].

Dans cette étude, nous allons nous intéresser au modèle RUSLE pour la quantification des pertes en sol au niveau du sous bassin versant de l'Oued Soummam. L'approche utilisée consisté dans un premier temps, à détecter les facteurs de déclenchement l'érosion et à les spatialiser en utilisant les images satellitaires Landsat. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisées pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. La modélisation prédictive dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion. Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrées et sont entrées dans une base de données SIG, après quoi elles seront spatialement modélisées pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage choisi.

Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre du modèle RUSLE et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation en utilisant le logiciel ArcGis. Toutes les couches ont été projetées en UTM zone 31N en utilisant le WGS 1984.

La méthodologie adoptée pour réaliser cette étude est représentée sur la figure suivante [7,15-20].

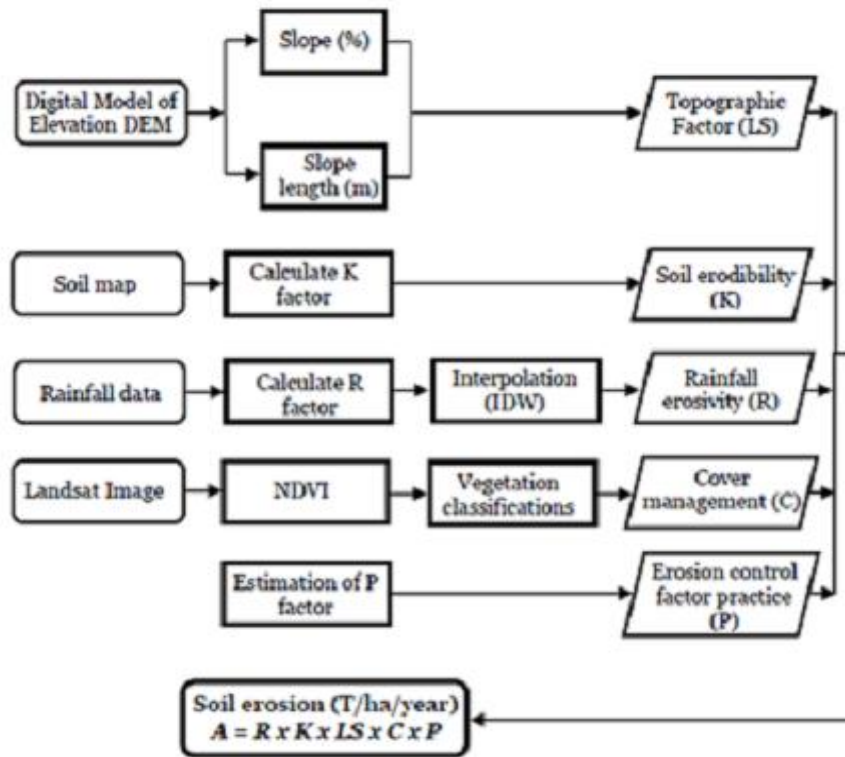


Figure III.1 : Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le sous bassin versant de l'Oued Soummam

III.3. Le modèle RUSLE

Le modèle RUSLE [17] est le développement de l'équation USLE [18]. Cette dernière est largement adaptée à toutes les échelles. Fondamentalement, elle a l'avantage de fournir des estimations à long terme sur les pertes moyennes annuelles en sol à partir de petites zones, et elle est considérée comme un "bon modèle" si le but de la modélisation est d'arriver à des estimations globales de l'érosion des sols.

L'équation RUSLE se présente sous forme d'une équation mathématique qui utilise les facteurs d'érosion comme entrées, pour estimer les pertes moyennes annuelles en sols, résultantes de l'érosion en nappe et en rigole. Cette équation ne prend pas en considération les processus d'érosion comme le détachement, le transport et le dépôt [18]. Elle conserve la même forme que l'équation utilisée dans le modèle USLE, et que se présente sous la relation suivante.

$$A = R * K * LS * C * P \dots\dots\dots (III.1)$$

Où,

A : est le taux annuel des pertes en sol (t/(ha.an))

R : est le facteur de l'érosivité des pluies, il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 min consécutives ((MJ·mm)/(ha·h·an)).

K : est l'érodibilité des sols, et dépend de la granulométrie, de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol ((t.h. ha)/(MJ.ha.mm)).

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

C : est un facteur sans dimension qui représente l'effet du couvert végétal.

P : est un facteur sans dimension, rapport qui tient compte des techniques culturales antiérosives, tel que, le labour en courbes de niveau.

L'objectif du développement de cette équation est :

- Elargissement à de nouveaux domaines de la gamme de variation du facteur (*R*).
- Développement d'un terme de susceptibilité du sol à l'érosion périodiquement variable (*K*) et des méthodes alternatives d'estimation de (*K*).
- Une nouvelle méthode pour calculer le facteur (*C*).
- Autres formules d'estimation du facteur (*LS*) en prenant en compte une topographie variable.

III.4. Résultats et discussion

III.4.1. Calcul de l'érosivité des pluies (*R*)

L'estimation du facteur (*R*) selon la formule de *Wischmeier & Smith* nécessite la connaissance des énergies cinétiques (*E_c*) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (*I₃₀*) des gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule empirique suivante [19].

$$R = k \cdot E_c \cdot I_{30} \dots\dots\dots (III.2)$$

(*k*) est un coefficient dépendant du système d'unités de mesure.

Certains auteurs (*Kalman 1967, Arnoldus 1980, et Rango & Arnoldus 1987*) ont développé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur **R** [7,9,15,16,20].

Etant donné que dans notre zone d'étude ou à sa proximité, les seules données disponibles sont les précipitations moyennes mensuelles et annuelles [4,6,16], nous allons appliquer la formule de *Rango & Arnoldus (1987)* pour estimer le facteur (*R*). Cette relation a donné de bons résultats sur beaucoup de bassin du grand Maghreb.

$$\log R = 1.74 * [\log \sum(P_i^2/P)] + 1.29 \dots\dots\dots (III.3)$$

Où :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

P_i: Précipitations moyennes mensuelles (mm).

Les résultats de calcul du coefficient d'érosivité (*R*) sont les suivants.

Tableau III.1 : Facteur *R* de l'érosivité des pluies pour chaque station pour la période (1970 -2018)
[4,6,16]

Station	Code	Longitude (d.d)	Latitude (d.d)	Z (m)	Facteur R
Akbou	151002	4.53	36.46	240	73.22
El kseur	151003	4.85	36.69	70	107.65
Tifra	151007	4.69	36.66	450	124.97
Tazmalt	150501	4.4	36.38	300	64.19
Ighil Ali	150503	4.46	36.34	1130	68.13
Boubirek	150703	4.81	36.47	500	92.83
Ain Roua	30206	5.09	36.46	1100	86.77
Djemaa Saharidj	21509	4.5	36.65	450	118.26
Tegma	20910	4.78	36.75	1000	150.54
Béjaia Aéroport	1510	5.07	36.71	2	117.02
Cap Sigli	20901	4.75	36.39	35	129.78

Les valeurs de *R* varient de 64.19 ((MJ·mm)/(ha·h·an)) comme valeur minimale au niveau de la station de Tazmalt (Ouest du bassin), et une valeur maximale de 129.78 ((MJ·mm)/(ha·h·an)) à la station Cap Sigli au Nord-est du bassin. La valeur moyenne de l'ensemble du bassin est de 103.032 ((MJ·mm)/(ha·h·an)).

Les valeurs élevées sont enregistrées au nord et à l'est du bassin, alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées à l'ouest et au sud du bassin (Fig. III.2).

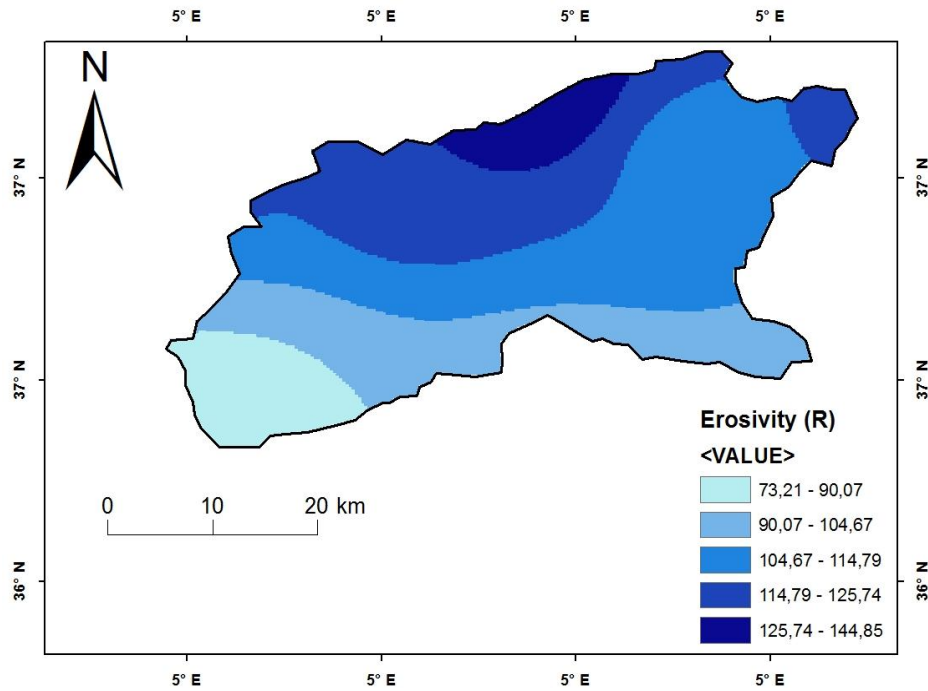


Figure III.2 : Carte du facteur (R) sur le bassin

III.4.2. Détermination du facteur topographique (LS)

Le facteur topographique regroupe les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison (S) de la pente sur l'érosion [17]. La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle.

Les équations utilisées pour le calcul du facteur (LS) sont :

- $F = (\text{Sin}(\text{"slope_degree"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\text{Sin}(\text{"slope_degree"} * 0.01745), 0.8) + 0.56))$ (III.4)

- $m = "F" / (1 + "F")$ (III.5)

- $L = \text{Power}(\text{"FlowAcc"} + 625, ("m" + 1)) - \text{Power}(\text{"FlowAcc"}, ("m" + 1)) / \text{Power}(25, ("m"+2)) * \text{Power}(22.13, "m")$ (III.6)

- $S = \text{Con}(\text{Tan}(\text{"slope_degree"} * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \text{Sin}(\text{"slope_degree"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \text{Sin}(\text{"slope_degree"} * 0.01745) - 0.5))$ (III.7)

Les valeurs obtenues pour le facteur (LS) ont été regroupées en cinq classes de valeurs (Fig. III.3). La distribution du facteur topographique (LS) montre que 99.97 % de la superficie du bassin versant fait partie de la classe 0.03 à 86.47.

