

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: Mahdi Madjeda

et

Kheta Khalil

Intitulé

**Estimation de l'érosion hydrique des sols sur le sous
bassin versant de Boussellam - Soummam**

Soutenu devant le jury composé de:

Mokhtari Elhadj

Université de M'sila

Président

Merzouk Belkacem

Université de M'sila

Rapporteur

Nebbar Mohamed Lakhdar

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

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 supporté 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 tout le corps enseignant et administratif du Département d'Hydraulique de l'université de M'sila.

*Enfin, Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail, en particulier Messieurs **MEZALI Farouk**, **BOUGHERRA Riad**, **KADRI Yazid** et **CHEBABHI Issam**.*

MAHDI Madjeda

&

KHETTA Khalil

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.*

MAHDI Madjeda
&
KHETTA Khalil

Résumé

L'objectif de ce présent travail est d'estimer les pertes annuelles en sol au niveau du bassin versant de Boussellam dans le Nord-est de l'Algérie, par l'utilisation de l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE), le système d'information géographique (SIG), et la télédétection. Le modèle RUSLE a été employé pour modéliser les principaux facteurs impliqués dans le phénomène d'érosion.

Le bassin versant de Boussellam s'étend sur une superficie de 4151 Km², de forme allongée et d'un relief faible. Il est caractérisé par une altitude qui varie de 189 m à 1757 m, avec une moyenne de 931 m et une pente oscillant entre 0 et 266 % avec une moyenne de 18 %. Les résultats montrent que le facteur d'érosivité R est en moyenne de 68 (MJ.mm/ha.h.an) avec une valeur maximale de 140 (MJ.mm/ha.h.an). Le facteur d'érodibilité des sols K varie de 0,04 à 0,21 avec une moyenne de 0,11 (t.h.ha)/(MJ.ha.mm). Le facteur topographique LS varie de 0 à 216 avec une moyenne de 16. La valeur moyenne du facteur P est de 0.77, et celle du facteur C est de 0.076.

La combinaison des différentes cartes de ces paramètres a permis de déduire la carte d'érosion à partir de laquelle, il ressort que le phénomène d'érosion touche surtout le nord du bassin avec une moyenne de 258 (t/ha/an) pour Juillet 2015.

Mots clés : Bassin versant Boussellam, Erosion, ArcGis, RUSLE, Télédétection.

Abstract

The objective of the present work was to estimate the annual soil loss in the Boussellam watershed in the northeast of Algeria, using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), geographic information system (GIS), and remote sensing. RUSLE model has been used for modelling the main factors involved in erosive phenomena.

The Boussellam watershed covers an area of 4151 km² of elongated shape and low relief. It is characterized by an altitude ranging from 189 m to 1757 m, with an average of 931 m and a slope ranging between 0 and 266 % with an average of 18 %.

Results showd that the average erosivity factor R is 68 (MJ.mm/ha.h.an) with a maximum value of 140 (MJ.mm/ha.h.an). The soil erodibility factor K ranges from 0.04 to 0.21 with an average of 0.11 (t.h.ha)/(MJ.ha.mm). The LS topographic factor ranges from 0 to 216 with an average of 16. The mean P factor is estimated to be 0.77, and the average C factor is 0.076.

The combination of the different maps of these parameters made it possible to deduce the erosion map from which, it appears that the phenomenon of erosion mainly affects the northern part of the basin with an average of 258 (t/ha/year) for July 2015.

Keywords: Boussellam watershed, Erosion, ArcGis, RUSLE, Remote sensing.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N° du Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Températures moyennes mensuelles en degrés Celsius corrigées de la région d'étude	10
Tableau I.2	Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003)	11
Tableau I.3	Valeurs des précipitations mensuelles et annuelles de 13 stations du sous bassin versant Boussellam (1970 -2017)	12
Tableau I.4	Répartition des différentes tranches d'altitude	15
Tableau I.5	Classification de l'ORSTOM	18
Tableau I.6	Principales caractéristiques morphométriques du bassin de Boussellam	20
Tableau III.1	Valeurs des précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) et R pour la période (1970 -2017)	35

Liste des figures

Liste des figures

N° de la Figure	Titre	Page
Figure I.1	Carte des grands bassins versants d'Algérie	2
Figure I.2	Les grands sous bassins versants de la Soummam	2
Figure I.3	Délimitation du sous bassin versant de Boussellam par ArcGis	3
Figure I.4	Profil en long de l'Oued Boussellam - Soummam	4
Figure I.5	L'orogénèse alpin périméditerranéen	5
Figure I.6	Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides	6
Figure I.7	Carte géologique du bassin versant de la Soummam	7
Figure I.8	Carte des sols du bassin versant de la Soummam	7
Figure I.9	Réseau hydrographique du bassin Soummam	9
Figure I.10	Réseau hydrographique du sous bassin Boussellam	9
Figure I.11	Etages bioclimatiques du bassin Soummam	10
Figure I.12	Courbe hypsométrique du bassin versant Boussellam	12
Figure I.13	Carte des tranches d'altitude du bassin Boussellam	16
Figure II.1	Eclatement des agrégats	26
Figure II.2	Détachement par splash	26
Figure II.3	Détachement par ruissèlement	27
Figure II.4	Décapage de la surface du sol	28
Figure II.5	Érosion des berges par le cours d'eau d'une rivière	28
Figure II.6	Ensablement des lits de rivière	29
Figure III.1	Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Boussellam	33
Figure III.2	Carte du facteur (R)	36
Figure III.3	Carte du facteur (LS)	37
Figure III.4	Code Structure (b)	38
Figure III.5	Code de perméabilité (c)	38
Figure III. 6	Carte du facteur (K)	39
Figure III.7	Carte du facteur (P)	40
Figure III.8	Diagramme expérimental d'estimation du facteur (C)	42
Figure III.9	Préparation des images satellitaires	43
Figure III.10	Carte des valeurs du NDVI (Juillet 2015)	43
Figure III.11	Carte des valeurs du NDVI (Mars 2016)	44
Figure III.12	Carte du facteur C (Juillet 2015)	44
Figure III.13	Carte du facteur C (Mars 2016)	45
Figure III.14	Taux annuel des pertes en sol (Juillet 2015)	46
Figure III.15	Taux annuel des pertes en sol (Mars 2016)	46

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I: Description de la zone d'étude

I.1. Introduction	02
I.2. La situation géographique	02
I.3. La géologie	04
I.3.1. Aperçu sur la géologie de l'Algérie du Nord	04
I.3.2. La lithologie des formations	06
I.4. Les sols	07
I.5. Le couvert végétal	08
I.6. Le réseau hydrographique	08
I.7. Situation climatique	09
I.7.1. Climat	09
I.7.2. Température	10
I.7.3. Vent	11
I.7.4. Précipitations	11
I.8. Transport solide en suspension	12
I.9. Caractéristiques morphométriques	13
I.9.1. La surface	13
I.9.2. Le périmètre	13
I.9.3. La forme	13
I.9.4. Le rectangle équivalent	14
I.9.5. Altimétrie et courbe hypsométrique	14
I.9.6. Caractéristiques des altitudes	16
I.10. Indices de pente	17
I.10.1. Indice de pente globale	17
I.10.2. Dénivelée spécifique	17
I.11. Les caractéristiques du réseau hydrographique	18
I.11.1. Densité de drainage	18
I.11.2. Densité hydrographique	19
I.11.3. Coefficient de torrentialité	19
I.11.4. Temps de concentration	19
I.11.5. Vitesse d'écoulement de l'eau	20
I.12. Conclusion partielle	21

Chapitre II : Le phénomène de l'érosion

II.1. Introduction	22
II.2. Définitions	22
II.3. Facteurs influençant l'érosion	23
II.3.1. Influence du climat	23
II.3.2. Influence du sol	23
II.3.3. Facteurs topographiques	23
II.3.4. Facteurs géologiques	23
II.3.5. Le couvert végétal	24
II.3.6. Les labours inadaptés	24
II.4. Types d'érosion	24
II.4.1. L'érosion éolienne	24
II.4.2. L'érosion aratoire ou mécanique sèche	24
II.4.3. L'érosion hydrique	25
II.5. Les enjeux de la conservation des sols dans le bassin méditerranéen	29
II.5.1. Les enjeux agricoles	29
II.5.2. Les enjeux territoriaux	29
II.5.3. Les enjeux paysagers	30
II.5.4. Les enjeux environnementaux	30
II.6. Lutte contre l'érosion hydrique	30
II.7. Conclusion partielle	31

Chapitre III : Estimation de l'érosion par RUSLE

III.1. Introduction	32
III.2. Méthodes d'évaluation de l'érosion	32
III.3. Le modèle RUSLE	33
III.4. Résultats et discussion	34
III.4.1. Calcul du facteur d'agressivité des précipitations (R).....	
III.4.2. Détermination du Facteur topographique (LS).....	36
III.4.3. Détermination du facteur d'érodibilité des sols (K)	37
III.4.4. Pratique anti- érosive (P)	39
III.4.5. Occupation des sols (C)	40
III.4.6. Taux annuel des pertes en sol (A)	45
III.5. Conclusion partielle	47
Conclusion générale	48

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

L'érosion des sols est un processus naturel qui est sans doute largement responsable de la géomorphologie actuelle. Les changements climatiques et des paysages sous l'influence de la pression démographique et l'extension des cultures d'exploitation, ont contribué à l'augmentation de l'exposition des terres au processus de ruissellement, et par conséquent, à la dégradation des sols par l'érosion.

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 enquêtes sur le terrain.

Ce travail a pour objectif l'estimation et la cartographie des risques érosifs du bassin Boussellam (Soummam) en utilisant l'équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE), SIG (ArcGis) et la télédétection.

Cette étude est constituée de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre décrit le bassin versant de Boussellam et ses caractéristiques.
- Le deuxième chapitre est dédié à la description du phénomène de l'érosion et son processus.
- Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation et à la cartographie du taux d'érosion.

Enfin, la conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives de recherche pour les prochaines années, puisque l'ampleur du sujet mérite encore bien d'autres développements.

Chapitre I

Description de la zone d'étude

Chapitre I : Description de la zone d'étude

I.1 Introduction

Le chapitre est consacré à une description générale du bassin versant étudié afin de déterminer les caractéristiques géographiques, géomorphologiques, géologique et hydrogéologiques, outils fondamentaux à la compréhension des mécanismes hydrologiques. L'ensemble de ces caractéristiques joue un rôle capital dans le comportement hydrologique des bassins versants et des cours d'eau.

I.2. La situation géographique

Le sous bassin versant de Boussellam appartient au grand bassin de la Soummam (15) qui est situé dans la partie centrale au Nord de l'Algérie (Figs. I.1 – I.3).

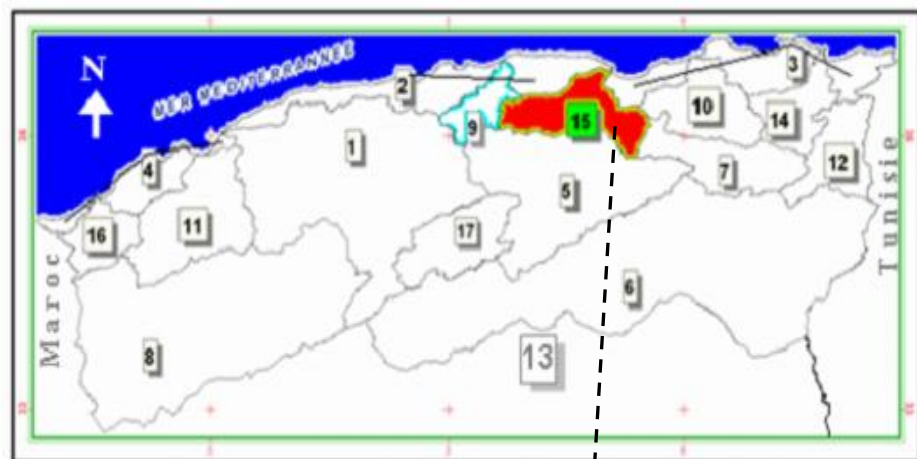


Figure I.1 : Carte des grands bassins versants d'Algérie

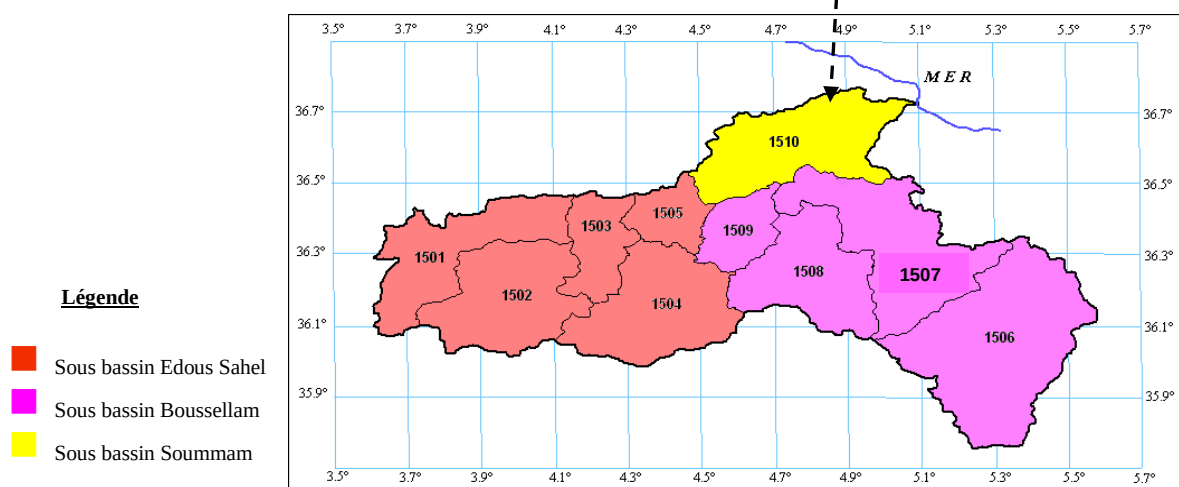


Figure I.2 : Les grands sous bassins versants de la Soummam [1]

