الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de sciences et Techniques

N°Ref :……

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité :Sciences Hydrauliques.

THEME

Apport de SIG à la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de Beni Haroun. Mila. Algérie

Présenté par :
- Bentlia Nour El Houda
- Bouzeraa Radja

Soutenu devant le jury :

Mme	***: Alia zineb***	***Président***
M.	***: Koussa Miloud***	***Promoteur***
M.	***: KabourAbdEssalam***	***Examinateur***

Année universitaire : 2016/2017

Remerciements

Avant tout, nous remercions ''Allah'' le tout puissant de nous avoir donné la santé, la force, le courage, la patience, la persistance et nous a permis d'exploiter les moyens disponibles à fin d'accomplir ce modeste travail. Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

*Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreur Monsieur « **KOUSSA MILOUD** »qui nous a dirigé tout au long de la réalisation de ce mémoire avec une grande rigueur scientifique, pour sa patience, ses conseils, sa grande disponibilité, ainsi pour le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

Nous exprimons nos profonds remerciements aux membres de jury qui vont juger notre recherche.

Enfin, nous adressons nos chaleureux remerciements à nos familles pour leur soutien matériel et moral, ainsi qu'à nos amis pour leurs encouragements.

Dédicace

À l'aide de dieu ''Allah'' tout puissant qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail.

Je dédie ce travail à ma famille spécialement aux personnes les plus chères au monde. Mes chers parents qui sont la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie. Qui m'ont apportés leur appui durant toutes mes années d'études, pour ses sacrifices et soutiens et qui m'ont donné la tendresse, la confiance, le courage et la sécurité.

À ma très belle chère mère ***SAMIA*** *: tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, et puisse Dieu le tout puissant te préserver, t'accorder la santé, longue vie et bonheur.*

À mon très cher père ***ALLEL*** *:Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation, et puisse dieu t'accorder santé et longue vie.*

À ma très belle chère sœur unique : ***ASMA***
À mon petit cher frère : ***NIDHAL***
À celle qui a partagé cette tâche avec moi : ***RADJA***
À mes chères amies : ***Lamia***, ***Meriem***, ***Soumia***, ***Nora*** , ***Houria***, ***Lilia***.
Enfin je tiens beaucoup à dédier ce travail à ***Rédha***.

Je remercie toute les personnes que je n'ai pas pu citer leurs noms ici, et qui ont participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

HOUDA

Dédicace

A l'occasion de l'élaboration du mémoire de fin d'étude, je dédie ce modeste travaille :

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger ; A Ma mère que j'adore : ***ARDJOUNA.*** *« Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance. »*

A l'école de mon enfance, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir ; A mon chère père : ***FOUDIL.*** *« Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. »*

A celle qui a partagé avec moi le meilleur et le pire, celle qui a toujours été là dans mes moments de détresse, mon inspiratrice depuis toujours, ma raison de vivre et la meilleure au monde, à celle que j'aime plus que tout ; mon âme sœur : ***FATEN.*** *« Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour toi. »*

A celui qui m'a toujours aidé et encouragé, qui était toujours à mes côtés; et à qui je témoigne mon affection et ma profonde reconnaissance; A mon chère frère : ***KARIM.*** *« Que dieu te protège. »*

A ceux qui sont les plus chères de ma vie : ***Mohamed, Ritedj et Anes***

À celle qui a partagé cette tâche avec moi : ***Nour Elhouda***

A ceux qui m'ont soutenu tout au long de mon travail par leurs vifs encouragements et à toute ma famille et mes amies.

RADJA

Introduction 1

Chapitre I : Erosion hydrique

Introduction 2

I.1.Définition..... 2

I.2.Origine et mécanisme..... 3

I.2.1. Le détachement..... 3

I.2.1.1. L'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies..... 3

I.2.1.2. Le ruissellement..... 4

I.2.2. Le transport..... 4

I.2.3. La sédimentation..... 5

I.3. Les formes de l'érosion hydrique..... 5

I.3.1. Erosion en nappe..... 5

I.3.2. L'érosion linéaire (micro-Channel ou Rill Erosion)..... 6

I.3.2.1. Erosion en griffes et rigoles..... 6

I.3.2.1.1. Les griffes..... 6

I.3.2.1.2. Les rigoles..... 7

I.3.2.1.3. Erosion en ravine..... 7

I.3.3. L'érosion en masse..... 8

I.3.4. Erosion mécanique sèche..... 9

I.4. Les facteurs de l'érosion hydrique..... 9

I.4.1. Les activités humaines..... 9

I.4.2. Le couvert végétal..... 9

I.4.3. Les facteurs climatiques..... 10

I.4.3.1. Les précipitations..... 10

I.4.4. Les facteurs géomorphologiques et hydrologiques..... 11

I.4.4.1. La géomorphologie du terrain..... 11

I.4.4.2. L'infiltrabilité des sols..... 11

I.4.5. La morphologie du terrain..... 11

I.4.5.1. La pente..... 11

I.4.5.3. La forme de la pente…….. 11

I.4.6. Le sol……..... 11

I.5. Quantification de l'érosion hydrique……... 11

I.5.1. Mesures directes…… 12

I.5.1.1. Mesures topographiques……. 12

I.5.1.2. Simulation de pluie……. 12

I.5.1.3. Mesures par l'étude du transport solide…… 12

I.5.1.3.1.Transport en solution……... 12

I.5.1.3.2. Transport de fond…… 12

I.5.1.4. Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues…… 12

I.5.2. Mesures indirectes…… 13

I.5.2.1. La modélisation…….. 13

I.6. Comment lutter contre l'érosion hydrique……... 14

Conclusion…… 15

Chapitre II : Système d'information géographique

Introduction……. 16

II.1. Définition de l'information géographique…….. 16

II.2. Système d'information géographique (SIG)…….. 17

II.2.1. Définition..... 17

II.2.2. Histoire du Système d'Information Géographique……. 18

II.3. Les modes de représentation de l'information géographique dans un SIG …… 19

II.3.2. Le mode vectoriel……. 19

II.3.2.1. Les points……..... 20

II.3.2.2. Les lignes……... 20

II.3.2.3. Les polygones……... 20

II.4. Les composants d'un SIG…… 21

II.4.1. Les données……. 21

II.4.2. Le matériel……... 21

II.4.3. Les utilisateurs…… 21

II.4.4. Les méthodes ou savoir-faire……... 21
II.4.5. Les logiciels……. 22
II.5. Les différentes fonctionnalités d'un SIG : les 5 « A »…… 22
II.5.1. Abstraction…….. 22
II.5.2. Acquisition des données……. 22
II.5.3. Archivage…… 22
II.5.4. Analyse…… 23
II.5.5. Affichage……. 23
II.6. Les domaines d'application…… 23
II.6.1. Océans……. 23
II.6.2. Terres et sols…… 24
II.6.3. Faune…… 24
II.6.4. Végétation……... 24
II.6.5. Agriculture……..... 24
II.6.6. Eau et eaux usées……..... 24
II.6.7. Eaux……..... 24
II.6.8. Exploitation minière…… 24
II.6.9. Ressources naturelles……... 25
II.7. Utilisations des SIG pour la cartographie du risque d'érosion…… 25
II.8. Fonctionnement d'un SIG…….. 25
II.9. Avantages de l'utilisation des SIG……. 26
II.10. Les contraintes des SIG…… 26
II.11. Le SIG idéal…….. 26
Conclusion…….. 27

Chapitre III : Présentation de la région d'étude

Introduction…… 28
III.1. Présentation de la région d'étude…….. 28
III.1.1. Cadre géographique……..... 28
III.1.1.1. Situation géographique régionale……..... 28

III.1.1.2. Le bassin de Beni Haroun…….... 29
III.1.2. Cadre géologique…… 30
III.1.3. Le couvert végétal…….. 31
III.1.4. Agriculture…..…… 31
III.1.5. cadre climatique……. 31
III.1.5.1. Les précipitations……... 32
III.1.5.1.1. Les variations interannuelles……... 32
III.1.5.1.2. Les variations mensuelles……. 33
III.1.5.1.3. Les variations saisonnières……..... 34
III.1.5.2. Les températures…… 35
III.1.5.2.1.Température moyenne mensuelle…….…… 35
III.1.5.2.2. Diagramme Obro-thermique…….……..... 36
III.1.5.2.3. Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte)…….. 37
III.1.5.3. Evaporation……. 38
III.2. Les indices climatiques……. 38
III.2.1. Indice de Martonne ou d'aridité…… 39
III.2.2. Indice d'EMBERGER…….. 39
Conclusion…….. 40

Chapitre IV : Délimitation du bassin versant

Introduction…… 41
IV.1. Détermination des caractéristiques du bassin versant……... 41
IV.1.1. Caractéristiques Géométriques……..…… 41
IV.1.1.1. La Surface…… 41
IV.1.1.2. Le périmètre……. 41
IV.1.1.3. La forme du bassin versant…….. 42
IV.1.1.3.1. L'indice de compacité (KG)…… 42
IV.1.1.4. Topographie et relief……...…… 43
IV.1.1.4.1. La carte hypsométrique……..... 43
IV.1.1.4.2. La courbe hypsométrique……. 44

IV.1.1.4.3. Les altitudes caractéristiques……... 45

IV.1.1.4.3.1.Les altitudes maximales et minimales……... 45

IV.1.1.4.3.2.L'altitude moyenne…….…….. 46

IV.1.1.4.3.3.L'altitude médiane…….…… 47

IV.1.1.4.4. La pente…… 47

IV.1.1.4.4.1.Le rectangle équivalent……. 48

IV.1.1.4.4.2.L'indice de pente global Ig…..……. 49

IV.1.1.4.4.3.La pente moyenne…….. 50

IV.1.2. Caractéristiques du réseau hydrographique……... 51

IV.1.2.1. Les longueurs caractéristiques……. 51

IV-1-2-2- Dénivelée spécifique (Ds)…….. 50

IV.1.2.3. Degré de développement de réseau…… 52

IV.1.2.3.1. La densité de drainage……. 53

IV.1.2.3.2. La densité hydrographique…….……. 53

IV.1.2.3.3. La fréquence des cours d'eau……... 54

IV.1.2.3.4. Le coefficient de torrentialité…….……. 54

IV.1.3.Le réseau hydrographique…….. 55

IV.1.3.1.Le temps de concentration……... 56

Conclusion…….. 57

Chapitre V : Méthodologie appliquée

Introduction…… 58

V.1.Origine d'USLE…….. 58

V.2. Définition d'USLE……. 58

V. 3. Paramètres du modèle…… 59

V. 3.1. Facteur d'érosivité (R) ……... 59

V.3.2. Facteur d'érodibilité du sol (K) …….. 60

V.3.3. Facteur topographique (LS) …… 60

V.3.4. Occupation des sols (C)……... 61

V.3.5. Le facteur Pratiques anti-érosives (P)……..…… 61

V.4. Données utilisées……...…… 61

V.5. logiciels utilisés……... 62

V.5.1.ArcGIS…….. 62

V.5.1.1. ArcView……... 62

V.5.1.2. ArcEditor…… 62

V.5.1.3. ArcInfo…… 62

V.5.2. ArcMap…… 63

V.5.3. Global Mapper……. 63

V.5.4. Google Earth……... 64

V.6. Méthodologie……. 65

V.7. Calcul et cartographie des paramètres du model…….……... 66

V.7.1. Le facteur R……. 66

V.7. 2. Facteur K…….…….…… 68

V.7. 3. Facteur LS…….…….. 71

V.7.4. Facteur C…….……. 73

V.7.5. Facteur P…….……. 74

V.8. Multiplication des facteurs, Résultats et discussions…….. 75

Conclusion…….. 76

Conclusion générale …….…….. 77

Références bibliographiques……... 78

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire.

Tableau 2 : Précipitations moyennes annuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun.

Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun.

Tableau 4 : Précipitations moyennes saisonnières (2004 à 2014) Station de Beni Haroun.

Tableau 5 : Températures moyennes mensuelles en °C (2004 à 2014) Station de Beni Haroun.

Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles et précipitations moyennes (2004 à 2014) Station de Beni Haroun.

Tableau 7 : Classification d'Euverte.

Tableau 8 : Résultat de calcul d'après la classification d'Euverte.

Tableau 9 : Evaporation dans la retenue de Beni Haroun (2003 à 2010).

Tableau 10 : Répartition de la surface partielle en fonction d'altitude du bassin versant de Beni Haroun.

Tableau 11 : Calcul de l'altitude moyenne du bassin versant de Beni Haroun**.**

Tableau 12 : Méthode classification de relief selon ORSTOM selon la dénivelée spécifique D_S.

Tableau 13 : Nombre de cours d'eau du bassin versant de Beni Haroun**.**

Tableau 14 : Calcul de l'érosivité R **(t/ha/an).**

Tableau 15 : Les différentes caractéristiques des couches.

Tableau 16 : Estimation du facteur K par l'équation de Williams.

Tableau 17 : Répartition des valeurs du facteur K dans le bassin versant de Beni Haroun.

Tableau 18 : Valeur du facteur C en fonction du type de couverture.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma modificatif du processus simplifié de l'érosion.

Figure 2 : Origine et mécanisme d'érosion hydrique.

Figure 3 : Effet des gouttes de pluies.

Figure 4 : Diagramme de Hjulstrom (1935).

Figure 5 : Schéma illustrant les trois phases de l'érosion.

Figure 6 : Erosion en nappe.

Figure 7 : Erosion linéaire.

Figure 8 : Photo représente l'érosion en griffes (Djbele sidi Ahmad Zagai wilaya de Saida).

Figure 9 : Photo représentative de rigole (Ain Tebouda wilaya de Saida).

Figure 10 : Photo érosion par ravinement.

Figure 11 : L'influence de l'intensité sur l'érosion hydrique.

Figure 12 : Bande tassée pour limiter le détachement des fragments.

Figure 13 : Bande enherbée pour ralentir le ruissellement et diminuer l'érodibilité.

Figure 14 : Schéma simplifié de l'information géographique.

Figure 15 : Définition schématique d'un Système d'Information Géographique.

Figure 16 : Carte en mode raster.

Figure 17 : Carte en mode vecteur.

Figure 18 : Transformation d'un mode vecteur vers un mode raster.

Figure 19 : Schéma simplifié des composants d'un SIG.

Figure 20 : Les 5 « A » d'un SIG.

Figure 21 : Fonctionnement d'un SIG.

Figure 22 : Situation géographique de la zone d'étude.

Figure 23 : Les unités géologiques de l'Est algérien et carte géologique de l'Algérie.

Figure 24 : Histogramme de Variation de précipitations moyennes annuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Figure 25 : Histogramme de Variation de précipitations moyennes mensuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Figure 26 : Histogramme de précipitations moyennes saisonnières (2004 à 2014) Station de Beni Haroun.

Figure 27 : Précipitation moyennes saisonnière en pourcentage.

Figure 28 : Histogramme de variation des températures moyennes mensuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun.

Figure 29 : Courbe des températures moyennes, maximales et minimales.

Figure 30 : Diagramme ombro-thermique.

Figure 31 : Histogramme d'évaporation dans la retenue de Beni Haroun (2003 à 2010) .

Figure 32 : Abaque de Martonne.

Figure 33 : Classification de climat d'EMBERGER.

Figure 34 : La carte de délimitation de bassin versant de Beni Haroun.

Figure 35 : La forme du bassin versant en fonction de l'indice de Gravilius.

Figure 36 : Carte hypsométrique du bassin versant de Beni Haroun.

Figure 37 *:* Courbe hypsométrique et diagramme de fréquences altimétrique du bassin versant de Beni Haroun.

Figure 38 : Statistique de différentes altitudes caractéristiques de bassin versant de Beni Haroun.

Figure 39 : La représentation d'altitude médiane (H50%).

Figure 40 : La carte des pentes de bassin versant de Beni Haroun.

Figure 41 : La représentation des déférentes altitudes (H5% et H95%).

Figure 42 : La carte du cours d'eau principal de bassin versant de Beni Haroun.

Figure 43 : Profil en long du cours d'eau principal de bassin versant de Beni Haroun.

Figure 44 : La carte de réseau hydrographique de bassin versant de Beni Haroun.

Figure 45 : Schéma simplifié de l'USLE.

Figure 46 : Conception et création de cartes en utilisant Arcmap.

Figure 47 : Conception et création de cartes en utilisant Global mapper.

Figure 48 : Google Earth.

Figure 49 : Schéma simplifié de la méthodologie du travail.

Figure 50 : Carte du facteur d'érosivité de pluie (R) du Bassin versant de Beni Haroun.

Figure 51 : Carte d'érodibilité du terrain (k) du Bassin versant de Beni Haroun.

Figure 52 : Application de l'expression L sous ArcGis 10.2.

Figure 53: Application de l'expression S sous ArcGis 10.2.2.

Figure 54 : Carte du facteur topographique (LS) du bassin versant de Beni Haroun.

Figure 55 : Carte du facteur du couvert végétale C.

Figure 56 : Carte de perte en sol du bassin versant de Beni Haroun.

Liste des abréviations

DEM : Digital Elevation Model.

ORSTOM : Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

USLE: Universal Soil Loss Equation.

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation.

SIG : Système d'Information Géographique.

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission.

ملخص :

في هذه الدراسة تم استخدام نظم المعلومات الجغرافية لتطوير عدد من الخرائط المواضيعية (المنحدر والطوبوغرافيا والخريطة الهيدروغرافية) ولتقييم ورسم خريطة ظاهرة تآكل المياه باستخدام معادلة فقدان التربة العالمية في مستجمعات المياه بيني هارون في الجزائر. يتميز هذا الحوض بعدم انتظام كبير في هطول الأمطار، وبمنحدر حاد ومن ناحية أخرى، فإن الغطاء النباتي المنخفض يجعلها عرضة للتآكل.و المعادلة العالمية لفقدان التربة هو مزيج لعدة عوامل تصف خصائص مستجمعات المياه، ودمج العوامل المختلفة لهاته المعادلة في نظام المعلومات الجغرافية مع قواعد البيانات الخاصة بهم، جعلت من الممكن بسرعة وكفاءة كشف التعقيد والترابط بين العوامل في تحليل مخاطر التعرية، وفهم أفضل لتأثير كل عامل، وتقييم مساهمته في خسائر التربة وإعطاء الأولوية لمختلف مناطق مستجمعات المياه، وإنتاج خريطة تركيبية لتوزيع حساسية التعرية، ولإقامة العامل المتحكم في تآكل المياه، والتي هي، من حيث الأهمية، المنحدر، تفتت التربة والغطاء النباتي...الخ

الكلمات المفتاحية : الحوض المائي بني هارون، ميلة، نظام المعلومات الجغرافية، المعادلة العالمية لفقدان التربة، التعرية المائية..

Résumé :

Dans cette étude, les systèmes d'information géographique (SIG) ont été utilisés pour élaborer un certain nombre de cartes thématiques (pente, topographie, carte du réseau hydrographique) et pour évaluer et cartographier le phénomène de l''érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol USLE dans le bassin versant de Beni Haroun en Algérie. Ce bassin se caractérise par une grande irrégularité dans les précipitations, une pente raide et une faible couverture végétale ce qui le rend très vulnérable à l'érosion.

L'USLE est la combinaison de différents facteurs spécifiques qui décrivent les caractéristiques du bassin versant ; l'intégration des différents facteurs de l'Equation universelle de pertes en sol dans le système d'information géographique avec leurs bases de données, a permis d'une manière rapide et efficace de démêler la complexité et l'interdépendance des facteurs dans l'analyse des risques d'érosion, afin de mieux comprendre l'impact de chaque facteur et d'évaluer sa contribution aux pertes en sol et permet de hiérarchiser les différentes zones du bassin versant, en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion, et pour établir les facteurs décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont, par ordre d'importance, la pente, l'érodibilité des sols et la couverture végétale… etc

Mots clés: Bassin versant de Beni Haroun Mila. SIG, USLE, érosion

Summary:

In this study, geographic information systems (GIS) were used to develop a number of thematic maps (slope, topography, hydrographic map) and to assess and map the phenomenon of water erosion using the universal soil loss equation USLE, in the watershed of Beni Haroun in Algeria. This basin is characterized by a great irregularity in precipitation, a steep slope; a mainly marly lithology and low vegetation cover which makes it very vulnerable to erosion.

The USLE is the combination of six specific factors that describe the characteristics of the watershed, the integration of the various factors of the Universal soil loss equation in the Geographic Information System with their databases, has made it possible quickly and efficiently to unravel the complexity and interdependence of factors in erosion risk analysis, to better understand the impact of each factor and to assess its contribution to soil losses and to prioritize the different zones of the watershed, producing a synthetic map of the distribution of sensitivity erosion, and to establish the decisive factors controlling water erosion, which are, in order of importance, the slope, soil erodibility and vegetation cover..etc.

Key words: Beni Haroun, Mila, watershed, SIG, USLE, Erosion

Introduction générale

Introduction générale :

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 un facteur principal de la dégradation du sol.

L'évaluation des risques d'érosion des sols du bassin versant nécessite la cartographie et l'analyse des nombreux facteurs intervenant dans le processus érosif : l'agressivité des précipitations, la pente et la longueur de pente, l'érodibilité des sols, le couvert végétal et les pratiques culturales. Chaque facteur présente un comportement différent d'une zone à l'autre du bassin versant. On a abouti ainsi à une multitude de données à cartographier, stocker, structurer et traiter de manière rationnelle.

A cet effet, des logiciels des Systèmes d'Information Géographique, notamment Arcgis, fournissent des outils intéressants de calculs et de mesures hydromorphologiques à partir des cartes MNT ou (DEM), Et permet de croiser des cartes aux thèmes différents, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur les valeurs numériques des facteurs d'érosion qui y sont rangées.

L'Equation universelle de pertes en sol (USLE) de Wischmeier & Smith (1978) reste, de loin, le modèle le plus utilisé parmi les modèles mathématiques de prédiction de l'érosion hydrique. L'intégration des cartes thématiques des facteurs de ce modèle dans le SIG a permis de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol.

Le but de cette étude consiste d'une part à utiliser le système d'information géographique comme outil pour élaborer les différentes cartes caractéristiques du bassin versant du barrage Beni Haroun de Mila et d'autre part à élaborer un ensemble de cartes thématiques présentant les résultats de l'analyse des différents facteurs intervenant dans le phénomène de l'érosion ainsi que des cartes de l'érosion potentielle et de la vulnérabilité au risque d'érosion. En outre, l'identification des facteurs d'érosion et les zones vulnérables à l'érosion du sol pourraient être très utiles à évaluer l'expansion et le degré des risques et, finalement, d'élaborer des mesures et conservation des sols et des plans de gestion de l'eau.

Ce mémoire intitulé « Apport de SIG à la cartographie des zones risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de Beni Haroun. Mila. Algérie », comporte 5 chapitres détaillés comme suit :

- Le premier et le deuxième chapitre sont un aperçu général sur l'érosion hydrique, et le système d'information géographique, successivement.
- Le troisième chapitre concerne la présentation générale de la zone d'étude, et son cadre géologique et climatique.
- Le quatrième chapitre montre la détermination des différentes caractéristiques du bassin versant de Beni Haroun.
- Le cinquième chapitre décrit la méthodologie appliquée, les résultats obtenus dans notre travail et leurs interprétations.

Chapitre I

Erosion hydrique

Introduction :

Il existe des phénomènes qui, jour après jour, déplace des sédiments et des débris à un endroit et les envoie à un autre, que ce soit en les prenant sur la terre pour les déplacer sur une autre section terrestre, ou de les prendre sur terre et de les déposer au fond des océans, il s'agit de l'érosion.

Celle-ci prend plusieurs formes : elle est effectuée par l'eau, les actions humaines, le vent, et quelques autres facteurs.

Ce chapitre consistera à expliquer les différents types d'érosion hydrique, les facteurs principales, les différentes méthodes utilisées pour la quantification, ainsi que les moyens de lutte contre ce type d'érosion.

I.1. Définition :

Le mot érosion vient du verbe latin « Erodere » qui signifie ronger. Elle représente l'ensemble des phénomènes qui contribuent, sous l'action d'un agent climatique, notamment l'eau, à modifier les formes de relief [1].

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol. Elle se définit comme étant la perte de sol provoqué par l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt [2].

En fait, c'est un processus naturel qui n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable et tolérable[3].

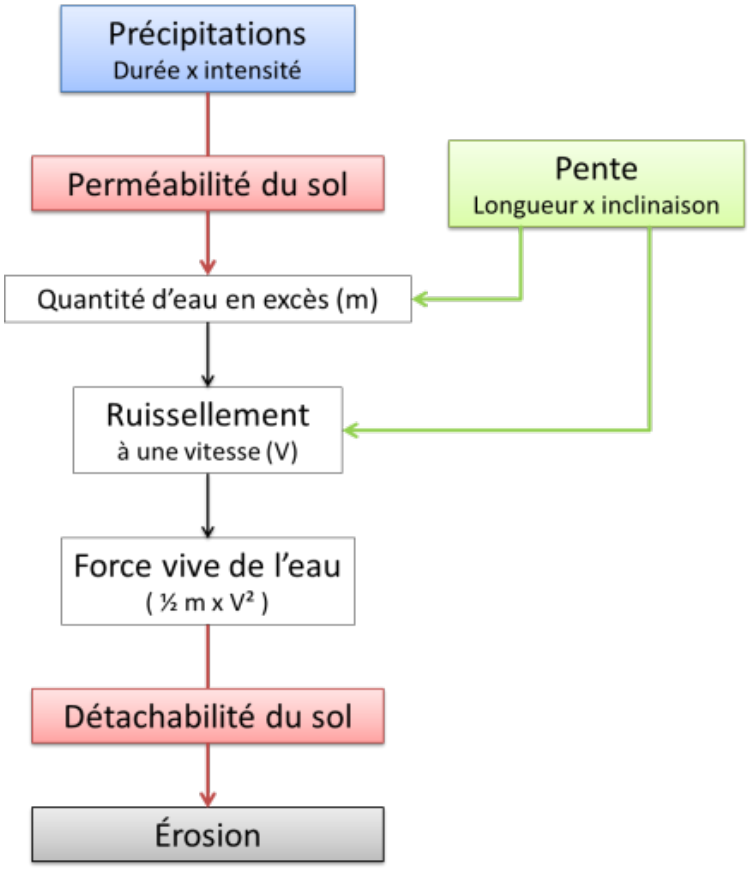

Figure 1 : Schéma modificatif du processus simplifié de l'érosion[4]

I.2. Origine et mécanisme :

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 comme schématiser dans la figure suivante :

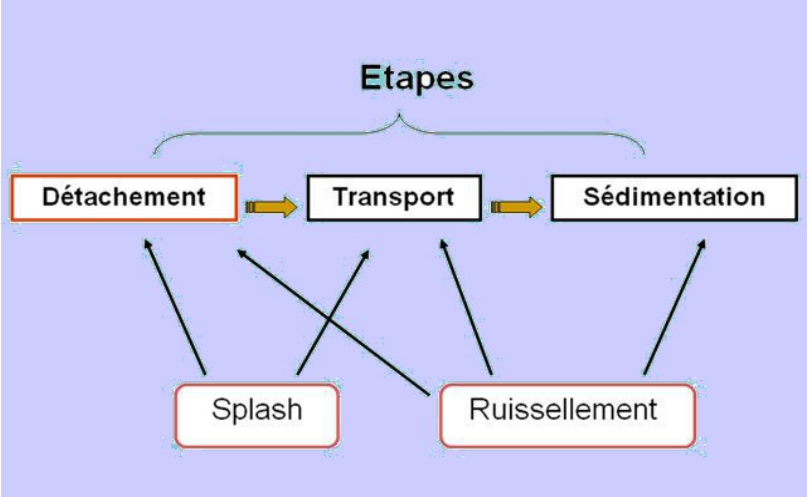

Figure 2 : Origine et Mécanisme de l'érosion hydrique[5]

I.2.1. Le détachement :

Le détachement des particules se produit à la surface du sol lorsque, sous l'action des gouttes de pluie, des agrégats éclaboussent. L'impact des gouttes de pluie a pour effet de désagréger les éléments présents à la surface du sol pour donner lieu à des agrégats de plus petite taille et des particules élémentaires[1].

Les principaux mécanismes conduisant au détachement sont :

I.2.1.1. L'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies :

Les gouttes de pluies constituent un élément important de l'érosion hydrique, et elle entrainent une décomposition mécanique des agrégats et la formation de la croute de battance qui imperméabilise la surface du sol et augmente le ruissèlement[6].