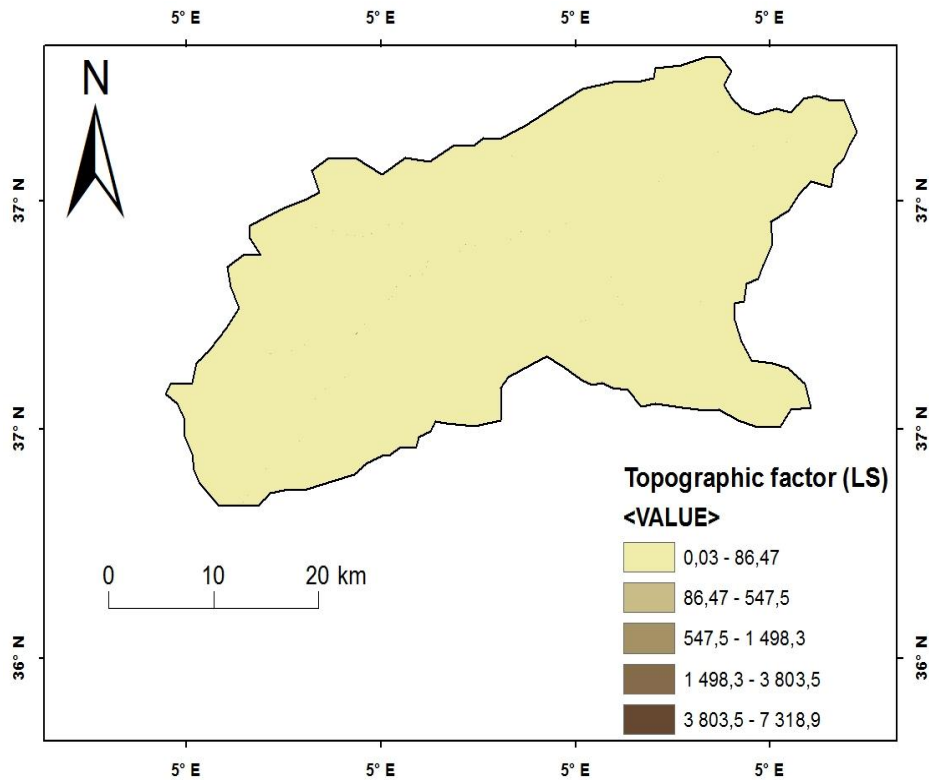


Figure III.3 : Carte du facteur (LS) sur le bassin

III.4.3. Détermination du facteur d'érodibilité des sols (K)

L'érodibilité d'un sol se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau. Le facteur d'érodibilité (**K**) d'un sol exprime sa sensibilité à l'érosion hydrique et dépend de ses propriétés intrinsèques à savoir sa texture, sa structure et sa perméabilité. Il est déterminé par la relation suivante [17,18].

$$100K = 2.1 * M^{1.14} * 10^{-4} (12 - a) + 3.25 * (b - 2) + 2.5 * (c - 3) \dots\dots\dots (III.8)$$

Avec,

$$M = (% \text{ Limon}) * (100 - \% \text{ Argile}) \dots\dots\dots (III.9)$$

a : pourcentage de matière organique ; **b** : code de la structure ; **c** : code de la perméabilité. Après le téléchargement des cartes relatives à la matière organique, au sable et à l'argile via le site (https://soilgrids.org/#!/?layer=ORCDRC_M_sl2_250m&vector=1), on calcule le paramètre (**M**) par la relation (III.9). Par la suite, on détermine les codes (**b**) et (**c**) en utilisant les diagrammes suivants [8].

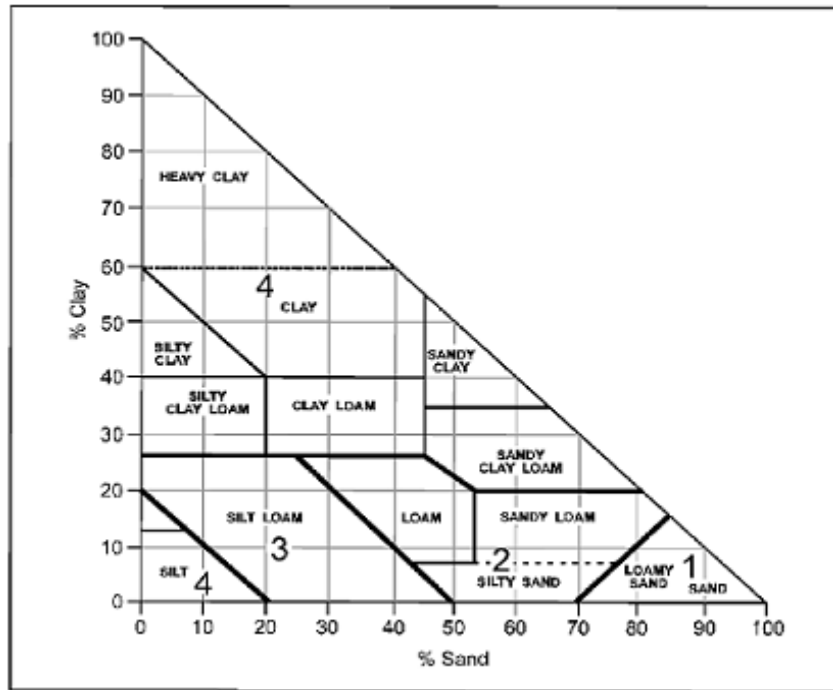


Figure III.4 : Code Structure (b)

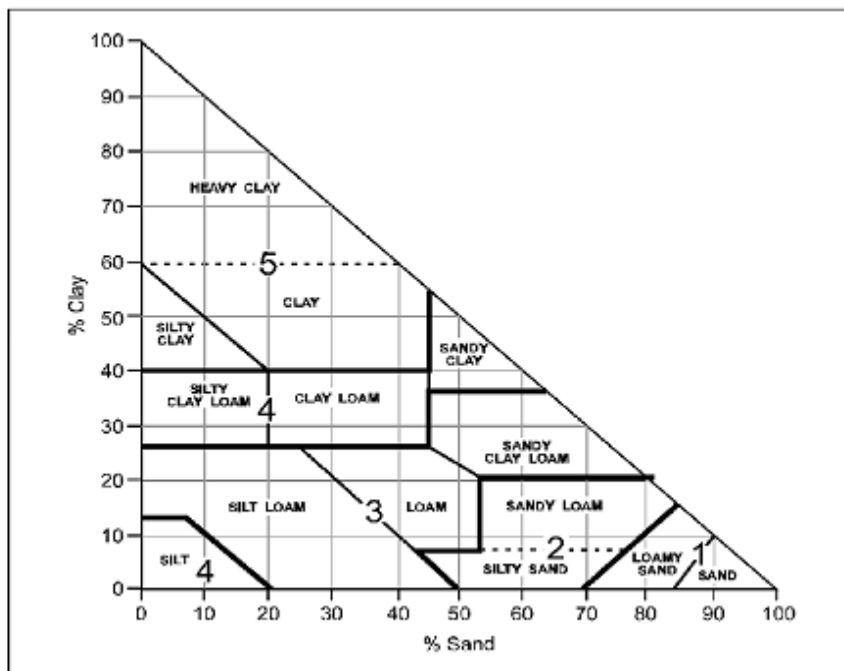


Figure III.5 : Code de perméabilité (c)

La figure (III.6) présente la carte du facteur d'érodibilité (K) pour le sous bassin versant de l'Oued Soummam.

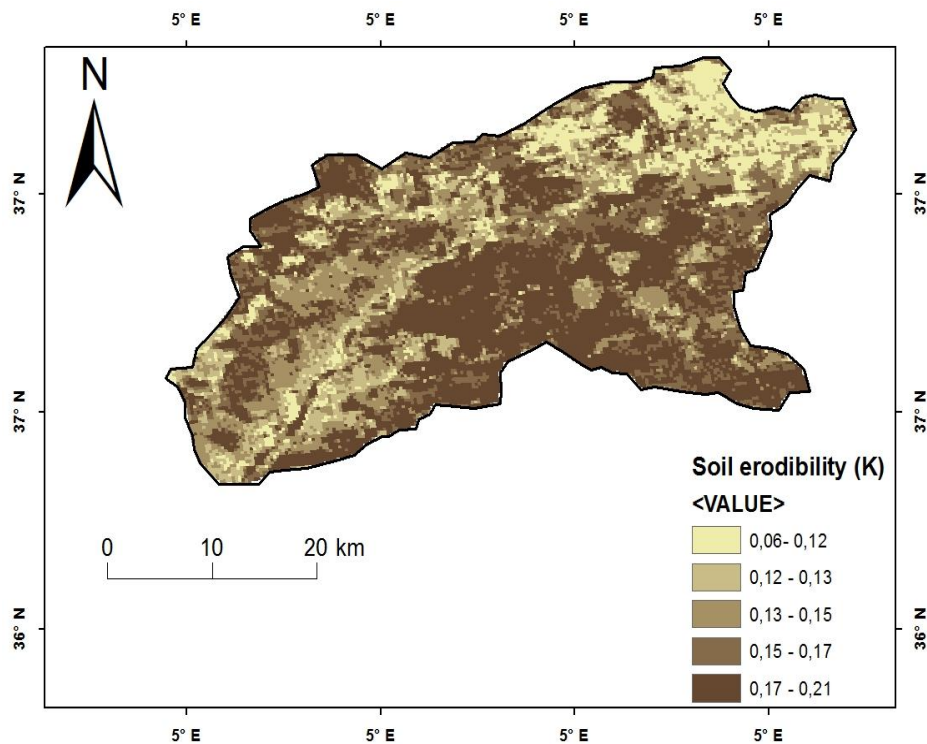


Figure III.6 : Carte du facteur (K) sur le bassin

Les résultats obtenus montrent que la totalité des sols du bassin versant possèdent une érodibilité faible (< 0.2). Ces régions sont caractérisées par une lithologie imperméable regroupant les faciès Karstiques et sableux. La valeur moyenne du facteur (K) est de 0.147 (t.h.ha)/(MJ.ha.mm).

III.4.4. Détermination du facteur de pratiques anti-érosives (P)

Le facteur (P) (variant de 0 à 1) désigne les pratiques culturales antiérosives. Ces pratiques affectent proportionnellement l'érosion en modifiant le schéma d'écoulement ou la direction de l'écoulement de surface, et en réduisant la quantité et la vitesse de ruissellement. La représentation cartographique de la carte de pente du bassin Oued Soummam (*Chap. I, Section I.6.2, Fig. I.6*) montre que 77.085 % de la surface totale du bassin ont des pentes inférieures à 21.59° . Ce pourcentage élevé des pentes faibles prouve la rareté des actions de pratiques antiérosives au niveau du bassin [18]. Les valeurs obtenues pour ce facteur sont 47.41 % pour $P = 1$, 3.65 % pour $P = 0.86$, 7.63 % pour $P = 0.6$ et 11.29 % pour $P = 0.55$. La valeur moyenne du facteur (P) est de 0.75 ; elle est proche de 1 (*Fig. III.7*). Ceci confirme qu'il n'y a pas de pratiques de contrôle de l'érosion au niveau du bassin.