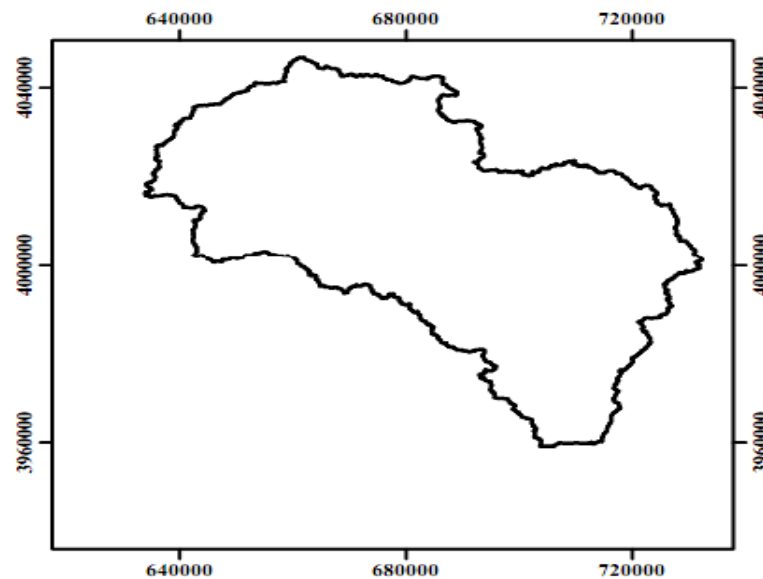


Figure I.3 : Délimitation du sous bassin versant de Boussellam par ArcGis

Le sous bassin versant de Boussellam est constitué à son tour de quatre (04) sous bassins (1506, 1507, 1508, 1509). Ce sous bassin prend sa source au Djebel Meghris au Nord de Sétif et draine l'eau vers l'Oued Soummam sur une longueur d'environ 129 Km.

L'oued Boussellam représente le principal axe hydrographique de Sétif. Il constitue avec l'Oued Sahel à l'Ouest, l'un des deux principaux affluents de la Soummam ; il draine 54,9 % de la superficie totale du bassin à la mer [2]. La Superficie du bassin versant est d'environ 4151 km², avec une longueur de 129 km et un volume régularisable annuellement de près de 38 Hm³. Il est constitué par la réunion de l'Oued Gassar qui longe le piémont sud du Djebel Meghris (Altitude 1737 m) et l'Oued Ouricia qui se trouve dans la partie sud de ce Djebel [3].

Il prend sa source à une altitude de 1100 m environ à cinq kilomètres au Nord-ouest de la ville de Sétif. Il s'étale approximativement entre les longitudes : 5° 20' 00'' et 5° 25' 00'' Est et 36° 10' 00'' et 36° 15' 00'' Nord. L'Oued Boussellam passe par plusieurs agglomérations dans la région Nord de Sétif (Bougaâ, Hammam Gergour, Oued Sebt, Charchar et Béni Ourtillene) et la région Sud (Farmatou, Sidi el khier, Mezloug et Hammam Ouled Yelles) (Fig. I.4). Historiquement, cet Oued a de tout temps était considéré comme un milieu humide de premier plan par les riverains et notamment par les habitats de la ville de Sétif. Il était exploité aussi bien pour la baignade, la pêche, le loisir et même les villégiatures [3].

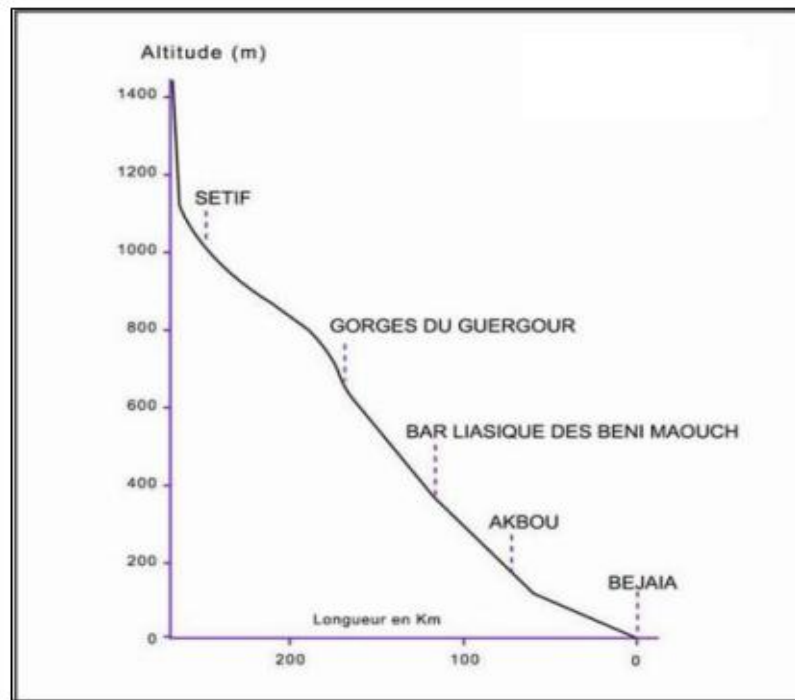


Figure I.4 : Profil en long de l'Oued Boussellam - Soummam [2]

I.3. La géologie

La géologie et la lithologie constituent une donnée importante pour la connaissance et l'étude du milieu. La nature des terrains est un des principaux critères qui conditionne le choix des travaux de mise en valeur. D'un point de vue géologique, l'Algérie est subdivisée en deux domaines qui s'opposent par leur histoire et leur structure géologique [4].

- Un domaine septentrional en Algérie du Nord.
- L'Algérie saharienne.

La frontière entre ces deux domaines est délimitée par l'accident Sud-atlasique qui suit le revers Sud de l'atlas saharien. Notre zone (région) étudiée appartient au premier domaine et fait partie de la chaîne des Maghrébides.

I.3.1. Aperçu sur la géologie de l'Algérie du Nord

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogénèse alpin périméditerranéen d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km depuis l'Espagne du Sud, à l'arc calabro-sicilien [4].

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogénèse alpin périméditerranéen (*Durand-Delga, 1969*) d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km depuis l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien (Figs. I.5 et I.6).

En Algérie, la chaîne des Maghrébides montre du nord au sud les domaines suivants :

- **le domaine interne** : appelé aussi socle kabyle ou Kabylide, est composé de massifs cristallophylliens métamorphiques (gneiss, marbres, amphibolites, micaschistes et schistes) et d'un ensemble sédimentaire paléozoïque (Ordovicien à Carbonifère) peu métamorphique. Ce socle affleure d'ouest en est dans les massifs du Chenoua (à l'ouest d'Alger), d'Alger, de Grande Kabylie et de Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda). Ce dernier, avec 120 km de long et 30 km de large, constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie. Ce socle est bordé au sud par les unités mésozoïques et cénozoïques de la Dorsale Kabyle appelée parfois "chaîne calcaire" à cause de l'importance du Jurassique inférieur calcaire.
- **le domaine des flyschs** : est constitué par des nappes de flyschs crétacés-paléogènes qui affleurent dans les zones littorales sur 800 km de long, entre Mostaganem et Bizerte (Tunisie). Il s'agit essentiellement de dépôts de mer profonde mis en place par des courants de turbidités. Ces flyschs se présentent de trois manières :
 - i) en position interne, superposés aux massifs kabyles, c'est-à-dire rétro-charriés sur les zones internes, et appelés flyschs nord-kabyles ;
 - ii) en position relativement externe à la bordure sud de la Dorsale kabyle (flyschs sud-kabyle)
 - iii) en position très externe, sous forme de masse isolées flottant sur le Tell charriées jusqu'à une centaine de kilomètres au sud.

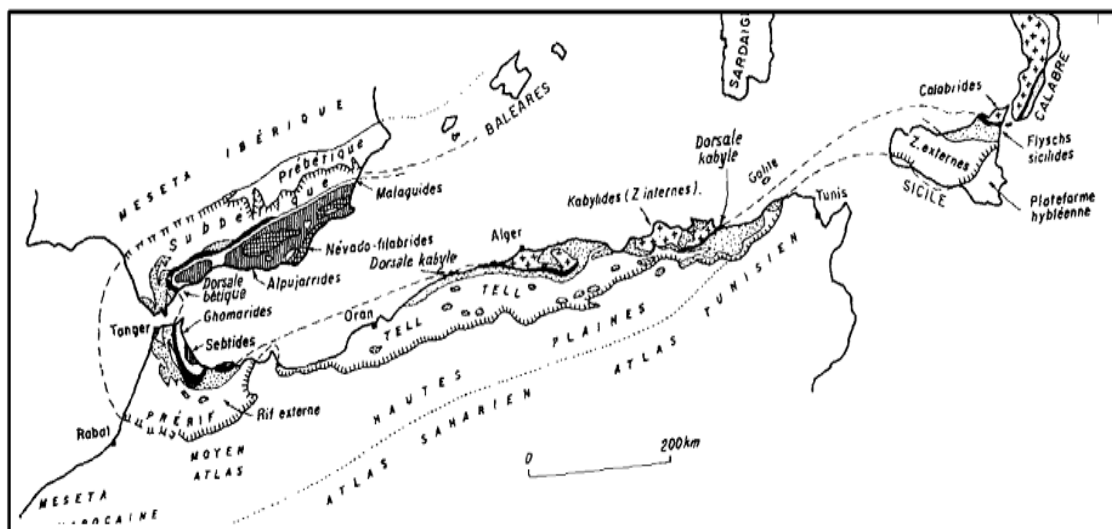


Figure I.5 : L'orogénèse alpin périméditerranéenne [5]

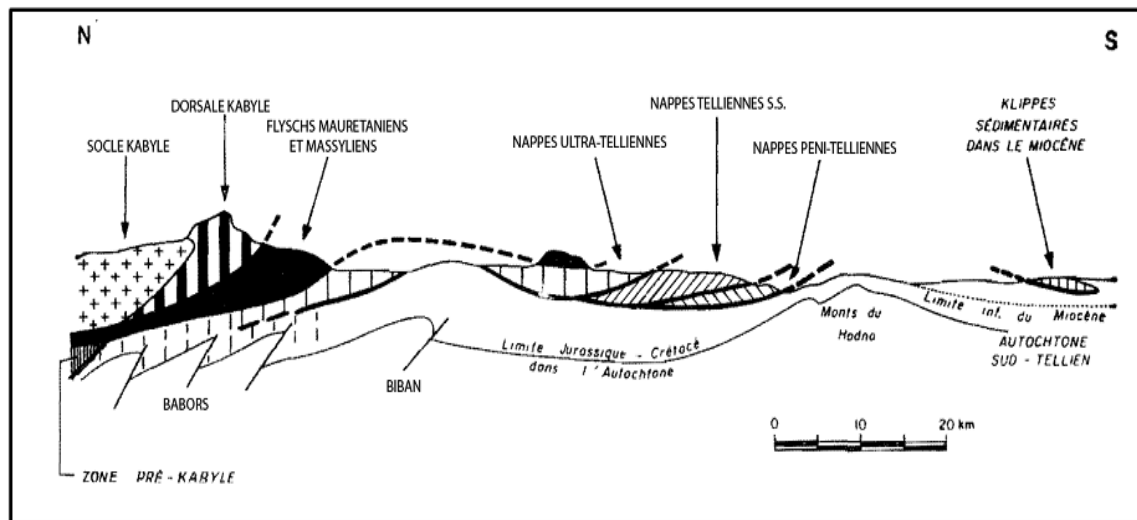


Figure I.6 : Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides [5]

II.3.2. La lithologie des formations

La géologie du bassin d'Oued Boussellam a été étudiée en se référant aux anciens travaux géologiques : La carte géologique de Sétif au 1/50 000, la carte géologique de l'Algérie au 1/500.000.00. L'Oued Boussellam s'étend sur des roches calcaires appartenant au Quaternaire [4]. Du point de vue lithologique, on distingue des roches calcaires appartenant au quaternaire, des apports d'alluvions récentes constituées de dépôts quaternaires d'origine calcaire lacustre, et des croutes villafranchiennes avec horizon caillouteux sphéroïdes. Le Mio-pliocène montre la présence des dépôts fluvio-lacustres offrant habituellement une coloration rougeâtre, assez prononcée, constitués de sables, graviers limon et argiles.

Le lit de l'oued est limite par les formations telliennes qui sont surtout représentées par des unités supérieures à matériel éocène et se localisent sur les versants Sud-ouest de Djebel Megress en plus de l'éocène moyen et supérieur formé par des marnes noires, brunes et grises. Le Sud de la carte géologique de Sétif est constitué par la nappe de Djemila composée de calcaire bitumineux blanc à cassure noire et silex noir. Au Nord, on trouve des formations calcaires constituées de roches marneuses noirâtres et de calcaire massif gris, blancs ou noirs (Fig. I.7) [1].