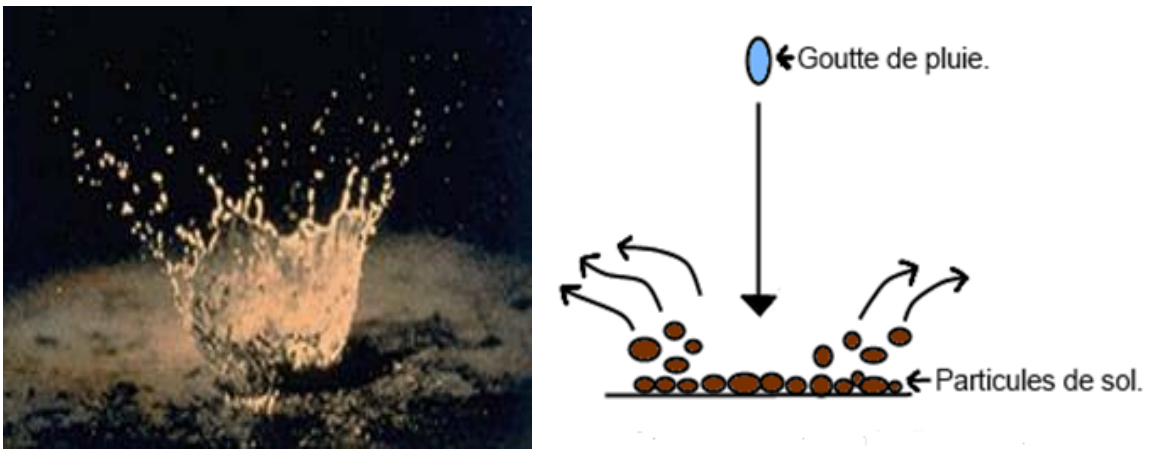

Figure 3 : effet des gouttes de pluies[7].

I.2.1.2. 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 terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent 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 (ruissellement par saturation) [8].

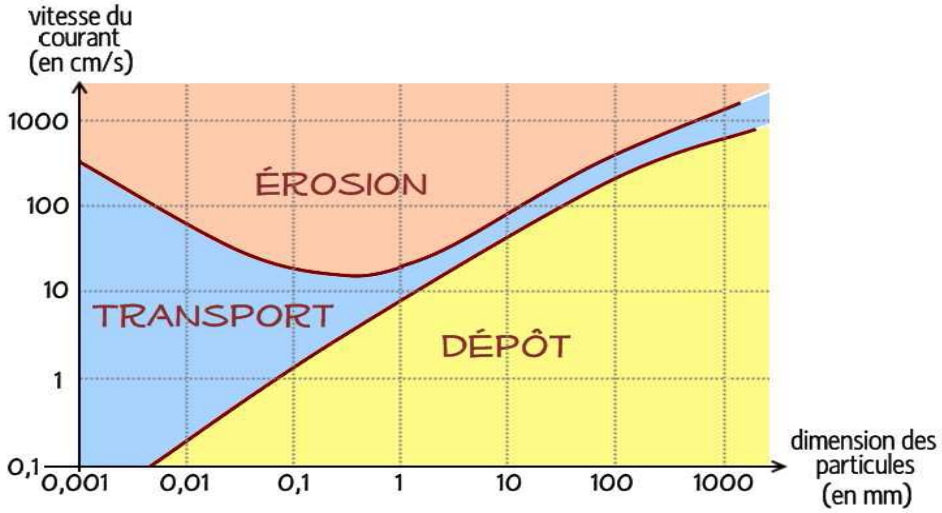

Figure 4: Diagramme de Hjulstrom (1935)[2]

I.2.2.Le transport :

Il correspond au mouvement des sédiments vers l'aval, que ce soit sur un versant ou dans un cours d'eau. Il est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie 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[2].

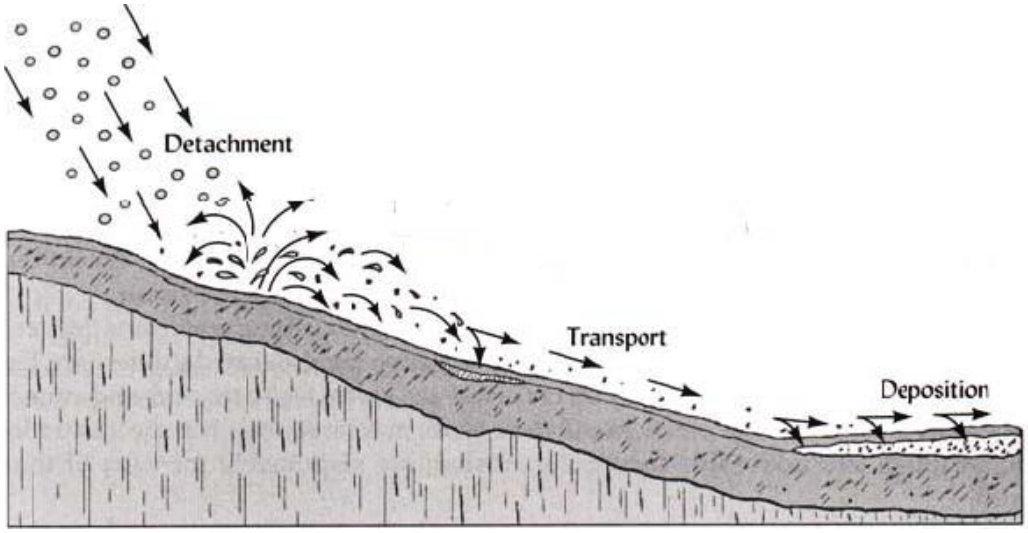

Figure 5 : Schéma illustrant les trois phases de l'érosion[9]

L'écoulement de l'eau trie les sédiments par tailles par sa vitesse d'écoulement : plus la vitesse est importante, plus elle peut transporter des sédiments grossiers.

Dès que la vitesse commence à diminuer les premiers sédiments qui se déposent sont les plus grossiers progressivement, les sédiments de tailles de plus en plus fines sont déposés au fur et à mesure que la vitesse d'écoulement diminue [2].

I.2.3.La sédimentation :

Le dépôt des apports sédimentaires s'effectue lorsque l'énergie cinétique du courant, qui déplace les matériaux issus du détachement, diminue ou s'annule [1].

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
- Densité
- Et de la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau [2].

I.3.Les formes de l'érosion hydrique :

Les formes de l'érosion hydrique dépendent de l'influence respective de la pluie, du ruissellement, de la rugosité et de la pente du terrain :

I.3.1.Erosion en nappe :

Cette forme d'érosion est caractéristique des sommets de bassin versant : l'érosion en nappe a un effet érosif maximal au sommet des versants, Au bas des versants, au contraire, il s'agit d'accumulation[10]. Elle est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), les particules sont arrachées et transportées, ce phénomène est observé sur les pentes faibles[1].

Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol [11].

Figure 6 : Erosion en nappe[2]

I.3.2. L'érosion linéaire (micro-Channel ou Rill Erosion) :

Elle se produit lorsque la concentration des eaux conduit à la formation de chenaux de dimension croissante : griffes (quelques centimètres des profondeurs), rigoles (incision dans la couche labourée), ravines (incision dépassant la couche labourée) [12].

L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (**Figure 7**) (Griffes, rigoles, ravines, etc.).En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, il creuse des formes de plus en plus profondes [2].

Figure 7 : Erosion linéaire[7]

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente[11].

I.3.2.1. Erosion en griffes et rigoles :

D'abord, l'écoulement se concentre davantage pour créer son passage sous forme de griffes, ensuite l'eau de ruissellement vient renforcer l'agrandissement de cette forme par des incisions bien définies faisant apparaitre des rigoles quoique petite à la surface de la terre [13].

I.3.2.1.1. Les griffes :

Sont des micros formes éphémères qui entaillent les microreliefs formés par les lignes de semis (**Figure 8**) : leur profondeur est inférieure au lit de semence, leur largeur n'excède guère 10 cm et leur longueur ne dépasse le mètre que lorsqu'elles s'allongent parallèlement aux rangs etaux inters rangs.

Elles correspondent le plus souvent à des bandes en dépression plus ou moins marquée, crées par les empreintes de roues ou le modelé de surface laissée par les outils de travail.

Elles ont donc toujours un caractère périodique. En fait, elles ne représentent vraisemblablement, et malgré leur caractère diffus qu'une part modeste de l'ensemble des pertes en terre globales même si leur évaluation est négligée car difficilement quantifiable[14].

Figure 8 : photo représente l'érosion en griffes (Djbele sidi Ahmad Zagai wilaya de Saida) [7]

I.3.2.1.2. Les rigoles :

Sont prolongées à l'aval par les ravines dont la profondeur atteint la semelle de labour et qui sont trouvées dans les régions de grande culture (**Figure 9**), en général localisées dans les zones de concentration du ruissellement, c'est à dire dans des dépressions ou des talwegs, même faiblement marqués. Leur tracé s'adapte à la topographie et le profil transversal présent la forme d'un U dans les sables[7].

Figure 9 : Photo représentative de rigole (Ain Tebouda wilaya de Saida)[7]

I.3.2.1.3. Erosion en ravine :

L'érosion en ravine c'est la dissection de la surface du sol par un chenal profondément découpé dans les terres se formant à l'aval d'un bief non incisé et créant ainsi une rupture de pente brutal[15].

Cette érosion par ruissellement concentré ou érosion de talweg peut se produire même dans des régions à faible pente (de l'ordre de 1% dans les talwegs et 2% sur les versants qui les alimentent) et pour des épisodes pluvieux de faible intensité [7]. En Algérie, l'érosion ravinant a déplacé 90 a 300 t/ha/an ce qui correspond à une vitesse d'altération des versants de 7 à 17 mm/an[12].

Figure 10 : Photo d'érosion par ravinement [7]

L'écoulement superficiel qui amène la formation de ravins ou l'élargissement de ravines est habituellement le résultat d'une mauvaise conception des exutoires des réseaux de drainage de surface et souterrain. L'instabilité des talus des ravins, habituellement associée au suintement des eaux souterraines, provoque l'érosion puis l'effondrement des talus[16].

Tableau 1 : Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire[17]

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

I.3.3.L'érosion en masse :

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain.

Dans ce cas, seul l'Etat dispose des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse[2].

Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux dont on peut citer :

1. Les glissements : sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes et sur les marnes en voie d'altération.
2. Coulées boueuses et laves torrentielles : Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène.
3. Les formes locales : Il s'agit d'éboulements rocheux ou d'effondrements de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine: ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive[2].

I.3.4.Erosion mécanique sèche :

Elle correspond à l'arrachement et au transport des particules du sol du fait de la gravité et de l'utilisation d'outils aratoires (manuels ou tractés). Ce processus où l'eau n'intervient pas est peu connu, peu étudié et rarement quantifié[1].

I.4.Les facteurs de l'érosion hydrique :

Les facteurs de l'érosion qui influencent les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat.

I.4.1.Les activités humaines :

L'homme qui, par des pratiques inadaptées sur les versants, est le facteur principal conditionnant l'intensité de l'érosion. Les défrichements qu'il opère sur les forêts et les parcours naturels, le surpâturage, la mise en culture sans précaution des terres susceptibles à l'érosion en pente, les labours mécanisés dans le sens des grandes pentes et la non restitution au sol de ses éléments nutritifs enlevés par les cultures facilitent le ruissellement et par conséquent l'érosion et ses effets indésirables pour l'environnement et pour l'économie. L'érosion hydrique des sols résulte de l'interaction entre les facteurs statiques et les facteurs dynamiques. Les facteurs statiques sont reliés à la vulnérabilité des terrains. Celle-ci représente une caractéristique propre du milieu, dépendante de la nature du terrain et indépendante des facteurs dynamiques. Ces derniers sont les agents de pression qui peuvent être soit naturels (climat et couverture végétale), soit humains[17].

I.4.2. Le couvert végétal :

Tant que la couverture végétale est continue, qu'il s'agisse d'une forêt, de fourrés, de savanes, de pâturages ou d'un simple paillis. Les phénomènes d'érosion sont modestes malgré l'agressivité des pluies, la fragilité des sols et la pente.

Lorsque le sol est totalement dénudé comme c'est le cas lors des défrichements mécanisés, les pertes en terre sont multipliées par100 à 1.000 et le ruissellement par 20 à 50.Sous cultures, les risques d'érosion sont intermédiaires et varient dans une très large mesure en fonction du type de plante, du rythme de croissance et des techniques culturales qui leur sont associées[18].

La végétation et les résidus tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration[1].

I.4.3.Les facteurs climatiques :

Le Climat constitue la cause et la source d'énergie érosive. Ce sont les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement sur les terrains en pente et les vents violents qui détachent et entraînent les particules terreuses. L'efficacité de la pluie vis à vis des processus d'érosion est liée aux rôles qu'elle a dans le détachement des particules des sols, mais surtout dans la formation du ruissellement. Cette érosivité dépend essentiellement de l'intensité et du volume des précipitations. L'intensité d'une pluie est le rapport d'une hauteur d'eau à une durée (exprimée en mm/h ou mm/min).

L'intensité réelle ou instantanée se réfère à un instant au cours de la pluie et n'est jamais constante au cours d'un même événement pluvieux. L'intensité moyenne au cours d'une pluie est le rapport du volume total de la pluie à la durée effective de la pluie[17].

I.4.3.1.Les précipitations :

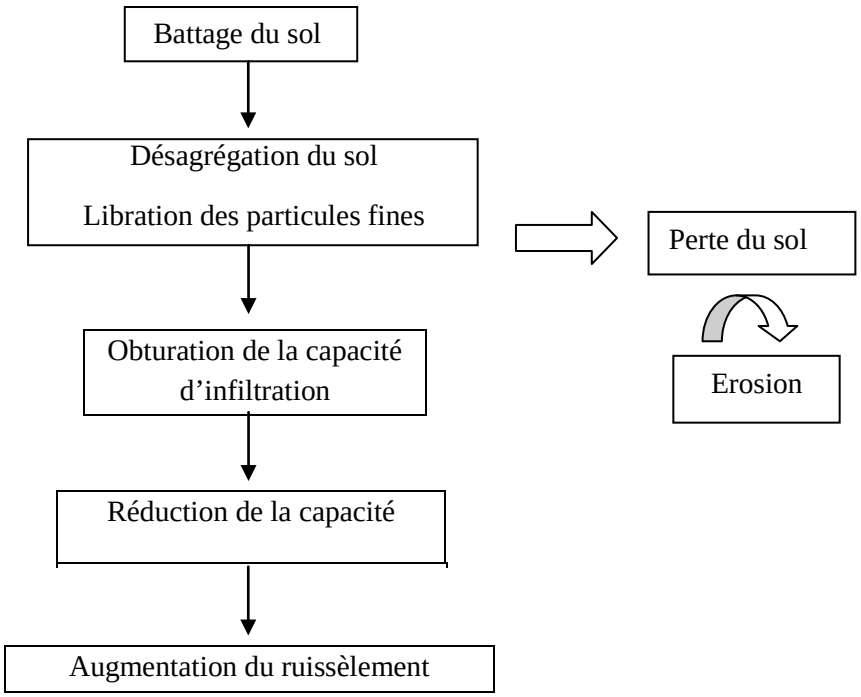

Figure 11 : l'influence de l'intensité sur l'érosion hydrique[17]

Les paramètres pluie liés à l'érosion sont :

1. La hauteur des précipitations est peu liée à l'importance de l'érosion.

2. L'intensité est le facteur principal de l'érosion. Plus l'intensité est grande, plus l'effet de battage du sol est prononcé.

I.4.4.Les facteurs géomorphologiques et hydrologiques :

I.4.4.1.La géomorphologie du terrain :

Conditionne la gravité de l'érosion. En effet, à petite échelle, on note que la rugosité de la parcelle explique les pertes du sol. Quant à grande échelle, c'est le relief du bassin versant qui conditionne l'importance des dégâts occasionnés par l'érosion hydrique[17].

I.4.4.2.L'infiltrabilité des sols :

L'érodibilité d'un sol, définie comme étant la vulnérabilité du sol à l'érosion dans des circonstances précises, est fonction de la perméabilité de la surface des sols. En effet, les sols issus de roches tendres (marnes et schistes feuilletés) sont généralement imperméables et très sensibles à l'érosion[17].

I.4.5.La morphologie du terrain :

I.4.5.1.La pente :

La pente est un facteur important d'érosion. Le ruissellement et l'érosion commencent sur des pentes faibles (1 à 2 %). L'érosion augmente avec la pente[17].

I.4.5.2.La longueur de la pente :

En principe, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie[17].

I.4.5.3.La forme de la pente :

Une pente donnée a tendance à devenir de plus en plus concave parce que les produits arrachés au sommet s'accumulent en bas de la pente. Cette évolution est parfois sensible et se traduit parfois par une diminution de l'érosion au cours du temps[17].

I.4.6.Le sol :

L'érodibilité d'un sol représente la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent. L'érodibilité d'un sol est définie par 2 caractéristiques :

- La résistance au splash (battance).
- La résistance au cisaillement (lié au ruissellement).

Elle est fonction de plusieurs paramètres :

- La capacité d'infiltration.
- La stabilité structurale.
- La texture.
- La teneur en matière organique[19].

I.5. Quantification de l'érosion hydrique :

Les méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles de travail. La quantification peut se faire par des mesures directes ou par des évaluations indirectes.

I.5.1. Mesures directes :

I.5.1.1. Mesures topographiques :

Le principe se base sur le suivi de l'évolution topographique de la surface du sol, notamment :

- Mesure par rugosimètre : on estime la variation de la hauteur du sol par rapport à un plan de référence.
- Suivi de l'évolution des ravines : on mesure la variation des dimensions de certaines sections des ravines après chaque évènement pluvieux[2].

I.5.1.2. Simulation de pluie :

L'objectif est de déterminer certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols et ce, à petite échelle et sous diverses conditions de pluie et de sols.

L'utilisation des simulateurs de pluie présente plusieurs avantages puisqu'ils :

- Sont des dispositifs mobiles

- Sont capables de produire à volonté des pluies d'intensité, de hauteur et d'énergie semblables à celles des pluies naturelles

- Permettent de simuler des averses de fréquence rare qui causent le plus de dégâts

- Permettent de raccourcir les temps d'observation sur le terrain[2].

I.5.1.3. Mesures par l'étude du transport solide :

I.5.1.3.1.Transport en solution :

Sa mesure est relativement facile puisque les concentrations en matières dissoutes sont en général homogènes dans une section. Ces concentrations sont liées à la conductivité qui est facilement mesurable in situ. Une formule établie par N'Guyen (1988) montre cette relation comme suit :[2]

$$\mathbf{C\ (mg/l) = K/R}\text{……..}(1)$$

Avec :

C : concentration en mg/l.

K : facteur d'érodabilité.

R : conductivité en ohms/cm.

I.5.1.3.2.Transport de fond :

Peut être estimé selon plusieurs méthodes à savoir des pièges à sédiments installés au fond de la zone active du lit, des fosses creusées au fond du lit ou aussi par marquage isotopique des sédiments. Cependant, sa mesure est imprécise[2].

I.5.1.4. Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues :

L'estimation de la quantité des sédiments déposés dans une retenue dépend de deux paramètres : la densité et le volume des sédiments. La densité des sédiments est variable en fonction du temps et en fonction de la position dans la retenue.

Elle varie en fonction de la granulométrie, la composition minéralogique, l'épaisseur des dépôts, le niveau de l'eau dans la retenue et l'âge des dépôts. Quant au volume des sédiments, il est déterminé sur la base d'une comparaison de la topographie de la cuvette avant et après mise en eau du barrage[2].

I.5.2. Mesures indirectes :

I.5.2.1.La modélisation :

Les effets de prédictions mathématiques de l'érosion hydrique ont commencé depuis plus d'un demi-siècle environ et durant ce temps-là, plusieurs essais et plusieurs méthodes ont été réinventés avec l'évolution de la technologie.

Parmi les méthodes et les équations proposées celle de Weishmeier et Smith a été largement adoptée d'une manière générale. Ces deux auteurs ont établi la première équation universelle de perte en terre (USLE). Le but de cette dernière était de permettre une prévision chiffrée des risques de l'érosion à l'échelle du champ dans le but d'intervenir pour garder l'érosion en dessous d'un seuil tolérable (1à12t/ha/an).

L'objectif de cette équation était de prédire les facteurs à partir de données météorologiques, des propriétés physico-chimiques du sol et des données de recherches sur chaque localité et le plus important, l'USLE était un outil libre de toute indexation géographique contrairement aux autres équations établies auparavant et qui étaient plutôt régionales[2]. L'équation exprime l'érosion comme étant le produit de cinq facteurs représentant :

- L'érosivité de la pluie et du ruissellement « R »
- La résistance du milieu à laquelle correspond l'érodabilité « K »
- La longueur et le degré de pente « LS »
- Le couvert végétal et les pratiques culturales « C »
- Les pratiques antiérosives « P »

L'équation est la suivante :

$$\mathbf{A=R.K.L.S.C.P}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

Avec : A : la perte en sol exprimée en t/ha/an.

L'équation a été réactualisée en 1978 et a été rendue plus accessible aux utilisateurs grâce notamment à des tableaux de données ainsi qu'à des graphes rendant son utilisation plus conviviale. Avec cette équation, les services américains de l'agriculture peuvent établir des tolérances ou des valeurs seuils de perte de terre pour des sols ou des systèmes culturaux donnés.

Le poids des différents facteurs a été évalué à partir du traitement statistique d'un grand nombre de mesures réalisées sur un grand nombre d'années sur des parcelles standardisées de dimensions réduites.

Si une utilisation appropriée des paramètres de l'équation permet d'avoir une idée de la quantité moyenne de terre exportée pour différents types d'occupation du sol, cette équation a ses limites, liées aux hypothèses de base et à ses objectifs.

Elle permet de prédéterminer les pertes en terre annuelles moyennes pour une parcelle donnée, dans des conditions bien définies[2].

I.6. Comment lutter contre l'érosion hydrique :

Afin de préserver les ressources en sol et limiter les nuisances liées à l'érosion, il faut mettre en place des moyens de lutte contre l'érosion :

- **Amont** :

- Limiter le détachement des fragments.

- Limiter la genèse du ruissellement.

- Casser le ruissellement (flux d'eau et de particules).

- Adapter les pratiques culturales (travail du sol, taille des parcelles, couverture végétale,…).

- Augmenter la stabilité structurale (apporter des matières organiques,…).

- Mettre en place des aménagements (bandes enherbés, bandes tassées,..) [20].

Figure 12 : Bande tassée pour limiter le détachement des fragments[20]

Figure 13 : Bande enherbée pour ralentir le ruissellement et diminuer l'érodibilité [20]

La bande enherbée constitue un obstacle (quelques mètres de larges) qui ralentit le ruissellement.

L'eau peut s'infiltrer le long des racines. Le ruissellement à l'aval de la bande enherbée est fortement diminué[20].

- **Aval :**

- Casser le ruissellement (flux d'eau et de fragments).

-Limiter la connexion des réseaux ruisselants, Canaliser le ruissellement.

- Limiter la taille des parcelles agricoles.

- Diversifier l'occupation du sol sur un bassin versant.

- Mettre en place des aménagements (mares tampons, bassins de rétention,…) [20].

Conclusion :

L'érosion hydrique est une cause majeure de dégradation des sols.

• Les caractéristiques de la pluie, du ruissellement et du sol, ainsi que la présence et la qualité du couvert végétal sont les principaux facteurs de l'érosion hydrique des sols.

• L'érosion du sol est un phénomène discontinu dans l'espace et dans le temps, que l'on peut observer à différentes échelles.

• Les études de l'érosion permettent de comprendre les processus, de prévoir les flux et de mettre en place des stratégies de lutte contre l'érosion.

Nous avons donc pu constater que cette érosion modélise et forme le paysage que nous pouvons observer aujourd'hui et cela depuis fort longtemps.

Chapitre II

Systéme d'information géographique

Introduction :

L'essor de la technologie informatique en termes de moyens et d'algorithmes de traitement a donné un élan inestimable aux systèmes d'information géographique(SIG).

Le terme SIG recouvre plusieurs acceptions selon le point de vue adopté. Nous nous limiterons à la notion de logiciel ou d'outil permettant de mettre en œuvre le système d'information relatif à l'information de nature géographique.

C'est-à-dire les systèmes permettant :

- d'accéder à des données géométriques et alphanumériques ;
- de faire des requêtes spatiales plus ou moins évoluées, croisées avec des requêtes sémantiques.

Le principe est de définir des objets localisés dans l'espace et de les caractériser par un ensemble de variables issues d'observations, d'enquêtes ou de calculs.

II.1.Définition de l'information géographique :

L'information géographique est la représentation d'un objet ou d'un phénomène réel, localisé dans l'espace à un moment donné[21].

Elle est classiquement représentée sous forme cartographique, avec ses 2 composantes :

- Une composante graphique : la carte, qui décrit la forme et les caractéristiques de l'entité tout en la localisant par des coordonnées géographiques ou cartographiques.
- Une composante attributaire : la légende, qui identifie les entités représentées[22].

Pour résumer, l'information géographique c'est :

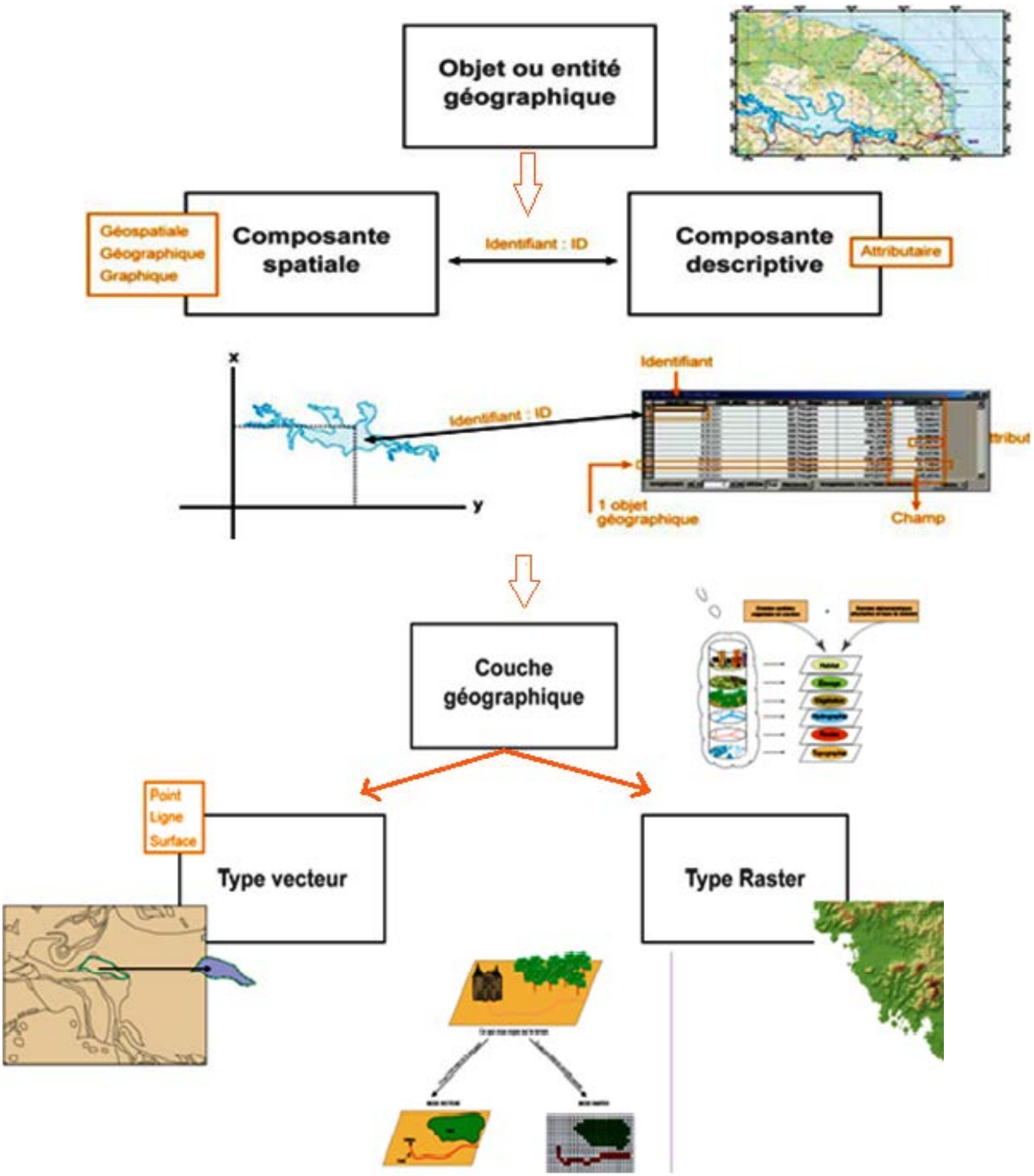

Figure 14 : Schéma simplifié de l'information géographique[23]

II.2.Système d'information géographique(SIG) :

II.2.1.Définition :

Quand bien même il existe plusieurs définitions d'un SIG, elles ont néanmoins en commun le fait de reposer sur ses différentes fonctions.

Le système d'information géographique est un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données géoréférencées.

L'ensemble des données est structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision[24].

Les SIG sont considérée comme une des technologies de l'information les plus performantes car elle vise à intégrer des connaissances provenant de sources multiples et créer un environnement pluri-secteurs idéal pour la collaboration.