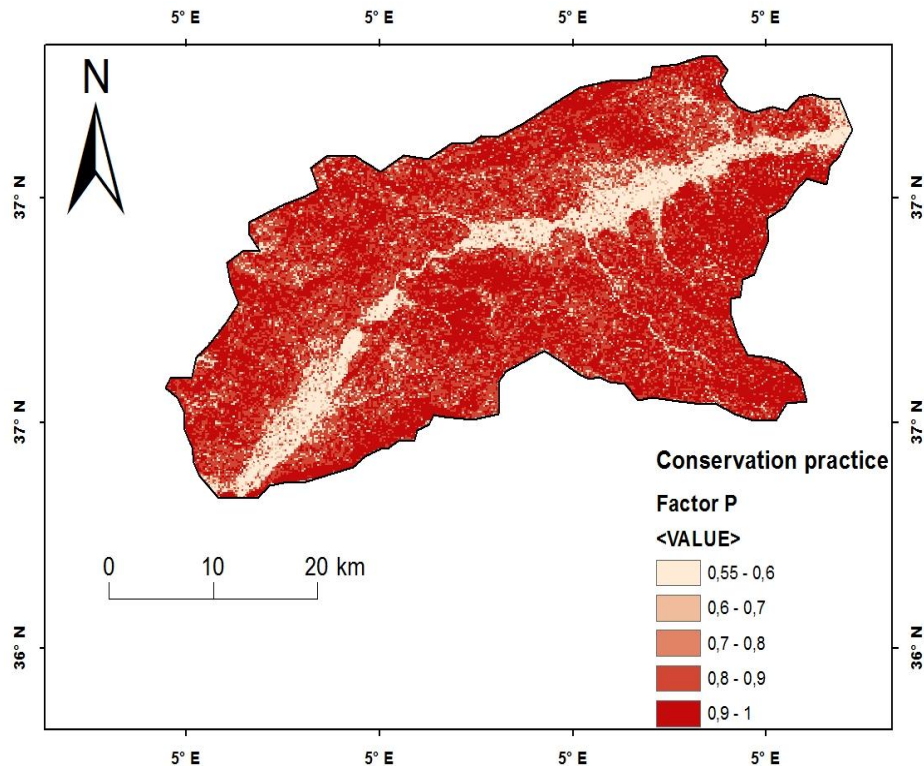


Figure III.7 : Carte du facteur (*P*)

III.4.5. Occupation des sols (*C*)

Le couvert végétal (facteur *C*) est le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols. Ce facteur sans dimension peut être estimé à partir de l'indice de végétation par différence normalisé (*NDVI*), déterminé de l'imagerie satellitaire. En fait, la valeur de ce facteur dépend de la nature de la végétation et du pourcentage du couvert végétal [16,21].

Les images satellitaires ont été collectées de la base américaine USGS (<http://landsat.usgs.gov/>), sur les satellites Landsat 5 et 8, avec une résolution de 30*30 pixels. Les images ont été prises durant des journées claires (non nuageuses et non neigeuses).

Les périodes étudiées sont:

- Pour la période sèche : Juillet ou Août (1995, 2015, 2019).
- Pour la période humide : Mars ou Avril (1995, 2016, 2018).

III.4.5.1. Principe de la télédétection

La télédétection est le résultat d'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 réfléchi par la cible [10,22].

III.4.5.2. Définition du NDVI

L'indice de végétation normalisé (NDVI) est construit à partir des canaux rouges (**R**) et proches infra rouge (**NIR**). Le NDVI met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge [10,17,21-23].

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \dots\dots\dots \text{(III.10)}$$

NDVI = (band4 - band3) / (band4 + band3) pour Landsat TM5 et TM7

NDVI = (band5 - band4) / (band5 + band4) pour Landsat LC08

Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Les valeurs du *NDVI* sont comprises entre **-1** et **+1** ; les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le *NDVI* présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de *NDVI* positives, généralement comprises entre 0.1 et 0.7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

III.4.5.3. Etapes de détermination de l'indice NDVI

Le *NDVI* est un nombre qui indique la probabilité que la zone observée contient de la végétation. Il est généralement utilisé en télédétection. Le *NDVI* peut être calculée à partir de la quantité de lumière que la zone observée reflète dans les régions proches de l'infrarouge et rouge du spectre de la lumière. Ces instructions fourniront les étapes de calcul du *NDVI* [10,16].

- Examiner l'importance de la réflectance spectrale dans la région du proche infrarouge. Les plantes ont tendance à réfléchir la lumière dans cette région parce qu'il n'a pas assez d'énergie pour la photosynthèse. Un facteur de réflexion élevé dans cette région augmente donc la probabilité que la zone observée contiendra de la végétation.
- Examiner l'importance de la réflectance spectrale dans la région rouge. Les plantes ont tendance à absorber la lumière dans cette région, car il y a assez d'énergie pour la photosynthèse, mais pas tellement d'énergie. Un faible facteur de réflexion de cette région augmente donc la probabilité que la zone observée contiendra une végétation.
- Définir le *NDVI* mathématiquement comme $\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$. Les valeurs les plus élevées de *NDVI* se traduiront d'une valeur de *NIR* haute et une valeur basse du Rouge, indiquant la végétation.
- Examiner la gamme du *NDVI*.
- Interpréter les valeurs *NDVI*. La végétation dense doit avoir une valeur de *NDVI* entre 0.3 et 0.8. Les nuages et la neige auront des valeurs de *NDVI* négatifs.

La classification de la végétation est réalisée suivant les conditions de seuillage suivantes [16, 22].

$NDVI < -0.1$: Eau

$-0,1 < NDVI < 0.15$: Sol nu

$0.15 < NDVI < 0.25$: Végétation dispersée

$0.25 < NDVI < 0.4$: Végétation moyennement dense

$NDVI > 0.4$: Végétation dense.

Afin d'estimer les valeurs du facteur C dans la zone d'étude, on a utilisé la régression polynomiale entre C et $NDVI$. Ces valeurs sont tirées du diagramme expérimental représenté sur la figure (III.8) [23].

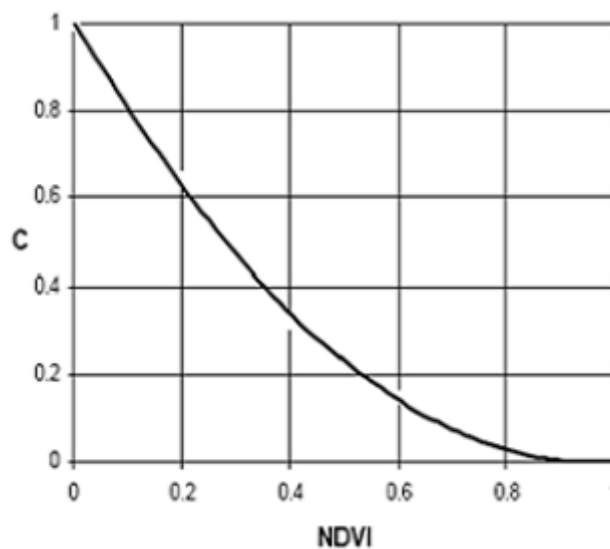


Figure III.8 : Diagramme expérimental d'estimation du facteur (C)

L'équation de la courbe polynomiale issue de la régression est :

$$C = 1.1119 * (NDVI)^2 - 2.0976 * (NDVI) + 0.9944 \dots\dots\dots (III.11)$$

Les figures (III.9 - III.14) présentent les valeurs du $NDVI$ pour les différentes périodes étudiées dans le sous bassin de l'Oued Soummam.

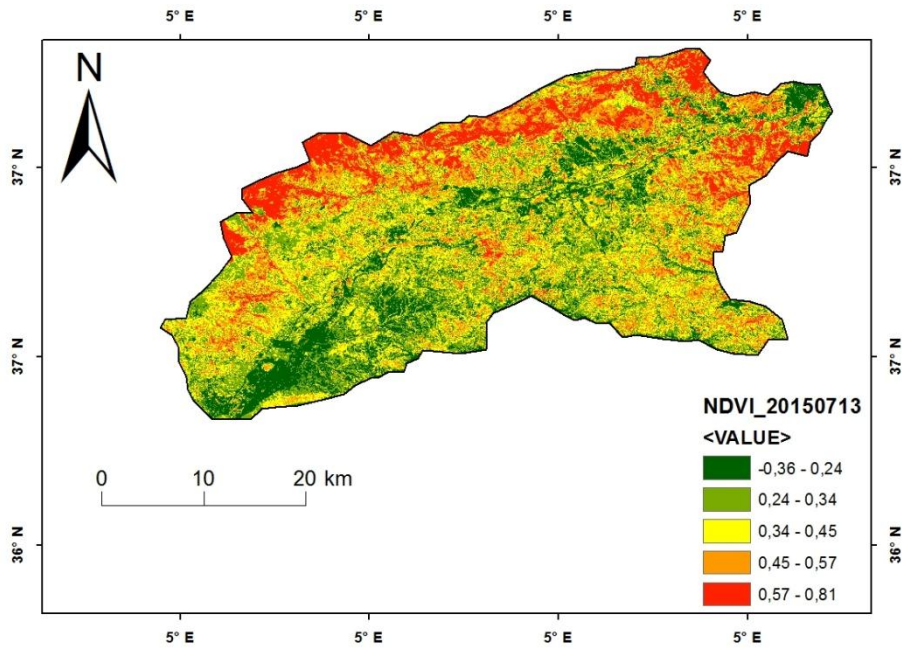


Figure III.9 : Carte des valeurs du NDVI (Juillet 2015)

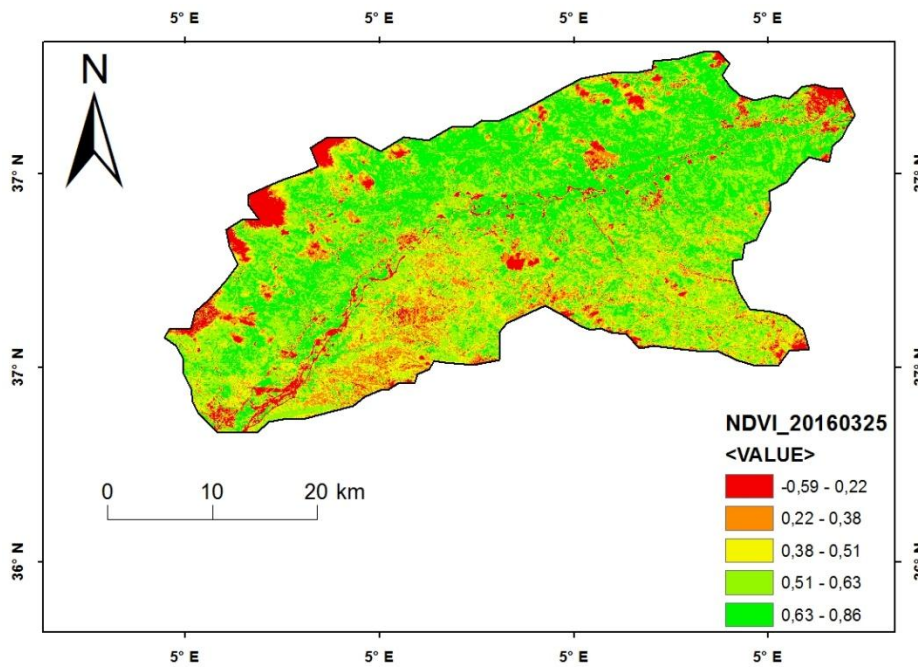


Figure III.10 : Carte des valeurs du NDVI (Mars 2016)