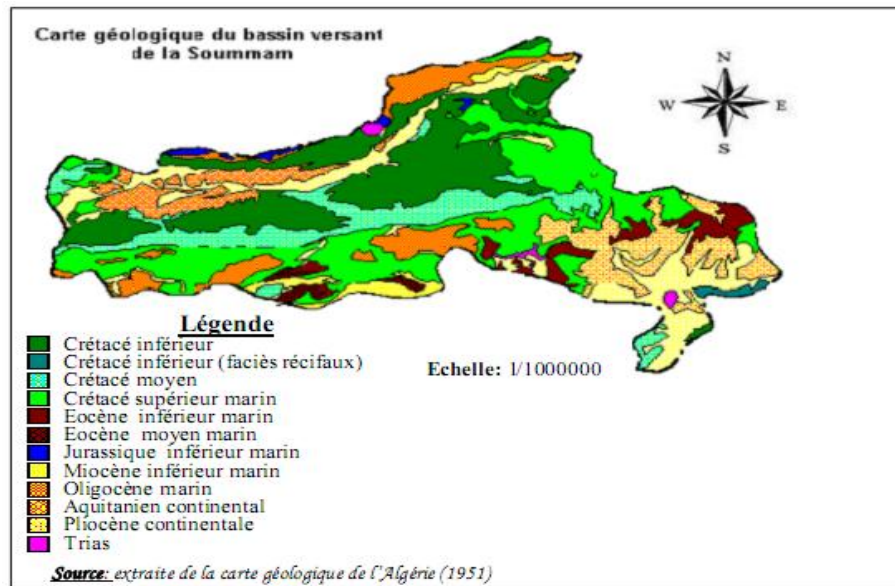


Figure I.7 : Carte géologique du bassin versant de la Soummam [1]

I.4. Les sols

Dans le bassin versant de la Soummam on trouve des types de sols anciens de formation paléo-marécageuse qui sont caractérisés par des formations bien accentués. La majorité des sols dans le bassin de la Soummam sont des sols calcaires (riches en calcaire). Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables (Fig. I.8).

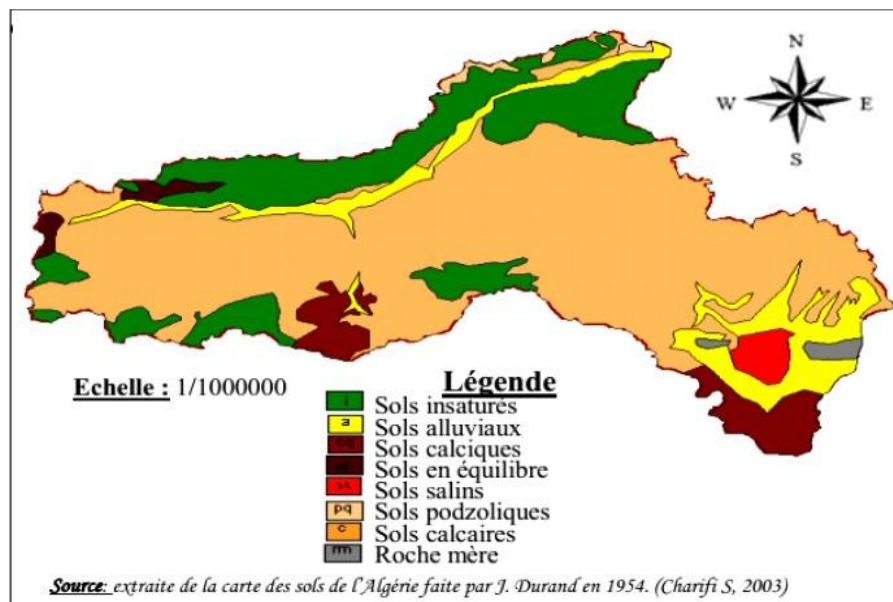


Figure I.8: Carte des sols du bassin versant de la Soummam [6]

Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables. Le long des Oueds, les

sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux. En outre on rencontre, en petites quantités des sols calcaïques et des sols en équilibre peu épais, plus ou moins riches en calcaire et très pauvres en sels solubles.

I.5. Le couvert végétal

La végétation est un paramètre physique important des bassins. Suivant sa nature, sa diversité et sa densité, le couvert végétal influence directement le cycle de l'eau au sein des bassins versants. La végétation évolue en fonction des conditions climatologiques du milieu. Ainsi, la densité de la végétation diminue avec l'altitude du fait de l'évolution des conditions climatologiques. Si la densité de la végétation diminue, alors les pertes par évapotranspiration et par interception diminuent de l'aval vers l'amont.

Sur les massifs de l'Akfadou, de Timezrit et des Babors, la végétation est dense et variée ; elle forme de vastes forêts de chênes, de chênes liège et de pin d'Alep. Par contre, elle est moins dense et localisée sur les reliefs intermédiaires, voire absente sur les collines marneuses. Elle est représentée par des maquis de chêne nain et d'oliviers lentisques. Par ailleurs, la zone montagneuse demeure une région de l'arboriculture notamment l'olivier et le figuier. Par contre pour la zone des dépressions et compte tenu de la qualité saline de ses sols, la flore est généralement pauvre [2]. Dans la plaine, la végétation est dense mais essentiellement temporaire ; elle est formée par les grands et formidables champs de cultures maraîchères diverses. Autrefois, les forêts qui couvraient la région fournissaient le bois nécessaire à une industrie du bois florissante mais malheureusement ce capital tend à disparaître sous les feux qui ravagent chaque année des milliers d'hectares. À cela s'ajoute l'absence d'une politique claire de reboisement et de lutte contre les incendies [1].

I.6. Le réseau hydrographique

Le bassin versant de la Soummam est très développé hydrographiquement par ses divers cours d'eau. La majorité de ses eaux sont drainées par l'Oued de Boussellam et Oued Sahel qui se rencontrent près d'Akbou formant l'Oued Soummam (Fig. I.9).

En ce qui concerne les eaux souterraines, dans la grande partie de bassin versant de la Soummam, elles sont confinées dans des couches profondes et ne peuvent remonter en surface que par des courants ascendants [6].

Le réseau hydrographique du sous bassin Boussellam tracé par ArcGis est représenté sur la figure (I.10).

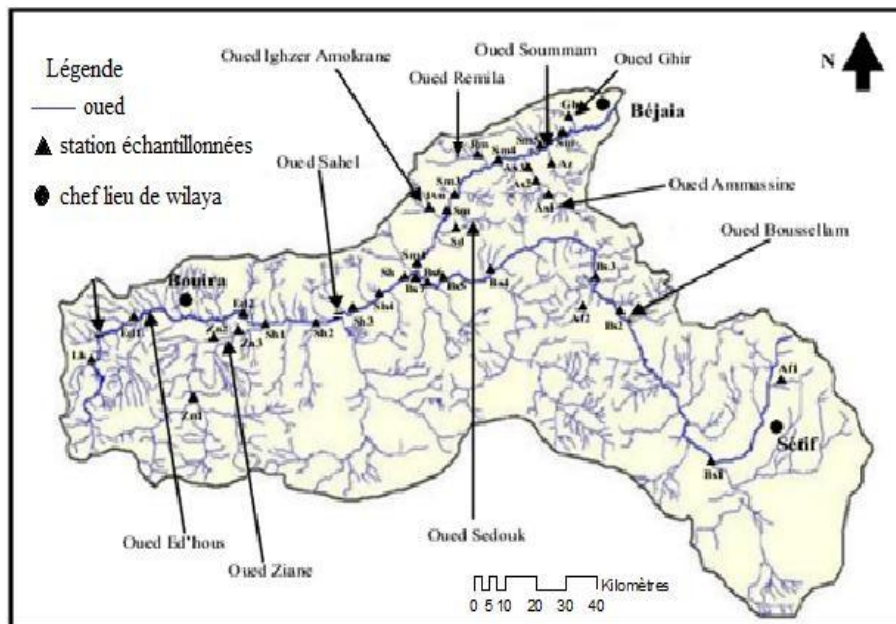


Figure I.9: Réseau hydrographique du bassin Soummam [6]

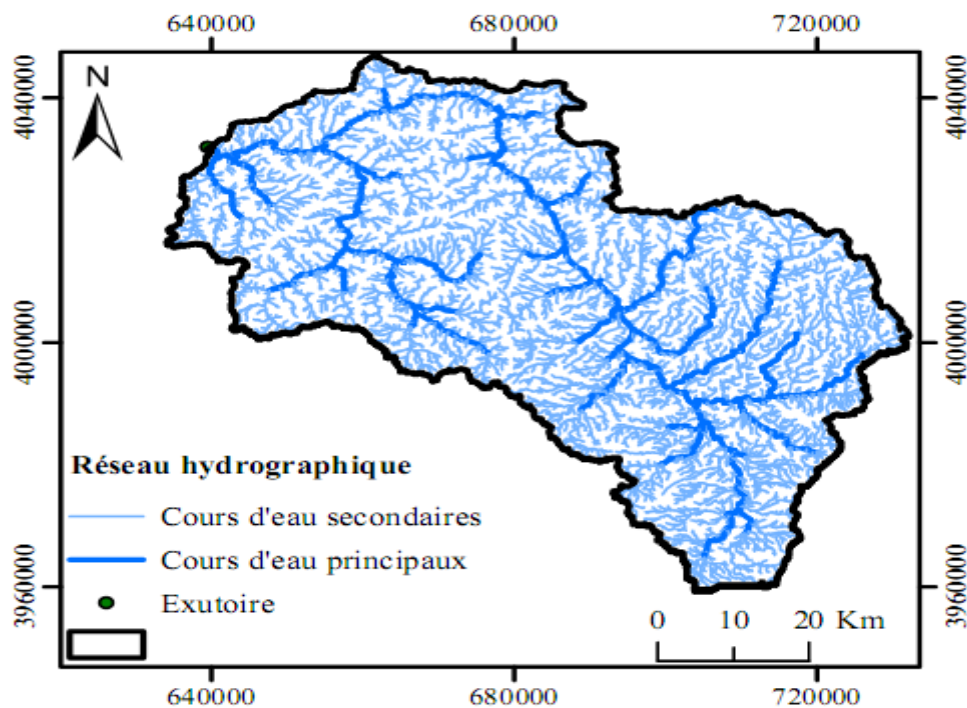


Figure I.10: Réseau hydrographique du sous bassin Boussellam

I.7. Situation climatique

I.7.1. Climat

La région de la Soummam est sous la dépendance de trois types de climat : climat littoral tempéré sur le cours inférieur de l'Oued Soummam, climat de l'Atlas Tellien sur la moyenne Soummam et sur une partie du haut bassin de la Soummam (Oueds Sahel - Cours inférieurs de Oued Boussellam) et climat des hautes plaines sur le haut bassin de l'Oued Boussellam. Une

carte des étages bioclimatiques est représentée dans la figure (I.11). Selon cette dernière, le climat de Boussellam est humide à sub-humide dans les régions Est et Nord, un climat semi-aride au centre et un climat aride au Sud.

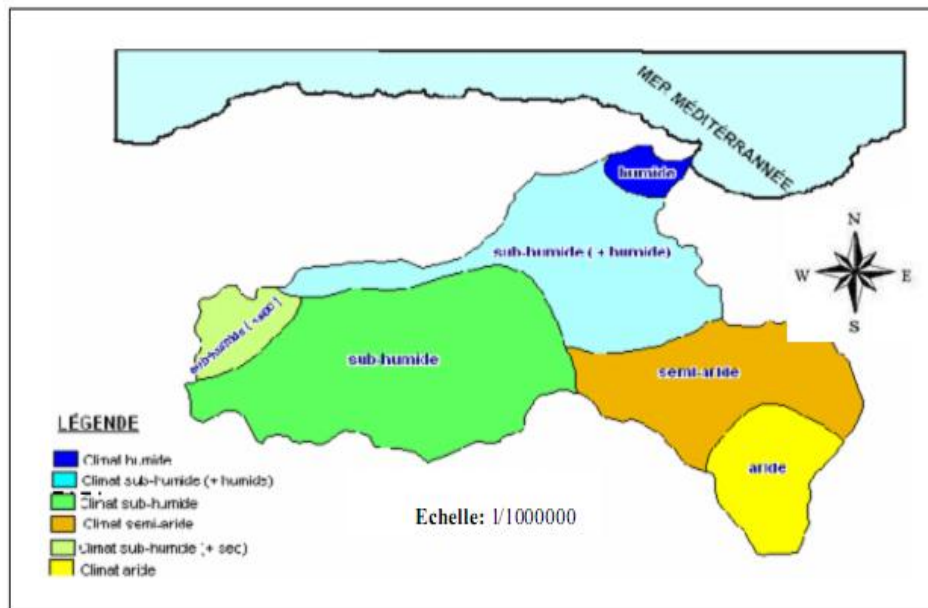


Figure I.11: Etages bioclimatiques du bassin Soummam [1]

I.7.2. Température

A titre indicatif, l'abaissement des températures maximales est de 0.65 °C pour une élévation de 100 m d'altitude, et celle des minimales est de l'ordre de 0.4°C pour la même élévation d'altitude. L'altitude maximale de notre zone d'étude est de l'ordre de 1757 m et l'altitude minimale est de 189 m. Ce qui signifie que l'altitude moyenne de notre zone d'étude est d'environ 973 m. Les températures moyennes mensuelles relevées de 1978 à 2017 sont représentées par le tableau suivant.