De plus, le SIG séduit les nouveaux utilisateurs par son côté intuitif et cognitif. Il réunit un environnement de visualisation performant et une puissante infrastructure d'analyse et de modélisation spécialement adaptée à la géographie[25].

Les SIG sont utilisés par tous ; collectivités territoriales, secteur public, entreprise, écoles, administrations, états utilisent les Systèmes d'Informations Géographique. La création de cartes et l'analyse géographique ne sont pas des procédés nouveaux, mais les SIG procurent une plus grande vitesse et proposent des outils sans cesse innovant dans l'analyse, la compréhension et la résolution des problèmes[26].

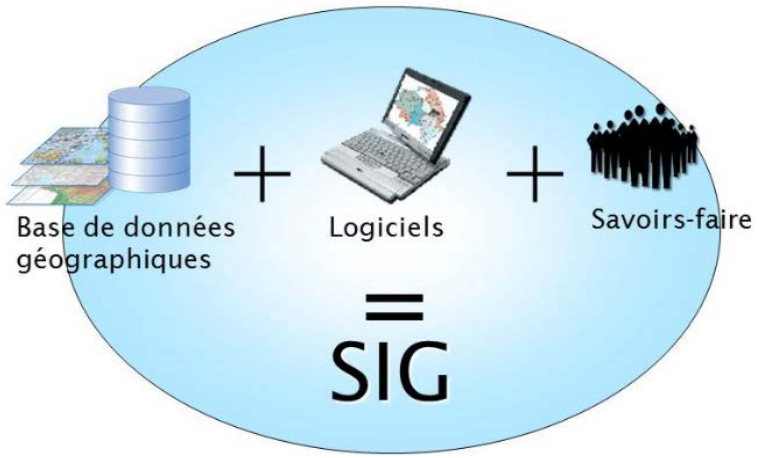

Figure 15 : Définition schématique d'un Système d'Information Géographique[*Site web* 1]

II.2.2. Histoire du Système d'Information Géographique :

La première application **SIG**, souvent citée en épidémiologie, est l'étude menée avec succès par le docteur John Snow. Il s'agit de l'épidémie de choléra dans le quartier de Soho à Londres en 1854 : ayant représenté sur un plan la localisation des malades et l'endroit où ils puisaient leur eau, il parvint à déterminer que c'était l'eau d'un certain puits qui était le foyer de contamination.

Dans les années 60, les cartes de l'Afrique de l'Est, trop nombreuses pour permettre de localiser les meilleurs endroits pour créer de nouvelles implantations forestières, font naître l'idée d'utiliser l'informatique pour traiter les données géographiques (**SIG**).

L'avancée de l'informatique encouragée par la prise de conscience environnementale ont permis l'usage des techniques et méthodes dans la science et l'aménagement du territoire.

Le suivi, la gestion et la protection de la biodiversité sont également à l'origine de l'évolution des applications **SIG**.

Depuis 1970, de nouvelles approches scientifiques transdisciplinaires et collaboratives ont vu le jour. Maguire (1991) distingue trois périodes principales dans l'évolution des **SIG** :

- Fin des années 1950 – milieu des années 1970 : début de l'informatique, premières cartographies automatiques
- Milieu des années 1970 - début des années 1980 : diffusion des outils de cartographie automatique/**SIG** dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques.)
- Depuis les années 1980 : croissance du marché des logiciels **SIG**, développements des applications **SIG**, mise en réseau (bases de données distribuées, avec depuis les années 1990, des applications **SIG** sur Internet) et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...), apparition de « logiciels libres » ou d'outils dédiés aux pratiques coopératives[*Site web* 2].

II.3. Les modes de représentation de l'information géographique dans un SIG :

Il existe 2 grands types de données géographiques dans les SIG : les « raster » et les « Vecteurs »

II.3.1. Le mode raster :

Appelées matrices, ce sont des images avec comme unité de base le pixel, La réalité est décomposée en une grille régulière et rectangulaire, organisée en lignes et en colonnes, chaque maille (= pixel) de cette grille ayant une intensité/valeur de gris ou une couleur[23].

C'est pour ça que ces images ne permettent pas d'association avec des données alphanumériques en dehors des attributs de chaque pixel[27]. La juxtaposition des points recrée l'apparence visuelle du plan et de chaque information[23].

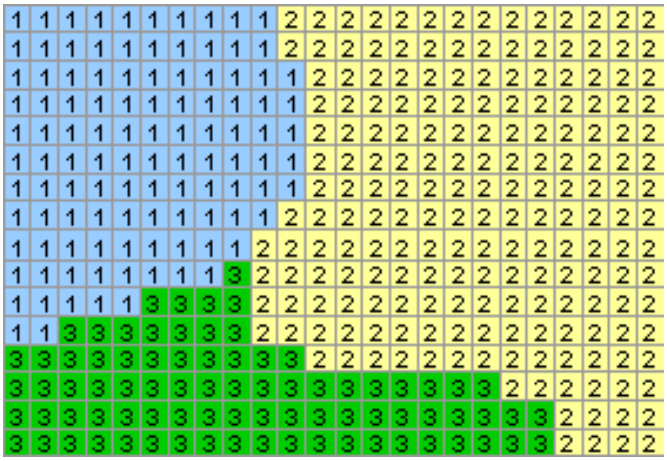

Figure 16 : Carte en mode raster[28]

II.3.2. Le mode vectoriel :

Est particulièrement utilisé pour représenter des données discrètes. Les limites des objets spatiaux sont décrites à travers leurs constituants élémentaires, à savoir les points, les arcs et les arcs des polygones.

Chaque objet spatial est doté d'un identifiant qui permet de le relier à une table attributaire,[23]ces données vectorielles traitant les objets géographiques individuellement, elles permettent en effet d'individualiser des secteurs géographiques et d'y associer des attributs quantitatifs.

Ces données sont contenues dans un « fichier de formes ». Il existe plusieurs formats de fichiers de formes (SHP, DXF, …).

Les éléments géographiques représentés grâce à des données vectorielles sont localisés par des coordonnées (X, Y).

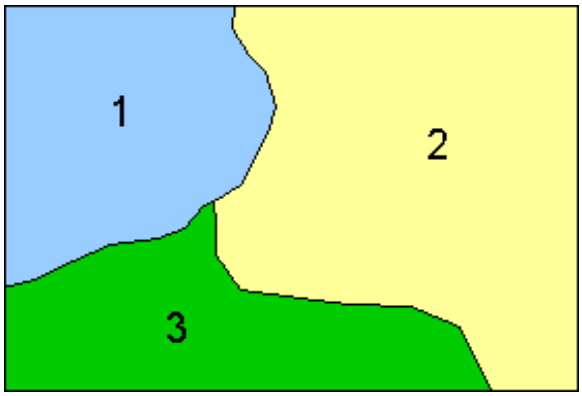

Figure 17 : Carte en mode vecteur[28]

Ils sont constitués de trois types d'entités : point, ligne, polygone.[27]

II.3.2.1. Les points :

Ils définissent des localisations d'éléments séparés pour des phénomènes géographiques trop petits pour être représentés par des lignes ou des surfaces qui n'ont pas de surface réelle comme les points cotés.

II.3.2.2. Les lignes :

Les lignes représentent les formes des objets géographiques trop étroits pour être décrits par des surfaces (ex : rue ou rivières) ou des objets linéaires qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveau.

II.3.2.3. Les polygones :

Ils représentent la forme et la localisation d'objets homogènes comme des pays, des parcelles, des types de sols[28].

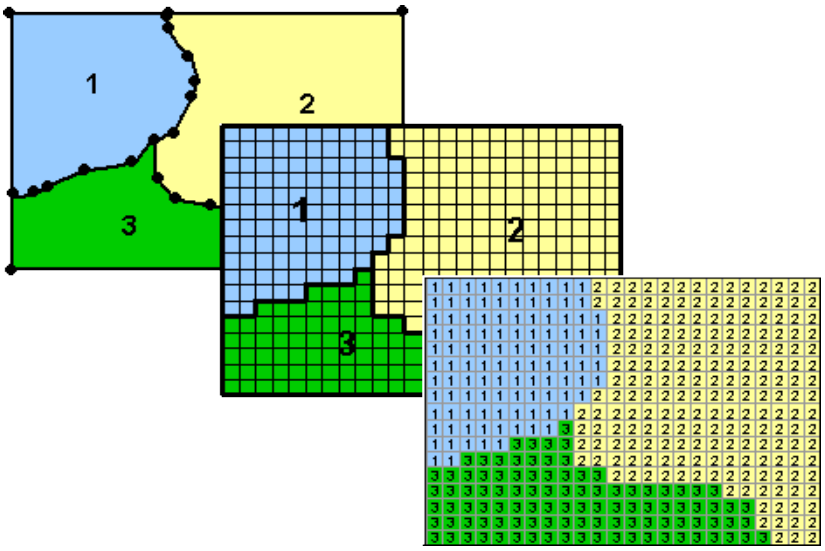

Figure 18 : Transformation d'un mode vecteur vers un mode raster [28]

II.4. Les composants d'un SIG :

Les SIG sont interprétés de différentes manières. Généralement, on les définit comme des systèmes à quatre composantes : base de données, base de connaissances, matériel et logiciel [29].

II.4.1. Les données :

Les données sont certainement les composantes les plus importantes des SIG, elles peuvent être de trois types : géographiques, attributaires ou métadonnées.

Les données géographiques sont des données localisées auxquelles on associe une forme et des paramètres d'affichage (couleur, épaisseur du trait...). Elles peuvent être de type raster ou vecteur.

Les données attributaires caractérisent les données géographiques (nom d'une route, nombre d'habitants dans un immeuble localisé, …).

Les métadonnées décrivent directement la ressource c'est-à-dire ici les données, ce sont « les données sur les données » comme par exemple la date d'acquisition, le nom du propriétaire, etc.[30].

II.4.2. Le matériel :

Il s'agit d'une composante indispensable à un S.I.G et l'élément fondamental de cette composante reste l'ordinateur. Les S.I.G fonctionnent grâce aux ordinateurs et périphériques connectés entre eux ou non et permettant aux utilisateurs d'avoir toutes les fonctionnalités des SIG regroupées autour des 5A (abstraction, analyse, acquisition, affichage, archivage).

Etant donné la forte taille des données stockées dans un SIG, les supports de stockage occupent une place de choix dans le matériel des SIG. Des systèmes client-serveur en intranet, extranet voire via Internet facilitent ensuite, et de plus en plus, la diffusion des résultats.

Ces solutions de diffusion appelées web-mapping ou web-SIG utilisent un serveur cartographique[31].

II.4.3. Les utilisateurs :

Les SIG s'adressent à des utilisateurs très différents (urbanistes, géographes, élus, militaires, commerciaux, informaticiens...) et aujourd'hui, en particulier avec l'apparition des SIG sur Internet n'importe qui peut être amené à utiliser un SIG[*Site web* 3].

II.4.4.Les méthodes ou savoir-faire :

Un SIG fait appel à divers savoir-faire et donc diverses méthodes qui proviennent généralement des compétences multidisciplinaires.

On retiendra notamment la nécessité d'avoir des compétences en géodésie (connaissance des concepts de système de référence et de système de projection), en photogrammétrie (ensemble des techniques et des matériels utilisés pour aboutir à la représentation d'un territoire étendu, à partir des clichés des prises de vues aériennes.),en analyse des données ,des processus, de la modélisation et de la programmation informatique, en traitement statistique ,en sémiologie graphique et cartographique, en traitement graphique[32].

II.4.5. Les logiciels :

Ce sont des outils pour saisir et manipuler les informations géographiques, pour stocker les bases de données (SGBD), pour des requêtes, analyse et visualisation via des interfaces graphiques utilisateurs pour une utilisation facile[32].

Les logiciels font le lien entre les données, le matériel et les utilisateurs. A partir d'une interface graphique, l'utilisateur va interroger une base de données afin de visualiser et d'analyser ces différentes informations[32].

Figure 19 : Schéma simplifié des composants d'un SIG[*Site web* 4]

II.5. Les différentes fonctionnalités d'un SIG : les 5 « A » :

Les systèmes d'information géographique peuvent être constitués pour répondre à différentes demandes. Comme le système universel n'existe pas. Il faut les adapter selon les objectifs fixés.

Toutefois ils ont en commun des fonctionnalités que Ton retrouve dans chaque système regroupées en 5 familles sous le terme des « 5A » pour : Abstraction. Acquisition. Archivage. Affichage et Analyse Ces termes résument les fonctionnalités que tous les systèmes doivent assurer mais cachent leur diversité : différents modèles mis en œuvre, nombreuses applications, présentations multiples des données, variété des informations et capacités de stockage.

II.5.1. Abstraction :

Modélisation des données géographiques et de leurs spécifications[33], et revient à concevoir un modèle qui organise les données par composants géométriques et par attributs descriptifs ainsi qu'à établir des relations entre les objets[34].

II.5.2. Acquisition des données :

Modélisation des données géographiques et de leurs spécifications[33],et revient à alimenter le SIG en données. Les fonctions d'acquisition consistent à entrer d'une part la forme des objets géographiques et d'autre part leurs attributs et relations[34].

II.5.3. Archivage :

Cette fonctionnalité fait appel aux notions suivantes :

Outils, procédures et fréquence d'archivage des données[33], Consiste à transférer les données de l'espace de travail vers l'espace d'archivage (disque dur) [34].

II.5.4. Analyse :

Cette fonctionnalité fait appel aux notions suivantes : Analyse spatiale, analyse temporelle[33], et permet de répondre aux questions que l'on se pose[34].

II.5.5. Affichage :

Cette fonctionnalité fait appel aux notions suivantes : Affichage de données et de synthèses à la fois sur écran et sur carte (donc nécessité de matériels performants pour l'impression) ; Convivialité et ergonomie des applications[33], et pour produire des cartes de façon automatique, pour percevoir les relations spatiales entre les objets, pour visualiser les données sur les écrans des ordinateurs[34].

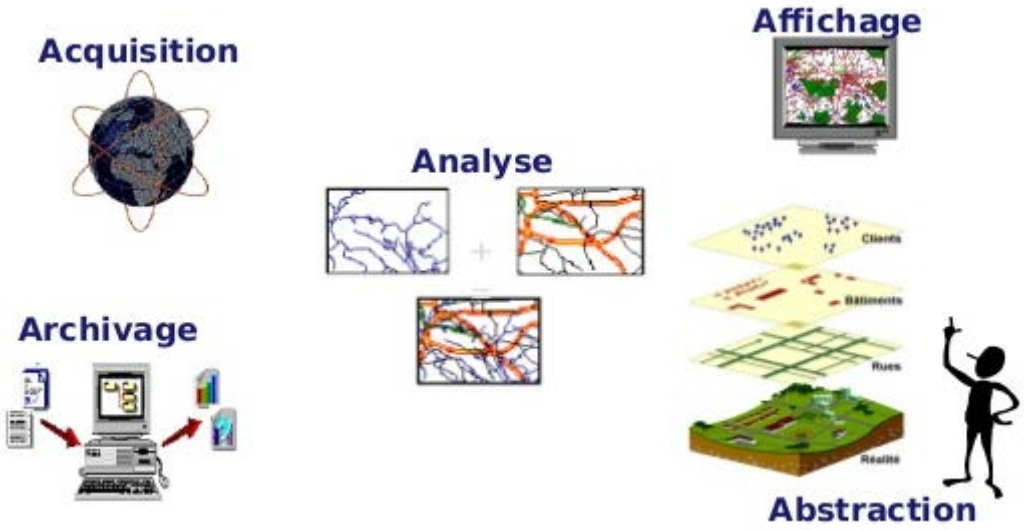

Figure 20 :Les 5 « A » d'un SIG[35]

II.6. Les domaines d'application :

Les SIG sont utilisés pour gérer et étudier une gamme très diversifiée de phénomènes et de réseaux de phénomènes. Les principales activités sons :

- Etablissement et mise à jour des cartes thématiques.
- La reconnaissance d'un lieu, d'une région, le choix d'un chemin.
- La représentation d'objets ou de classes d'objets.
- La réalisation des inventaires de l'occupation, de la nature ou de tout autre attribut du sol.
- La représentation des phénomènes dynamiques dans le temps[36].

Les domaines d'application des SIG sont aussi nombreux que variés :

II.6.1. Océans :

Un SIG marin utilise des données sur les océans et les mers pour représenter des phénomènes survenant dans les eaux littorales et des grands fonds, comme les courants, la salinité, la température, la masse biologique et écologique et la densité.

II.6.2. Terres et sols :

Des informations précises sur le paysage local sont indispensables dans la prise de décision sur ce qu'il faut protéger et comment le protéger. .

Les cartes numériques de sites peuvent être liées à des bases de données relationnelles qui stockent des données topographiques, à des données de base, de la documentation sur les sites et à des photographies numériques aériennes.

II.6.3. Faune :

Un SIG est un outil important dans la gestion et la protection des habitats et des espèces. Un SIG permet d'étudier les populations animales à diverses échelles et fournit des outils analytiques pour étudier les corridors d'habitats, les schémas de migration et l'influence des parcs et réserves naturelles sur la préservation de la faune.

II.6.4. Végétation :

Un SIG représente l'outil idéal pour cartographier et inventorier la végétation et mieux comprendre pourquoi certaines espèces sont menacées ou en danger.

II.6.5. Agriculture :

Un SIG fournit des capacités analytiques qui sont au cœur de tout système agricole de précision réussi.
Un SIG permet aux agriculteurs d'effectuer des analyses spatiales, propres aux sites, sur des données agronomiques.

II.6.6. Eau et eaux usées :

Dans des services ressources hydrauliques, les cartes de haute résolution détaillent la localisation géographique des pipelines souterrains, bassins versants, réservoirs et installations hydroélectriques.
La base de données d'informations permet au service d'évaluer les possibilités de développement

II.6.7. Eaux :

Un SIG est utilisé à l'échelle mondiale dans les laboratoires d'écologie, les services de planification, les parcs, les agences et les organismes à but non lucratif pour promouvoir un développement durable.

Des comités sur les bassins versants ont recours à un SIG pour la mise en carte et la planification des habitats, des terrains marécageux et de la qualité de l'eau. Ils exploitent un SIG pour cartographier les eaux, y compris les bassins versants en amont, les caractéristiques des canaux, le flux saisonnier, l'utilisation des terres adjacentes et les caractéristiques naturelles de l'habitat existant.

II.6.8. Exploitation minière :

La modélisation des terrains et des gisements, l'exploration, le forage, les programmes d'exploitation, la remise en état et la réhabilitation sont des éléments cartographiques et numériques importants pour l'exploitation minière.

II.6.9. Ressources naturelles :

L'exploration de pétrole et de gaz, l'aménagement hydraulique, la gestion du gros bois d'œuvre et les opérations minières sont autant d'éléments qui nécessitent une évaluation fiable pour favoriser la croissance dans les zones capables de la soutenir, tout en évitant la pollution des rivières ou la destruction des ressources.

Le délicat équilibre entre le développement industriel et la préservation de l'environnement nécessité des outils de modélisation et des outils analytiques de données spatiales[$Site\ web$ 3].

Autres domaines d'application *:*

- Tourisme (gestion des infrastructures, itinéraires touristiques).
- Marketing (localisation des clients, analyse du site).
- Planification urbaine (cadastre, voirie, réseaux assainissement).
- Protection civile (gestion et prévention des catastrophes).
- Transport (planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires).
- Hydrologie.
- Forêt (cartographie pour aménagement, gestion des coupes et sylviculture).
- Géologie (cartographie, mouvement de terrain, amiante environnemental, prospection minière).
- Biologie (études du déplacement des populations animales).
- Télécoms (implantation d'antennes pour les téléphones mobiles) [23].

II.7. Utilisations des SIG pour la cartographie du risque d'érosion :

Les SIG sont des outils rapides d'exécution, flexibles et très puissants capables d'intégrer un grand nombre de facteurs et de les présenter sous une forme facilement. L'estimation quantitative de l'érosion se fait en appliquant des modèles empiriques ponctuelles, qui nécessitent comme paramètres d'entrée, des données spatialisées (Pentes, texture du sol, hauteur de pluies, etc.) caractérisant les facteurs de l'érosion hydrique (topographie, érodibilité, l'érosivité, etc.).

Les SIG permettent d'appliquer des modèles ponctuelles cellules après cellule sur tout un espace géographiquement étendu. Les données spatialisées de chaque paramètre sont traitées séparément sous forme de couches d'informations et intégrées (superposition des couches) dans le SIG pour en ressortir la carte de distribution du risque.

Grace aux SIG, on résout le problème d'intégration des cartes analogiques, car sa plateforme permet de superposer différentes couches d'informations caractérisant des phénomènes dépendants ou indépendants, et qui aboutit à l'élaboration des cartes relationnelles très utiles comme outil d'aide à la décision[37].

II.8. Fonctionnement d'un SIG :

Un SIG stocke les informations sous la forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie. Ce concept, à la fois simple et puissant, a prouvé son efficacité pour résoudre de nombreux problèmes concrets[38].

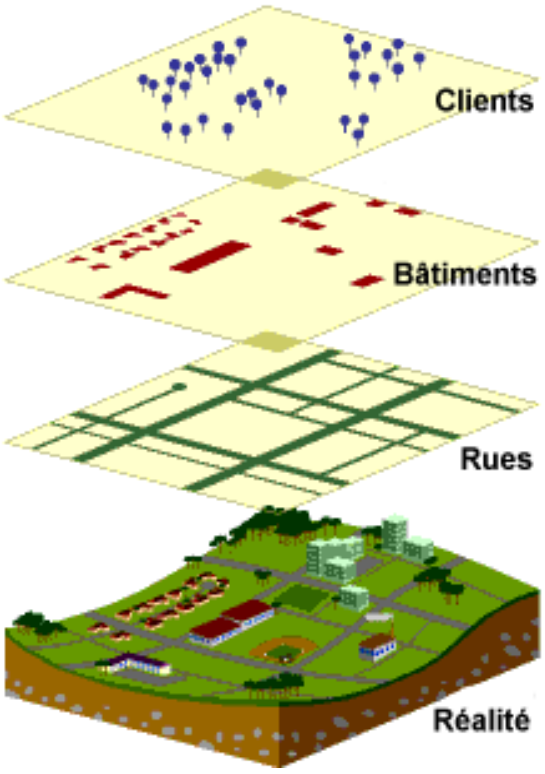

Figure 21 : Fonctionnement d'un SIG[38]

II.9. Avantages de l'utilisation des SIG :

- les données sont gardées sous forme physique (support magnétique).
- mesures sur les cartes, les superpositions, les transformations, la conception graphique.
- des tests analytiques de modèles à caractère géographique peuvent être réalisés et répétés facilement.
- l'étude des changements (études diachroniques) intervenues entre plusieurs dates peuvent être facilement réalisés.
- la conception graphique interactive et les traceurs automatisés peuvent être utilisés pour la conception et la production cartographique [36].

II.10. Les contraintes des SIG :

- Le manque de personnel spécialisé et compétant.
- Coût élevé et problèmes techniques pour l'acquisition des données fiables.
- Non Standardisation des formats de données.
- Nécessité d'une mobilisation continue des acteurs[*Site web* 5].

II.11. Le SIG idéal :

Idéalement, un SIG doit atteindre plusieurs objectifs et pour ce faire posséder certaines qualités. Il doit être :

- Rentable (en fonction du mandat de l'organisme).
- Pertinent (les résultats plutôt que sur les méthodes de production).
- Flexible (capable d'évoluer).
- Sécuritaire (construit de façon modulaire pour minimiser les erreurs et protéger l'information confidentielle).
- Performant (contrôle de la qualité et efficacité des traitements).

- Indépendant (du matériel et des logiciels afin d'en assurer l'évolution et la portabilité).
- Coopératif (bien définir les rôles et les responsabilités des services et des individus impliqués).
- Motivant (impliquer les utilisateurs à toutes les étapes de la conception et de l'utilisation).
- Progressif (éviter les achats massifs d'équipements et limiter la saisie initiale des données afin de réduire les risques d'erreur et les coûts).
- Documenté (rédaction de la documentation parallèlement au développement du système). [$Site\ web$ 5].

Conclusion :

Pour Finir ce chapitre, on peut dire que les SIG vont pouvoir servir de support à différentes analyses spatiales conduisant à une compréhension de ce territoire modélisé et permettre la production de documents, sous différentes formes, rendant compte de ces analyses. L'information ainsi recueillit va conduire le ou les gestionnaires à prendre des décisions sur ce territoire.

Les aspects matériels et logiciels ne sont plus une limite au développement des SIG. Ils accompagnent au contraire le développement exponentiel de cet outil. En effet, l'accélération des performances des ordinateurs (processeurs et capacités de stockage) permet au plus grand nombre de bénéficier de ces outils et permet également d'envisager le développement important de nouvelles technologies dans ce domaine.

Chapitre III

Présentation de la région d'étude

Introduction :

Nous avons choisi comme zone d'étude la wilaya de Mila, elle représente une partie du Nord-Est algérien qui renferme une richesse et une biodiversité exceptionnelle.

Prenant une grande partie du bassin versant, la région se caractérise par un espace géographique très diversifié avec un relief complexe et irrégulier et profondément disséqué par un réseau hydrographique dense.

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un point de la surface terrestre.

Aussi, la bonne connaissance des conditions climatiques de la zone d'étude, et de ses caractéristiques est importante pour la compréhension de l'évolution des éléments climatiques et du comportement hydrologique des cours d'eau.

On a pris alors les données de la station météorologique de Beni Haroun qui est installée dans le versant Est du barrage, Dans ce chapitre, on s'intéressera à évaluer trois paramètres climatiques jugés importants : Les précipitations, les températures et l'évaporation.

III.1. Présentation de la région d'étude :

III.1.1. Cadre géographique :

III.1.1.1. Situation géographique régionale :

La wilaya de Mila est située dans le Nord-Est Algérien à 464 m d'altitude, et à 33 KM de la mer Méditerranée. Elle est aussi dans la partie Est de l'Atlas tellien, une chaîne de montagnes qui s'étend d'ouest en est sur l'ensemble du territoire nord du pays.

Le bassin versant de Béni Haroun est l'un des plus grands bassins hydrographiques importants en Algérie, ses limites dépassent le territoire de la wilaya de Mila pour atteindre plusieurs wilayas limitrophes, Constantine et Oum El-Bouaghi à l'Est, Batna au Sud, Sétif à l'Ouest, Jijel et Skikda au Nord.[39]

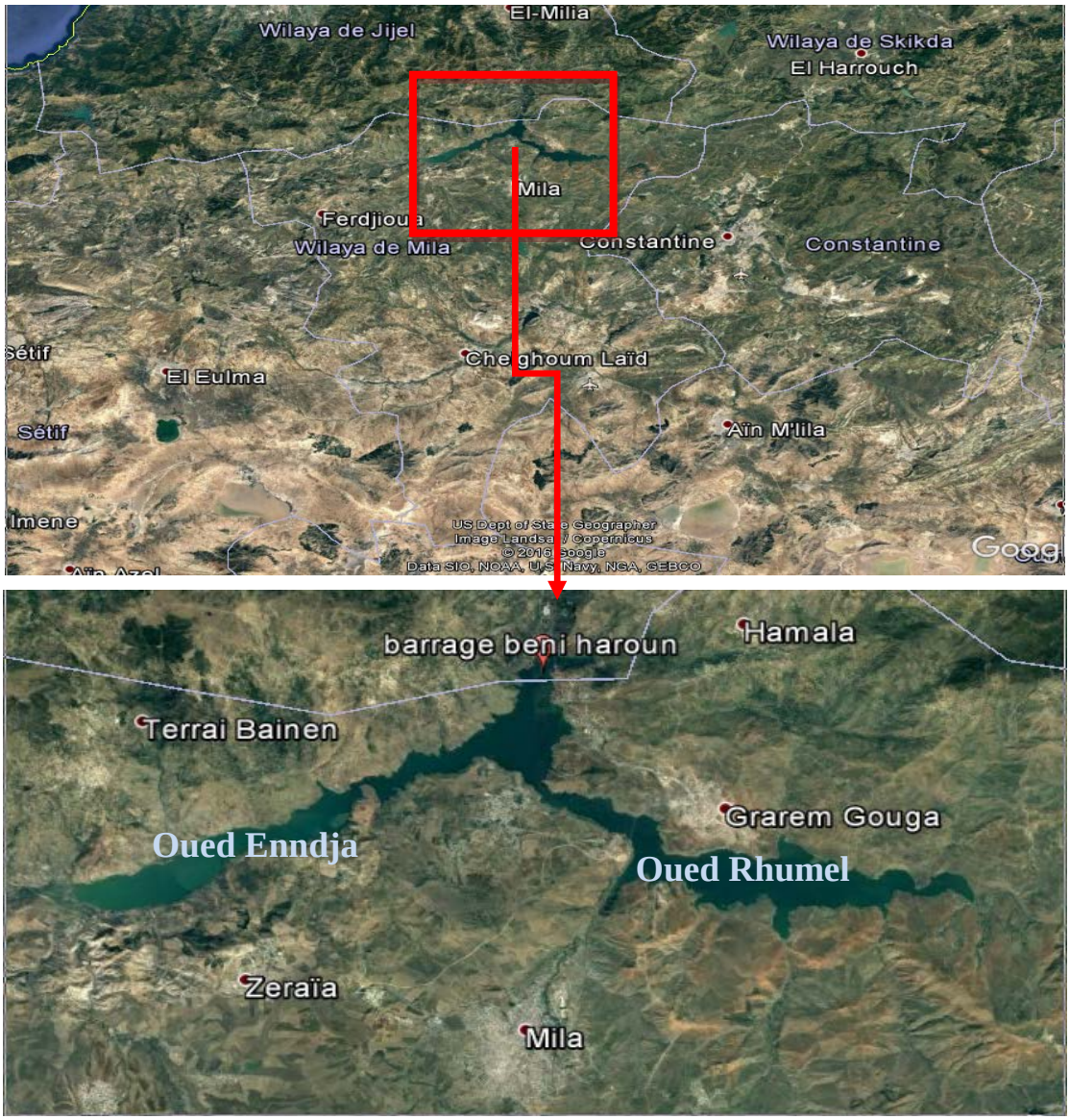

Figure 22: Situation géographique de la zone d'étude[40]

III.1.1.2.Le bassin de Beni Haroun :

Est situé en grande partie sur le versant méridional du bombement tellien. Il représente à ce titre une zone intermédiaire entre le domaine tellien à très forte influence méditerranéenne au nord et le domaine des hautes plaines à forte influence continentale au sud [41].