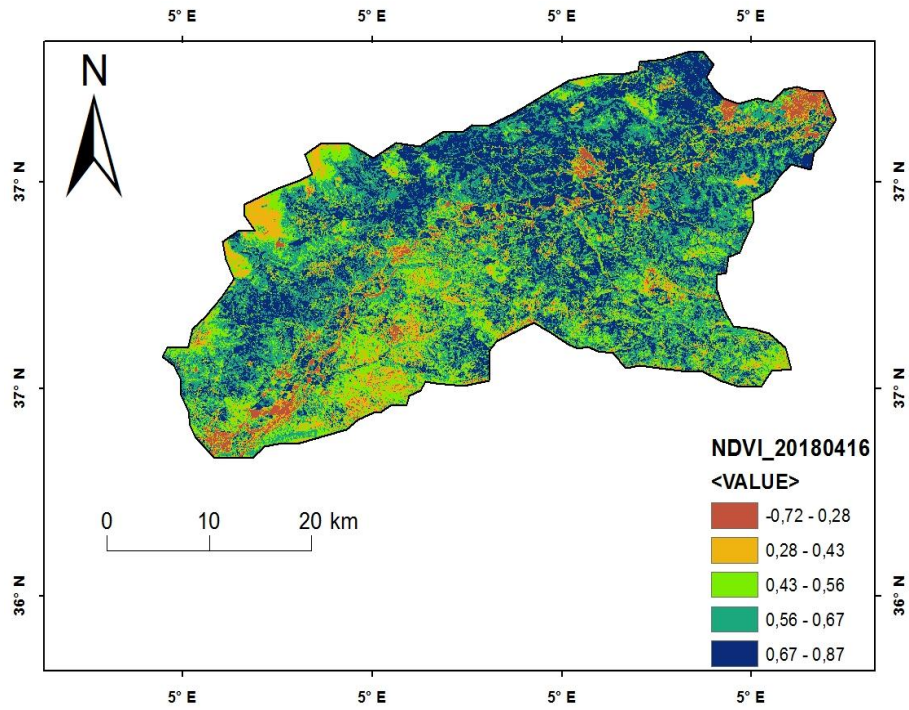


Figure III.11 : Carte des valeurs du NDVI (Avril 2018)

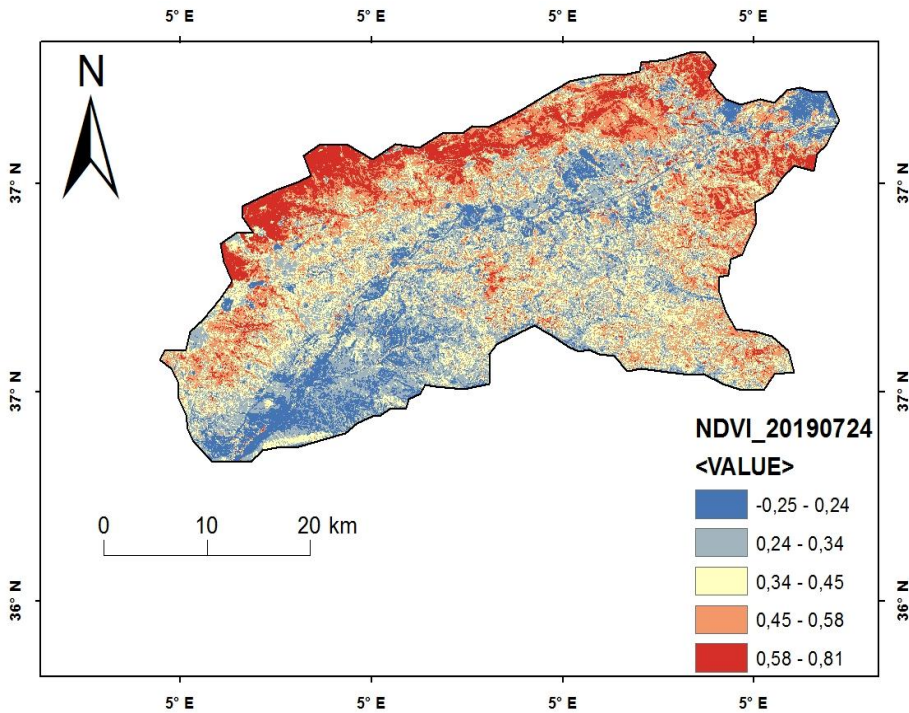


Figure III.12 : Carte des valeurs du NDVI (Juillet 2019)

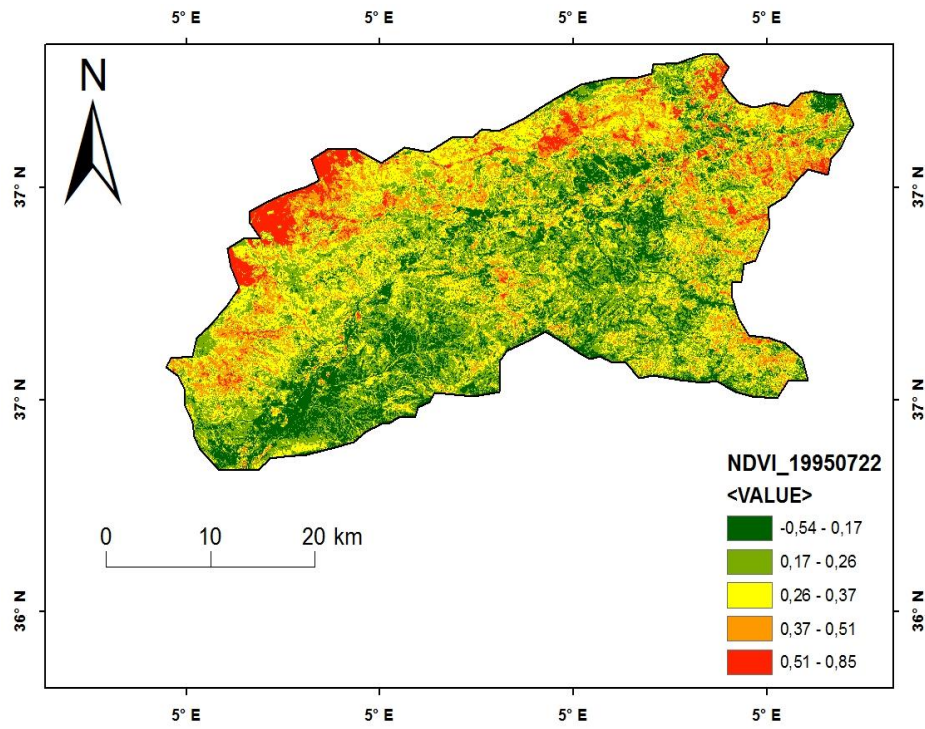


Figure III.13 : Carte des valeurs du NDVI (Juillet 1995)

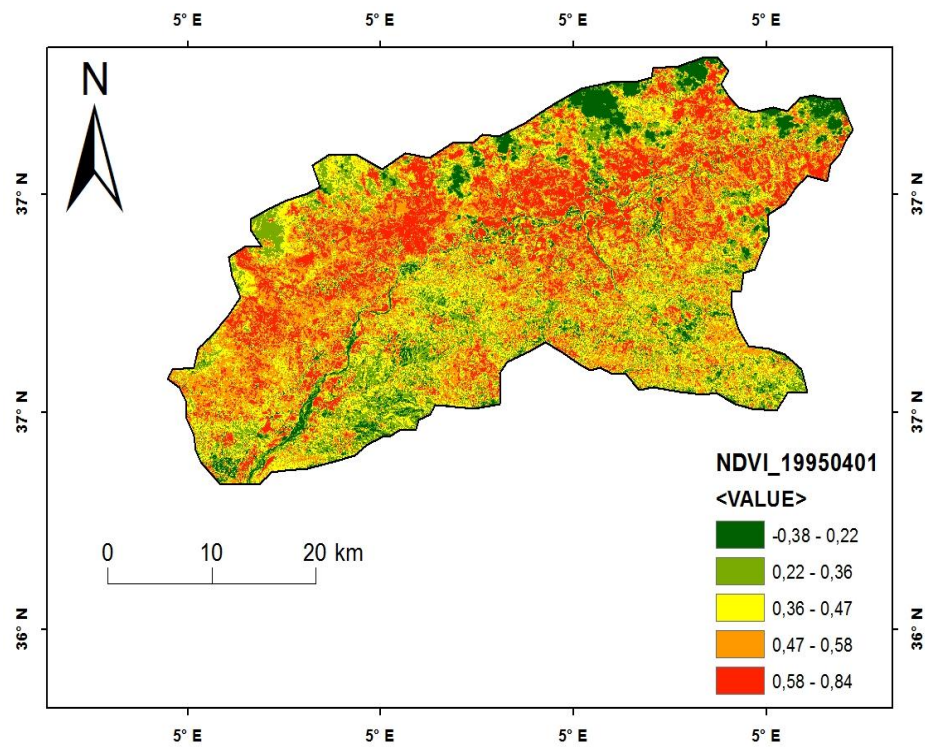


Figure III.14 : Carte des valeurs du NDVI (Avril 1995)

En analysant les cartes du *NDVI*, on constate qu'il y a une variation du couvert végétal entre la période humide et la période sèche. Les valeurs les plus élevées correspondant à une végétation dense se situent dans le Nord pour les deux périodes. La végétation diminue graduellement en allant vers le Sud. Cette zone est considérée comme étant une zone dégradée.

Les cartes du facteur *C* sont générées en utilisant l'équation polynomiale de régression citée auparavant (Eq. III.11). Pour les valeurs du *NDVI* négatives, le facteur *C* est considéré comme nul car dans ces surfaces, il n'y a pas de couvert végétal (eau).

Les changements du couvert végétal et du taux érosif sont récapitulés visuellement dans (Figs. III.15 - III.20) et (Figs. III.21 - III.24), respectivement, et numériquement dans le tableau III.2.