Tableau I.1 : Températures moyennes mensuelles en degrés Celsius corrigées de la région d'étude

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
T _{max} (C°)	11.75	11.62	13.28	15.01	17.53	21.03	24.13	24.88	22.79	20.07	15.42	12.27
T _{min} (C°)	4.14	4.33	5.69	7.49	10.63	14.33	17.33	17.91	15.8	15.8	8.44	5.33
T _{moy} (C°)	7.64	7.97	9.48	11.25	14.08	17.68	20.73	21.39	19.29	16.31	11.93	8.8

Avec :

T_{max}: Température maximale, T_{min}: Température minimale

T_{moy}: Température moyenne. $[T^{\circ}_{moy} = (T_{max} + T_{min})/2]$

Il en ressort que le mois de janvier est le plus froid avec une température de 4.14 °C, alors que les mois de juillet et août sont les plus chauds à des valeurs 24.13 °C et 24.88 °C.

I.7.3. Vent

C'est un facteur favorisant l'évaporation, il transporte les couches d'air saturées qui sont près de la surface de l'eau ou des sols pour être remplacées par des couches d'air plus au moins sèches.

Dans la région de la Soummam, les vents dominants sont les vents du nord-ouest (vents marins qui s'engouffrent facilement dans la vallée de la Soummam). En hiver, ils apportent les nuages, la pluie. En été, ce sont les vents sud-est qui sont beaucoup moins importants et surtout le vent sud, le sirocco, vent sec d'intensité variable ayant une action funeste sur la végétation. Les moyennes mensuelles des vitesses du vent moyen sur dix ans sont données dans le tableau ci-après.

Tableau I.2 : Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003) [1]

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

La vitesse du vent la plus faible a été enregistrée le mois d'août de l'ordre de 3,38 m/s contrairement à la période hivernale où les vents sont froids et violents surtout durant le mois de décembre et janvier dont la vitesse du vent varie entre 4,91 et 4,7 m/s.

I.7.4. Précipitations

Deux groupes de facteurs géographiques (*éloignement par rapport à la mer, altitude, exposition des versants par rapport aux vents pluvieux du Nord-Ouest*) et météorologiques (*déplacement des masses d'air polaire océanique, froid et humide, des masses d'air tropical chaud et humide de l'Atlantique Sud et enfin des masses d'air tropical continental ou anticyclone saharien*) influencent la répartition spatiale des précipitations, mais aussi les structures des régimes pluviométriques [1].

Le caractère d'irrégularité temporelle des précipitations est, par ailleurs, une donnée fondamentale du climat algérien. La carte pluviométrique de l'Algérie du Nord établie par l'Agence Nationale des Ressource Hydrique ([ANRH – Projet PNOD/ALG/88/021-Janvier 1993](#)) fournit la pluie moyenne annuelle de la période 1969 – 1989. On observe les points suivants:

- Les pluies sont maxima sur le massif du Djurdjura de 1000 mm jusqu'à 1500 mm.
- Le bassin du Sahel, au centre et au Sud, à des précipitations comprises entre 300 et 500 mm.
- Le bassin aval, près de Bejaia, est soumis à des précipitations de 600 à 900 mm.

- Le bassin du Boussellam comprend deux secteurs : le Sud, caractérisé par un climat aride, a des précipitations inférieures à 400 mm, voire à 300 mm. Le Centre et le Nord du bassin ont des précipitations plutôt supérieures à 500 mm, avec des valeurs moyennes de l'ordre de 600 mm, et jusqu'au maximum de 700 mm.

La pluviométrie du bassin versant de la Soummam est bien déterminée grâce à l'existence d'environ 50 stations pluviométriques, soit à peu près une station pour 180 km². L'exploitation des données pluviométriques de treize (13) stations situées dans le bassin Boussellam a montré que la moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 423,31 mm [Tableau I.3].

Tableau I.3 : Valeurs des précipitations mensuelles et annuelles de 13 stations du sous bassin versant Boussellam (1970 -2017) [4,6]

N°	Code	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	P _{an}
1	150603	27.78	32.42	34.35	26.47	31.27	30.07	31.78	34.73	38.66	20.56	7.9	10.13	346.4
2	150606	32.95	36.72	37.18	63.73	48.28	39.9	43.92	40.81	43.43	21.81	8.35	11.11	420.32
3	150607	33.29	37.74	39.38	54.83	49.55	41.49	45.86	43.36	44.3	22.06	8.39	11.22	432.45
4	150608	32.81	36.88	39.5	60.29	52.54	46.1	51.62	46.77	43.59	20.85	7.87	10.75	441.99
5	150614	28.3	34.36	37.18	40.26	38.19	33.52	33.89	37.62	40.01	21.32	8.02	10.43	370.9
6	150703	27.52	47.98	57.82	98.92	92.93	84.26	65.88	57.64	43.85	15.81	4.81	7.84	612.82
7	150706	36.07	46.51	52.04	81.51	70.6	61.89	62.65	52.45	49.13	20.93	7.89	11.22	555.94
8	150707	29.51	31.73	39.07	50.84	39.87	36.72	42.53	37.81	39.8	20.59	8.32	9.06	385.85
9	150802	31.79	39.72	48.14	80.6	61.97	57.97	59.23	55.47	45.3	19.79	7.16	10.37	500.62
10	150904	26.31	32.83	43.04	62.16	56.59	42.31	42.82	38.37	29.24	8.14	4.49	8.55	394.85
11	150602	29.51	31.73	39	50.84	39.87	36.72	42.53	37.81	39.8	20.59	8.32	8.5	385.22
12	50901	26.6	28.8	35.27	42.85	47.47	32.47	28.67	33.3	29.8	7	5.4	4.19	321.82
13	150801	33.12	26.89	31.3	38.47	36.56	27.24	31.12	39.59	38.54	15.94	3.97	11.44	333.88
Moyenne annuelle														423.31

I.8. Transport solide en suspension

L'estuaire du bassin versant de la Soummam reçoit une partie importante du volume des rejets urbains et industriels, en plus des eaux chargées qui viennent de l'amont.

La qualité des eaux à l'estuaire est nettement dégradée, vue que les concentrations des matières en suspension (MES) sont très élevées et dépassent de loin les normes relatives aux eaux de surfaces (> 50 mg/L), en plus d'une charge en matières dissoutes exprimées par des conductivités électriques assez élevées comprise entre 1.26 et 13.22 mS/cm. Les concentrations en oxygène dissout (OD) sont relativement faibles (2.82 - 5.4 mg/L). Une nette variation temporelle de ces paramètres (MES, Conductivité, OD) a été constatée durant la période d'étude, ceci est dû principalement aux variations des taux de précipitation (facteur naturel), en plus des rejets urbains et industriels dont le volume est très irrégulier dans le temps (facteur anthropique) [7].

I.9. Caractéristiques morphométriques

Les paramètres morphologiques d'un bassin versant (forme, altitudes, pente, relief, ...) jouent un rôle essentiel dans son comportement hydrologique. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée qu'il convient de préciser autant que possible, dès le début de toute étude. La forme des bassins versant qui peut être traduite par l'indice de compacité de *Gravelius* a également une influence certaine sur l'écoulement.

Les résultats de cette étude ont été réalisés en utilisant le logiciel ArcGis 10.1.

I.9.1. 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 Arc Gis, Global Mapper, MapInfo ...). La surface du bassin versant de Boussellam est de 4150.9 km².

I.9.2. 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 B.V de Boussellam est de 421.41km.

I.9.3. 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](#)) [8] :

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

- 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.

Avec :

K_G : Indice de compacité de *Gravelius*

P : Périmètre du bassin versant en km

A : Superficie du bassin versant en km^2 .

$K_G = 1.83 \Rightarrow$ le bassin versant Boussellam est de forme allongée.

I.9.4. Le rectangle équivalent

C'est le rectangle de longueur L et de largeur ℓ qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant. Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité), et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

En 1963, [Roche](#) a établi deux relations relatives aux dimensions du rectangle équivalent, dont les dimensions sont données par les relations suivantes :

$$L_r = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)} \right]$$

$$\ell_r = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)} \right]$$

Avec :

L_r : Longueur du rectangle équivalent en km

ℓ_r : Largeur du rectangle équivalent en km

K_G : Indice de compacité

A : Superficie du bassin versant en km^2 .

Pour notre cas, nous obtenons :

$$L_r = 188.72 \text{ km} \quad \ell_r = 21.99 \text{ km}$$

I.9.5. Altimétrie et courbe hypsométrique

La topographie du bassin joue un rôle très important en hydrologie, elle conditionne le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation.

Les résultats d'une telle application sont donnés dans les tableaux suivants.

Les fréquences altimétriques sont représentées dans le [Tableau \(I.4\)](#) et par la courbe hypsométrique ([Fig. I.12](#)).

Ces représentations montrent que la classe d'altitude supérieure (1364 – 1757 m) ne représente que 55.75 Km², soit environ 1.34 % de la surface totale du bassin. 24.81 % de la surface du bassin se trouve entre 860 et 945 m d'altitude avec une surface de 1029.752 km².

Tableau I.4 : Répartition des différentes tranches d'altitude

Tranche d'altitude	Surface (km ²)	Surface (%)	Surface Cumulée (%)	Surface Cumulée (km ²)	Altitude (m)
189 - 441	109.0739	2.63	2.63	109.0739	189
442 - 600	200.0107	4.82	7.45	309.0846	442
601 - 742	285.8429	6.89	14.34	594.9275	601
743 - 859	433.6908	10.45	24.79	1028.6183	743
860 - 945	1029.752	24.81	49.6	2058.3703	860
946 - 1019	923.6588	22.25	71.85	2982.0291	946
1020 - 1111	564.8208	13.61	85.46	3546.8499	1020
1112 - 1222	374.721	9.03	94.49	3921.5709	1112
1223 - 1363	173.2392	4.17	98.66	4094.8101	1223
1364 - 1757	55.75092	1.34	100	4150.56102	1364
Total	4150.56102	100			1757

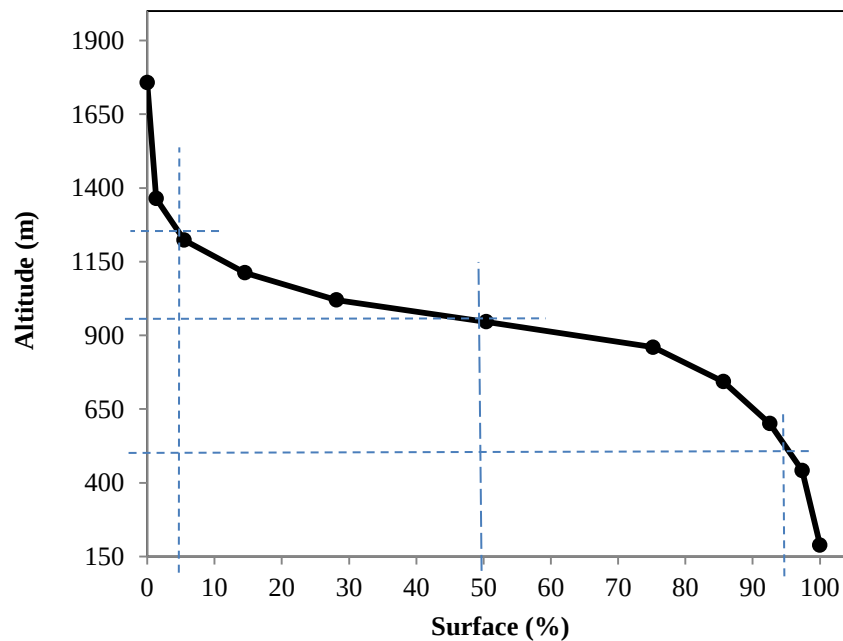


Figure I.12 : Courbe hypsométrique du bassin versant Boussellam

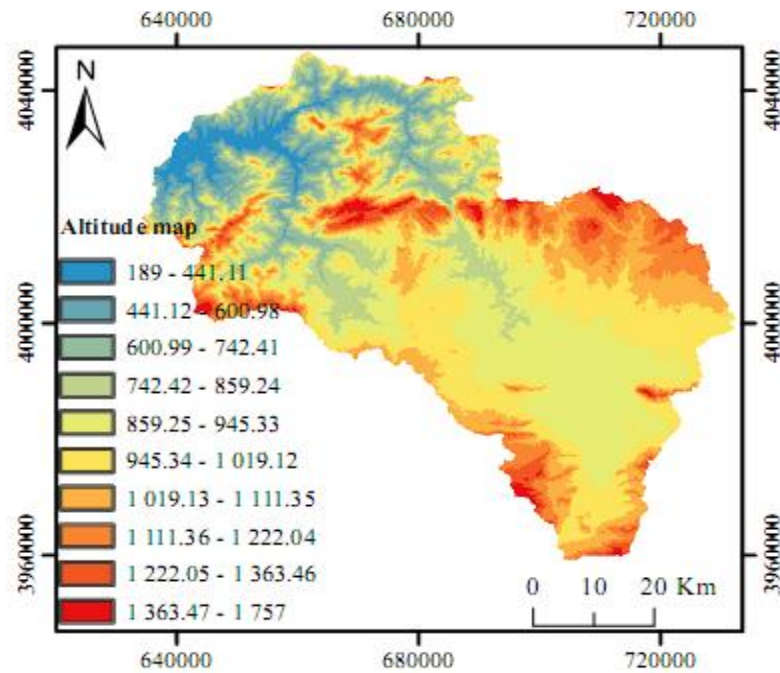


Figure I.13 : Carte des tranches d'altitude du bassin Boussellam

I.9.6. Caractéristiques des altitudes

1) Altitude moyenne (H_{moy})

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques. Elle se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

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

Avec :

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

A_i : Surface élémentaire comprise entre deux courbes de niveaux (Km^2)

A_t : Surface totale du bassin (Km^2).