Le bassin se divise en deux parties distinctes :

- **La partie occidentale**, constitué par le bassin de **l'Oued Endja**, il nait à la confluence de l'Oued El Kébir et de l'Oued Redjas. Son lit possède une forme lithologique très intéressante du point de vue hydrogéologique ce qui explique le réseau hydrologique dense du barrage Beni Haroun[42].

Il se caractérise par des précipitations relativement élevées (700mm/an en moyenne) et une topographie montagneuse. Dans ce bassin les cotes atteignent 1400 m.

- **La partie orientale**, constituée par le bassin de **l'oued Rhumel**, Il prend naissance dans les hautes plaines sétifiennes, entaille les gorges de Constantine jusqu'à la confluence de l'Oued Endja et prend ensuite le nom d'El Kébir[42].

Il se caractérise par une topographie plus douce et des précipitations modérées (500mm/an). Dans ce bassin le terrain s'élève jusqu'à 1300m.

Le bassin de l'oued El Kebir : prend sa naissance des deux oueds précédents, Rhumel et Endja, d'un linéaire de 56 Km et se déverse dans la mer[42]. Cet oued est situé en Algérie Orientale. Il est bordé au sud par les Hauts plateaux telliens, à l'ouest par la montagne de petite Kabylie au Nord par la frontière de partage des eaux que forme l'Atlas Tellien, et à l'Est parle bassin du Seybouse [43].

III.1.2. Cadre géologique :

L'histoire géologique du Bassin de Beni Haroun est particulièrement mouvementée et marquée par un empilement d'unités structurales du Nord au Sud.

La carte géologique (**figure 23**) montre en relief l'existence d'une mosaïque de terrains et de structures plus ou moins complexes dont le résultat se traduit par une grande diversité des ressources souterraines tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

En effet, à l'opposition topographique par laquelle se caractérise le bassin, s'ajoute une opposition structurale qui se traduit par un substratum relativement simple au sud formé de vastes étendues sédimentaires d'où immergent des massifs calcaire isolés, et d'un édifice beaucoup plus complexe au nord constitué de nombreuses séries hétérogènes empilées durant les phases tectoniques successives.[41]

Ainsi, on distingue du nord au sud les nappes suivantes :

- **Les nappes telliennes :** Les nappes telliennes sont développées sur toute la moitié nord du bassin. Paléo géographiquement et du nord au sud, on peut distinguer : les séries ultra-telliennes, les séries telliennes sesu-stricto et les séries peni-telliennes**.**
- **La nappe numidienne :** Peu développée dans notre bassin, elle affleure dans la partie Nord – Est sur les monts de Djebel El Ouahch et près de Ain Abid et Sigus au sud du Djebel Oum Settas. Ce terme a été employé pour bien des formations différentes à partir Du moment où elles étaient gréseuses et apparemment dépourvues de faunes. C'est le cas de beaucoup d'affleurements actuellement rapportés au crétacé inférieur.

De bas en haut on rencontre :

− Argiles « sous-numidiennes »

− Grés numidiens.

− Argiles, marnes « Supra-numidiennes »[41].

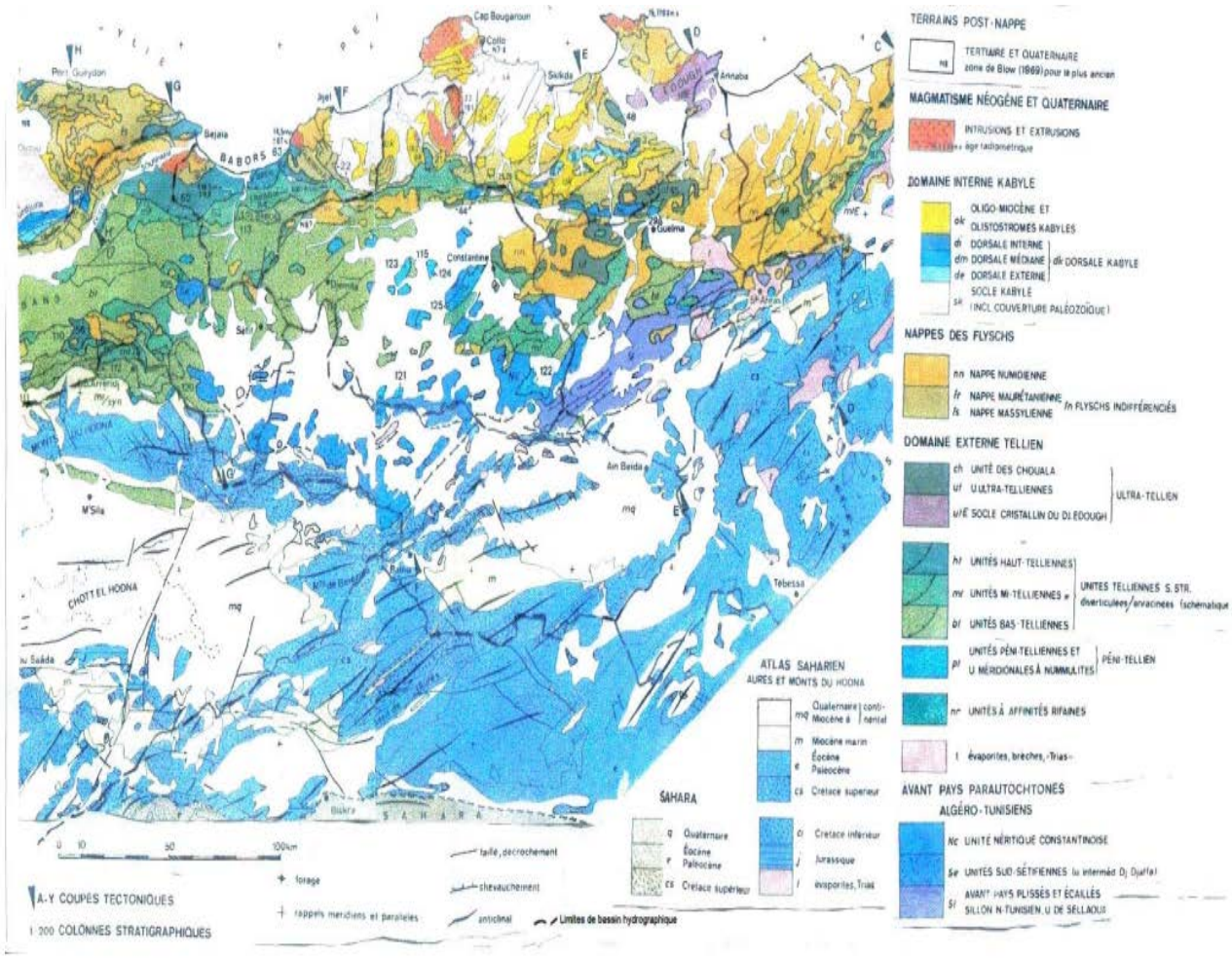

Figure 23: Les unités géologiques de l'Est algérienne et carte géologique de l'Algérie[43]

En fin, Le bassin de Beni Haroun montre une opposition topographique. Aux hautes plaines situées au sud du bassin, à topographie simple, qui donne des limites un peu floues au bassin, succède l'atlas tellien, au Nord, à la limite bien nette.

Une opposition géologique s'ajoute à cette opposition topographique, se traduisant par un substratum assez simple au sud formé de vastes étendues sédimentaires d'âge quaternaire, et d'où émergent des massifs calcaires isolés. Au nord, un relief fortement accidenté, de structure très complexe, constitués de séries hétérogènes empilées au cours de phases tectoniques successives [41].

III.1.3. Le couvert végétal :

Le couvert végétal de la région d'étude est réduit. Il se résume à des surfaces recouvertes majoritairement d'herbes et quelques arbres d'eucalyptus, ce faible couvert végétal a considérablement favoriser le phénomène d'érosion de sol [44].

III.1.4. Agriculture :

Le bassin du Beni Haroun se caractérise par une agriculture mixte, traditionnelle (irrigation gravitaire) et moderne (irrigation par canaux d'aspersion), tout dépend du type de culture.

La superficie actuellement irriguée dans le bassin est de 2 679 ha consommant un volume annuel de 27,65 hm3 d'eau.

Les principales activités des périmètres irrigués sont essentiellement les cultures maraichères et l'arboriculture. Les engrais les plus utilisés en agriculture sont les ammo-nitrates (NH4-NO3 33%) et les superphosphates (45%) [45].

III.1.5. Cadre climatique :

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un point de la surface terrestre.

Les facteurs climatologiques sont dans l'ensemble des variables aléatoires permettant d'expliquer quantitativement les variations du régime hydrologique[46].

Les caractéristiques les plus originales de toute la région sont réunies dans le bassin de Beni Haroun. Le nord s'avère être une zone humide et pluvieuse et le sud avec un climat semi-aride à aride.

Cette opposition trouve son origine dans de multiples causes :

- Le nord influencé par un climat méditerranéen, le sud par un climat de type continental.
- La répartition des ensembles montagneux, les contrastes renforçant cette disparité Géographique . [41]

III.1.5.1. Les precipitations:

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

Les précipitations constituent un facteur climatique très important qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères[46]. En effet, elles ont un effet direct sur le débit, les matières en suspension et les ph de dilution[42].

III.1.5.1.1.Les variations interannuelles :

Le tableau (2) représente la série pluviométrique durant 10 ans de (2004 à 2014) dans la Station de Beni Haroun :

Tableau 2 : Précipitations moyennes annuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Année	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Total (mm)	794	686.1	527.1	635.4	487.4	828.7	612.5	616.3	538.5	859	706

Nous traduisons le tableau (2) dans un graphique, (**figure24**) :

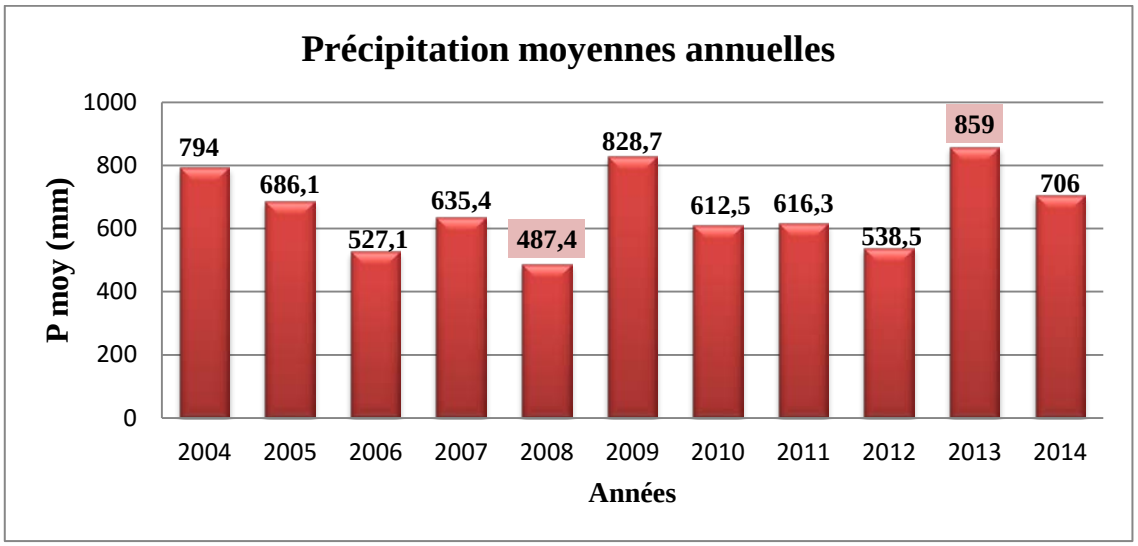

Figure 24: Histogramme de Variation de précipitations moyennes annuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

D'après l'histogramme de l'évolution des précipitations annuelles moyennes (**Figure24**), nous pouvons constater que la lame d'eau tombée varie entre 487.4 mm (2008) et 859 mm (2013). On trouve que la valeur moyenne annuelle est 662.8 mm.

III.1.5.1.2. Les variations mensuelles :

Le tableau (3) représente la variation mensuelle durant 10 ans de (2004 à 2014) dans la Station de Beni Haroun :

Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
Précipitation (mm)	39.39	42.67	92.36	110.26	79.86	96.19	88.7	55.62	36.16	14.36	1.69	5.53

Nous traduisons le tableau (3) dans un graphique, (**figure 25**) :

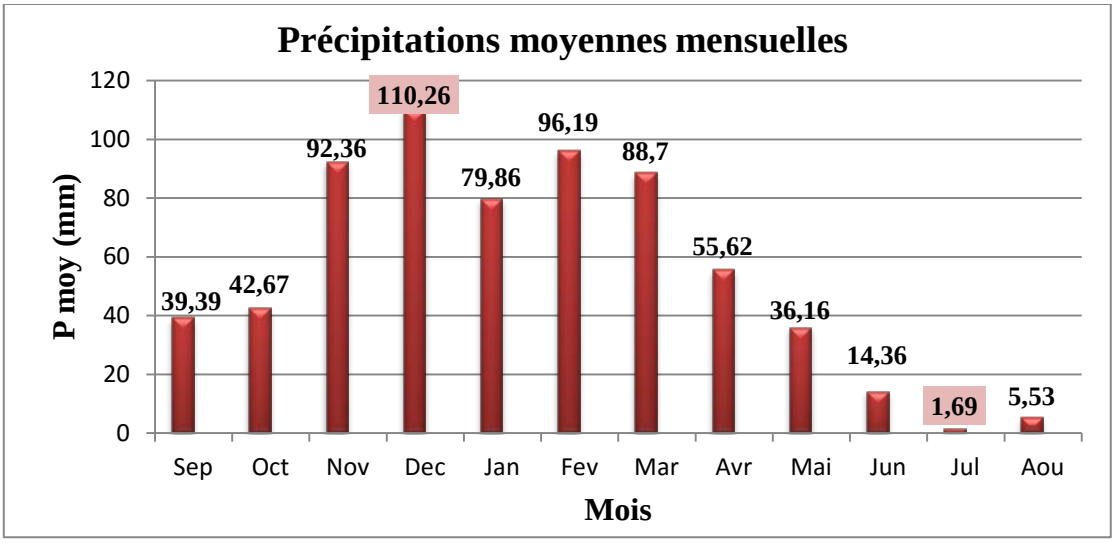

Figure 25 : Histogramme de Variation de précipitations moyennes mensuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Les données recueillies au niveau de la station d'observation Beni Haroun sur une période de 10 ans (**tableau 3**) montrent la variation moyenne mensuelle des hauteurs pluviométriques enregistrées dans cette station. L'histogramme (**figure 25)** indique que le maximum est observé au mois de Décembre avec 110.26 mm ; alors que le minimum est observé au mois de Juillet avec 1,69 mm.

III.1.5.1.3. Les variations saisonnières :

Tableau 4 : Précipitations moyennes saisonnières (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Total
Moyenne saisonnière	174.42	286.31	180.48	21.58	662.8
%	26.32	43.20	27.23	3.25	100

Nous traduisons le tableau (4) dans un graphique, (**figure26**) :

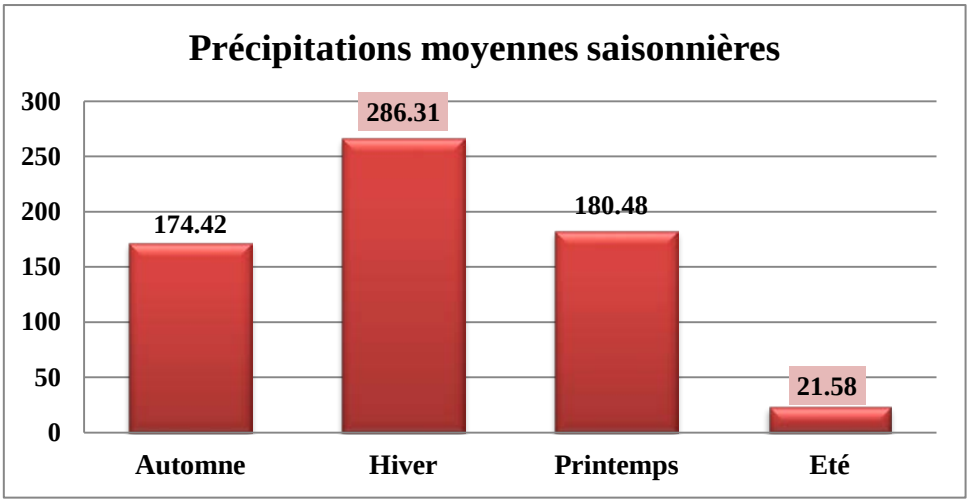

Figure 26 : Histogramme de précipitations moyennes saisonnières (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

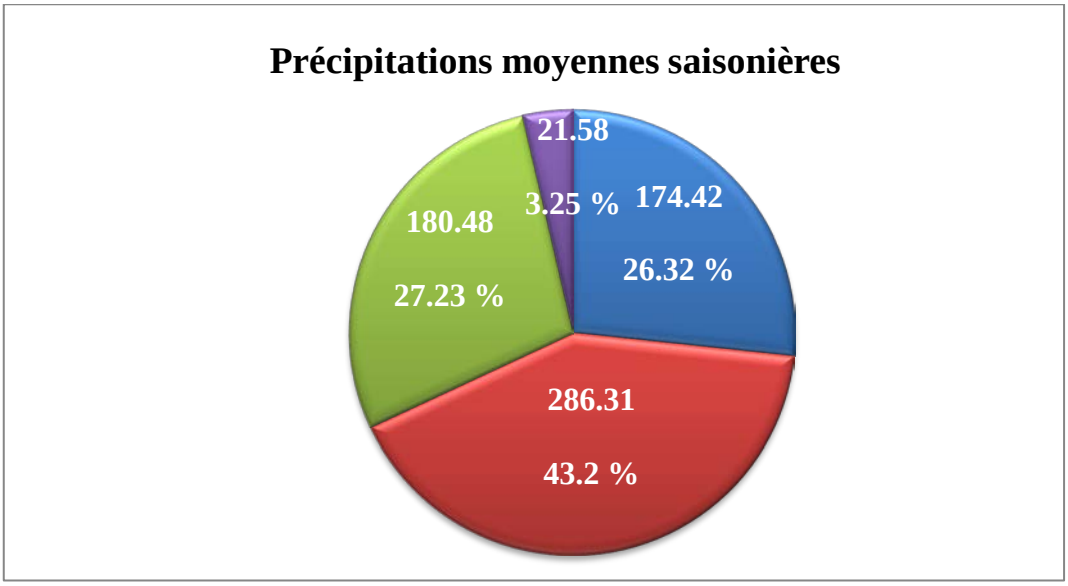

Figure 27 : précipitations moyennes saisonnières en pourcentage

Les précipitations saisonnières moyennes de notre région d'étude montrent qu'il y a quatre saisons distinctes : Hiver avec une moyenne de 286.31 mm, Printemps 180.48 mm, Eté 21.58 mm et automne 174.42 mm.

III.1.5.2. Les températures :

La température joue un rôle déterminant dans l'étude de l'évaporation et de l'évapotranspiration. Elle permet d'étudier l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement annuel et saisonnier intervient dans le développement du rythme biologique des végétaux, et elle facilite l'établissement du bilan hydrique [44].

Les données températures disponibles sont des valeurs moyennes mensuelles mesurées au niveau de la station de Beni Haroun sur une période de 10 ans (2004 à 2014).

III.1.5.2.1.Température moyenne mensuelle :

Les températures moyennes mensuelles sont calculées par différentes méthodes.

Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de la sommation des extrêmes et le calcule de leur moyenne arithmétique « M+m/2 »

Le tableau (5) représente les températures mensuelles maximales et minimales ainsi que les températures moyennes.

Tableau 5 : Températures moyennes mensuelles en °C (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Moy
Tmoy (°C)	26	23.5	17.5	13.3	11.7	11.9	14.6	16.6	20.1	23.2	25.9	27.8	**19.33**
T min (°C)	23.7	21	15.9	11.8	9.8	8.9	11.2	13.7	16.7	19.6	22	23.8	**16.51**
T max (°C)	28.3	26	19.1	14.7	13.6	14.8	18	19.5	23.4	26.8	29.8	31.8	**22.15**

Nous traduisons le tableau (5) dans un graphique, (**figure 28**) :

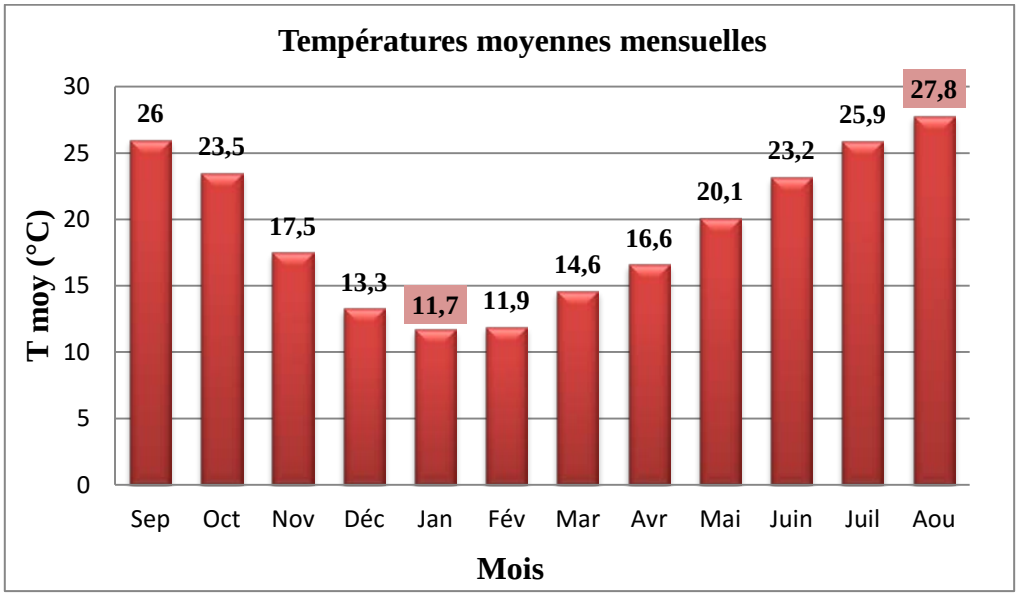

Figure 28 : Histogramme de variation des températures moyennes mensuelles (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

D'après le graphe (**Figure 28**), on distingue que la plus forte valeur caractérise le mois de Aout, elle peut atteindre 27.8°C. La plus faible valeur est enregistrée au mois de Janvier et est de 11.7 °C.

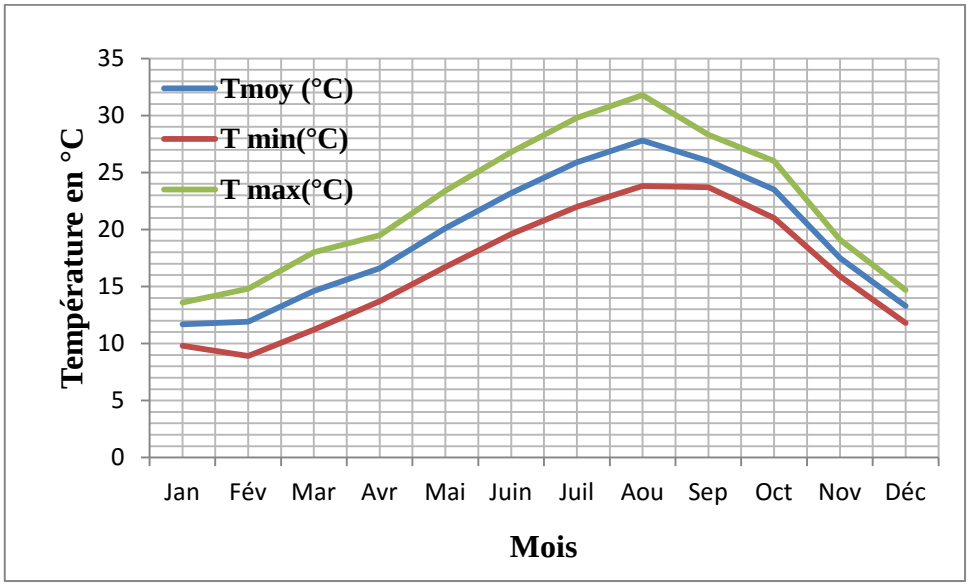

Figure 29 : Courbe des températures moyennes, maximales et minimales

III.1.5.2.2. Diagramme Ombro-thermique :

Le diagramme Ombro-thermique est établi selon la méthode de Gaussen et Bagnouls.

Les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations. Cela permet de déterminer le période sèche durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations du mois est inférieure ou égale au double de la température **(P ≤ 2T).**[44]

• Si la courbe des températures passe au-dessus de la courbe des précipitations nous avons un mois sec.

• Si la courbe des températures passe au-dessous de la courbe des précipitations nous avons un mois humide.

Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles et précipitations moyennes (2004 à 2014) Station de Beni Haroun

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
Pmoy (mm)	39.39	42.67	92.36	110.26	79.86	96.19	88.7	55.62	36.16	14.36	1,69	5.53
T moy (mm)	26	23.5	17.5	13.3	11.7	11.9	14.6	16.6	20.1	23.2	25.9	27,8
2xT moy (°C)	52	47	35	26.6	23.4	23.8	29.2	33.2	40.2	46.4	51.8	55.6

Le diagramme ombrothermique est représenté dans (**la figure30**) suivante :

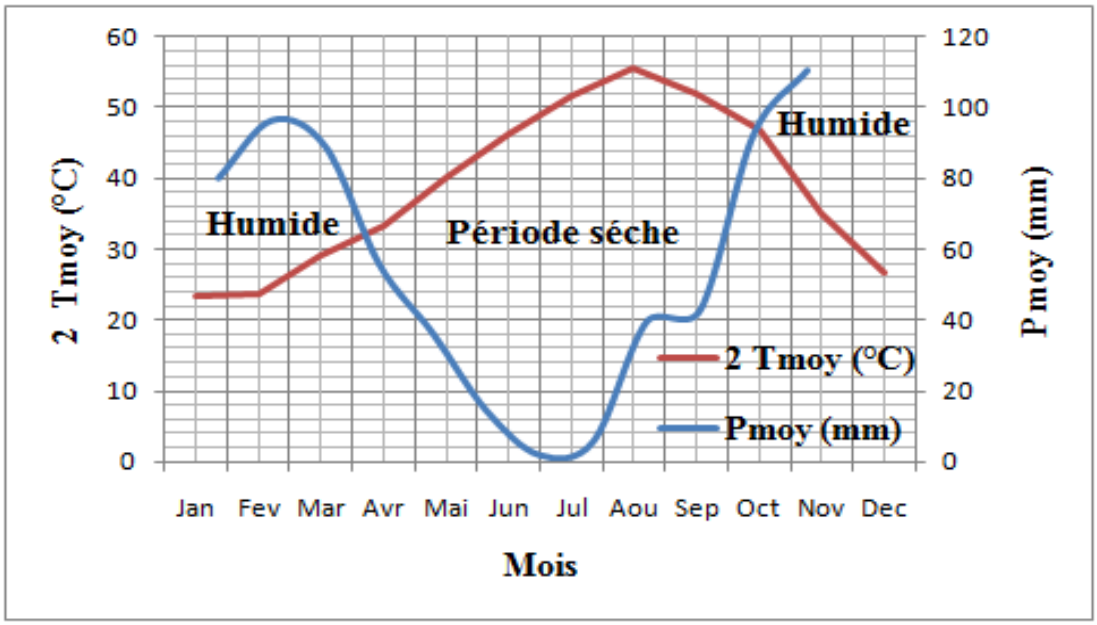

Figure 30 : Diagramme ombro-thermique

D'après le Diagramme Ombro-Thermique la période sèche s'étale depuis la première semaine du mois d'avril jusqu'à la première semaine du mois d'Octobre.