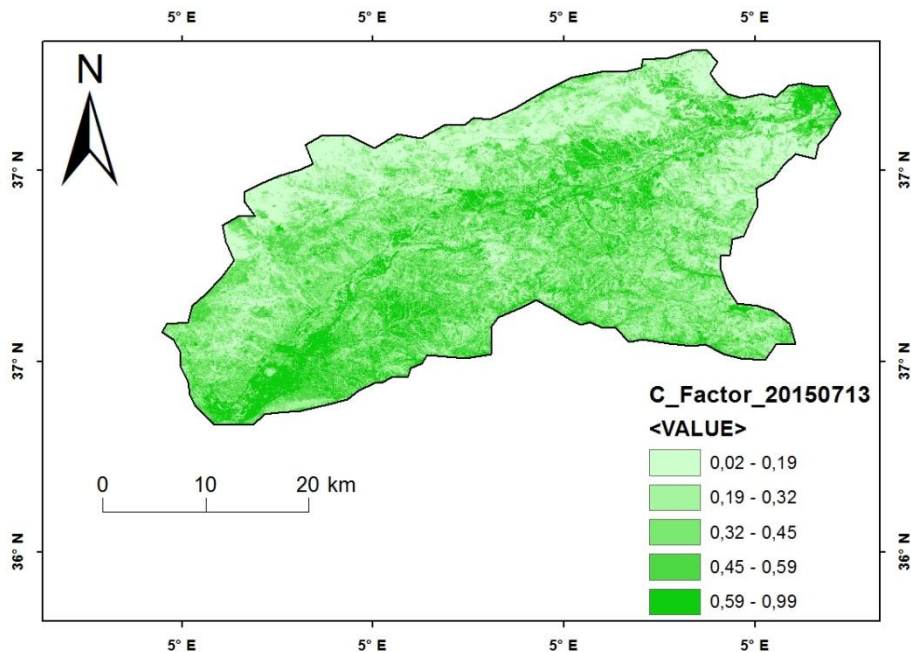


Figure III.15 : Carte du facteur *C* (Juillet 2015)

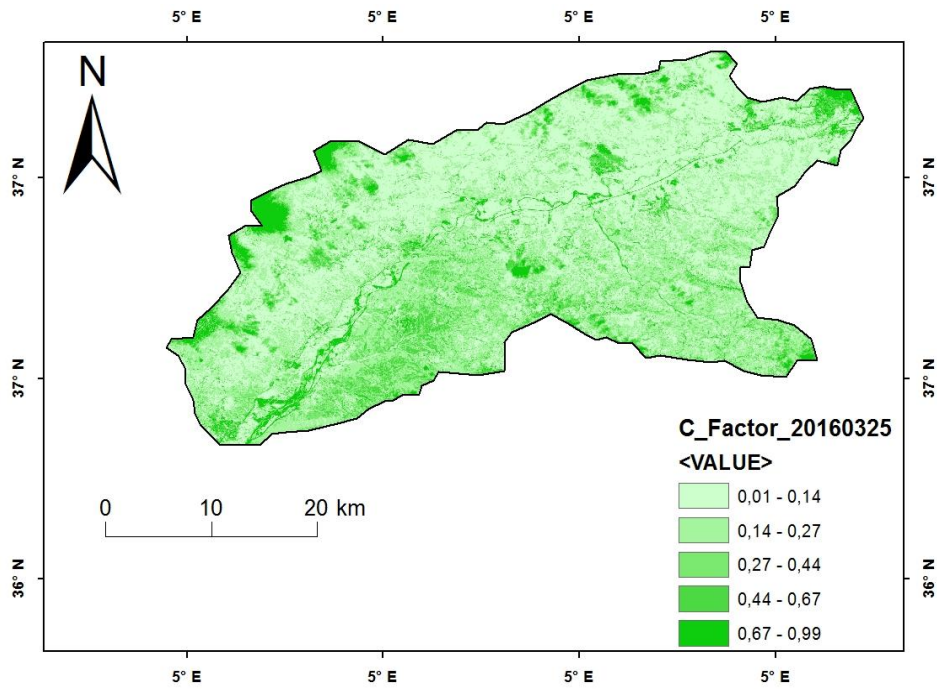


Figure III.16 : Carte du facteur C (Mars 2016)

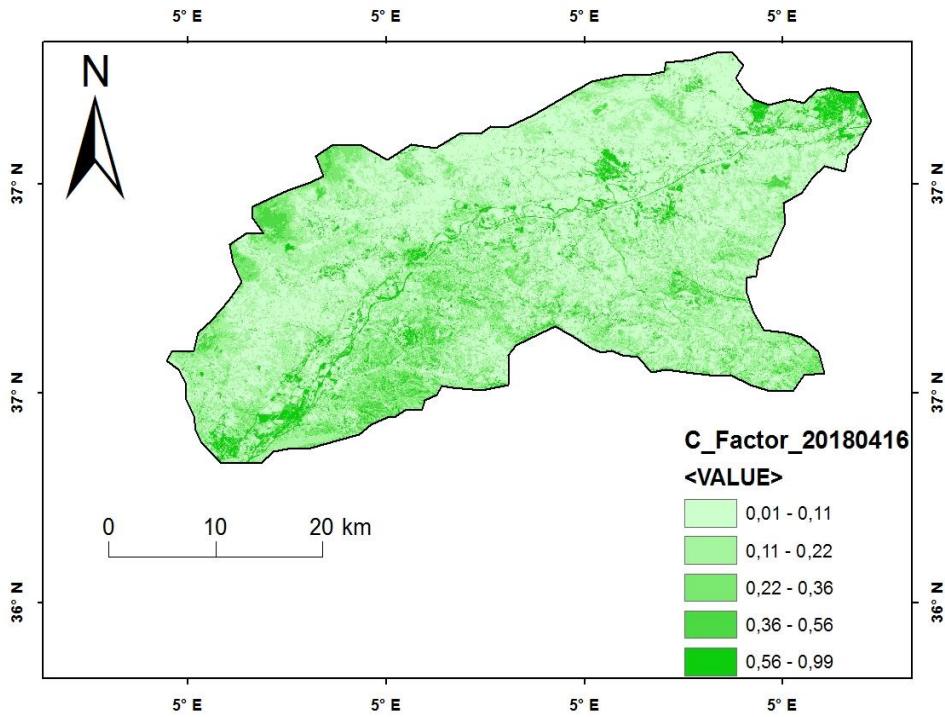


Figure III.17 : Carte du facteur C (Avril 2018)

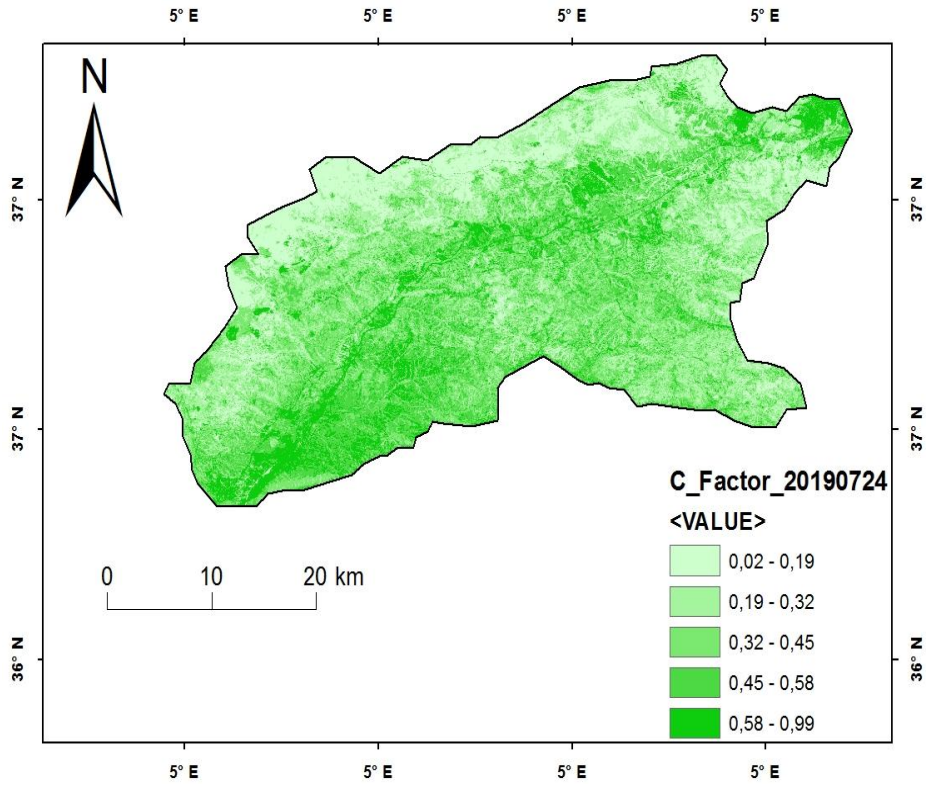


Figure III.18 : Carte du facteur C (Juillet 2019)

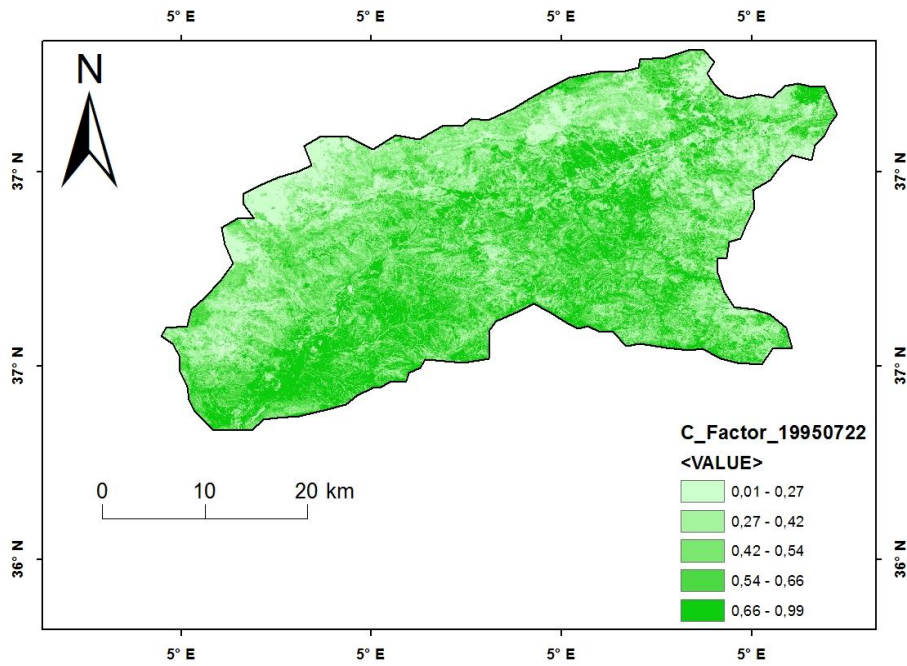


Figure III.19 : Carte du facteur C (Juillet 1995)

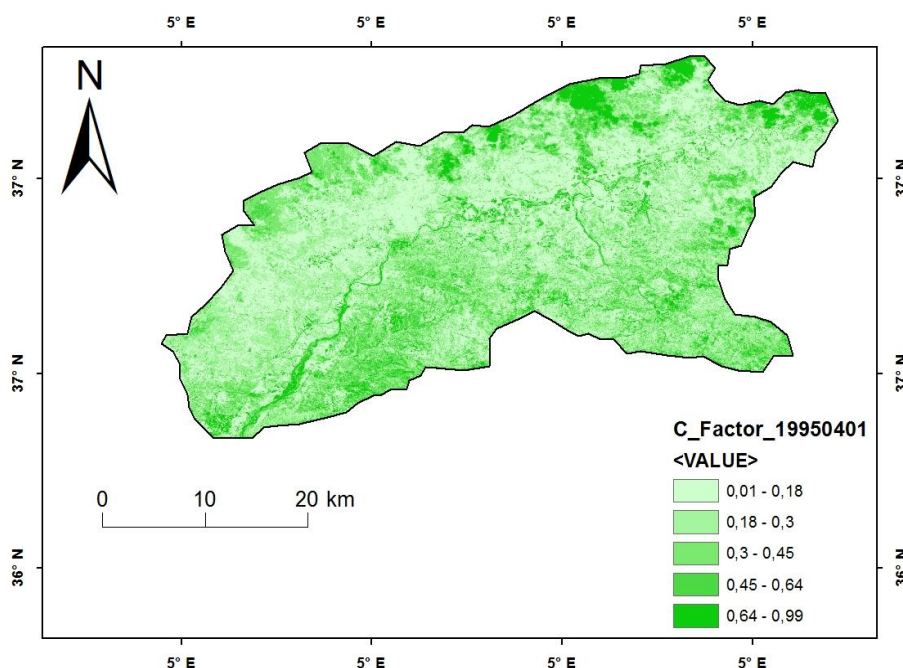


Figure III.20 : Carte du facteur C (Avril 1995)