Pour notre cas, $H_{moy} = 931,65$ m.

2) Altitude médiane (H_{50})

Correspond au point d'abscisse 50 % sur la courbe hypsométrique, $H_{50\%} = 940$ m.

3) Altitudes extrêmes

Les principales altitudes extrêmes sont les suivantes :

- L'altitude minimale est : $H_{min} = 189$ m

- L'altitude maximale est : $H_{\max}=1757$ m
- La hauteur à 5% de la surface totale est : $H_{5\%} = 1250$ m
- La hauteur à 95% de la surface totale est : $H_{95\%} = 520$ m.

4) Dénivelée simple (D)

Sur la courbe hypsométrique tracée, on prend la distance verticale en (m), qui sépare les altitudes ayant 5 % et 95 % de la surface totale du sous bassin versant.

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 730 \text{ m.}$$

I.10. 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 :

I.10.1. 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 (m)

L_r : Longueur du rectangle équivalent (km) ;

$$\Rightarrow I_g = 3.86 \text{ m/km} = 0.00386$$

$I_g < 0.002$	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 2 et 5 m/km, le sous bassin Boussellam présente un relief faible.

I.10.2. Dénivelée spécifique (DS)

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification d'ORSTOM (Tableau I.5). 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 (DS).

$$D_s = I_g * [A]^{1/2} \Rightarrow D_s = 249.21 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM, la dénivelée spécifique du bassin de Boussellam se trouve dans la classe R5, caractérisée par un relief assez fort.

Tableau I.5 : Classification de l'ORSTOM [8]

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 Boussellam présente une carte des pentes ci-après.

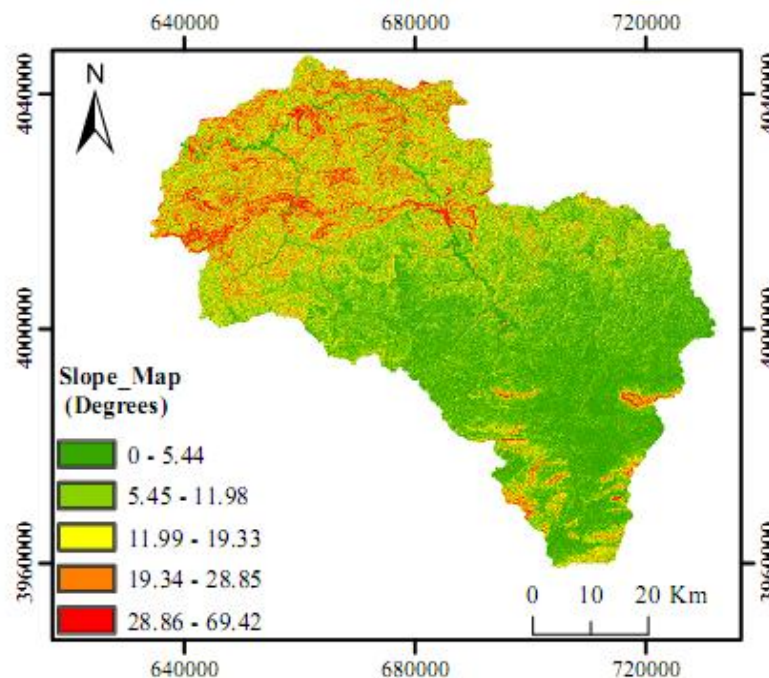


Figure I.13 : Carte des pentes du bassin Boussellam

La carte montre que plus de 84 % de la surface ont une pente inférieure à 19°, 11 % représente 28.85 ° et environ 4% pour la pente de 69.42 °.

I.11. Les caractéristiques du réseau hydrographique

I.11.1. 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 [Schumm](#), 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 [6,8] :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \dots\dots (km/km^2)$$

Où,

$\sum L_i$: longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : aire du bassin en km².

$$\Rightarrow D_d = \frac{51260.787}{4150.9} = 12.34 \text{ km/km}^2$$

I.11.2. Densité hydrographique (F)

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Elle est donnée par la relation :

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

N_i : nombre de cours d'eau.

$$\Rightarrow F = 10081/4150.9 = 2.42 \text{ km}^{-2}.$$

I.11.3. Coefficient de torrentialité (C_T)

$$C_T = \frac{N_1}{A} * D_d$$

N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1 ($N_1 = 4975$). $\Rightarrow C_T = 14.8$

I.11.4. 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 [8].

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 * L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \dots\dots (h)$$

Où,

A : superficie du bassin (km²)

L_p : longueur du talweg principal (km)

H_{moy} : altitude moyenne (m)

H_{min} : altitude minimale (m).

$$\Rightarrow T_c = 20,70 \text{ h.}$$

I.11.5. Vitesse d'écoulement de l'eau (v_e)

Elle est donnée par l'expression suivante.

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

$$\Rightarrow V_e = \frac{129}{74520} = 1.73 \text{ m/s}$$

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales du bassin étudié.

Tableau I.6: Principales caractéristiques morphométriques du bassin de Boussellam

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Aire	A	Km ²	4150.9
Périmètre	P	km	421.41
Indice de compacité	K _G	/	1.83
Altitude maximale	H _{max}	m	1757
Altitude minimale	H _{min}	m	189
Altitude moyenne	H _{moy}	m	931
Indice de pente globale	I _g	%	0.0038
Largeur du rectangle équivalent	l _r	km	21.99
Longueur du rectangle équivalent	L _r	km	188.72
Dénivelée	D	m	730
Dénivelée spécifique	D _s	m	249.21
Altitude à 5%	H _{5%}	m	1250
Altitude à 95%	H _{95%}	m	520
Densité de drainage totale	D _d	km/km ²	12.34
Temps de concentration	T _c	heures	20.70
Classification de Horton	ordre	/	7
Densité hydrographique	F	1/km ²	2.42

I.12. Conclusion partielle

Dans ce chapitre nous avons essayé de représenter le bassin versant de Boussellam, connaître la topographie, les conditions climatiques et l'état actuel du réseau hydrographique de la région.

Ce bassin possède une superficie d'environ 4151km², un périmètre de 421 Km, une altitude moyenne de 931 m, un relief faible et une forme allongée. L'oued Boussellam constitue avec l'Oued Sahel à l'Ouest, l'un des deux principaux affluents de Oued Soummam.

Le bassin du Boussellam est caractérisé par un climat humide à sub-humide dans les régions Est et Nord, un climat semi-aride au centre et un climat aride au Sud. Les précipitations sont inférieures à 300 mm au Sud, et supérieures à 500 mm au Centre et au Nord.

La connaissance de la région d'étude est très importante avant toute étude approfondie du bassin (Hydrologie, érosion, transport solide, inondations ...). Dans cette étude nous allons nous intéresser au phénomène d'érosion.

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 ravinatoire, 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.

II.2. Définitions

- L'érosion du sol, soit le mouvement du sol d'un lieu vers un autre, survient sous l'effet de trois principaux phénomènes. 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 (les jachères, 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 et à une accumulation à la base des pentes [9,10].
- 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 [10].

II.3. 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.

II.3.1. Influence du climat

Le climat est un facteur important qui influe sur 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.3.2. 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.3.3. 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.3.4. 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.3.5. Le 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.3.6. 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 structurale 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.4. Types d'érosion

II.4.1. 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].

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.4.2. L'érosion aratoire ou mécanique sèche

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.4.2.1. 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.4.2.2. 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.4.3. 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].

II.4.3.1. 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.

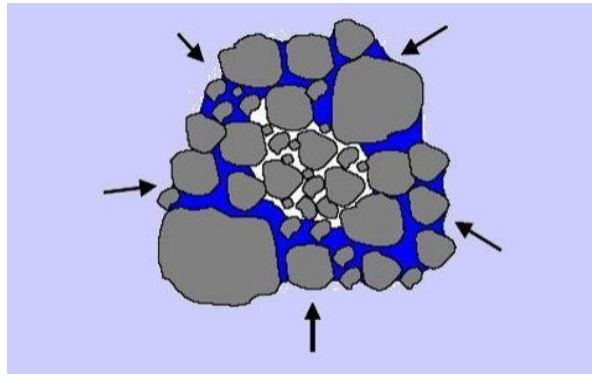


Figure II.1 : Eclatement des agrégats

- *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.

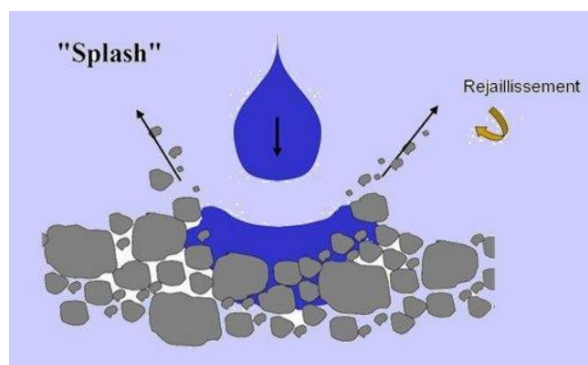


Figure II.2 : Détachement par splash

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.

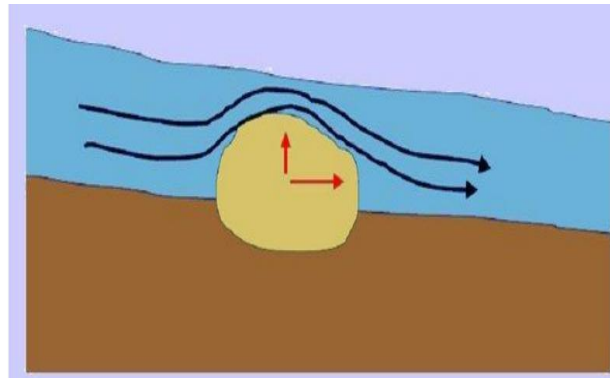


Figure II.3: Détachement par ruissellement

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 (dépôt)

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 il se dépose soit après évaporation de l'eau, soit après floculation.

II.4.3.2. Exemples de dégâts causés par l'érosion hydrique**1) 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 du sol



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

2) 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.5. 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.5.1. 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.5.2. 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.5.3. 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.5.4. 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.6. 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.7. 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.

Cette recherche sur l'érosion nous a permis de connaître et de bien comprendre le phénomène d'érosion, afin de sortir avec les résultats attendus, et d'arriver à l'objectif tracé qui est la quantification de l'érosion hydrique dans le bassin de Boussellam.

Chapitre III

Estimation de l'érosion par RUSLE

Chapitre III : Estimation de l'érosion par RUSLE

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 de la ressource sol.

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).

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

Plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer les risques d'érosion des sols. Ainsi, deux modèles de prédiction de perte en sol ou de l'érosion peuvent être utilisés compte tenu de leur adaptation universelle. Il s'agit du modèle R.U.S.L.E (Revised Universal Soil Loss Equation : *Equation Universelle Révisée des Pertes en Sol*) et du modèle de Gravičovic (Erosion Potential Method) pour prédire, respectivement, les pertes en sol au niveau des versants et la production de sédiments au niveau de l'exutoire des sous bassins versants [14].

Dans cette étude, seul le modèle RUSLE sera étudié pour la quantification des pertes en sol au niveau du bassin versant Boussellam.

L'approche utilisée consisté dans un premier temps, à détecter les facteurs de déclenchant 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 [7,15,19].

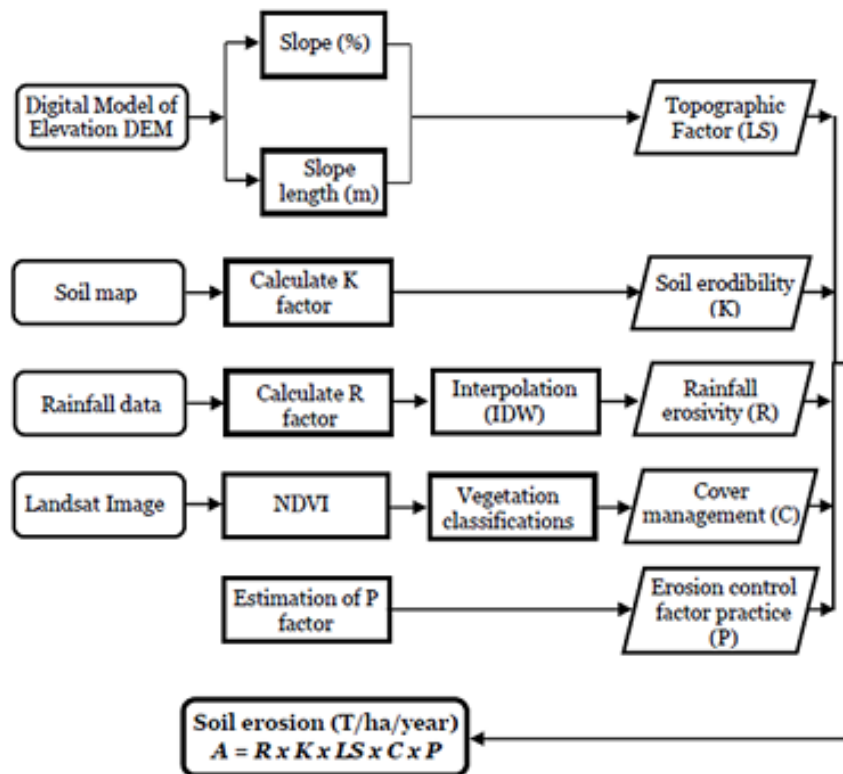


Figure III.1 : Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Boussellam

III.3. Le modèle *RUSLE*

Le modèle *RUSLE* [16] est le développement de l'équation *USLE* [17]. 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.