III.1.5.2.3. Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte) :

Cette méthode est basée sur l'établissement d'un rapport entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles (P/T) d'une même période [44].

Le rapport (P/T) donne la valeur de l'humidité du sol et permet de définir 4 types de régimes :

Tableau 7 : Classification d'Euverte [44]

Rapport (P/T)	P/T < 1	1< P/T < 2	2 < P/T < 3	P/T > 3
Le régime	Très sec	sec	Subhumide	humide

Tableau 8 : Résultat de calcul d'après la classification d'Euverte

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
P moy (mm)	39.39	42.67	92.36	110.26	79.86	96.19	88.7	55.62	36.16	14.36	1.69	5.53
T moy (mm)	26	23.5	17.5	13.3	11.7	11.9	14.6	16.6	20.1	23.2	25.9	27.8
P/T	1.52	1.82	5.28	8.29	6.83	8.08	6.08	3.35	1.80	0.62	0.07	0.20

Les valeurs du rapport P/T représentées dans le **Tableau 8** permettent de connaitre l'évolution de l'humidité du sol pendant l'année :

- ✓ Un régime **très sec** durant les mois de Juin, Juillet et Aout.
- ✓ Un régime **sec** durant le mois de Septembre, Octobre et mai.
- ✓ Le régime est **humide** pendant le reste de l'année.

III.1.5.3.Evaporation :

L'évaporation représente le processus au cours duquel l'eau se transforme en vapeur.

L'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration est connu sous le nom d'évapotranspiration. Cette dernière est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique[47].

Le phénomène de l'évaporation des lacs des barrages en Algérie est considérable ; une perte de volume très élevée est enregistrée annuellement dans les barrages. Les mesures de l'évaporation se font à l'aide d'un bac Colorado installé à proximité de la retenue.

Nous avons représenté sur **(figure 31)** et (**tableau9)**, l'évolution du volume évaporé dans la retenue de Béni Haroun, d'une capacité de 195 Millions m3 durant la période : 2003-2010. La capacité du réservoir à août 2010 a atteint un volume total de 596 Millions m3. Le graphe indiqué montre l'évolution d'évaporation annuelle dans la retenue du barrage Béni Haroun depuis la mise en eau en septembre 2003[43].

Tableau 9 : Evaporation dans la retenue de Beni Haroun (2003 à 2010) [43]

ANNEE HYDROLOGIQUE	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	TOTAL
VOLUME (m^3)	4600	14703	28112	32290	35172	39695	40664	195236

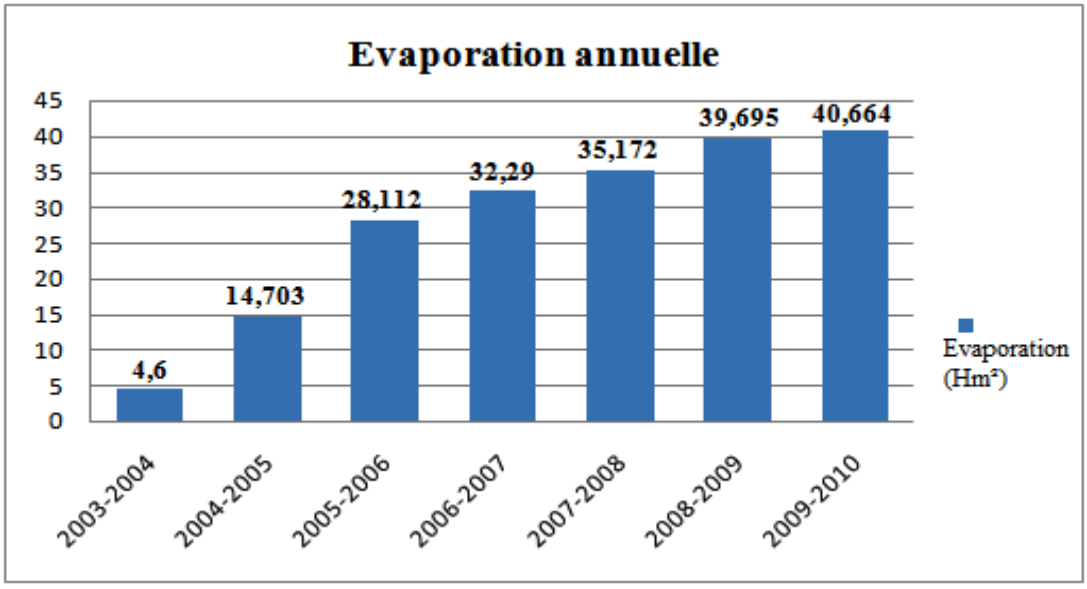

Figure 31 : Histogramme d'évaporation dans la retenue de Beni Haroun (2003 à 2010) [43]

Ce tableau représente l'évolution de l'évaporation et qui montre l'augmentation progressive par rapport à la monté du plan d'eau de la retenue pendant le remplissage.

III.2. Les indices climatiques :

Pour avoir une idée sur le climat dominant la zone d'étude, quelques indices et diagrammes ont été introduits :

III.2.1. Indice de Martonne ou d'aridité :

L'indice d'aridité est défini comme le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles, il est pour exprimer l'aridité d'une région, calculé par la relation suivante :[*Anonyme* 6]

$$I = \frac{p}{T+10} \ldots\ldots\ldots (3)$$

Avec :

I : Coefficient d'aridité

P : La précipitation moyenne annuelle en mm.

T : La température moyenne annuelle en °C.

Pour :

- ✓ 20 < I < 30 : Climat tempéré
- ✓ 10 < I < 20 : Climat semi-aride
- ✓ 7.5 <I < 10 : Climat steppique
- ✓ 5 < I < 7.5 : Climat désertique
- ✓ I< 5 : Climat hyperaride

Pour le barrage de Beni Haroun: P = 662.8 mm, T = 19.33 C°

D'après la formule N°(3) ; I = 22.6

L'indice d'aridité est entre 20 et 30, alors le climat de notre zone d'étude est tempéré.

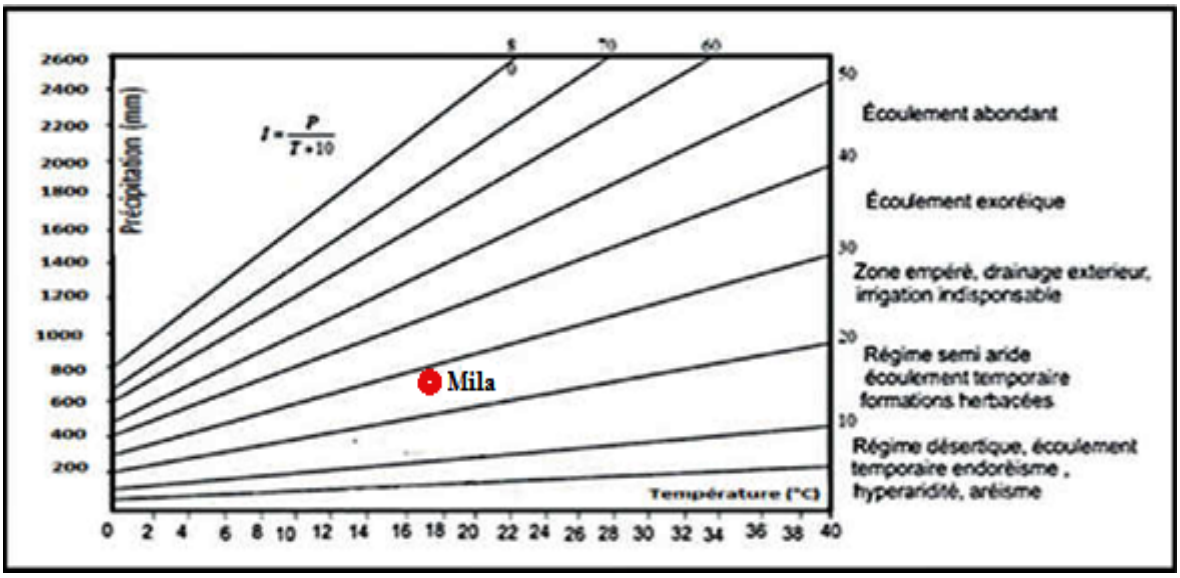

Figure 32: Abaque de Martonne

III.2.2.Indice d'EMBERGER :

La classification la plus souvent utilisée a été élaborée par L. EMBERGER (1955) en utilisant

Un diagramme bidimensionnel dans lequel la valeur d'un « quotient pluviométrique » d'une localité déterminée est en ordonnée et la moyenne du mois le plus froid de l'année en abscisse.

Q 2 est calculé par la formule suivante :[48]

$$Q2 = \frac{2000 * P}{M^2 - m^2} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Avec :

- Q 2 : Le quotient pluviométrique d'EMBERGER.
- P : La précipitation moyenne annuelle en mm.
- M : La moyenne des maximales du mois le plus chaud en degré Kelvin (K°)
- m: La moyenne des minimales du mois le plus froid en degré Kelvin (K°).

P = 662.8 mm

M =31.8 + 273 =304.8 K°.

m =8.9 + 273 = 281.9 k°.

En Algérie DJEBAILI. S, (1984), a montré que la dernière formulation ou quotient pluviométrique (Q2) peut s'écrire :[48]

$$\mathbf{Q2 = 3{,}43 \times P / (M - m)}\ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

Le Q2 de la zone d'étude est égal à 99.28 correspondants à l'étage sub-humide à variante thermique hiver chaud (**Figure 33**).

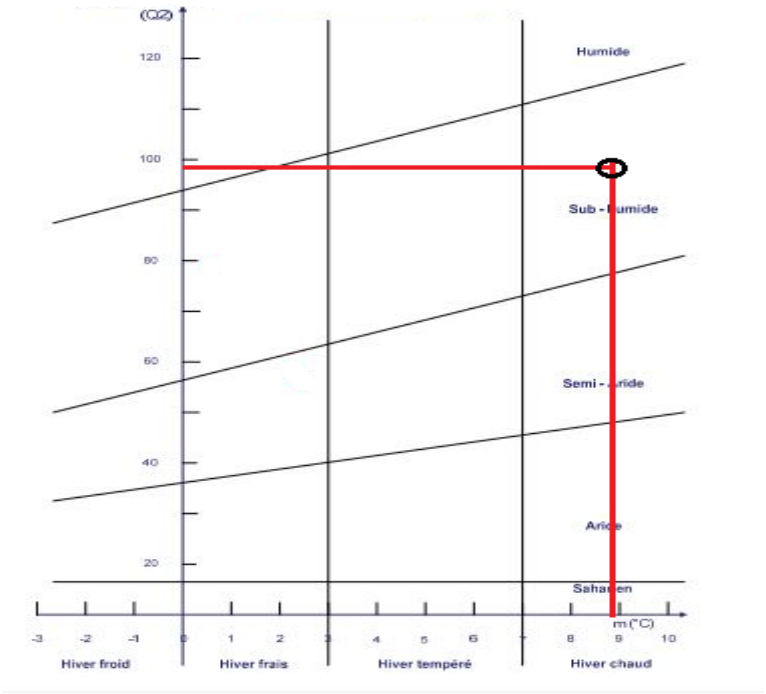

Figure33: classification de climat d'Emberger

Conclusion :

Les variations climatiques liées directement à la situation géographique de la zone, à partir de l'analyse climatique de la région d'étude et sa position géographique on trouve que le bassin versant de Beni -Haroun est caractérisée par :

- Un climat sub-humide défini bien par l'indice de Martonne, ainsi que par le climagramme de L. EMBERGER.
- Des précipitations moyennes annuelles de 662.8 mm/an.
- Des températures moyennes annuelles de 19.33 °C.

Chapitre IV

Délimitation du bassin versant

Introduction :

Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

La détermination des caractéristiques du bassin versant de Beni Haroun consiste à calculer, ou évaluer, les paramètres explicatifs, indispensables à la mise en œuvre de la méthode proposée.

L'hydrologie des cours d'eau ainsi que leur dynamisme dépend vivement des caractéristiques physiographiques du bassin versant correspondant. Le relief, la forme et le réseau hydrographique constituent les principaux paramètres de l'étude physique du bassin versant en vue de caractériser son comportement vis-à-vis des différentes unités géologique qu'il traverse.

La délimitation d'un bassin versant repose sur deux éléments essentiels :

- Les courbes de niveaux sur la carte topographique de la région ciblée.
- Le réseau de drainage de barrage qui doit être entouré par la ligne de partage des eaux (à l'intérieur de l'entité délimitée).

IV.1. Détermination des caractéristiques du bassin versant :

IV.1.1. Caractéristiques Géométriques :

IV.1.1.1. La Surface :

Le bassin versant de Beni Haroun étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface, voire (**figure 34**).

La surface du bassin versant de Beni Haroun peut être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre [49]. Où, par les différentes méthodes de calcul géométrique des logiciels Arcgis:

$$\mathbf{S=8350{,}24\ km^2}$$

IV.1.1.2. Le périmètre :

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km, voire (**figure34).**

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 les logiciels[49]**,** dans notre cas :

$$\mathbf{P= 427\ km}$$

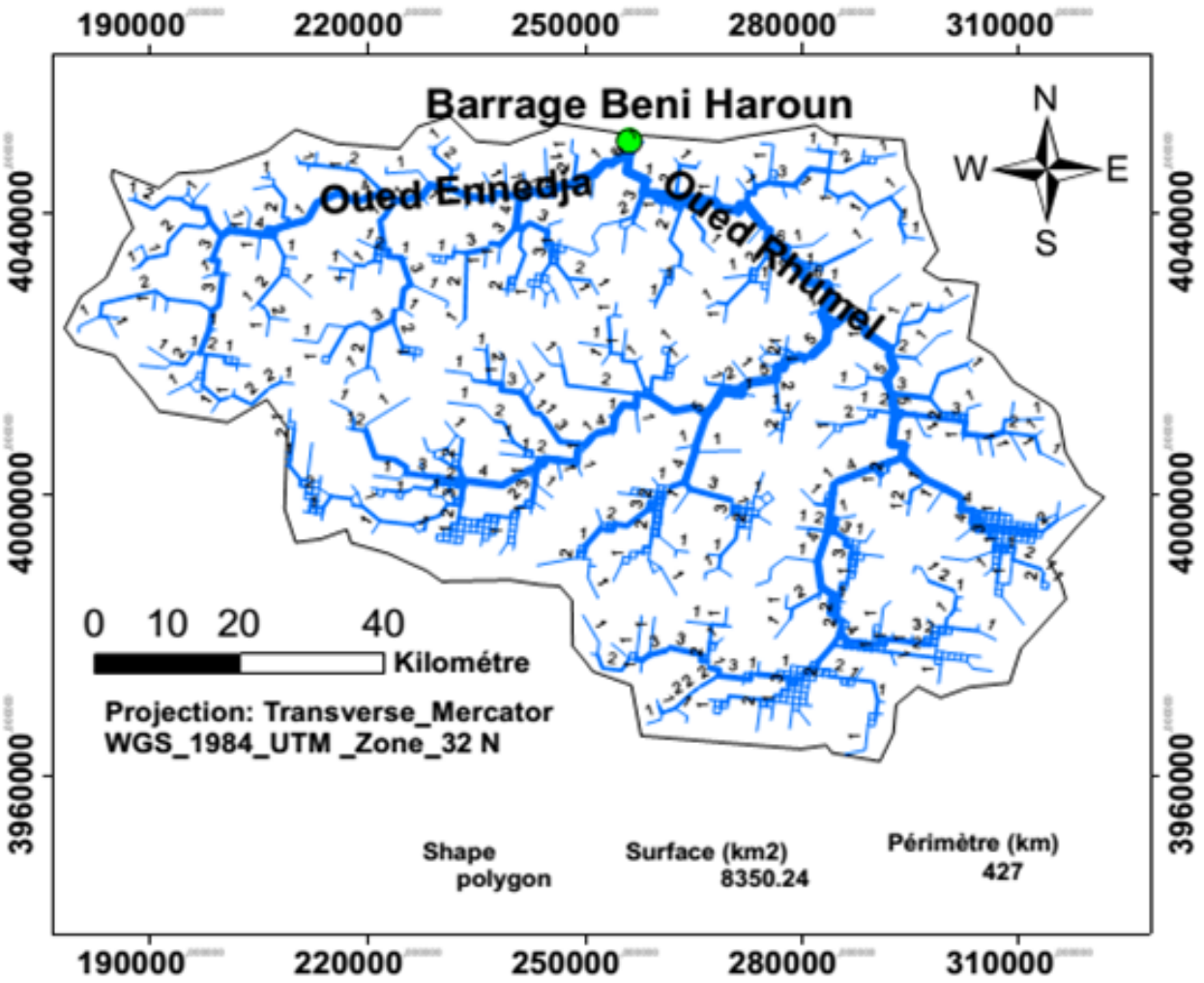

Figure 34 : La carte de délimitation du bassin versant de Beni Haroun

IV.1.1.3. La forme du bassin versant :

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple : Indice de compacité de Gravelius *(*K_G)[15].

IV.1.1.3.1. L'indice de compacité de Gravelius (K_G) :

L'indice de compacité (K_G) renseigne sur la forme du bassin versant qui 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 à celui d'un cercle qui aurait la même surface [50].

Il s'exprime par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0{,}28\ \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{.....(6)}$$

Avec :

K_G : L'indice de compacité ou Gravilius.

S : La surface du bassin versant [km²]

P : Le périmètre du bassin [km]

Si : K_G>1 et d'autant plus voisin de cette valeur que le bassin versant est compacté.

Si : K_G>1.12, donc le bassin versant est allongé.

Si : K_G<1.12, donc le bassin versant est carrée.

Si : K_G =1.12, donc le bassin versant est compacté.

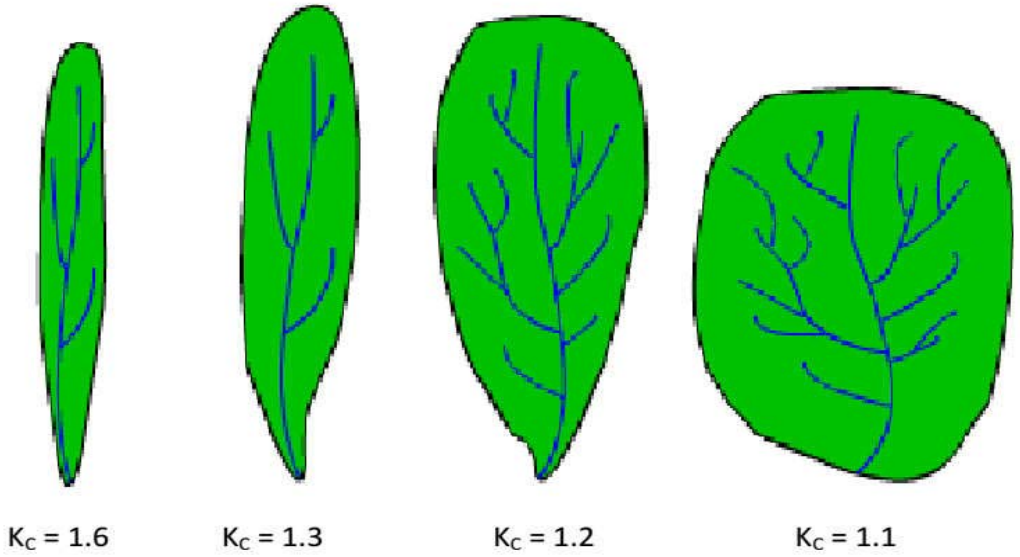

Figure 35 : La forme du bassin versant en fonction de l'indice de Gravilius

Dans notre cas : **P= 427Km** et **S= 8350,24Km²**

Donc : **K_G= 1.30 >1.12**

D'où le bassin versant de Beni Haroun est **allongé** et sa superficie s'étend étroitement autour de cours d'eau ce qui peut provoquer une réaction hydrologique rapide face à la sollicitation pluviométrique.

IV.1.1.4. Topographie et relief :

IV.1.1.4.1. La carte hypsométrique :

La réalisation de cette carte hypsométrique permet à l'utilisateur de percevoir plus facilement des reliefs et de pouvoir estimer la pente des bassins versants [15].

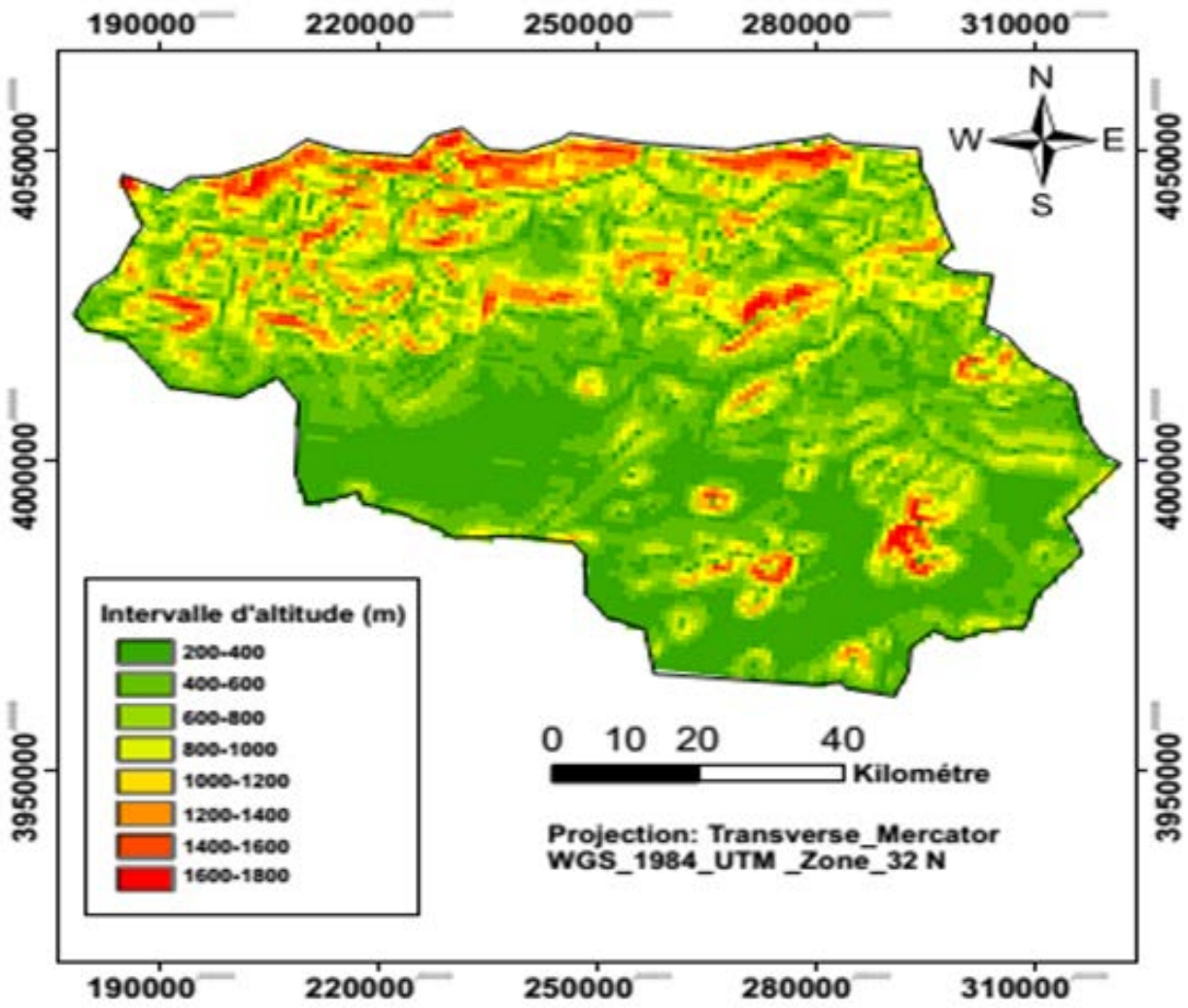

Figure 36 : Carte hypsométrique du bassin versant de Beni Haroun

IV.1.1.4.2. La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage [15].

Tableau 10 : Répartition de la surface partielle en fonction d'altitude du bassin versant de Beni Haroun

Classes altitude (m)	centre classe(m)	Surface partielle(km2)	Surface partielle en (%)	Surface cumulée %
1600-1734	1667	0,81	0,01	0,01
1400-1600	1500	11,75	0,14	0,15
1200-1400	1300	143,10	1,71	1,86
1000-1200	1100	901,00	10,79	12,65
800-1000	900	3732,00	44,69	57,35
600-800	700	2220,00	26,59	83,93
400-600	500	881,80	10,56	94,49
200-400	300	440,20	5,27	99,77
140-200	170	19,58	0,23	100,00
		Total=8350,24	**Total =100**	

Nous traduisons le tableau 10 dans la figure ci-dessous (**Figure 37**), qui représente la surface cumulée et inversée en pourcentage en fonction des altitudes :

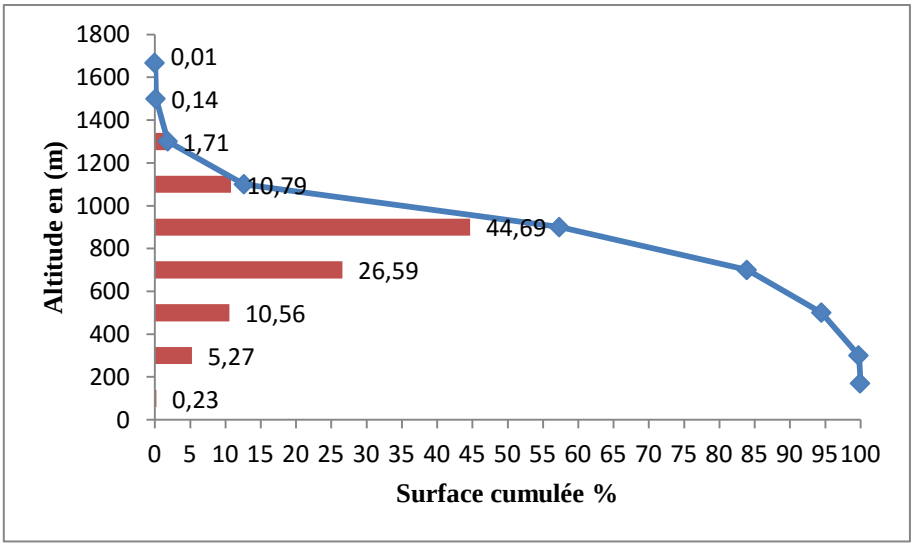

Figure37 : Courbe hypsométrique et diagramme de fréquences altimétrique du bassin versant de Beni Haroun

IV.1.1.4.3. Les altitudes caractéristiques :

IV.1.1.4.3.1. Les altitudes maximales et minimales :

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux [*Site web* 3].

L'altitude maximale H_{max} = 1734 m.
L'altitude minimale H_{min} = 140 m.

IV.1.1.4.3.2. L'altitude moyenne :

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité [*Site web* 3].

Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques [51].

On peut la définir comme suit :

$$H_{moy=} \sum \frac{Si\ hi}{S} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

Avec :

Hmoy : Altitude moyenne du bassin [m] ;

Si : Surface comprise entre deux courbes de niveau [km2] ;

Hi : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

S : Superficie totale du bassin versant [km2].