Tableau III.2 : Résultats de calcul des différents facteurs pour différentes périodes étudiées

Année		NDVI		C		A	
		Période humide	Période sèche	Période humide	Période sèche	Période humide	Période sèche
1995	Min	-0.36	-0.5	0.016	0.014	0.0043	0.037
	Max	0.84	0.85	0.99	0.99	729.28	1843.07
	Moy	0.4	0.42	0.4	0.47	124.64	406.43
2015 - 2016	Min	-0.59	-0.36	0.011	0.024	0.0034	0.016
	Max	0.86	0.81	0.99	0.99	495.75	1470.94
	Moy	0.43	0.4	0.49	0.39	111.97	168.49
2018 - 2019	Min	-0.72	-0.24	0.0099	0.022	0.0037	0.018
	Max	0.87	0.81	0.99	0.99	1039.81	1419.86
	Moy	0.54	0.48	0.43	0.49	191.26	286.54

Les résultats obtenus montrent qu'une grande partie du bassin présente un taux de couverture végétale moyen à élevé pour les deux périodes, et tous les facteurs varient selon la période. La majeure partie du bassin est caractérisée par des valeurs moyennes du facteur (C) entre 0.4 et 0.5. Ces zones ont des végétations denses.

III.4.6. Taux annuel des pertes en sol (A)

La superposition des cartes des facteurs intervenant dans l'érosion hydrique des sols a permis d'obtenir la carte des pertes en sol en tout point du sous bassin versant de l'Oued Soummam (Figs. III.20 et III.26) pour chaque période étudiée. A titre d'exemple, les pertes en sol sont de l'ordre de 0.0016 à 1470.94 t/ha/an pour Juillet 2015, avec une moyenne de 168.49 t/ha/an, et de

0.0034 à 495.75 t/ha/an pour Mars 2016, avec une moyenne de 111.97 t/ha/an ; ce qui témoigne de la forte érosion du bassin. Le taux moyen d'érosion a atteint 406.43 t/ha/an en juillet 1995 et 168.49 t/ha/an pour juillet 2015.

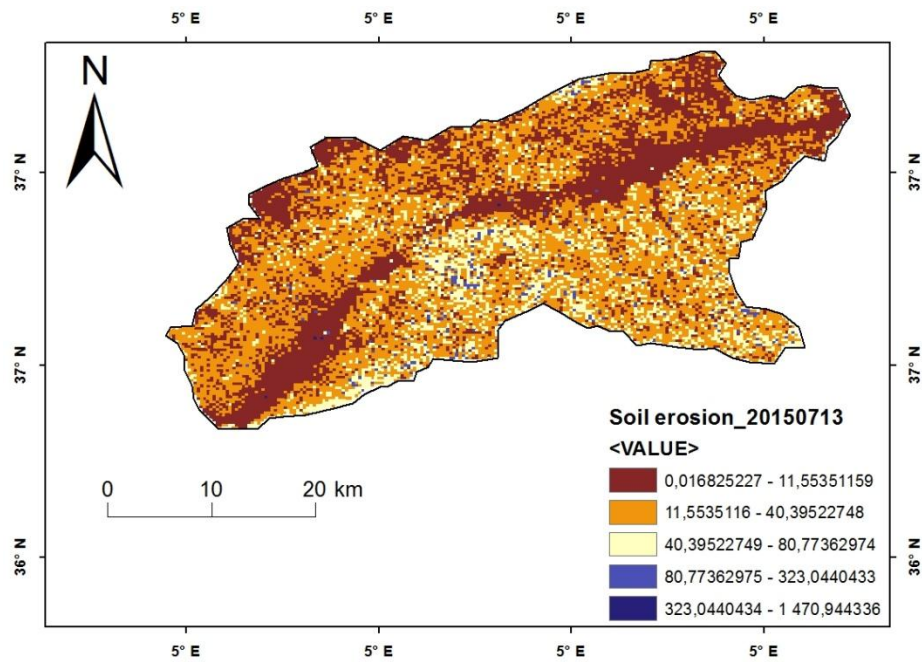


Figure III.21 : Taux annuel des pertes en sol (Juillet 2015) en (t/ha/an)

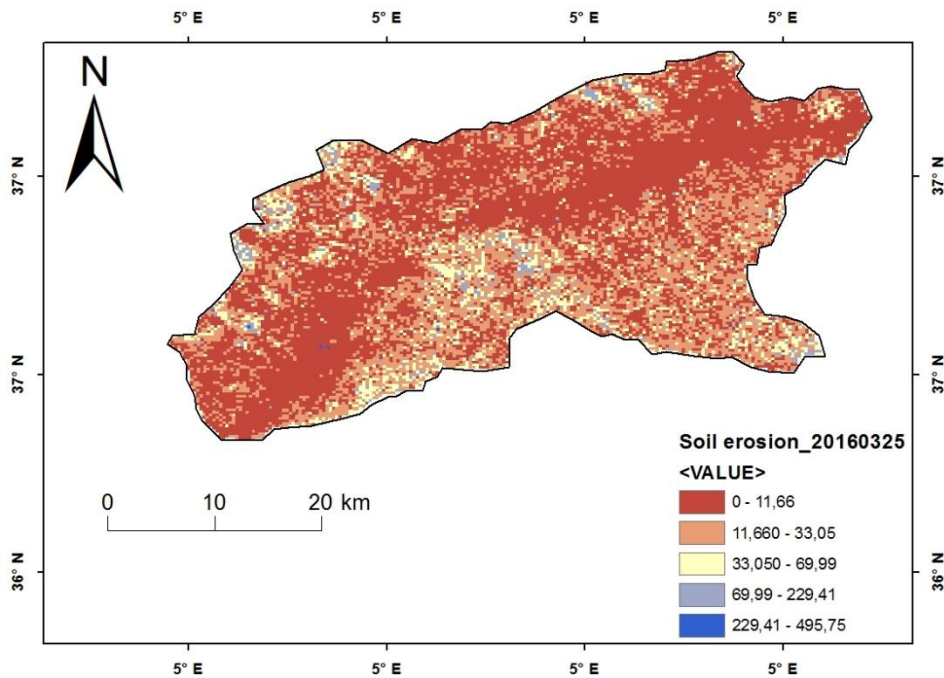


Figure III.22: Taux annuel des pertes en sol (Mars 2016) en (t/ha/an)

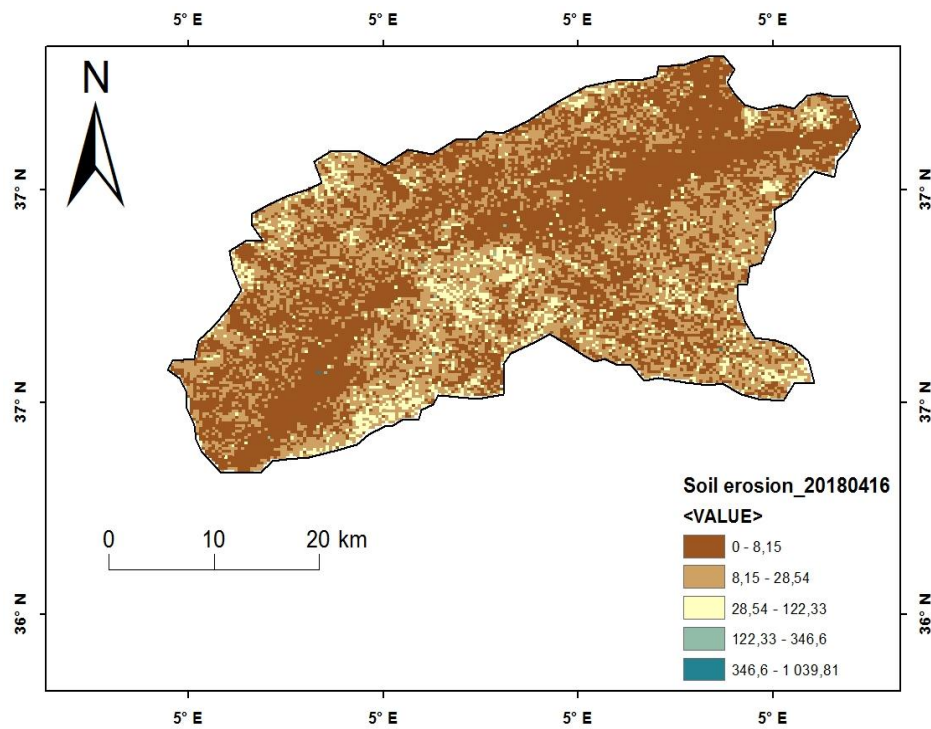


Figure III.23: Taux annuel des pertes en sol (Avril 2018) en (t/ha/an)

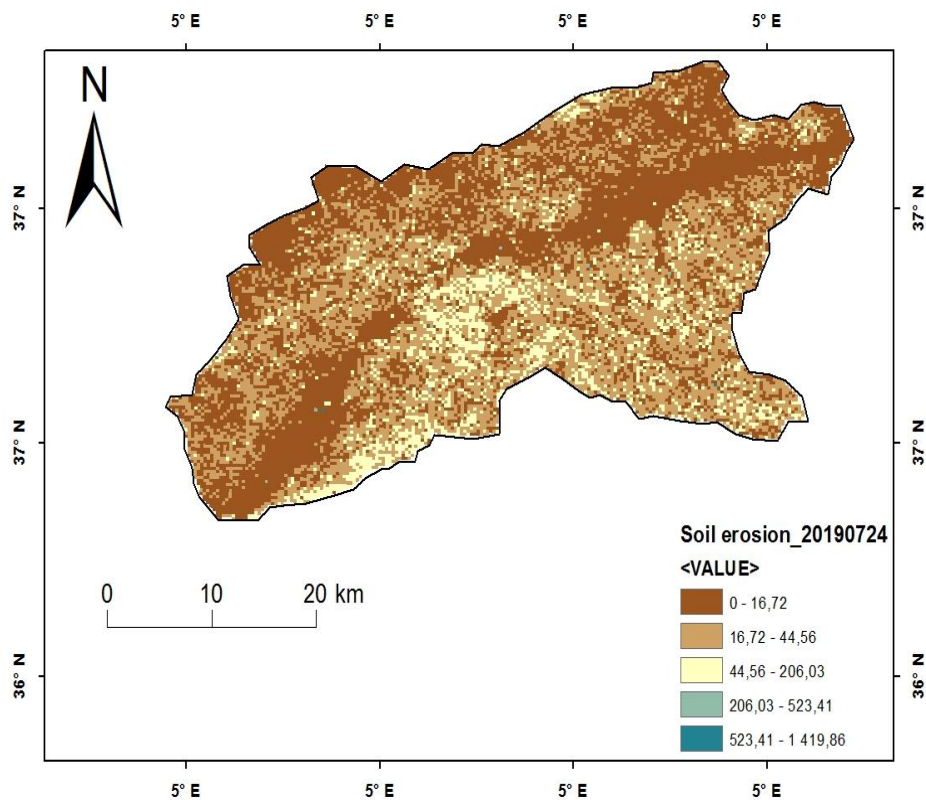


Figure III.24: Taux annuel des pertes en sol (Juillet 2019) en (t/ha/an)

Les valeurs faibles du risque érosif occupent la partie centrale du bassin qui suit l'Oued Soummam. Les terrains dans cette partie du bassin ont des inférieures à 14.48°).