Le modèle *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. Ce modèle ne prend pas en considération les processus d'érosion comme le détachement, le transport et le dépôt [18]. Il conserve la même forme que l'équation utilisée dans le modèle *USLE*, et que se présente sous la relation suivante.

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

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 de la couverture végétale

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

L'objectif de ce développement 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 du facteur d'agressivité des précipitations (R)

L'estimation du facteur (R) selon la formule de Wischmeier 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 suivante [18].

$$R = K \cdot E_c \cdot I_{30}$$

(K) étant un coefficient dépendant du système d'unités de mesure.

Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent dans le bassin ou à sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles.

Des auteurs comme (Kalman, 1967, Arnoldus, 1987, Rango & Arnoldus, 1987) [7,9,15,19] ont développé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelle et annuelle pour déterminer le facteur (R).

$$\log R = 1.74 \cdot \log \sum (P_i^2/P) + 1.29 \quad \dots\dots\dots (III.2)$$

Où :

P_i : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

Les résultats de calcul du coefficient d'érosivité (R) sont affichés dans le tableau (III.1).

Tableau III.1 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) et R pour la période (1970 -2017) [4,6]

N°	Code	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	P _{an}	R
1	50403	24.81	34.25	38.5	47.42	40.62	41.56	38.69	42.86	39.89	17.46	6.38	8.97	390.75	55.015
2	50501	24.69	31.53	36.47	75.93	68.58	49.17	52.17	40.05	27.45	14.34	4.36	6.99	400.58	72.83
3	50503	26.61	34.3	42.86	70.49	66.83	55.2	52.41	46.29	35.89	16.71	5.59	8.68	452.74	70.14
4	50603	27.78	32.42	34.35	26.47	31.27	30.07	31.78	34.73	38.66	20.56	7.9	10.13	346.4	45.70
5	50606	32.95	36.72	37.18	63.73	48.28	39.9	43.92	40.81	43.43	21.81	8.35	11.11	420.32	61.99
6	50607	33.29	37.74	39.38	54.83	49.55	41.49	45.86	43.36	44.3	22.06	8.39	11.22	432.45	60.53
7	50608	32.81	36.88	39.5	60.29	52.54	46.1	51.62	46.77	43.59	20.85	7.87	10.75	441.99	64.47
8	50614	28.3	34.36	37.18	40.26	38.19	33.52	33.89	37.62	40.01	21.32	8.02	10.43	370.9	51.39
9	50703	27.52	47.98	57.82	98.92	92.93	84.26	65.88	57.64	43.85	15.81	4.81	7.84	612.82	88.38
10	50706	36.07	46.51	52.04	81.51	70.6	61.89	62.65	52.45	49.13	20.93	7.89	11.22	555.94	76.48
11	150707	29.51	31.73	39.07	50.84	39.87	36.72	42.53	37.81	39.8	20.59	8.32	9.06	385.85	55.76
12	50802	31.79	39.72	48.14	80.6	61.97	57.97	59.23	55.47	45.3	19.79	7.16	10.37	500.62	75.58
13	150904	26.31	32.83	43.04	62.16	56.59	42.31	42.82	38.37	29.24	8.14	4.49	8.55	394.85	61.81
14	51002	25.07	44.74	52.38	79.57	80.95	70.22	55.25	48.55	36.31	14.16	3.91	6.37	532.52	76.76
15	51003	37.57	63.96	82.2	126.63	117.8	104.15	81.45	59.61	36.99	15.84	3.26	5.42	735.29	107.26
16	51007	32.85	69.44	87.4	149.13	142.5	116.78	98.94	75.32	47.48	16.31	4.19	7.56	834.52	122.51
17	70103	43.06	26.73	34.33	45.62	52.57	43.02	43.17	45.29	37.05	25.12	4.33	15.91	416.2	58.96
18	100106	27.43	54.41	60.91	115.44	98.83	112.01	94.74	94.73	49.35	15.19	6.64	5.4	735.08	105.89
19	1510	48	89	98	122	113	111	89	74	42	14	7	11	818	110.80
20	70102	30	32	39.5	50.8	40.1	37	42.6	38	40	20.4	8.89	9.8	389.09	55.90
21	150602	29.51	31.73	39	50.84	39.87	36.72	42.53	37.81	39.8	20.59	8.32	8.5	385.22	55.79
22	51111	27.93	34.66	36.88	40.12	37.11	33.52	33.89	37.62	39	21.5	8	9.43	359.66	51.93
23	51011	23.7	19	17.6	24	20.56	18.75	21.55	25.75	30.8	9.1	8.25	10	229.06	36.82
24	50901	26.6	28.8	35.27	42.85	47.47	32.47	28.67	33.3	29.8	7	5.4	4.19	321.82	51.81
25	150801	33.12	26.89	31.3	38.47	36.56	27.24	31.12	39.59	38.54	15.94	3.97	11.44	333.88	50.18

La carte d'érosivité synthétisée à partir de la spatialisation des stations hydrologiques, montre que la valeur du facteur R varie de 36.82 à 122.51 MJ.mm/ha.h.an (Fig. III.2). Les valeurs élevées sont enregistrées au nord du bassin, alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées au sud. En effet, les valeurs de R subissent un gradient croissant de Sud vers le Nord du bassin versant (de l'amont vers l'aval).

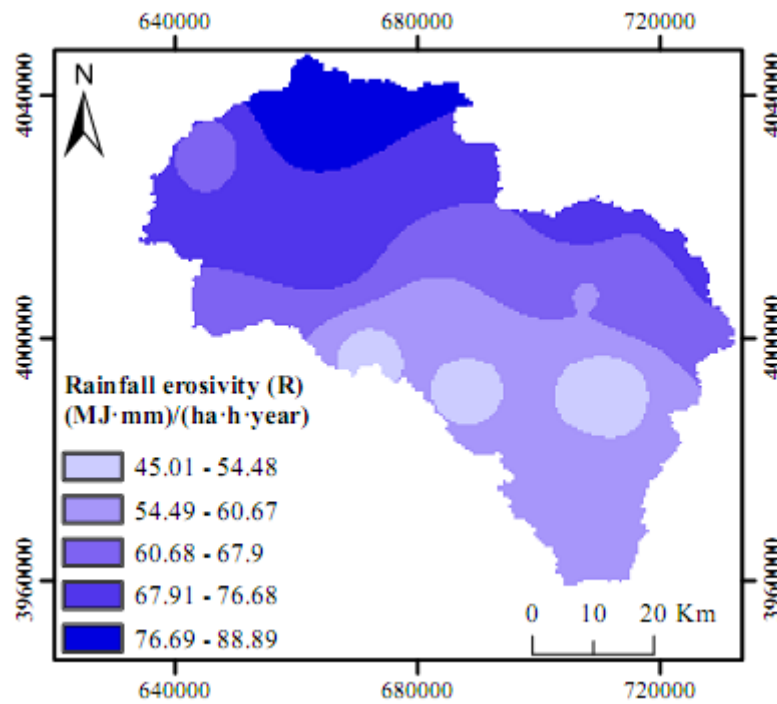


Figure III.2 : Carte du facteur (R)

26.9 % de la surface totale du bassin versant est soumise à une agressivité climatique élevée correspondante à une classe de R supérieur à 67.91 MJ.mm/ha.h.an. Les valeurs de R varient entre 44 et 140 MJ.mm/ha.h.an, avec une moyenne établie à 65.33 MJ.mm/ha.h.an. Les valeurs de R les plus faibles présentées par la classe (45.01 à 54.48 MJ.mm/ha.h.an) se situent au Sud du bassin versant, alors que les valeurs les plus fortes (> 76.68 MJ.mm/ha.h.an) se situent au nord du bassin et aux zones montagneuses. Ces valeurs montrent que le bassin versant de Boussellam est soumis à une agressivité pluviale.

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 [16]. 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 :

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

- $$m = "F" / (1 + "F") \quad \dots\dots\dots \text{(III.4)}$$

- $$L = \text{Power}((\text{"FlowAcc"} + 625), ("m" + 1)) - \text{Power}(\text{"FlowAcc"}, ("m" + 1)) / \text{Power}(25, ("m" + 2)) * \text{Power}(22.13, "m") \quad \dots\dots\dots \text{(III.5)}$$

- $$S = \text{Con}(\tan(\text{"slope_degree"} * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \sin(\text{"slope_degree"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin(\text{"slope_degree"} * 0.01745) - 0.5)) \quad \dots\dots\dots \text{(III.6)}$$

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 99.99 % de la superficie du bassin versant fait partie de la classe 0.03 à 5. Par conséquent, la majeure partie du bassin est soumise à un grand risque d'érosion.

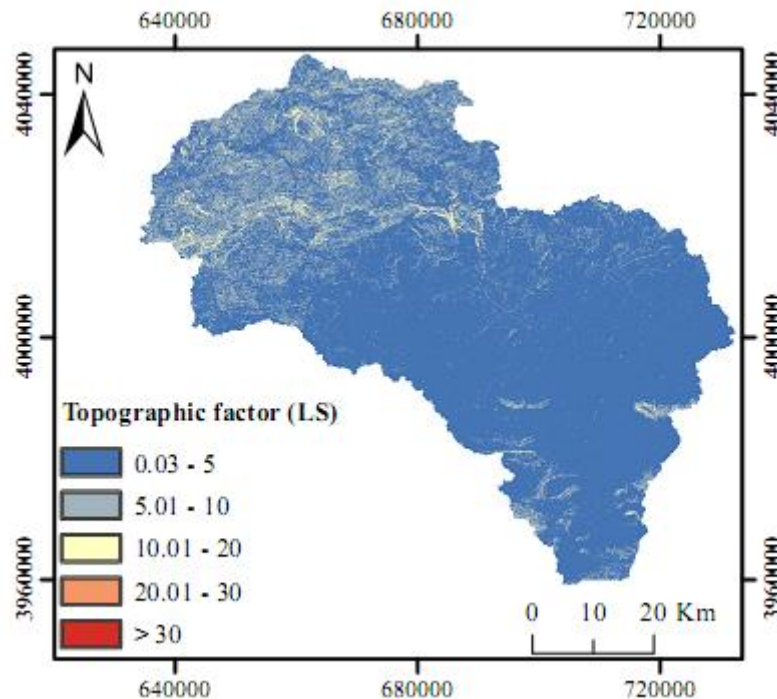


Figure III.3 : Carte du facteur (LS)

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 [16,17].

$$100K = 2.1 * M^{1.14} * 10^{-4} (12 - a) + 3.25 * (b - 2) + 2.5 * (c - 3) \quad \text{..... (III.7)}$$

Où :

M = (% Limon) x (100 – % Argile)

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 formule (III.8), par la suite on détermine les codes (b) et (c) en utilisant les diagrammes suivants [8].

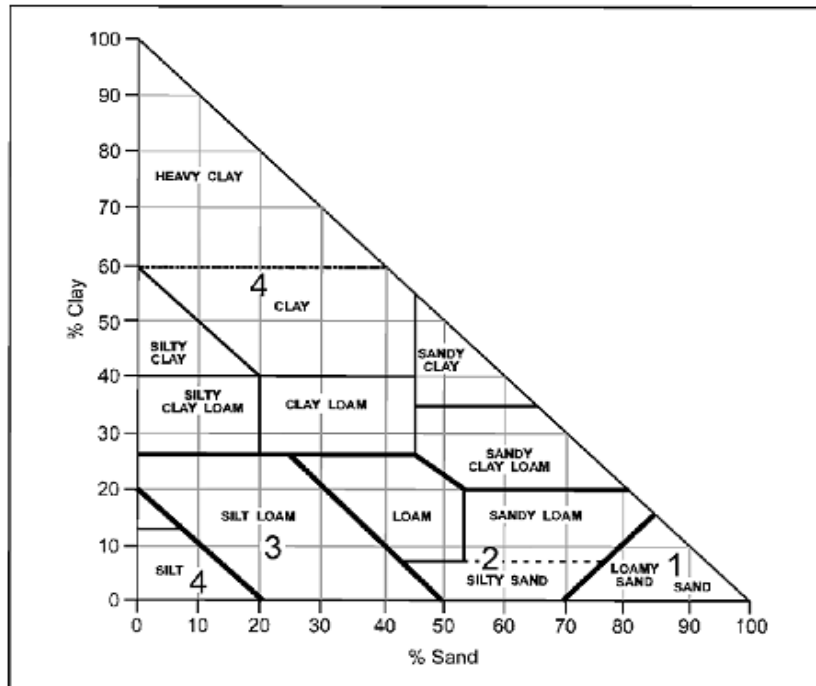


Figure III.4 : Code Structure (b)

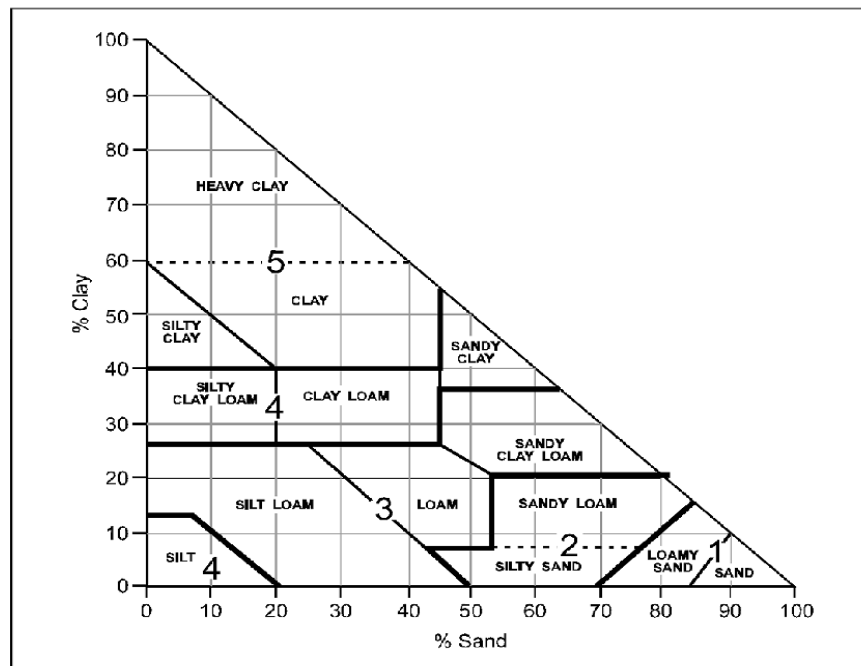


Figure III.5: Code de perméabilité (c)

La figure (III.6) présente une cartographie du facteur d'érodibilité (K) pour le bassin versant de Boussellam.