Tableau11 : Calcul de l'altitude moyenne du bassin versant de Beni Haroun

Classes altitude (m)	centre classe (m)	S(km2)	Si *hi/S
1600-1734	**1667**	**0,81**	**0,16**
1400-1600	**1500**	**11,75**	**2,11**
1200-1400	**1300**	**143,10**	**22,28**
1000-1200	**1100**	**901,00**	**118,69**
800-1000	**900**	**3732,00**	**402,24**
600-800	**700**	**2220,00**	**186,10**
400-600	**500**	**881,80**	**52,80**
200-400	**300**	**440,20**	**15,82**
140-200	**170**	**19,58**	**0,40**

Alors :

$$\mathbf{H_{moy} = 800,60m}$$

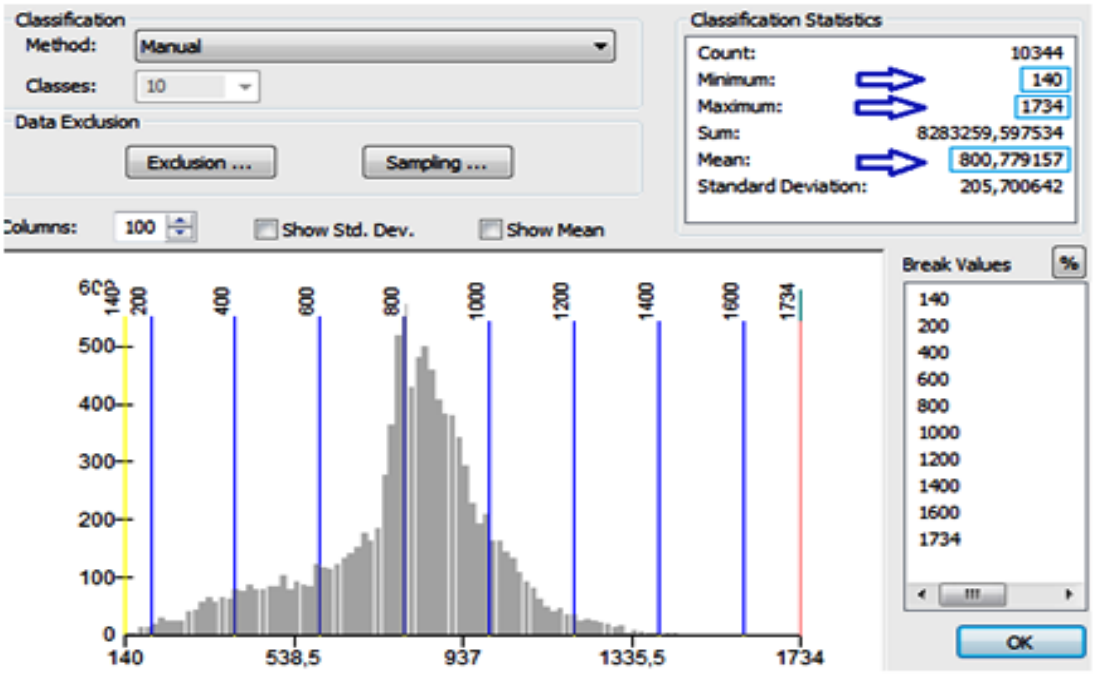

Figure38 : Statistique de différentes altitudes caractéristiques du bassin versant de Beni Haroun

IV.1.1.4.3.3. L'altitude médiane :

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne, dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière [52]. L'altitude médiane de notre bassin versant au point de 50 % de la surface totale est comprise entre l'altitude **800 m** et **1000 m**. Elle est approximativement égale **à 925 m**. Cette valeur est différente de celle de la moyenne. Voire (**Figure 39**) :

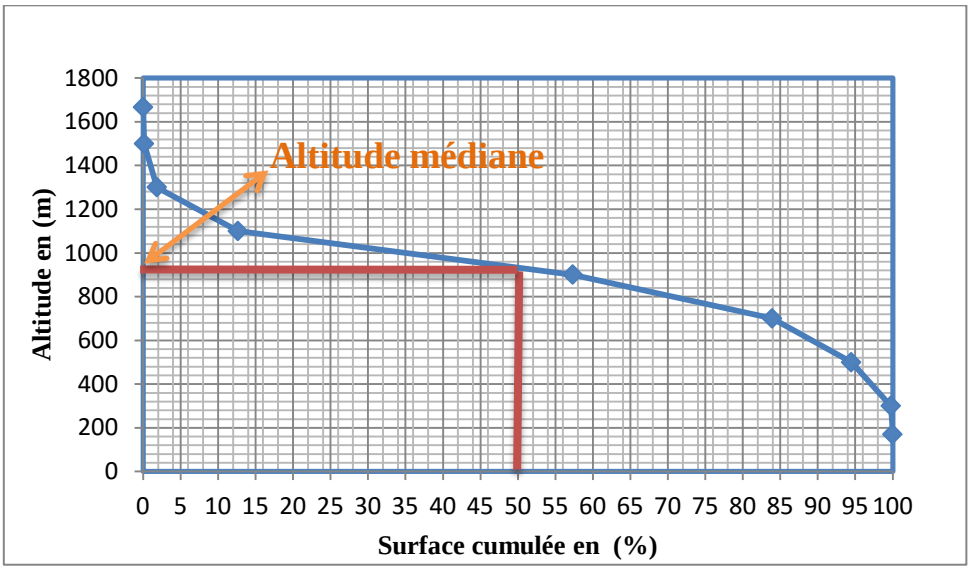

Figure39 : La représentation d'altitude médiane (H50%)

IV.1.1.4.4. La pente :

La pente joue un rôle incontournable dans le cycle hydrologique, elle influence directement l'infiltration et le ruissèlement. Ainsi pour une même averse et à perméabilité équivalente,

la dualité des partages entre écoulement superficiel et infiltration sur le bassin sera essentiellement en fonction de la pente [52].

La carte des pentes (**Figure 40**), constitue un des éléments de base pour l'analyse des caractéristiques physiques qui déterminent l'aptitude des diverses zones. En effet, la potentialité et les limites d'utilisation du territoire dépendent dans leur majeure partie de la pente puisque celle-ci contribue à la détermination des possibilités d'érosion en relation avec d'autres facteurs de mécanisation des cultures, des modalités d'irrigation, des possibilités de pâturage, de l'installation et le développement de la végétation de reforestation. Cette carte est établie sur la base du modèle numérique de terrain [53].

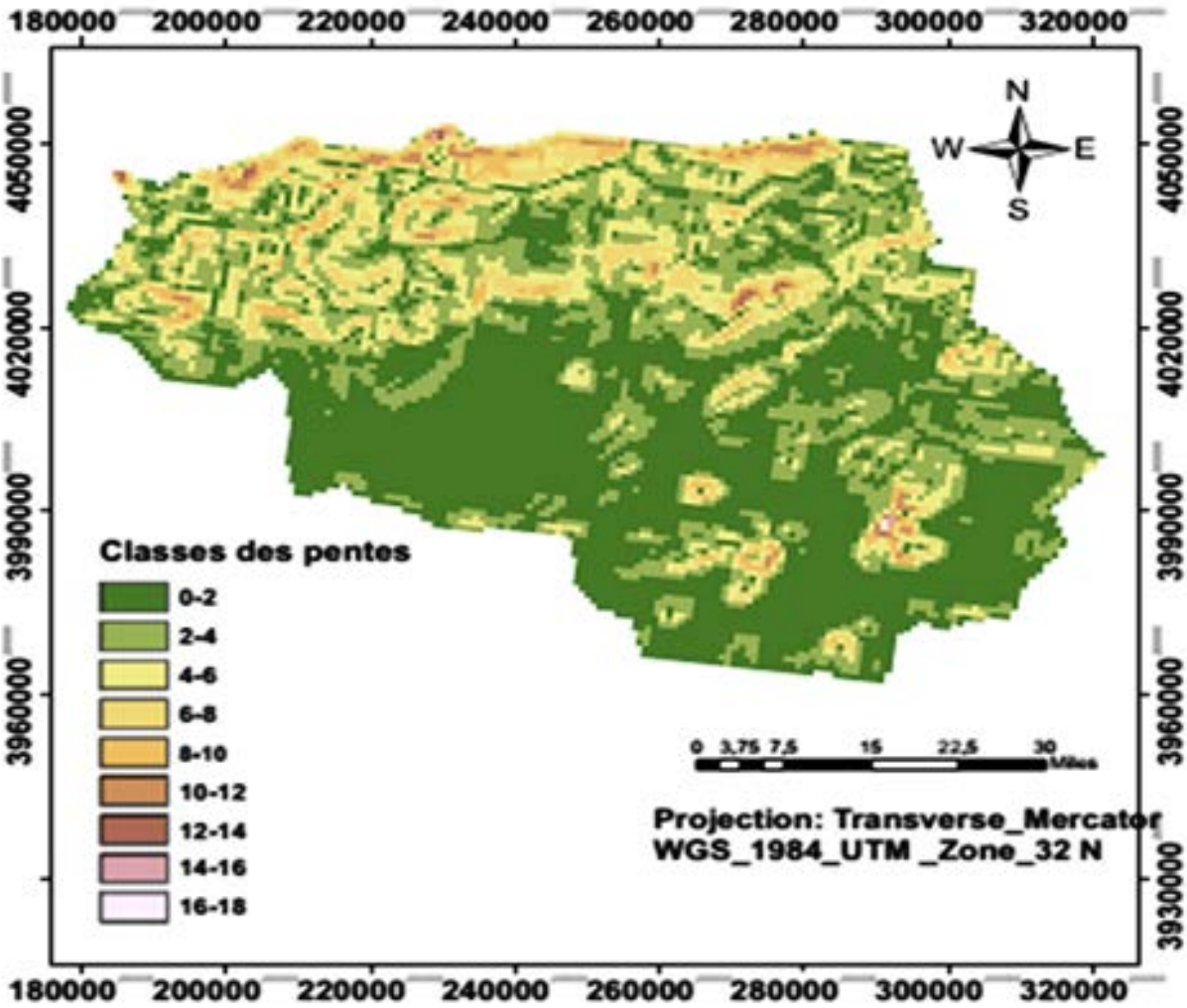

Figure 40 : La carte des pentes de bassin versant de Beni Haroun

La pente est désignée comme un facteur capital qui favorise l'érosion. Dans cette optique, certains indices ont été déterminés :

IV.1.1.4.4.1. Le rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est une transformation géométrique visant à convertir le périmètre du bassin en un rectangle de même contour et de même surface. Ainsi, les courbes de niveaux deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. L'un de ses petits côtés du rectangle représente l'exutoire. La formule suivante est utilisée pour calculer les deux paramètres Let I du rectangle équivalent [54].

Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes :

La longueur L:

$$L = \frac{KG\sqrt{S}}{1,12}\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Donc : **L =159.91km**

La largeur du rectangle équivalent est donnée par la formule suivante :

$$l = \frac{KG\sqrt{S}}{1,12}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{KG}\right)^2}\right) = \frac{S}{L} \ldots\ldots\ldots (9)$$

Donc : **l = 52.21 km**

Avec :

KG : Indice de compacité de Gravelius (K_G = 1.30).

S : Surface du bassin versant (S = 8350.24km^2).

L : Longueur du rectangle équivalent (L = 159.91 km).

l : Largeur du rectangle équivalent (l = 52.21 km).

Le tracé des droites de niveau du rectangle équivalent découle directement de la répartition hypsométrique cumulée [52].

IV.1.1.4.4.2. L'indice de pente global Ig :

Sur la courbe hypsométrique (**Figure 41**), on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de A. On en déduit les altitudes $H_{95\%}$ et $H5_{\%}$ entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin et la dénivelée D = $H_{5\%}$ - $H_{95\%}$. Voire (**Figure 41**) :

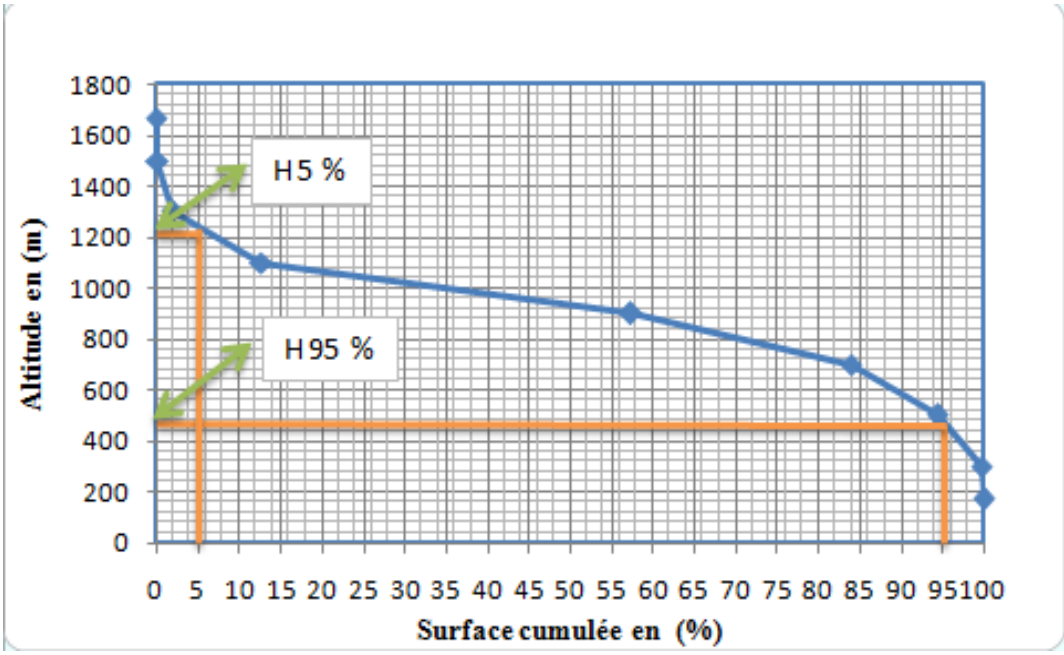

Figure 41 : La représentation des déférentes altitudes (H5% et H95%)

$H_{95\%}$: l'altitude correspondant à 95% de la superficie totale du bassin versant.

$H_{5\%}$: l'altitude correspondant à 5% de la superficie totale de bassin versant.

L:La longueur du rectangle équivalent.

$$Ig = \frac{D}{L} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

Avec :

H5% = **1240m**

H95% =**455 m**

L =**159.91Km**

Alors : **Ig =4.91m/km**

IV.1.1.4.4.3. La pente moyenne :

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses.

Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices [55].

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin. Toutes elles se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative ou bien à partir d'un MNA. La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données [52].

Une autre façon de procéder à la détermination de la pente moyenne est de recourir au rectangle équivalent. Dans ce cas :

$$I_{moy} = \frac{\Delta H}{L} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

Avec :

I_{moy}: La pente moyenne.

ΔH : La différence d'altitude maximale sur le bassin (m).

L : La longueur du cours d'eau principale , (L = 156.79 km).

Donc :

$$\mathbf{I_{moy} = 0.0102}$$

IV.1.2. Caractéristiques du réseau hydrographique :

IV.1.2.1. Les longueurs caractéristiques :

Un bassin versant se caractérise principalement par les deux longueurs suivantes, illustrées sur la figure ci-après (**Figure 42**).

- **La longueur d'un bassin versant (LCA)** est la distance curviligne mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à un point représentant la projection du centre de gravité du bassin sur un plan.
- **La longueur du cours d'eau principal (L)** est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface [*Anonyme* 3].

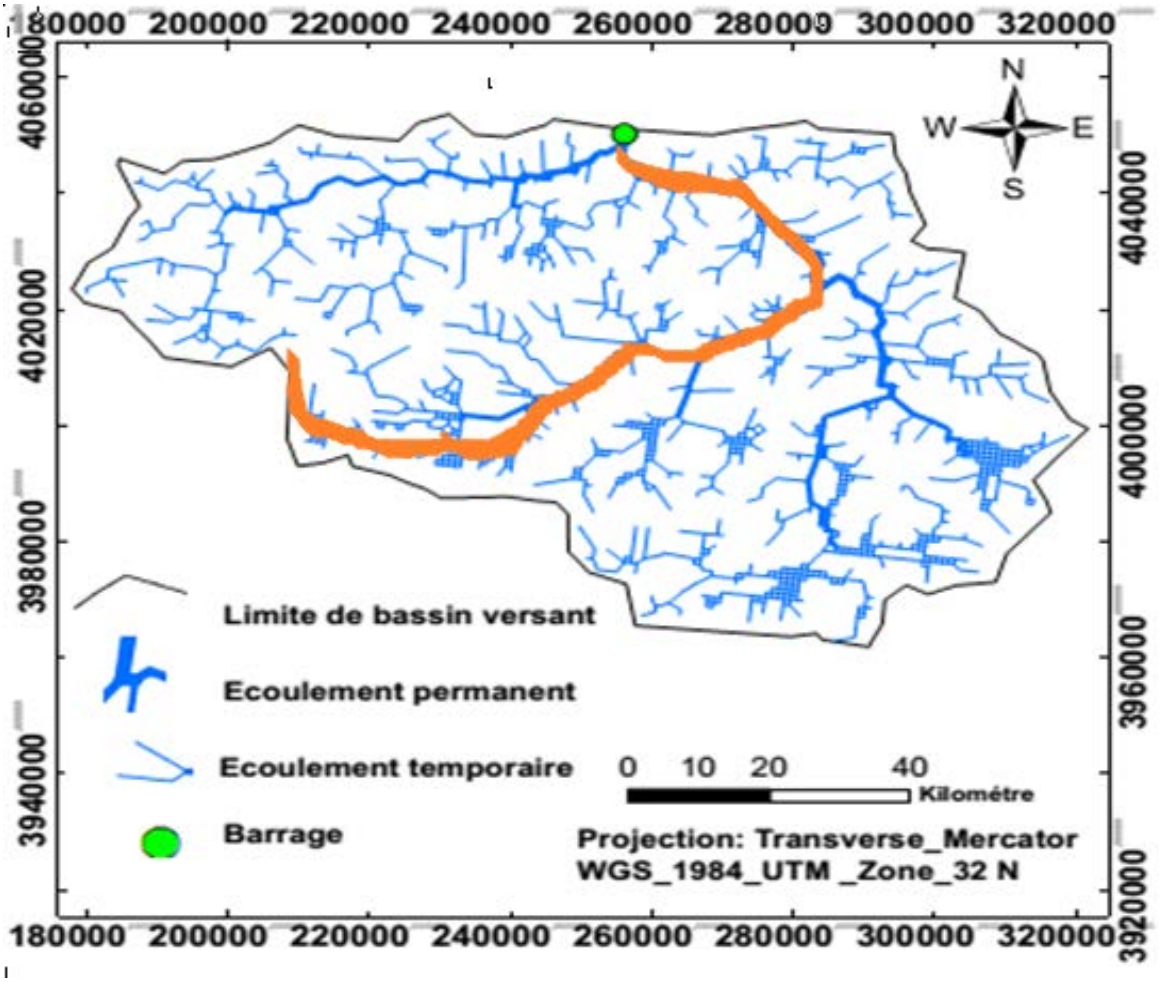

Figure 42 : La carte du cours d'eau principal de bassin versant de Beni Haroun

Donc, on trouve : **L = 156.79 km**

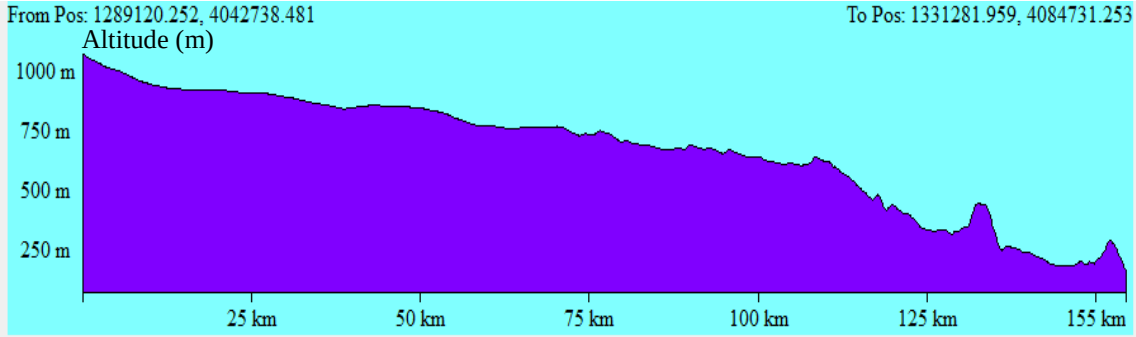

Figure 43 : Profil en long du cours d'eau principal de bassin versant de Beni Haroun

IV.1.2.2.Dénivelée spécifique (Ds) :

Le paramètre Dénivelé spécifique " Ds " est utilisé pour corriger l'indice de pente global par rapport à la surface du bassin versant suivant la formule suivante :[54]

$$D_s = I_g \sqrt{S} \quad \text{.....(12)}$$

Dans notre cas :

Ig = 4.91m/km

S =8350.24 km2

D_s = 448.67 m

Alors :

La dénivelée spécifique permet d'utiliser la classification de L'O.R.S.T.O.M (tableau 12) qui permet définir les différents types de relief des bassins quel que soit leurs superficies[11].

Tableau 12 : Méthode classification de relief selon ORSTOM selon la dénivelée spécifique D_S

Classe	Type de relief	D_s
R1	Relief très faible	10
R2	Relief faible	10-25
R3	Relief assez faible	25-50
R4	Relief modéré	50-100
R5	Relief assez fort	100-250
R6	Relief fort	250-500
R7	Relief très fort	+500

D'après la classification de L'O.R.S.T.O.M, notre bassin versant de Beni Haroun présente **un relief fort** car : 250m >Ds(m) > 500 (m) .

IV.1.2.3.Degré de développement de réseau :

IV.1.2.3.1.La densité de drainage :

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques.

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :[$Site\ web$ 3]

$$D_d = \frac{\sum Li}{S} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

Avec :

D_d : densité de drainage [km/km^2].

L_i : longueur de cours d'eau [km].

A : surface du bassin versant [km^2].

Dans notre cas : S =**8350.24 Km** et L =**2508.42km**

Donc :

$$\mathbf{D_d = 0.30\ km/km^2}$$

IV.1.2.3.2. La densité hydrographique :

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

$$F = \frac{\sum Ni}{S} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

Avec :

F : densité hydrographique [km^{-2}].

N_i : nombre de cours d'eau =**1459**

S : superficie du bassin [km^2] = 8349.17 km^2

Alors : F= 0.17km^{-2}

En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique (deux facteurs allant souvent de pair) présentent en général une roche mère imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux.

L'opposé (dans notre cas), c'est-à-dire faible densité de drainage et faible densité hydrographique, se rencontre en région à substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué [*Site web* 3].

IV.1.2.3.3.La fréquence des cours d'eau :

Elle représente le rapport du nombre du cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant d'étude [*Site web* 3].

D'après le **Tableau 13**, le nombre de cours d'eau d'ordre 1 égal à 767.

Tableau 13 : Nombre de cours d'eau du bassin versant de Beni Haroun

Ordre du cours d'eau	Longueur de cours d'eau (km)	Nombre du cours d'eau
1	1253	767
2	697,4	394
6	53,18	155
5	73,64	74
3	269,2	37
4	162	32

F = nombre du cours d'eau d'ordre 1.

$F = 0.092 Km^{-2}$

D'après cette valeur on remarque que le bassin versant de Beni Haroun présente une fréquence plus au moins faible, ce qui traduit que le réseau hydrographique présente une hiérarchisation moyenne.

IV.1.2.3.4. Le coefficient de torrentialité :

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage :

Ct= Dd * F ……...(15)

Avec :

$Dd = 0.30 km/km^2$

$F = 0.092 km^{-2}$

Ct pour le bassin versant Beni Haroun est égale à **$0.028 Km/Km^4$**

Cette valeur traduit que le bassin ne représente pas des caractéristiques morphométriques adaptées à l'écoulement, ainsi qu'il est constitué par des formations perméables dont l'infiltration est importante [*Site web* 3].

IV.1.3.Le réseau hydrographique :

Il se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes [52].

Le réseau hydrographique du bassin d'étude est représenté par deux oueds importants : Oued Rhumel et Oued Enndja, avec les affluents de chaque oued ; et des chaabats plus dense au Sud et à l'Ouest. Cette densité des cours d'eaux joue le rôle d'un exutoire et drainent une superficie importante [44].

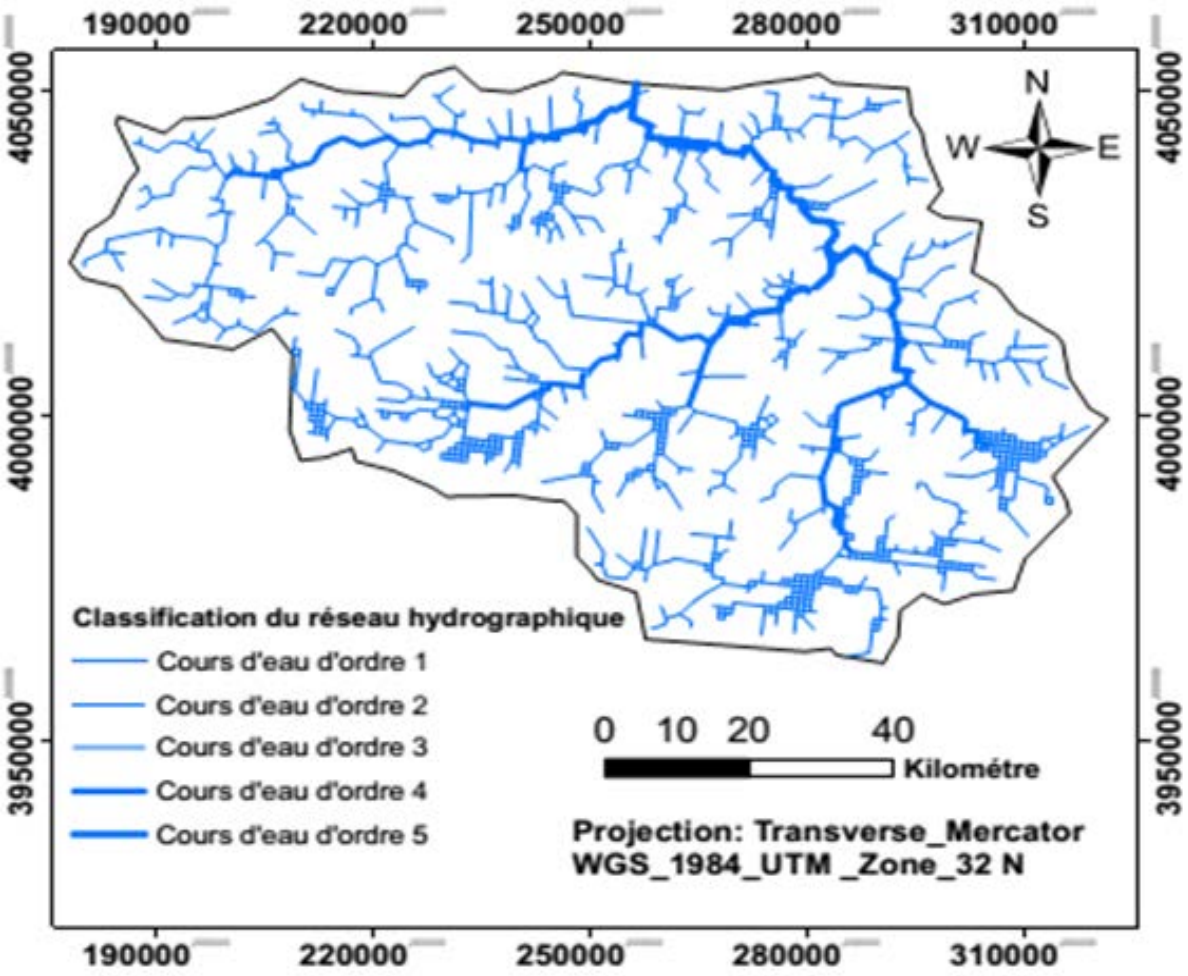

Figure 44 : La carte de réseau hydrographique de bassin versant de Beni Haroun

La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux.

- **La géologie** : par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique.
- **Le climat** : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

- **La pente du terrain** elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.
- **Effet anthropique** : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

Afin de caractériser le réseau hydrographique, il est souvent utile de reporter son tracé en plan sur une carte à une échelle adéquate. L'utilisation de photographies analogiques ou numériques est utile à cette identification. Divers paramètres descriptifs sont utilisés pour définir le réseau hydrographique [52].

IV.1.3.1.Le temps de concentration :

Le temps de concentration est un indicateur de temps que mettra la première goutte tombée au point hydrologique le plus éloigné du bassin versant pour arriver à l'exutoire. Le temps de concentration peut être déterminé en utilisant plusieurs formules empiriques, dans le cas du bassin de Beni Haroun, le temps de concentration est calculé sur la base de la formule de GIANDOTTI :[42]

$$Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1{,}5\ L}{0{,}8\sqrt{H\ moy - H\ min}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

Avec :

Tc : temps de concentration (heures).
S : superficie du bassin versant. (S = 8350.24 km^2)
L : longueur du talweg principal. (L = 156.79 km)
Hmoy: altitude moyenne du bassin versant.(Hmoy = 800.60 m)
Hmin: altitude moyenne du bassin versant.(Hmin =140 m)

Alors : Tc =29Heures.

Plus ce temps de concentration est élevé, plus les risques associés à l'érosion sont faibles.

À l'inverse, si ce temps est faible, cela signifie que les eaux de ruissellement se rassemblent et prennent de l'ampleur rapidement et leur évacuation se fait avec une vitesse élevée générant également une grande force d'arrachement des particules de sols et risque donc d'avoir un pouvoir érosif plus important.

Afin d'affaiblir la violence des ruissellements et par conséquent minimiser les risques d'érosion, il faut, d'une part favoriser l'infiltration de ces eaux dans les sols et d'autre part favoriser un séjour le plus étendu possible et assurer leur évacuation avec des débits non érosifs. Cela n'est possible là encore qu'avec les techniques de conservation des eaux et des sols[56].

Conclusion :

Les résultats obtenus à partir de cet exemple montrent les capacités des systèmes d'informations géographiques et les modèles numériques de terrain dans le calcul des paramètres qui influencent sur l'écoulement des eaux de surface.