Alors que les valeurs fortes du risque érosif se localisent beaucoup plus dans les régions Nord du bassin versant, à cause de la forte pente des terrains et de l'érosivité des pluies.

III.5. Evolution du couvert végétal et de l'érosion (1995 – 2015)

Afin de voir l'évolution des facteurs (C) et (A) de 1995 à 2015, nous avons calculé la moyenne des deux facteurs pour les deux périodes sèches et humides (Figs. III.25 – III.30).

Pour cartographier les changements de ces deux facteurs, nous avons soustrait la carte de 2015 avec celle de 1995 (Eqs. III.12, III.13). Une carte de changement (Delta : Δ) a été obtenue pour chaque facteur, qui montre la distribution spatiale du couvert végétal et du risque érosif (Fig. III.27) et (Fig.III.30), respectivement.

$$(\Delta_C = \text{Carte Facteur } C_{2015} - \text{Carte Facteur } C_{1995}) \dots\dots\dots (III.12)$$

$$(\Delta_{\text{Erosion}} = \text{Carte Erosion } 2015 - \text{Carte Erosion } 1995) \dots\dots\dots (III.13)$$

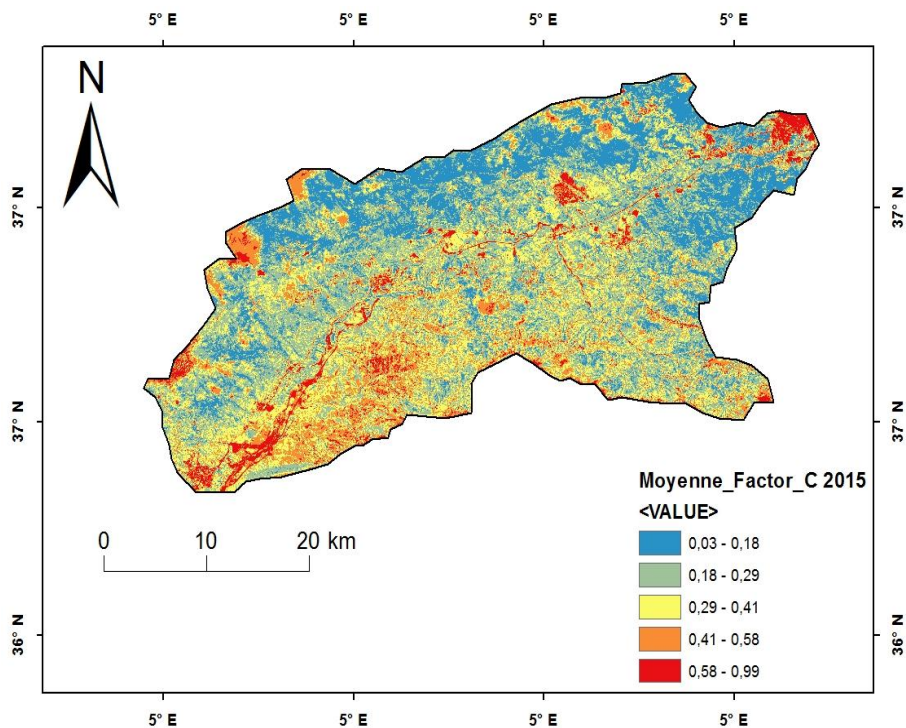


Figure III.25: Carte du facteur C moyen (2015)

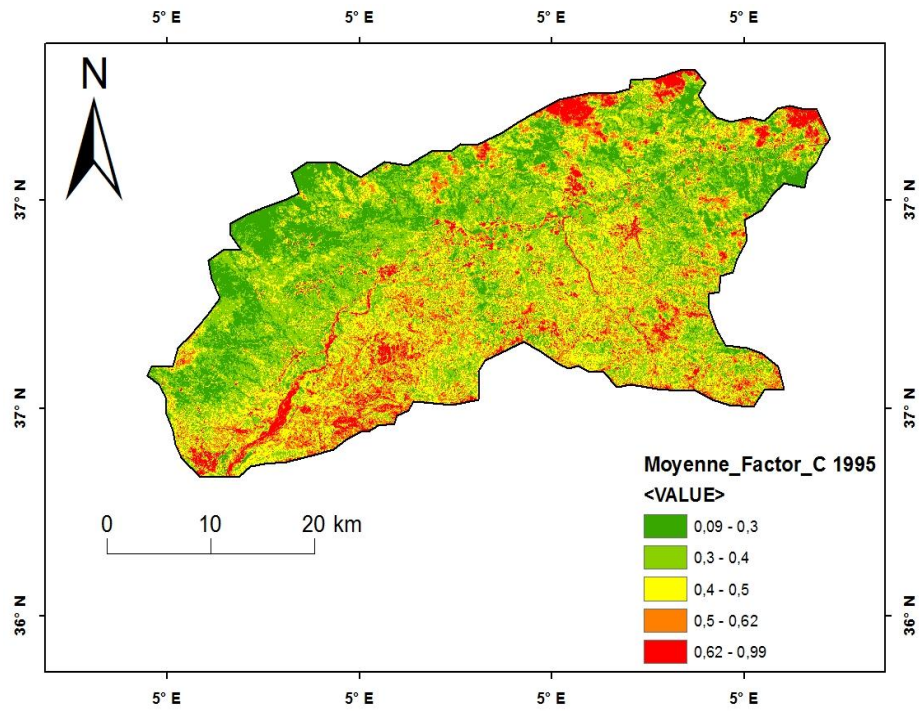


Figure III.26 : Carte du facteur *C* moyen (1995)

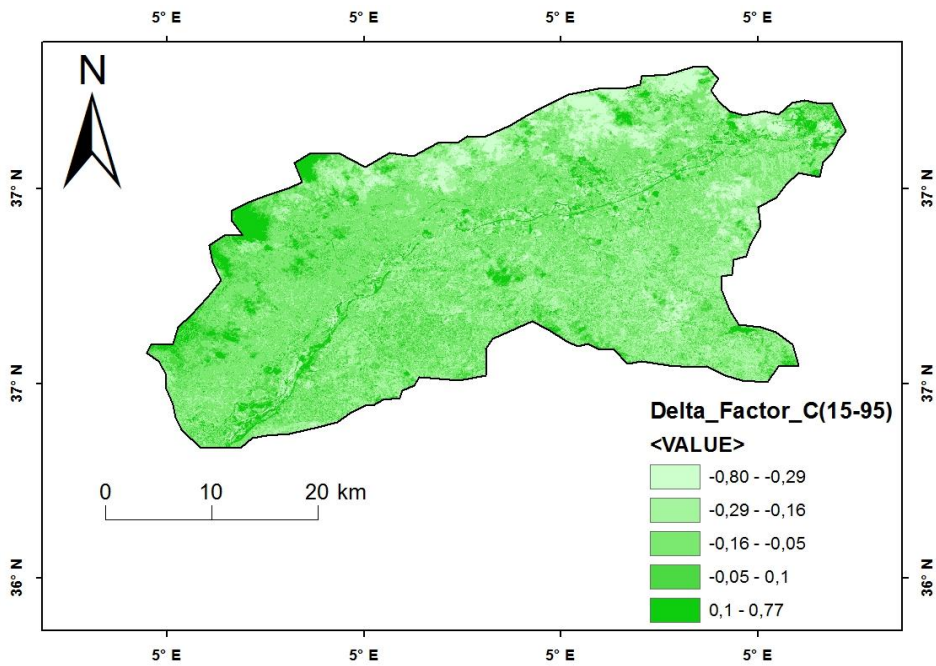


Figure III.27 : Carte de Delta *C*

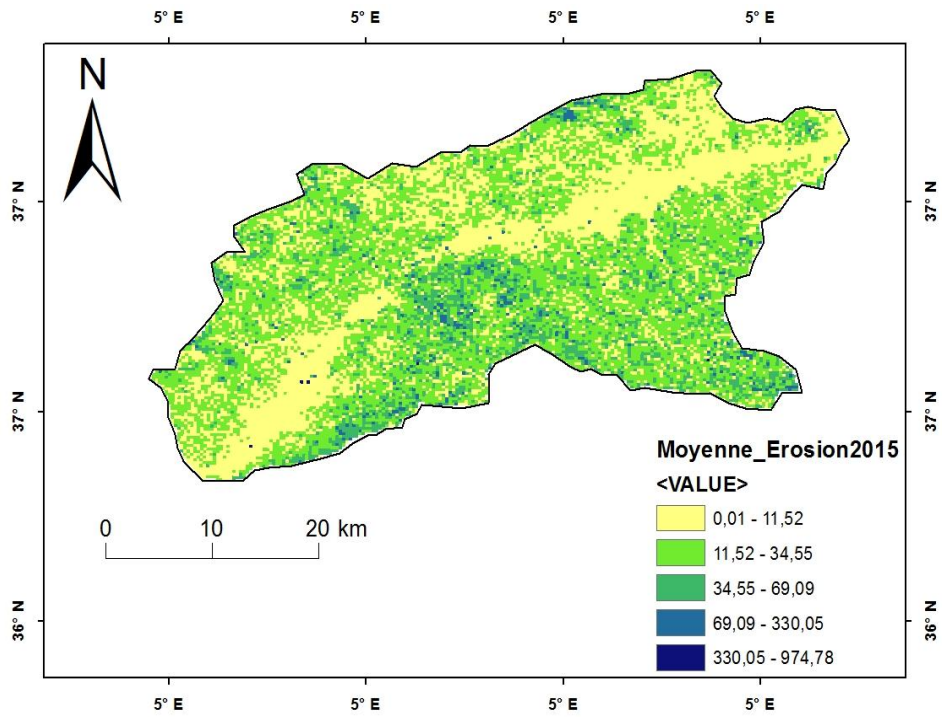


Figure III.28 : Taux moyen annuel des pertes en sol (2015) en (t/ha/an)