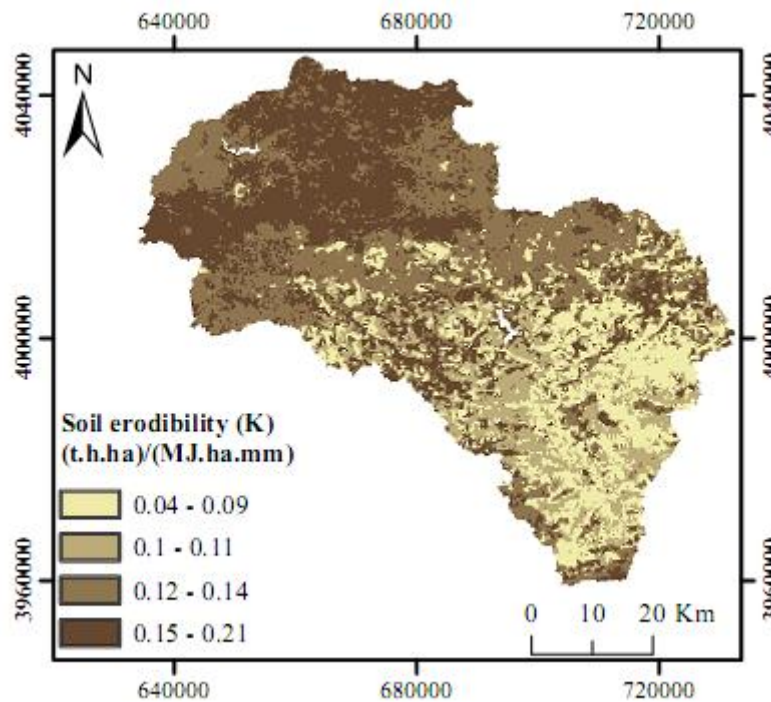


Figure III.6 : Carte du facteur (K)

Les résultats obtenus montrent que majeure partie des sols du bassin versant (67 %) possèdent une érodibilité faible (< 0.2). Ces régions sont caractérisées par une lithologie imperméable regroupant les faciès Karstiques et sableux. Seulement (33 %) de la surface du bassin possède une érodibilité élevée supérieure à 0.2 ; localisée principalement au milieu et au sud du bassin versant. La valeur moyenne du facteur (K) est de 0,11 (t.h.ha)/(MJ.ha.mm).

III.4.4. Pratique anti- érosive (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 Boussellam (*Fig. I.13- Chap. I*) montre que les pentes inférieures à 19° constituent 84 % de la surface totale du bassin versant, et les pentes supérieures à 69° constituent presque 4 % de la surface totale. Le pourcentage très élevé des pentes faibles prouve la rareté des actions de pratiques antiérosives au niveau du bassin [17].

Les valeurs obtenues pour ce facteur sont 26.6 % pour $P = 1$; 47.47 % pour $P = 0.9$ et 25.92 % pour $P = 0.55$. La valeur moyenne du facteur (P) est de 0.77 ; elle est proche de 1, ceci confirme qu'il n'y a pas de pratiques de contrôle de l'érosion au niveau du bassin.

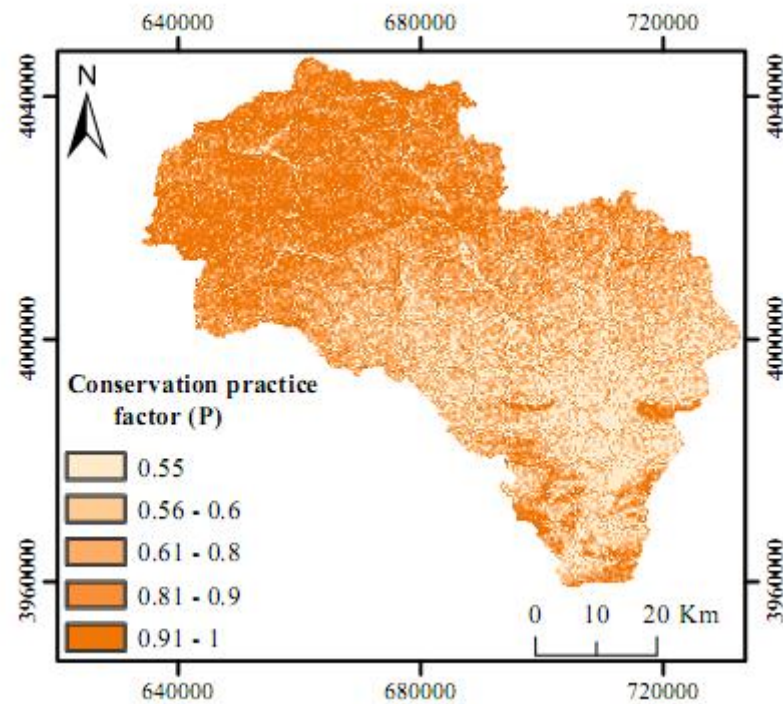


Figure III.7 : Carte du facteur (P)

III.4.5. Occupation des sols (C)

Le facteur "couvert végétal" (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 [15,20].

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 deux images sont prises durant des journées claires (non nuageuses et non neigeuses), et sont composées de deux scènes :

Pour la période sèche, la date d'acquisition est 06/07/2015 et 13/07/2015

Pour la période humide, la date d'acquisition est 18/03/2016 et 25/03/2016.

a) Principe de la télédétection

Le principe de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme. 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.

b) C'est quoi NDVI ?

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

$$NDVI = (NIR - R) / NIR + R) \quad \dots\dots\dots (III.8)$$

$$NDVI = (band4 - band3) / (band4 + band3) \text{ pour Landsat TM5 et TM7}$$

$$NDVI = (band5 - band4) / (band5 + band4) \text{ pour Landsat LC08}$$

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.

c) 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.

- 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 $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. 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 [15, 21]:

NDVI < -0,1 : Eau

-0,1 < NDVI < 0,15 : Sol nu

0,15 < NDVI < 0,25 : Végétation clairsemée

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 dans la figure (III.8) [22].

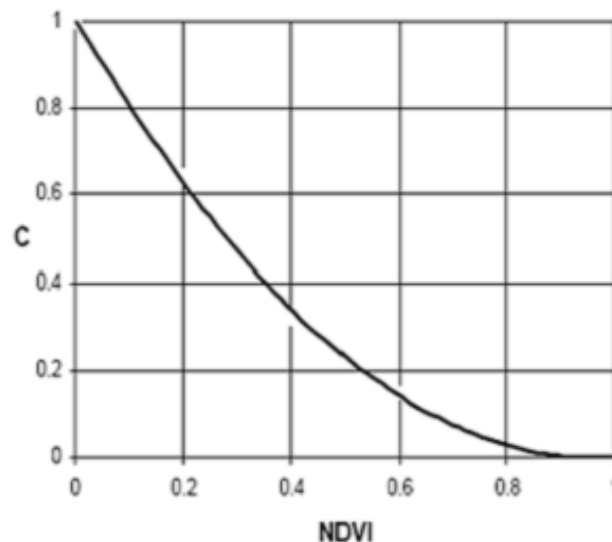


Figure III.8 : Diagramme expérimental d'estimation du facteur (C) [22]

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

$$C = 1.1119 * (NDVI)^2 - 2.0976 * (NDVI) + 0.9944 \quad \dots\dots\dots (III.9)$$

La figure (III.9) présente la mosaïque des rasters qui couvre le bassin de Boussellam (juillet 2015).

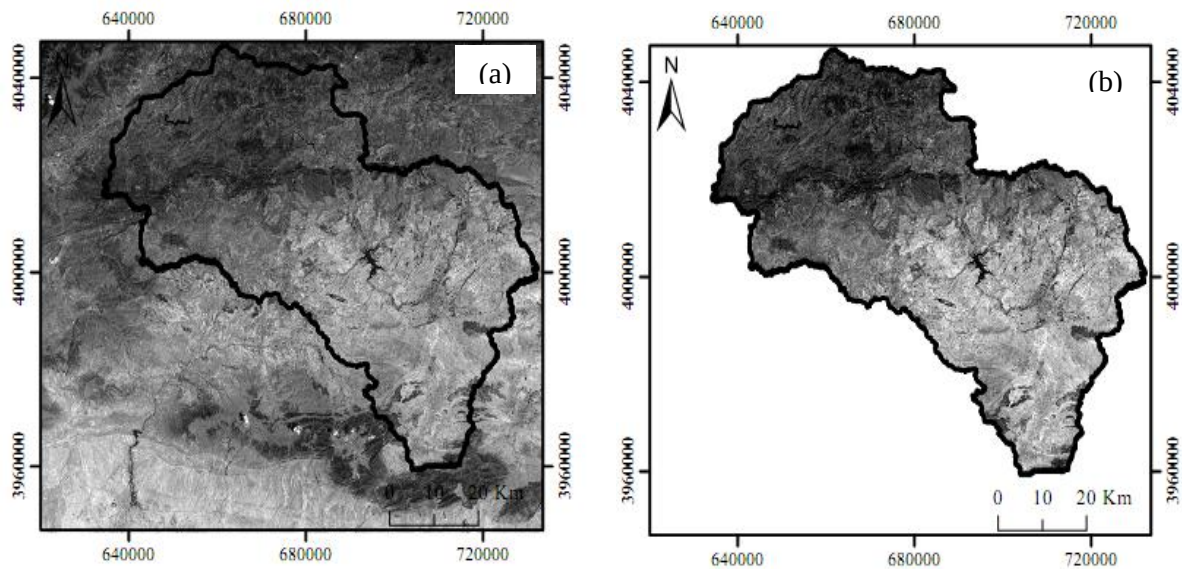


Figure III.9 : Préparation des images satellitaires. a) Mosaïque de deux scènes couvrant le B.V (LC08_Bande 4_Juillet 2015). b) Extrait d'images couvrant le B.V de Boussellam

Les figures (III.10), et (III.11) présentent les valeurs du NDVI dans le bassin de Boussellam.

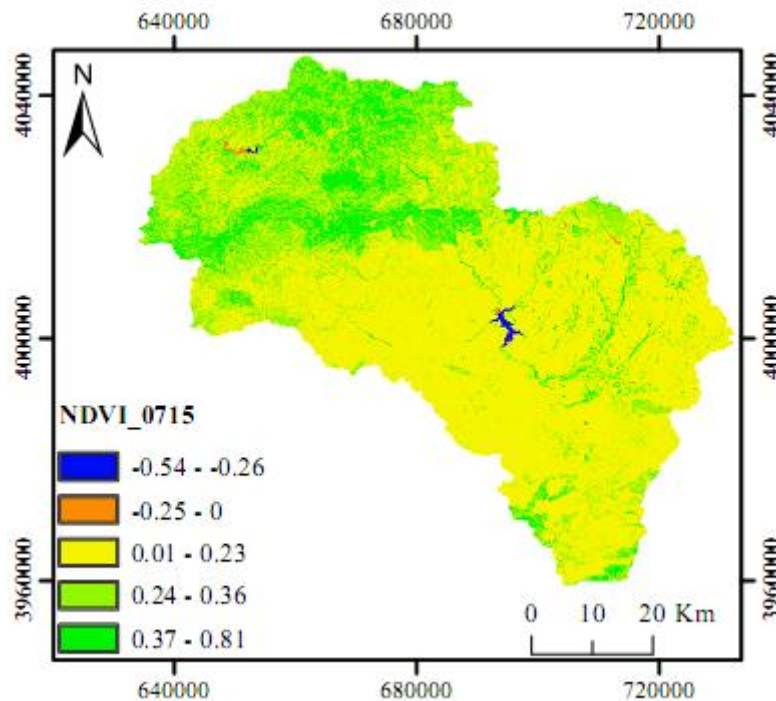


Figure III.10 : Carte des valeurs du NDVI (Juillet 2015)

L'étude de l'NDVI a montré qu'il y a une variation du couvert végétal entre la période humide et la période sèche. Les valeurs les plus élevées (0.3 à 0.86) 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.