L'évaluation de ces paramètres qui intervenant dans le comportement hydrologique du bassin versant de barrage de Beni Haroun nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

Le bassin versant présente une forme allongée, un relief fort, une surface qui est dans l'ordre de **8350.24 km2** et un périmètre de **427 km**.

Chapitre V

Méthodologie appliquée
Résultats et discussions

Introduction :

Il existe des méthodes différentes pour évaluer l'érosion du sol, qu'elle soit laminaire ou en sillon dans un segment de pente. Ici, de manière brève, sont présentées les trois méthodes les plus importantes en termes d'applicabilité dans les bassins versants :

- MUSLE qui a la même équation de l'USLE, mais avec la différence de plusieurs améliorations pour vérifier les facteurs.
- La Méthode Onstad Foster (AOF)(Onstad et Foster 1975).
- La RUSLE, de même que l'USLE

La méthode choisie est dite USLE car elle détermine la valeur des facteurs, en fonction des données disponibles, selon les travaux de Wischmeier 1957.

L'équation bien connue USLE a été utilisée car c'est le modèle qui demande le moins de données-sources et il a été appliqué largement à toutes les échelles

Les avantages de L'USLE incluent la facilite d'utilisation, simplicité, et une base de données sur laquelle elle a été développée. Cependant, elle a plusieurs limites. Les méthodes pour estimer les six facteurs ne se trouvent disponibles dans beaucoup de zones en dehors des USA. Elle est basée sur la supposition de pente de terrain, sols, cultures et gestion uniformes.

C'est un processus statistique qui ne considère pas les processus physiques de séparation, transport et sédimentation sous la forme mécanique. Finalement, elle n'a pas été élaborée pour estimer les rendements de sédimentation dans des bassins versants complexes [57].

V.1. Origine d'USLE :

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'Etats d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine.

L'objectif de Wischmeier et Smith (1960; 1978) était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production [58].

V.2.Définition d'USLE :

L'USLE c'est un modèle empirique de perte en terre qui a été élaboré en 1960 et mis à jour par de Wischmeier et Smith en 1978 [59] (EUPT L'équation universelle des pertes en terre, mieux connue par son abréviation anglaise, USLE) elle prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ [53]. L'USLE est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques anti-érosives : **A = R .K .LS .C . P**[60].

Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravite de l'érosion du sol a un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques.

Par conséquent, les valeurs obtenues par l'USLE représentent avec plus de précision les moyennes à long terme.[53]

Le modèle empiriques RUSLE est basé sur l'Equation universel des pertes de sols de Wischmeier (USLE) et représente une amélioration de l'ancienne. L'équation de Wischmeier révisée était combinée avec les techniques de SIG pour analyser le taux de perte de sol brute et pour évaluer la distribution spatiale des taux de perte de sol sur les différentes occupations des sols[61], le modèle RUSLE a été largement utilisé aussi bien dans les milieux agricoles que forestiers [62].

- **Équation universelle des pertes en terre (EUPT : USLE) :**

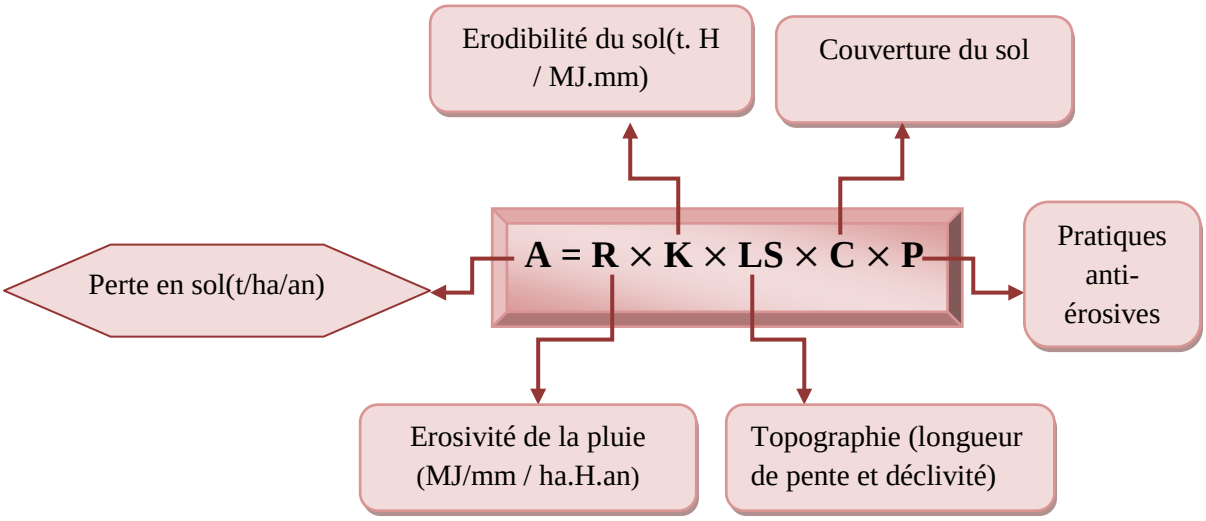

Figure 45 :Schéma simplifié de l'USLE

Avec :

A : Perte annuelle moyenne de sol(t/ha/an).

R : Indice d'Erosivité potentielle de la précipitation (MJ/mm / ha. H. an).

K : Indice d'Erodibilité des sols à l'érosion hydrique (t. H / MJ. mm).

LS : Facteur Topographique dépendant de la pente et sa longueur.

C : Facteur de Culture, incluant la régie des cultures et des sols et les pratiques culturales.

P : Facteur de Conservation et d'Aménagement.

V.3. Paramètres du modèle :

V.3.1. Facteur d'érosivité (R) :

La pluie est l'élément moteur de l'érosion. Sans précipitation il n'y a pas d'érosion hydrique [63]. Son agressivité peut être caractérisée par sa hauteur, son énergie et son intensité [53].

Cependant l'intensité est le facteur principal de l'érosion. Plus l'intensité est grande, plus l'effet de battage du sol est prononcé[63].

L'érosivité de la pluie est définie comme la capacité potentielle de pluie à causer de l'érosion[64], c'est l'énergie des gouttes des pluies qui déclenche le processus de destruction des agrégats et le ruissellement assure leur transport[65].Le coefficient R nécessite de connaitre la répartition de précipitation sur toute la superficie du Bassin versant[45].

V.3.2. Facteur d'érodibilité du sol (K) :

Le facteur K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement[66]. D'autre part il faut savoir aussi que le sol est diffèrent selon leur résistance à l'érosion, fonction de la texture, de la structure, de la rugosité, de la teneur en matière organique et du degré d'humidité du sol[65]. Comme aussi on peut le définir comme suite :

C'est sa résistance à deux sources d'énergie, la battance des gouttes de la pluie à la surface du sol et l'entaille du ruissellement entre les mottes dans les griffes ou les rigoles[67].

La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier & Smith (1978) de développer une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols[60]:

$$100K=2,1.M1,14.10\text{-}4\ (12–a) + 3,25\ (b–2) + 2,5\ (c–3) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (18)$$

Avec :

M : est calculé par la formule M = (% sable fin +limon).(100 – % argile).

a : est le pourcentage de matière organique.

b : est le code de la perméabilité.

c : est le code de la structure.

V.3.3. Facteur topographique (LS) :

Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont en général à l'origine d'une érosion importante dont l'importance dépend de la géologie, de la nature des sols, et de la protection par la couverture végétale [65].Lefacteur LS est le produit de deux sous facteurs à savoir le sous facteur longueur de la pente (L) et le sous facteur gradient de la pente (S) [67]. Ainsi le facteur (LS) peut être défini comme la relation entre le sol perdu dans une zone avec une pente et longueur[57].

La longueur de la pente (L) est définie comme étant la distance parcourue par une goutte d'eau depuis la source de ruissellement jusqu'à un point donné du bassin[67].

Le gradient de la pente est le degré d'inclinaison du terrain, exprime généralement en pourcentage[57].

Le facteur topographique (LS) a été calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur par la formule de Wischmeier & Smith (1978) :[69]

$$LS= (L/22,13)m.(0,065 + 0,045.S + 0,065.S2) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (19)$$

Avec :

L est la longueur de pente en m.

S est l'inclinaison de la pente en %.

m est un paramètre tel que :

m = 0,5 si la pente est > 5%

m = 0,4 si la pente est de 3,5 à 4,5 %

m = 0,3 si la pente est de 1 à 3 %

m = 0,2 si la pente est < 1%.

V.3.4.Occupation des sols (C) :

L'occupation des terres et la végétation sont en rapport avec d'autres facteurs tel que: la topographie, la géologie, les sols, le climat et les caractéristiques hydrologiques. L'occupation du sol, sauf dans les endroits éloignés, est en rapport direct avec les activités humaines. Les activités qui ont la plus grande influence sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abattage du bois, la construction de routes et l'urbanisation [65].

Le couvert végétal est, après la topographie, le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols[68].

Le facteur C est défini comme un ratio de la perte en sol d'un terrain avec une végétation particulière par rapport à la perte correspondante d'un terrain en jachère, Sa valeur dépend du couvert végétal et des pratiques d'exploitation[69].

En effet la couverture végétale permet la diminution de l'effet "splash" sur les sols. De même les racines des arbres et des plantes fixent le sol et favorisent l'infiltration. Les feuilles des plantes en tombant se transforment en matière organique toute chose qui contribue à la cohésion du sol[45].

V.3.5.Le facteur Pratiques anti-érosives (P) :

Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols[60].

Le facteur P décrit les actions humaines conservatrices des sols qui se pratiquent pour contrer l'érosion hydrique . [64]Et qui visent à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion[52].Il varie généralement de 0 à 1, selon la pratique adoptée et selon la pente[64].

V.4.Données utilisées :

1) Précipitations mensuelles (mm), téléchargées de site web : www.worldclim.org/version 2.

World clim : sont des cartes climatiques normales mensuelles pour la période 1970-2000, elles donnent les températures minimales, maximales et moyennes, les précipitations et les altitudes, ainsi qu'un ensemble de 19 variables bioclimatiques. Les cartes sont disponibles sur des grilles de 30 secondes d'arc sont à peu près de 1km, 2,5 minutes, 5 minutes et 10 minutes .Elles peuvent être téléchargées librement de format ESRI pour une intégration dans Arcmap.

2) Carte numériques du sol du monde « Digitale soil maps of the world (DSMW), obtenue sur le site web : http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116

DSMW : Carte représentée sous forme raster ou vectorielle. L'ensemble de données vectorielles est basé sur la carte FAO-UNESCO sur le sol du monde. La carte des sols numérisés du monde, à l'échelle 1: 5.000.000, se trouve dans la projection géographique (Latitude-Longitude) intersectée avec un modèle contenant des caractéristiques liées à l'eau (littoral, lacs, glaciers et rivières doubles) [$Site\ web$ 7].

3) Fichier MNT de résolution 90 m qui couvre toute la région d'étude ; obtenue sur le site web : http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp

Modèle numérique de terrain (MNT) :

Un modèle numérique de terrain est une représentation numérique du terrain en termes d'altitude. Il fournit des renseignements non seulement sur les formes du relief, mais également sur leur position [70].

4) Image satellitaire extraite de Google Earth professionnel (Année 2014).

V.5. logiciels utilisés :

Les logiciels SIG représentent l'élément le plus important de l'outillage géomantique et il est important de choisir ces logiciels avec un grand soin, les plus répandus de ces logiciels actuellement sont ceux fourni par la société ESRI tel que Arc GIS :

V.5.1.ArcGIS :

Est l'un des Systèmes d'informations géographiques les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales. Le principe directeur d'un SIG est le suivant : nous avons d'un côté les données géométriques et de l'autre les4 données attributaires. Ces données sont stockées sous format numérique et organisées par couches (appelées aussi « shapefiles» dans ArcGIS). Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées. Les différentes couches d'informations sont descriptives d'un espace géographique terrestre déterminé. Elles peuvent correspondre à des documents cartographiques représentant des objets thématiques géographiquement identifiés, Ou issus des analyses et des procédures de spatialisation (carte de la teneur en eau du sol, carte topographique, carte de la hauteur des arbres dans un peuplement forestier, etc.)[71].

ArcGIS est en réalité une suite, qui se décline en trois versions du plus simple au plus perfectionné (ArcView, ArcEditor et ArcInfo).

V.5.1.1. ArcView :

Est un outil SIG complet dédié à l'utilisation des données, la cartographie et l'analyse.

V.5.1.2. ArcEditor :

Permet la création et la mise à jour avancées de données géographiques.

V.5.1.3. ArcInfo :

Est un outil SIG bureautique professionnel et complet, qui propose des fonctions SIG complètes et de nombreux outils de géotraitement.

- Des fonctionnalités supplémentaires sont disponibles par l'activation d'une série d'extensions. Les utilisateurs ont également la possibilité de développer leurs propres extensions.
- La différence entre ces versions est le nombre d'options supplémentaires disponibles, ArcView en possédant le moins. Ceci est indépendant des extensions (Spatial Analyst, 3D Analyst… que l'on peut acheter en supplément de chaque suite).

Chacune de ces trois versions de la suite ArcGis est constitué d'une interface ArcMap et d'une interface ArcCatalog[71].

V.5.2.ArcMap :

ArcMap représente l'application centrale dans ArcGIS Desktop. Il s'agit de l'application SIG utilisée pour toutes les tâches associées aux cartes, y compris la cartographie, l'analyse des cartes et la mise à jour.

Dans cette application, vous travaillez avec des cartes. Les cartes ont une mise en page contenant une fenêtre géographique (ou vue) avec un ensemble de couches, légendes, barres d'échelle, Flèches du Nord et autre élément.

ArcMap offre différentes façons de visualiser une carte - vue des données géographiques et mode de mise en page - dans lesquelles vous pouvez effectuer de nombreuses tâches SIG[72].

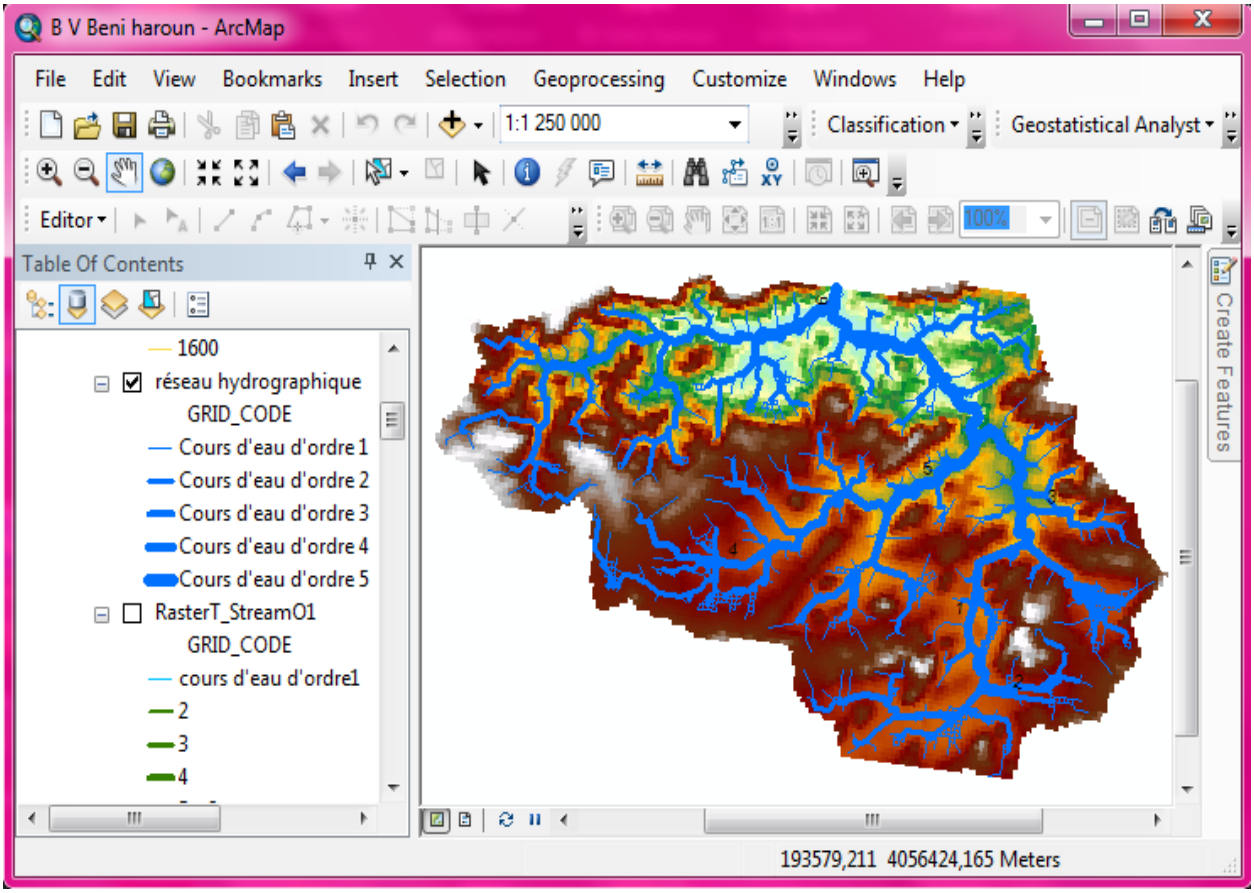

Figure 46 : Conception et création de cartes en utilisant Arcmap

V.5.3. Global Mapper :

Global Mapper est plus qu'un simple outil de visualisation capable d'afficher les images raster, les données d'altitude et les données vectorielles les plus répandues.

Il convertit, édite, imprime, acquière des données GPS, et vous permet d'utiliser des fonctionnalités SIG sur vos jeux de données de manière peu onéreuse et simple. Global Mapper permet aussi, en son sein, un accès direct à la totalité de la base de données Terra Server d'imagerie satellitaire et de cartes topographiques de l'USGS ainsi que la visualisation des données d'altitudes en vrai 3D avec un drapage de n'importe quelles images raster ou données vectorielles.

Vos fichiers de données peuvent être chargés comme des couches, ainsi un modèle numérique de terrain (MNT) peut être chargé avec une carte topographique pour créer une vue 3D de la carte. Une photographie aérienne numérique peut être drapée en même temps que des données vectorielles pour créer une carte riche en informations. Le résultat peut être imprimé, ou bien encore l'espace de travail peut être exporté sous la forme d'une image raster en haute résolution destinée à être utilisée dans une présentation ou un rapport[72].

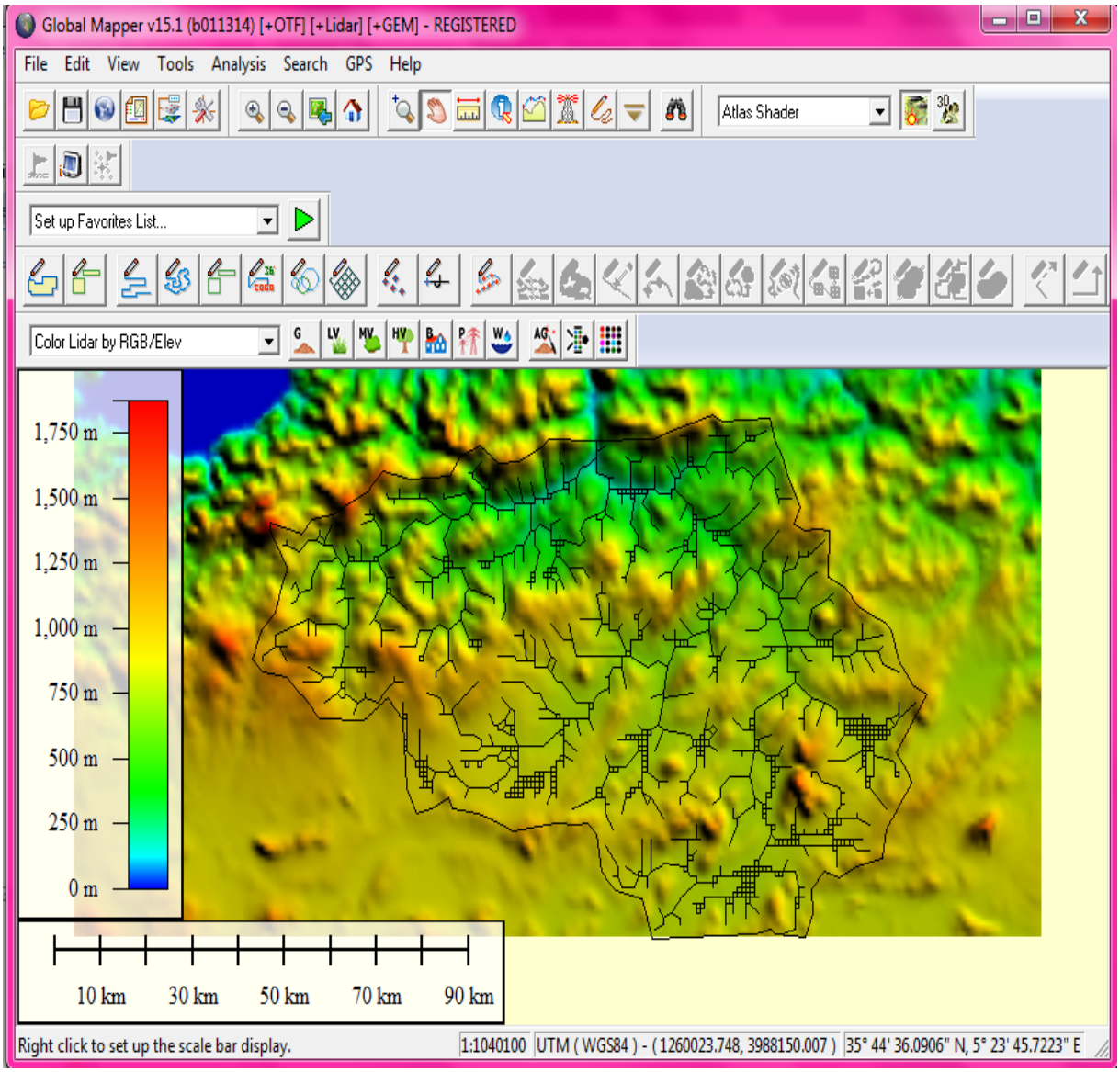

Figure 47 : Conception et création de cartes en utilisant Global mapper

V.5.4. Google Earth :

Google Earth est une mappemonde virtuelle qui vous permet de visualiser les images, enregistrées par satellite, de la plupart des endroits de la planète. Que le lieu visité soit aperçu depuis l'espace ou à quelques mètres du sol, la précision des photos est surprenante.

Au programme: images satellite, plans, cartes, images en relief et représentations 3D des bâtiments.

Des informations supplémentaires peuvent êtres superposées à l'image satellite, comme les hôtels, les restaurants, les routes, etc.[*Site web* 8].

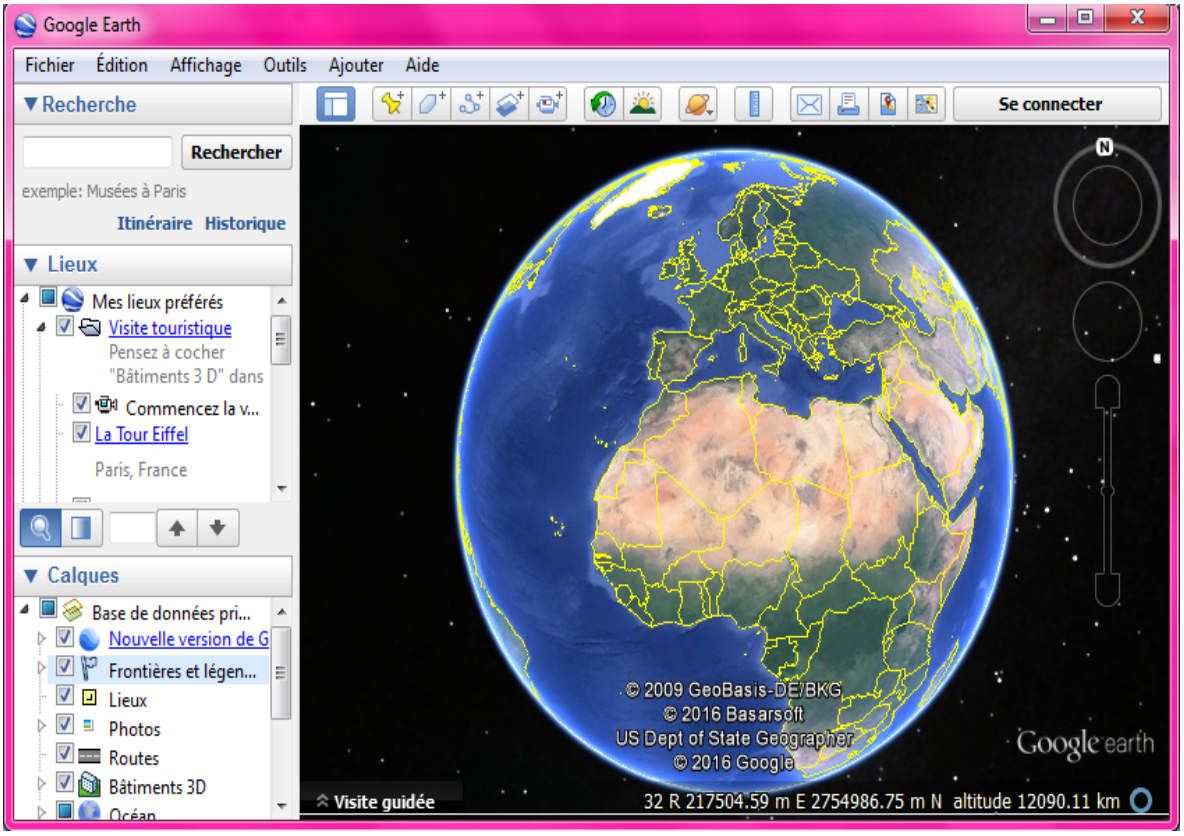

Figure 48 : Google Earth

V.6. Méthodologie :

La méthodologie du travail consiste à représenter des informations cartographiques et descriptives des différents facteurs et paramètres de l'érosion dans une plate-forme de système d'information géographique SIG. Le modèle quantitatif d'érosion à base empirique permet ainsi de fournir une estimation des pertes en sol, en T/ha/an, par unité de surface, qui correspond dans le cas d'utilisation de superposition cartographique sous SIG, au pixel de base du MNT.

Cette démarche est schématisée par la figure suivante (**figure 49**) :

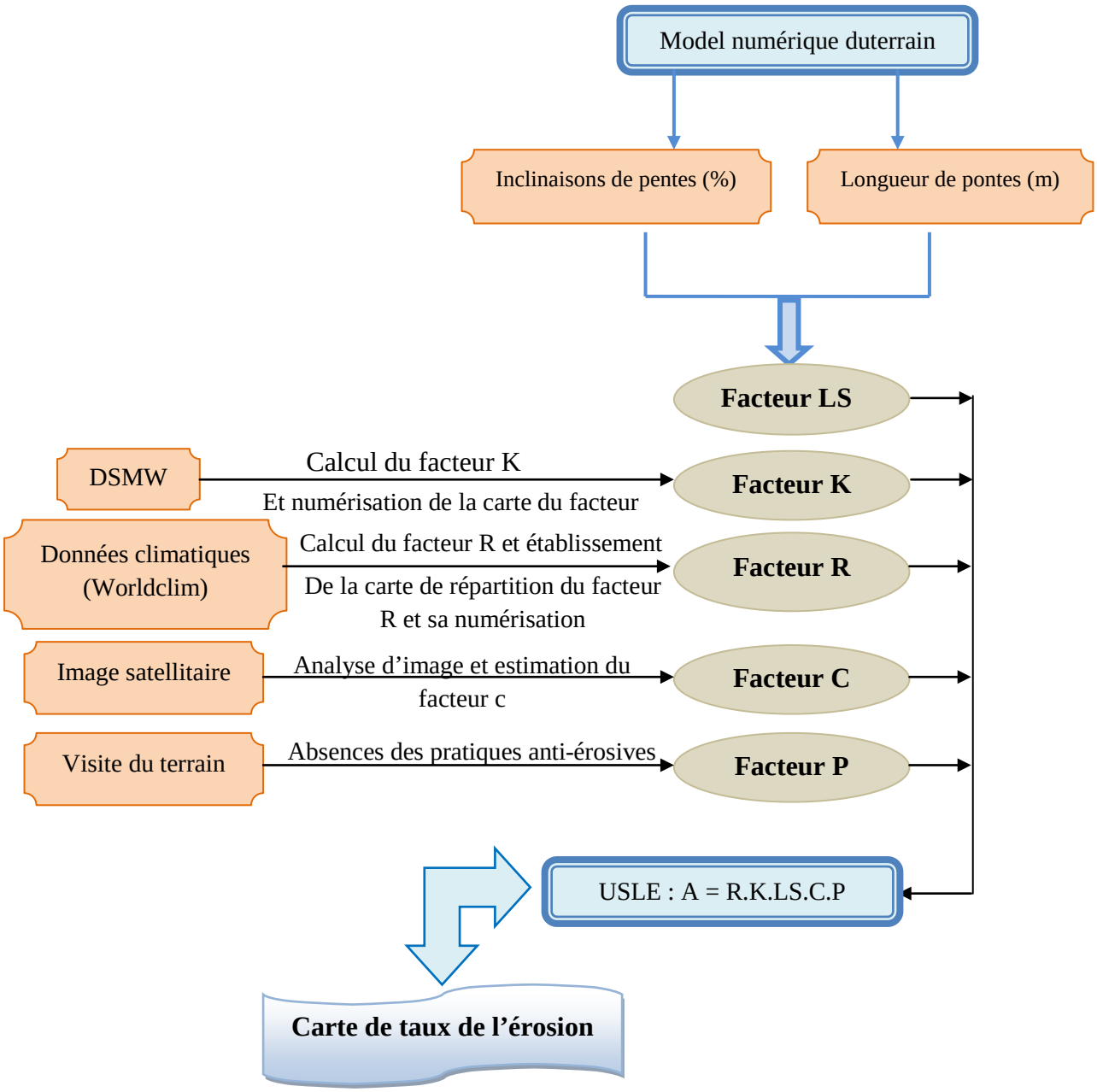

Figure 49 : Schéma simplifié de la méthodologie du travail

V.7. Calcul et cartographie des paramètres du model :

V.7.1. Le facteur R :

L'érosivité de la pluie a été calculée suivant l'équation de Renard et Freimund :

$$R = 0.04830\ P^{1.610} \text{……..(20)}$$

R : Erosivité en (t/ha/an)

P : précipitations annuelles en (mm).