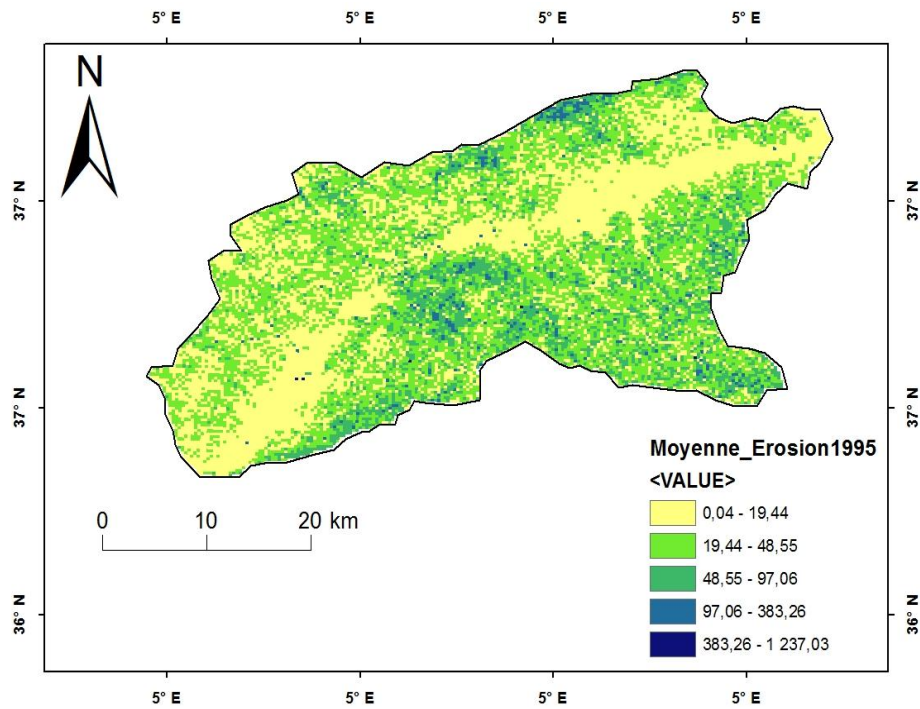


Figure III.29: Taux moyen annuel des pertes en sol (1995) en (t/ha/an)

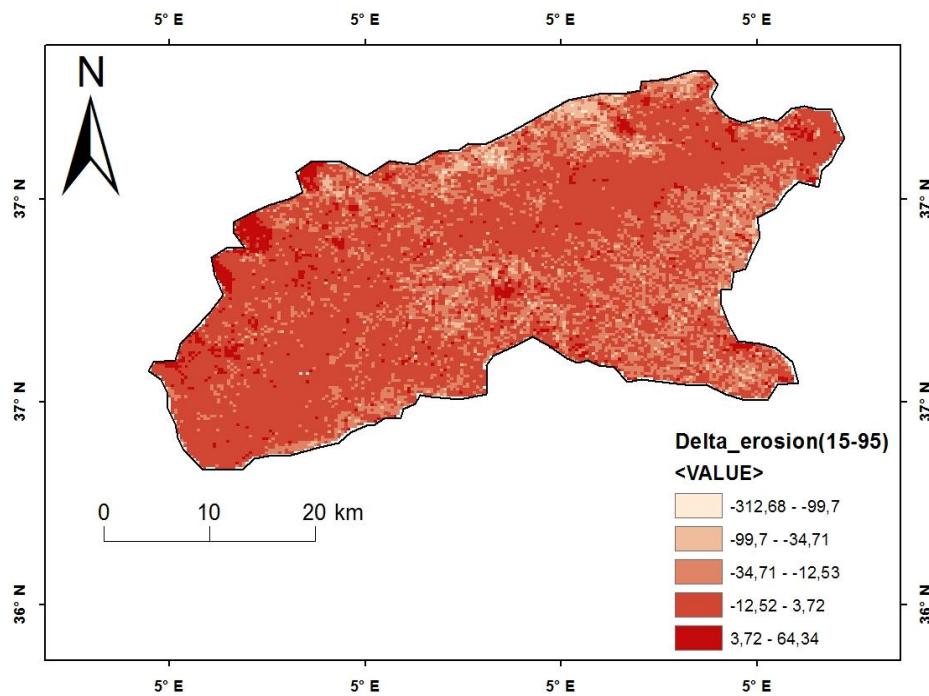


Figure III.30 : Taux moyen annuel de Delta E en (t/ha/an)

Le risque d'érosion (ΔA) suit celle du couvert végétal (ΔC) entre 1995 et 2015. Dans les zones claires (signes -), le risque d'érosion a diminué, tandis que dans les zones foncées, il a augmenté. Ces changements varient selon les zones et dépendent de plusieurs facteurs, notamment, l'effet anthropique, le reboisement, les aménagements pour lutter contre l'érosion [24].

III.6. Conclusion partielle

Les résultats obtenus montrent que les sols du sous bassin Oued Soummam subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant la dégradation du couvert végétal et le risque érosif, à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols.

Dans certaines régions, en raison de l'accélération de l'urbanisation et du développement et de l'utilisation excessives des terres, la situation de désertification s'est intensifiée, ceci est traduit par une forte érosion allant jusqu'à 1843.07 t/ha/an pour juillet 1995 et 1470.94 t/ha/an pour juillet 2015. Le taux moyen d'érosion a atteint 406.43 t/ha/an en juillet 1995 et 168.49 t/ha/an pour juillet 2015.

L'étude de l'évolution du couvert végétal et de l'érosion entre 1995 et 2015 a montré que les deux facteurs augmentent et diminuent selon les zones du bassin.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les conditions environnementales et socio-économiques font de la dégradation des sols une préoccupation majeure de nos jours. La perte à long terme de la végétation naturelle, la faible couverture végétale et la désolation des terres sont des caractéristiques saillantes de la dégradation des sols, et une base importante de la surveillance de la désertification.

Cette étude avait pour objectif l'étude de l'évolution du couvert végétal et de l'érosion des sols dans le sous bassin versant de l'Oued Soummam. L'application de l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE) et l'utilisation de la télédétection ont été utilisées pour estimer les pertes en sols, et pour suivre l'évolution du couvert végétal, respectivement.

Les résultats obtenus montrent que :

- Les sols du sous bassin Oued Soummam subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant la dégradation du couvert végétal et le risque érosif, à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal, l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols.
- L'imagerie satellitaire, en particulier les données de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), s'est avérée être un outil très efficace pour surveiller l'évolution de la couverture végétale.
- Dans certaines régions, en raison de l'accélération de l'urbanisation, du développement et de l'utilisation excessives des terres, la situation de désertification s'est intensifiée, ceci est traduit par une forte érosion allant jusqu'à 1843.07 t/ha/an pour juillet 1995 et 1470.94 t/ha/an pour juillet 2015. Le taux moyen d'érosion a atteint 406.43 t/ha/an en juillet 1995 et 168.49 t/ha/an pour juillet 2015.
- L'étude de l'évolution du couvert végétal et de l'érosion entre 1995 et 2015 a montré que les deux facteurs augmentent et diminuent selon les zones du bassin.

A titre de perspectives, plusieurs points sont à étudier :

- Etudes approfondies de géologie, de géophysique et d'hydrogéologie.
- Analyse expérimentale des sols pour valider les résultats du facteur K .

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] A. Amour, Caractérisations des crues pluviales des sous bassins de la Soummam. *Mémoire de Magister en Hydraulique générale*, Université de Béjaia, (2010).
- [2] S. Djenba, Influence des paramètres géologique, géomorphologique et hydrogéologique sur le comportement mécanique des sols de la wilaya de Setif. (Algérie). *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Biskra, (2015).
- [3] D. Sersoub, Aménagement et sauvegarde de la biodiversité de la vallée d'Oued Soummam (Sétif). *Mémoire de Magister*, Université de Sétif, (2012).
- [4] M. Smaili et A. Touati, Contribution à la caractérisation des eaux de cinq sources dans le bassin versant de Boussellam, Sud-est de Bejaia-Algérie. *Mémoire de Master en Toxicologie Industrielle et Environnementale*, Université de Béjaia, (2018).
- [5] M. Durand Delga, Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie, N. S., Bull.* 39, (1969) 89-131.
- [6] N. Ben Hamiche, Contribution à l'étude de l'influence climatique, lithologique et anthropique sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'un aquifère du Nord-est algérien : Cas de la basse Soummam, Bejaia. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Béjaia, (2015).
- [7] Ch. Allili, B. Laignel, N. Adjeroud, H. Bir, K. Madani, Particulate flow at the mouth of the Soummam watershed (Algeria). *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35 (1) (2015) 204-211.
- [8] M. Baaidja, A. Bachiri, Evaluation des pertes en sols et leur identification dans le bassin versant d'Oued Azzerou (BBA). *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, (2018).
- [9] L. Bouhali, Cartographie des risques d'érosion des sols dans le bassin versant de la Soummam. *Mémoire de fin d'études, Master en Ouvrages hydrauliques et Aménagement*, Université de M'sila, (2016).
- [10] M.M. Benachour, Etude de l'érosivité des pluies sur le bassin de la Soummam par le biais de SIG et télédétection. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, ENSH de Blida, (2016).
- [11] B. Heusch, L'érosion du Pré Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. (1988).
- [12] E. Roose, La lutte antiérosive conventionnelle en fonction des processus et des facteurs de l'érosion hydrique. (1994).
- [13] R. Neboit, L'Homme et l'érosion. Editeur Presses Universitaires Blaise Pascal, collection Nature & Sociétés, (2010).
- [14] M. Yjjou, Modélisation de l'érosion hydrique via le SIG et l'équation universelle de perte en sol au niveau du bassin versant d'Oum Er Rbia. *Mémoire de fin d'études, Master en Sciences des Sols et Environnement*, Université Moulay Ismail, Meknès (Maroc), (2009).
- [15] M. Mahdi, Kh. Kheta, Estimation de l'érosion hydrique des sols sur le sous bassin versant de Boussellam - Soummam. *Mémoire de fin d'études, Master en Ouvrages hydrauliques*, Université de M'sila, (2020).

- [16] Y. Sahli, E. Mokhtari, B. Merzouk, B. Laignel, C. Vial, K. Madani, Mapping surface water erosion potential in the Soummam watershed in Northeast Algeria with RUSLE model. *Journal of Mountain Science*, 16 (7) (2019) 1606-1615.
- [17] K.G. Renard, G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder, Predicting rainfall erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture handbook*, USDA, 703 (1997).
- [18] W.H. Wischmeier, D.D. Smith, Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. *Agriculture handbook*, USDA, 537 (1978).
- [19] D.K. McCool, L.C. Brown, G.R. Foster, Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 30 (1987) 1387-1396.
- [20] A. Sadiki, B. Saïdati Bouhlassa, A. Jamal, F. Ali, J.-J. Macaire, 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.
- [21] R. Kalman, Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou. *Rapport du Ministère de l'Agriculture, Maroc*, (1967).
- [22] S. Toumi, Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Mina. *Thèse de Doctorat en Sciences*, ENSH de Blida, (2013).
- [23] I.Z. Gitas, K. Douros, C. Minakou, G.N. Silleos, Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSeL eProceedings*, 8 (1) (2009) 40-53.
- [24] M. Wynants, H. Solomon, P. Ndakidemi, W.H. Blake, Pinpointing areas of increased soil erosion risk following land cover change in the Lake Manyara catchment, Tanzania. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 71 (2018) 1-8.