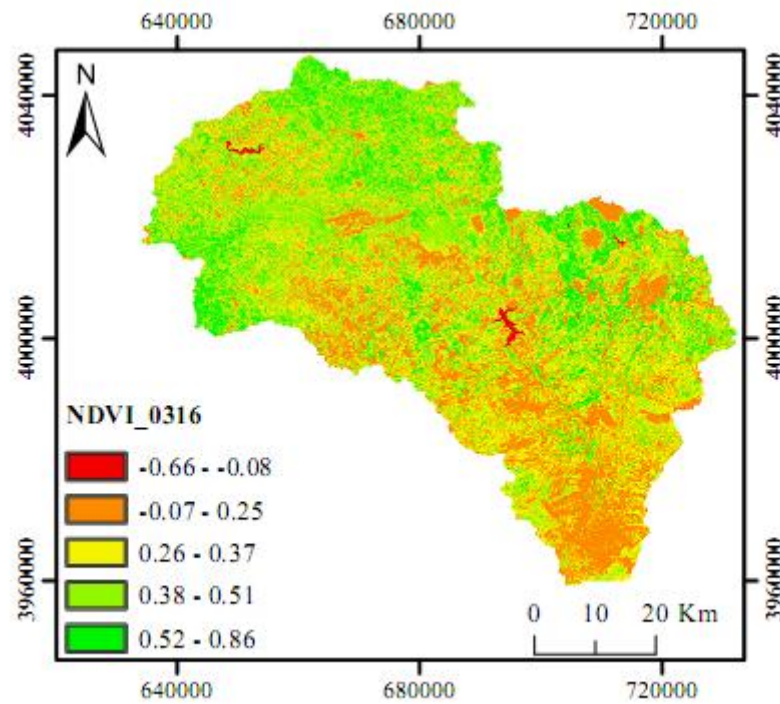


Figure III.11 : Carte des valeurs du NDVI (Mars 2016)

Les cartes du facteur C (Figs. III.12 et III.13) sont générées en utilisant l'équation polynomiale de régression citée auparavant (Eq. III.9). 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).

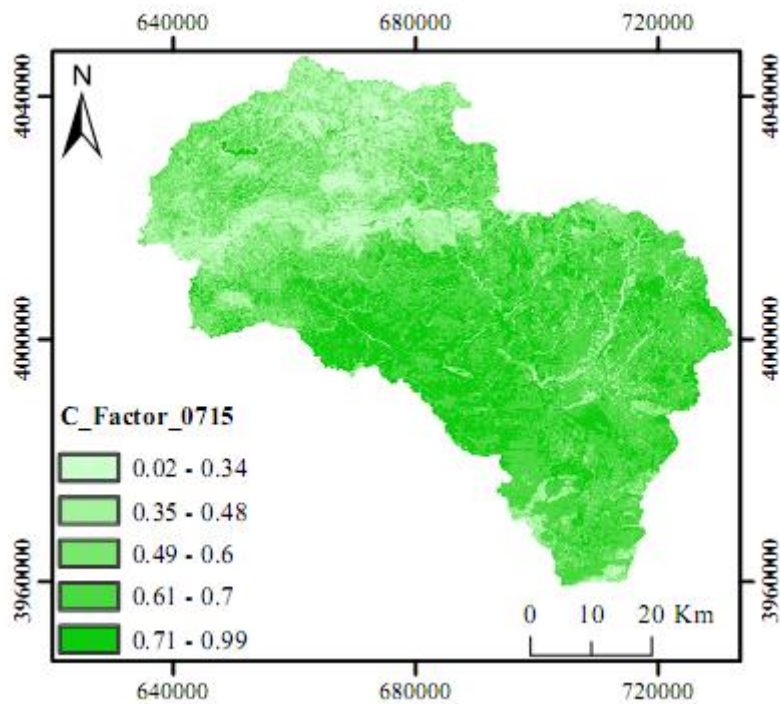


Figure III.12 : Carte du facteur C (Juillet 2015)

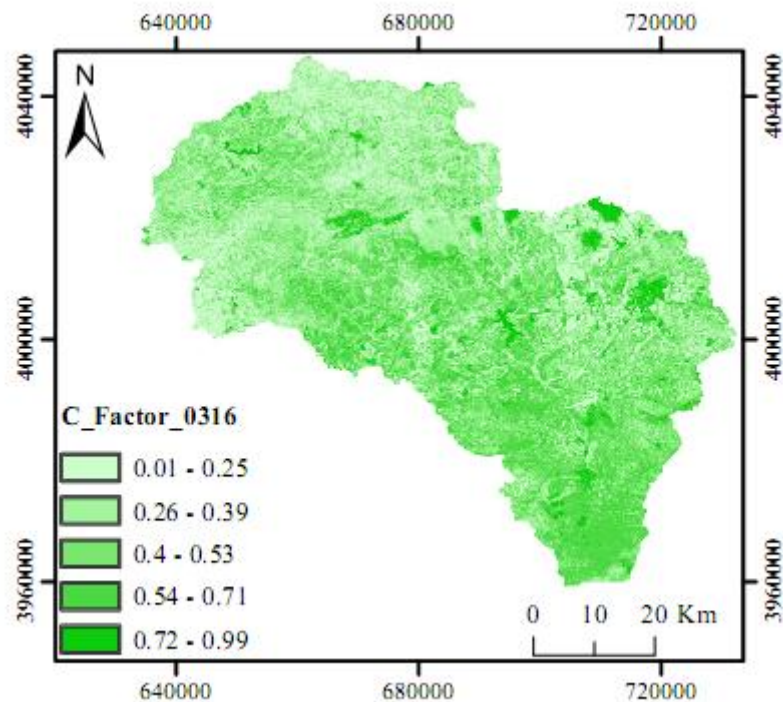


Figure III.13 : Carte du facteur C (Mars 2016)

Les résultats obtenus montrent que plus de 80 % de la superficie du bassin présente un taux de couverture végétale très faible pour les deux périodes, et seulement 7 % (pour Juillet 2015) et 19 % (pour Mars 2016) de cette superficie sont bien protégées avec $C < 0,3$.

La majeure partie du bassin est caractérisée par des valeurs du facteur (C) entre 0.5 et 0.7. Ces zones sont des végétations modérées. La seconde classe en importance est constituée de valeurs variant de 0,4 à 0,6. Les régions dans lesquelles se situe cette seconde classe sont principalement au Nord et au centre du bassin versant avec des végétations séparées. Ceci peut être expliqué par la dominance des terrains de parcours dégradés et les zones de cultures qui sont considérées très sensibles à l'érosion.

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 bassin versant de Boussellam (Figs. III.14 et III.15). Ainsi, les pertes sont de l'ordre de 0.0058 à 578.39 t/ha/an pour Juillet 2015, avec une moyenne de 258,06 t/ha/an et de 0.0013 à 1164.89 t/ha/an pour Mars 2016, avec une moyenne de 190.92 t/ha/an ; ce qui témoigne de la forte érosion du bassin. 66 % de la surface du bassin pour Mars 2016 et 56 % de la surface du bassin pour juillet 2015 ont des pertes en dessous du seuil de tolérance (< 7 t/ha/an).

Les valeurs faibles du risque érosif occupent la partie Sud du bassin. Les terrains dans ces régions sont quasiment plats (pente inférieure à 11.5 %).

Alors que les valeurs fortes se localisent dans la région Nord du bassin versant. Le risque érosif est important dans ces régions à cause de la forte pente des terrains mais aussi à cause des fortes valeurs du facteur R malgré la présence d'une végétation dense dans ces zones.

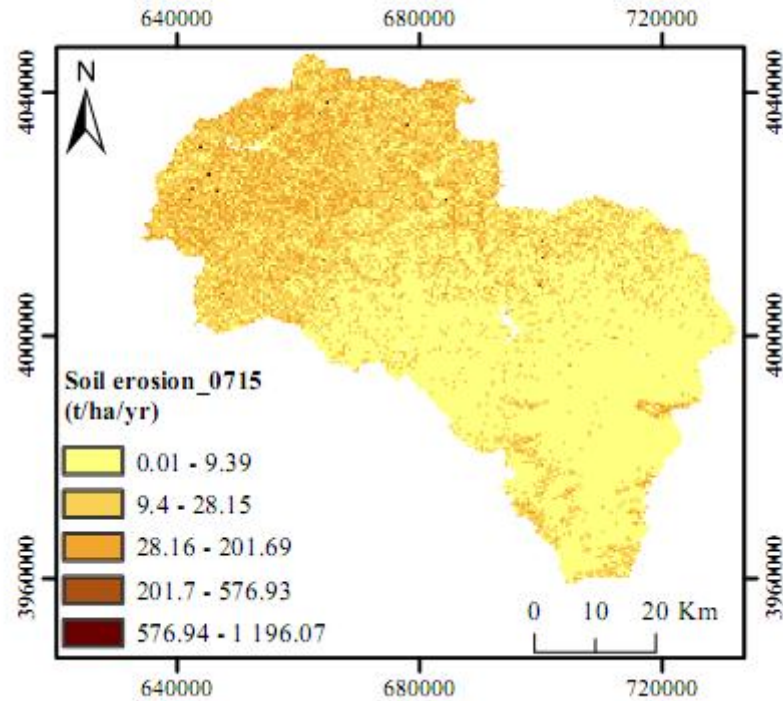


Figure III.14 : Taux annuel des pertes en sol (Juillet 2015) en (t/ha/an)

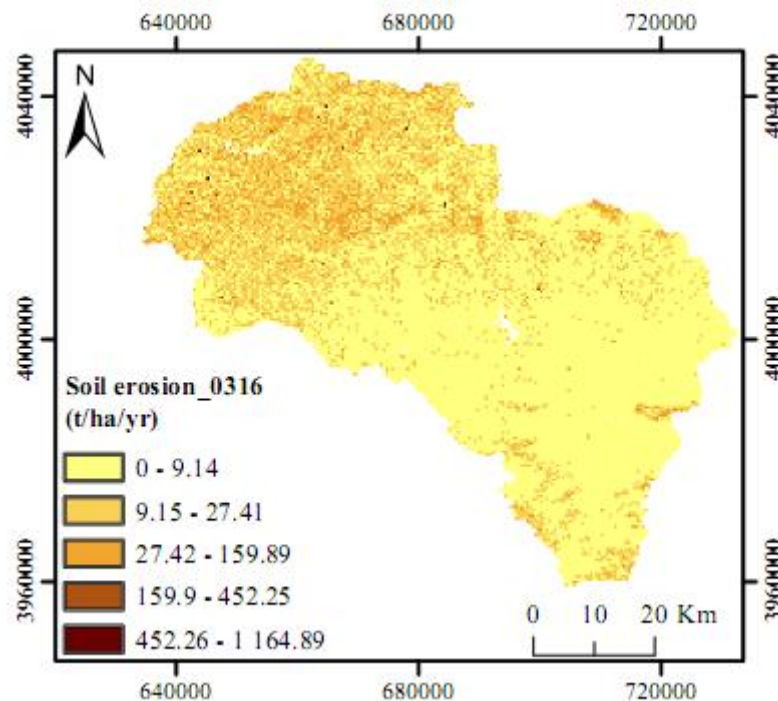


Figure III.15 : Taux annuel des pertes en sol (Mars 2016) en (t/ha/an)

III.5. Conclusion partielle

Les résultats obtenus montrent que les sols du bassin versant de Boussellam subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant le phénomène d'érosion à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Ils indiquent également que le bassin versant de Boussellam est soumis à une forte érosion avec des pertes variant de 27 à 1196 t/ha/an, touchant 34 % du territoire pour Mars 2016 et 43.34 % pour Juillet 2015.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude bibliographique nous a permis de bien connaître la topographie, les conditions climatiques, les caractéristiques morphométriques et le réseau hydrographique du bassin versant de Boussellam.

Par ailleurs, l'utilisation du SIG et de la télédétection a permis d'appliquer les méthodes théoriques pour résoudre les problématiques de l'analyse spatiale et de traiter les données géographiques.

Les résultats obtenus montrent que les sols du bassin versant de Boussellam subissent l'effet de plusieurs facteurs favorisant le phénomène d'érosion à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Ils indiquent également que le bassin versant est soumis à une forte érosion avec des pertes variant de 27 à 1196 t/ha/an, touchant 34 % du territoire pour Mars 2016 et 43.34 % pour Juillet 2015. Cette situation grave dans le Nord du bassin est favorisée par les facteurs d'érosion qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion, les pentes fortes, une agressivité de pluies inquiétante, une dégradation alarmante du couvert végétal et des sols très érodables.

L'étude a montré que l'application du modèle RUSLE peut apporter une aide importante aux décideurs et planifier les interventions de lutte contre les dégâts causés par l'érosion.

A titre de perspectives, plusieurs points sont à étudier :

- Evolution saisonnière des valeurs du NDVI sur une longue période en utilisant la télédétection.
- Analyse des sols pour valider les résultats du facteur K.
- Etudes approfondies de géologie, de géophysique et d'hydrogéologie.

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 Boussellam (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. Adjeroūd, 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] 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.

- [16] 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).
- [17] W.H. Wischmeier, D.D. Smith, Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. *Agriculture handbook*, USDA, 537 (1978).
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] R. Kalman, Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou. *Rapport du Ministère de l'Agriculture*, Maroc, (1967).
- [21] 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).
- [22] 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.