En utilisant des précipitations moyennes annuelles en (mm) de différentes régions situées dans le secteur d'étude ou dans ses environs, ces valeurs que nous avons acquises, nous les avons extraites de WorldClim version 2.

On a téléchargé les variables pour différentes résolutions spatiales, Chaque téléchargement est un fichier "zip" contenant 12 fichiers GeoTiff (.tif), un pour chaque mois de l'année (janvier est p1 et décembre est p12).

Le tableau suivant, récapitule les différents résultats obtenus (**Tableau14**) :

Tableau 14 : Calcul de l érosivité R **(t/ha/an)**

Stations	X(m)	Y(m)	p_{moy} annuelle (mm)	R(t/ha/an)
El Eulma	263573,29	4075962,60	1023,00	3387,25
Ferdjioua	215980,10	4068527,12	928,00	2895,34
Belaà	286496,82	4064255,33	860,00	2561,47
Oum ElBouaghi	193167,49	4055980,21	870,00	2609,60
Oum toub	225605,23	4033776,59	684,00	1771,69
Erraguen	216773,06	4010732,66	594,00	1411,70
boussbaia	154487,26	4007421,82	446,00	889,97
Ain Zada	245257,16	4006118,38	505,00	1087,04
Agram	199492,66	4005756,13	454,00	915,81
Chelghom Laid	329369,88	3971179,07	494,00	1049,17
Batna	242910,30	3937937,75	353,00	610,75

En suite les valeurs de R calculées ont été interpolées en utilisant une méthode d'interpolation **krigeage**. On a abouti à cette carte, (**Figure 50**) :

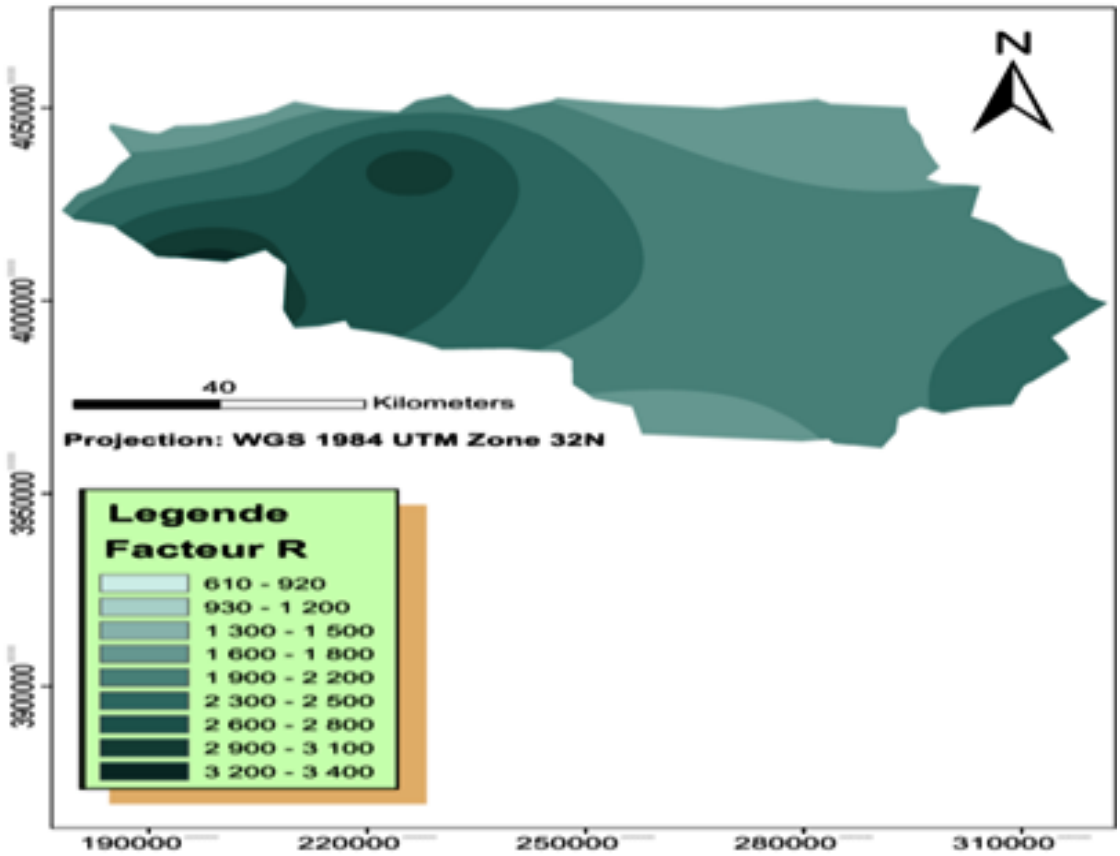

Figure 50 : Carte du facteur d'érosivité de pluie (R) du Bassin versant de Beni Haroun.

La carte d'érosivité (**Figure 50**), synthétisée à partir de la spatialisation des stations hydrologiques, montre que la valeur du facteur R varie de 610**(t/ha/an)** à 3400**(t/ha/an).**

Les valeurs élevées sont enregistrées au Nord-Ouest, alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées au Nord et au Sud du bassin versant de Beni Haroun.

V.7. 2.Facteur K :

Nous avons évalué l'indice K des différents types de sols à l'aide des équations de (Wiliams ; 1995)en utilisant la carte numérique du sol du monde DSMW (Digital Soil Map of the World).

Le traitement de cette carte sous Arcgis , nous a donné les résultats suivants :

Tableau 15 : les différentes caractéristiques des couches

Couches	Sable% (sand)	Limon%(Silt)	Argile %(clay)	Matière organique % (OC)
LA	87,5	6,2	6,4	0,47
BK	81,6	6,8	11,7	0,44
XK	48,7	29,9	21,6	0,64
XH	54,8	20,6	24,9	0,53
ZO	43,2	24,6	32,4	0,4

Avec :

LA : Luvisols Acrisols .

Bk : Calcic Cambisols.

XK : Calcic Xerosols.

XH : Haplic Xerosols.

ZO : Orthic Solonchaks.

Après ces résultats obtenus, on a trouvé le facteur K a partir des équations réalisées par (Wiliams ;1995) qui sont :

$$K_{USLE} = \int_{csand} . \int_{cl\text{-}si} . \int_{orgc} . \int_{hisand} \ldots\ldots\ldots\ldots (21)$$

Avec :

$\int_{csand}$:est un facteur qui abaisse l'indicateur K dans les sols avec teneur élevée en sable grossier et plus élevée pour les sols avec un peu de sable.

$\int_{cl\text{-}si}$: donne de faibles facteurs d'érosion du sol pour les sols avec taux élevés d'argile à limon.

$\int_{orgc}$: réduit les valeurs de K dans les sols avec teneur élevée en carbone organique.

$\int_{hisand}$: abaisse les valeurs K pour les sols à teneur en sable extrêmement élevée.

$$\int_{csand}=\left(0.2+0.3\,.\exp\left[-0.256.ms.\left(1-\frac{msilt}{100}\right)\right]\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (22)$$

$$\int_{cl\text{-}si}=\left(\frac{m\,silt}{mc+m\,silt}\right)^{0.3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (23)$$

$$\int_{orgc}=\left(1-\frac{0.25\,.\,orgC}{orgC+\exp[3.72-2.95.orgc]}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (24)$$

$$\int_{hisand}=\left(1-\frac{0.7\,.\left(1-\frac{ms}{100}\right)}{\left(\frac{ms}{100}\right)+\exp\left[-5.51+22.9\,.\left(1-\frac{ms}{100}\right)\right]}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (25)$$

Où:

m_s - la teneur en fraction de sable (0.05-2.00 mm de diamètre) [%].

m_{silt} - la teneur en fraction de limon (0,002-0,05 mm de diamètre) [%].

m_c- la teneur en fraction argileuse (<0,002 mm de diamètre) [%].

Org_C - la teneur en carbone organique (SOC) [%].

A partir de ces équations, on a calculé le facteur K, les résultats sont représentés dans le tableau suivant (**Tableau 16**) :

Tableau 16 : Estimation du facteur K par l'équation de Williams.

Couches	fcsand	f cl-sil	f Org	f hi sand	K USLE	K
LA	0,2	0,8678	0,9891	0,5532	0,0949	0,0125
BK	0,2	0,8186	0,9906	0,7185	0,1165	0,0153
XK	0,2	0,8970	0,9768	0,9993	0,1751	0,0230
XH	0,2	0,8534	0,9856	0,9975	0,1678	0,0221
ZO	0,2	0,8453	0,9924	0,9998	0,1678	0,0220

Les valeurs du facteur K, situées entre 0,0125 et 0, 0230 montrent une nette fragilité des sols et leur susceptibilité à l'érosion.

Suivant ces études, on a abouti à cette carte d'érodibilité du terrain de Bassin versant de Beni Haroun, (**Figure 51) :**

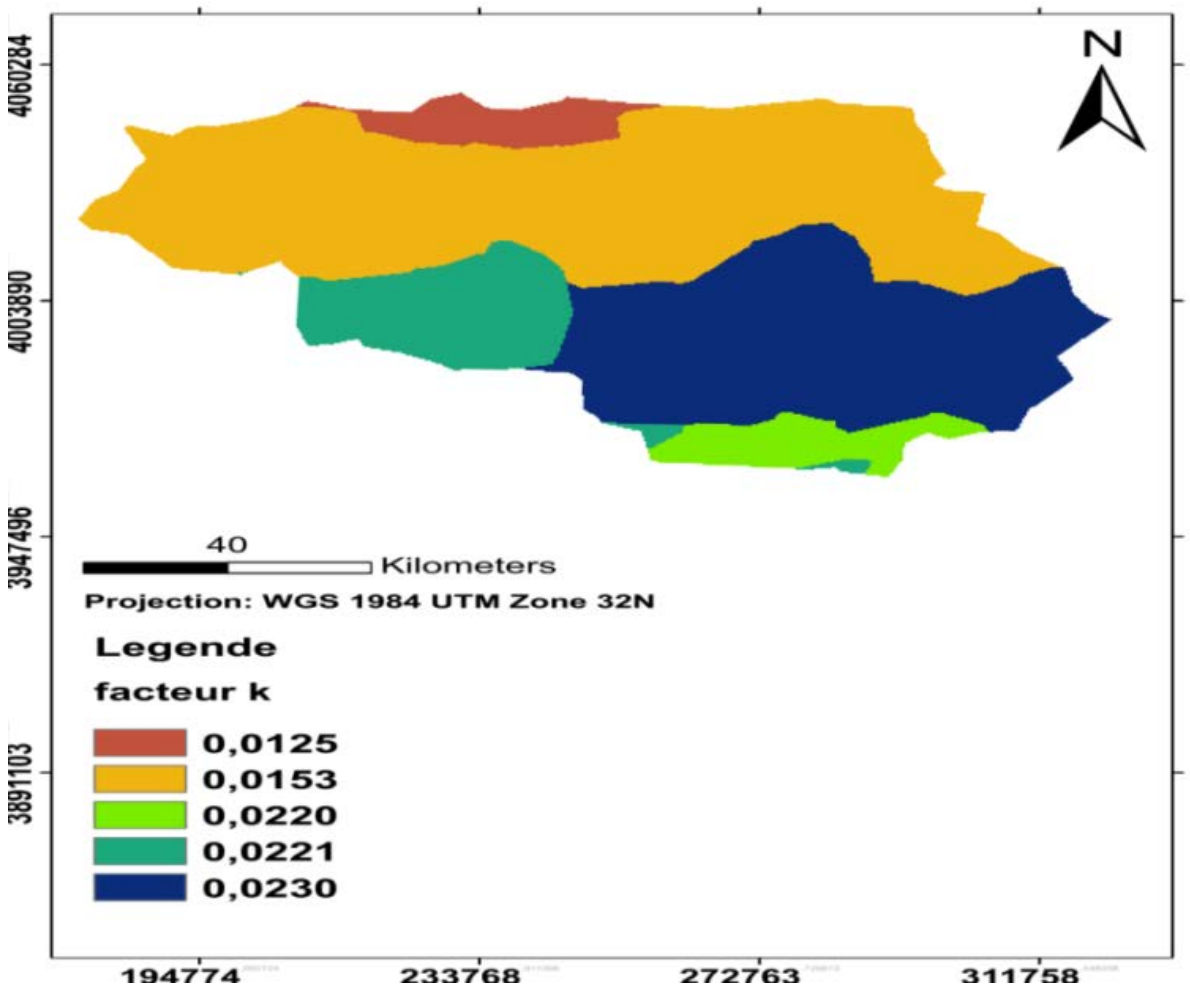

Figure 51 : Carte d'érodibilité du terrain (k) du Bassin versant de Beni Haroun

Tableau 17 : Répartition des valeurs du facteur K dans le bassin versant de Beni Haroun

les valeurs du facteur K	superficie (m)	% Superficie
0,0125	350,590181	4,25
0,0153	4096,475077	49,63
0,0230	2547,626966	30,86
0,0221	871,992595	10,56
0,0220	387,184558	4,69

La carte (**Figure 51**) présente la répartition spatiale des différentes classes du facteur K dans le bassin versant. Les valeurs de l'indice d'érodibilité sont comprises entre 0.0125 et 0,0230 et sont réparties sur la zone d'étude selon les différentes unités homogènes. Le bassin versant présente généralement une érodibilité moyenne (0.0153-0.0212) couvrant plus de la moitié (64.88%) de la superficie totale du bassin, suivie d'une érodibilité faible 0.0125 avec (4.25%) et celle forte 0.0230 avec (30.86%) de la surface (Tableau 17).

V.7. 3.Facteur LS :

Le facteur topographique regroupe les effets de la longueur (L) et de l'inclinaison (S) de la pente sur l'érosion Ci-dessous, les équations du calcul réalise sont détaillées :[66]

Les équations utilisées pour déterminer le facteur L sont :

$L = \left(\frac{\lambda}{22}.13\right)^{m}$ …… (26)$m = \frac{F}{(1+F)}$…… (27)$F = \frac{\sin\left(\frac{\beta}{\theta}\right) 0.896}{3(\sin\beta)^{2}}$…….(28)

Avec :

λ:est la longueur de la pente (m).

β : est l'angle de la pente.

m : est l'exposant de la longueur de la pente.

Sous ArcMap, il est obtenu à partir de la commande CON, qui est la fonction conditionnelle.

Spatial Analyst Tools→ Mapalgebra →Raster Calculator**:**

F = (Sin("slope_degree" * 0.01745) / 0.0896) / (3 * Power(Sin("slope_degree" * 0.01745),0.8) + 0.56))…… (29)

m = "F" / (1 + "F")…… (30)

Ces deux paramètres calculés dans leur champ respectif dans la table attributaire de ce facteur, et les résultats intégrés dans l'équation finale :

L = Power(("FlowAcc" + 625), ("m" + 1)) – Power("FlowAcc", ("m" + 1)) / Power(25,("m" + 2)) * Power(22.13,"m"))…….. (31)

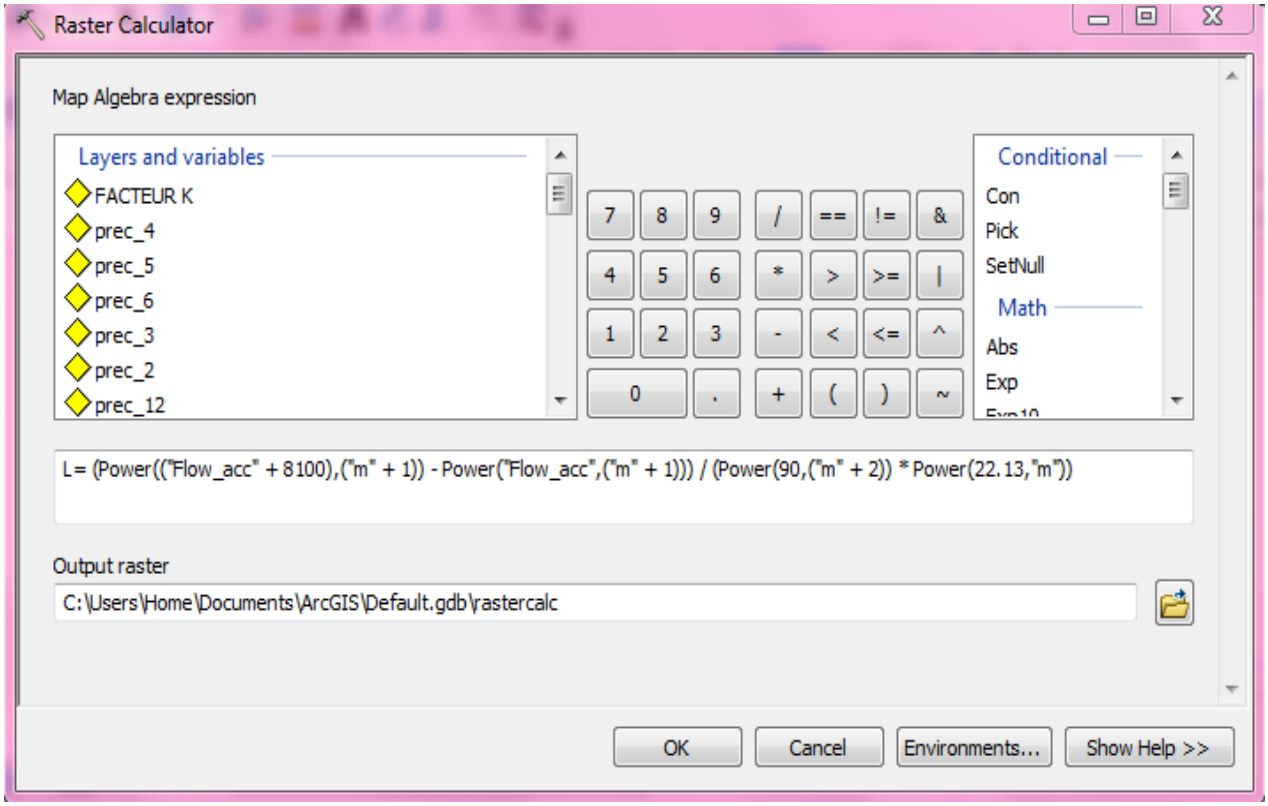

Figure 52 : Application de l'expression L sous ArcGis 10.2.

Les équations utilisées pour déterminer le facteur S sont :[66]

$S_{(i,j)} = 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03$ $\tan \beta(i,j) < 0.09$……. (32)

$16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5$ $\tan \beta(i,j) \geq 0.09$……..... (33)

Avec :

B : Angle (gradient) qui représente les effets de l'inclinaison dans l'érosion et considéré comme l'angle moyen a tous les grids dans la direction de pente plus grande.

S = Con(Tan("slope_degree" * 0.01745) < 0.09,(10.8 * Sin("slope_degree" * 0.01745) + 0.03),(16.8 * Sin("slope_degree" * 0.01745) - 0.5)) …… (34)

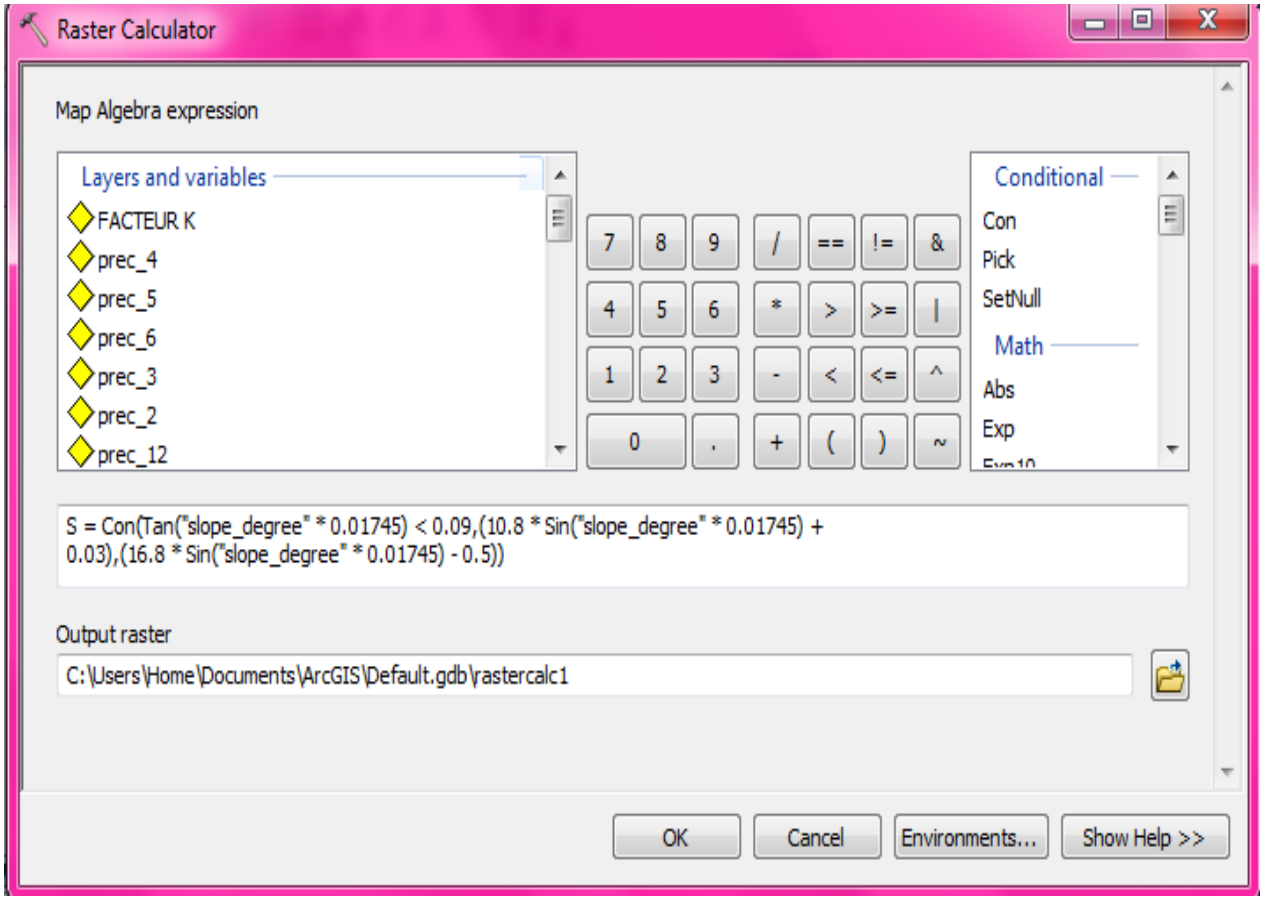

Figure53 : Application de l'expression S sous ArcGis 10.2.2

En dernier lieu, on a obtenu le facteur LS à travers la multiplication du facteur L et S :

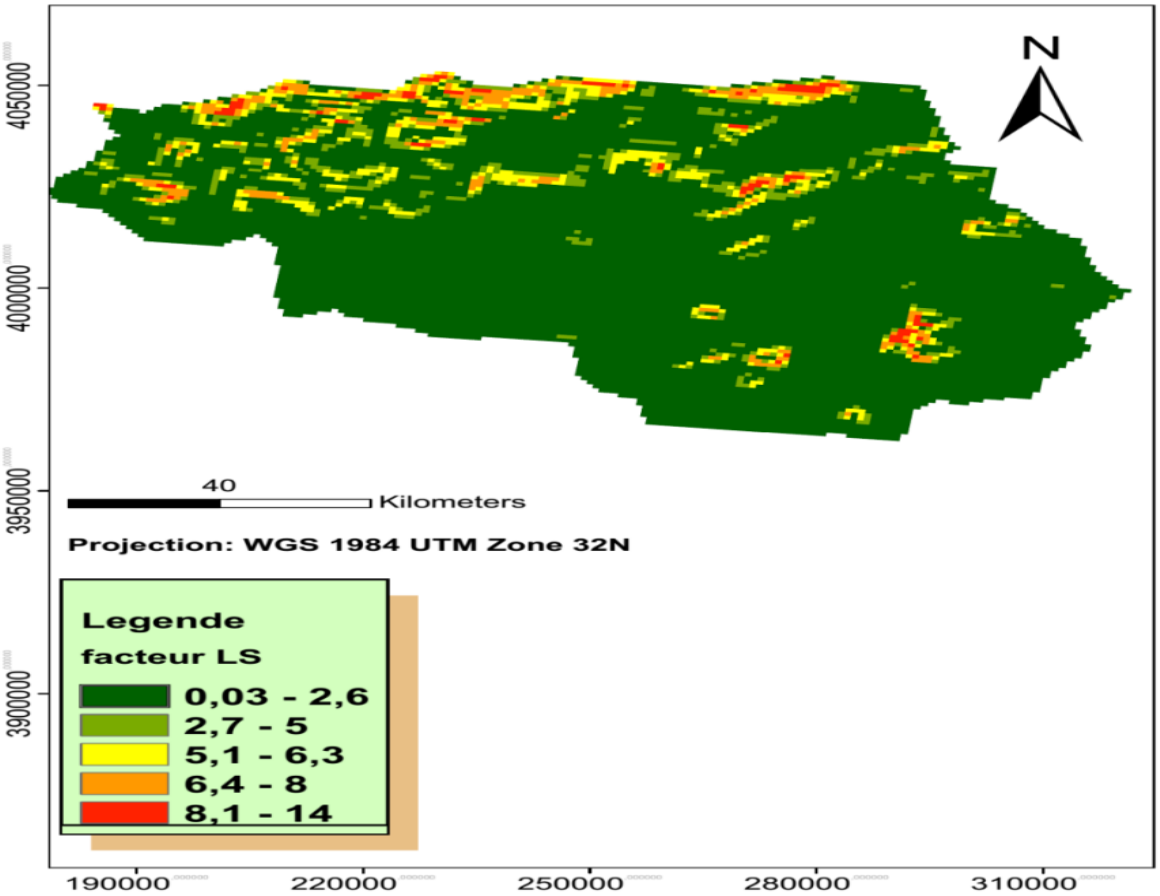

Figure 54 :Carte du facteur topographique (LS) du bassin versant de Beni Haroun

Le facteur topographique LS est classé selon des valeurs variant entre 0.03 à 14. La lecture de la carte (**Figure 54**) reflète généralement la topographie du terrain. Les valeurs entre (5.1-14) se présentent généralement au Nord-Ouest du Bassin versant, coïncidant généralement avec des zones à hautes altitudes et pentes élevées, et les valeurs comprises entre 0.03 à 2.6 dispersées dans toute la zone.

V.7.4.Facteur C :

Représente les effets des plantes, la couverture du sol, la biomasse du sol et les activités destructrices du sol dans les processus d'érosion. La détermination de ce facteur est élaborée à partir de la cartographie de la densité de la végétation sur les images de Google Earth.

On a utilisé une image extraite de Google Earth professionnel, cette carte a été analysée selon la méthode de classification supervisée.

La classification supervisée : c'est l'assignation des pixels aux classes. Cela signifie qu'il faut d'abord déterminer le nombre et la nature des classes utilisées[86].

Après la classification d'image et le choix des classes de terrain (urbains, végétation, cours d'eaux, eaux) on a attribué une valeur du facteur C pour chaque type du sol :

Tableau 18 : Valeur du facteur C en fonction du type de couverture[66]

Types de couvertures	Facteur C
Végétations	0.03
urbains	0.01
eaux	0
Parcours	0.1

En utilisant ArcToolBox a travers de **Conversion Tools / To Raster / Feature Raster**. Le résultat est dans la carte suivante :

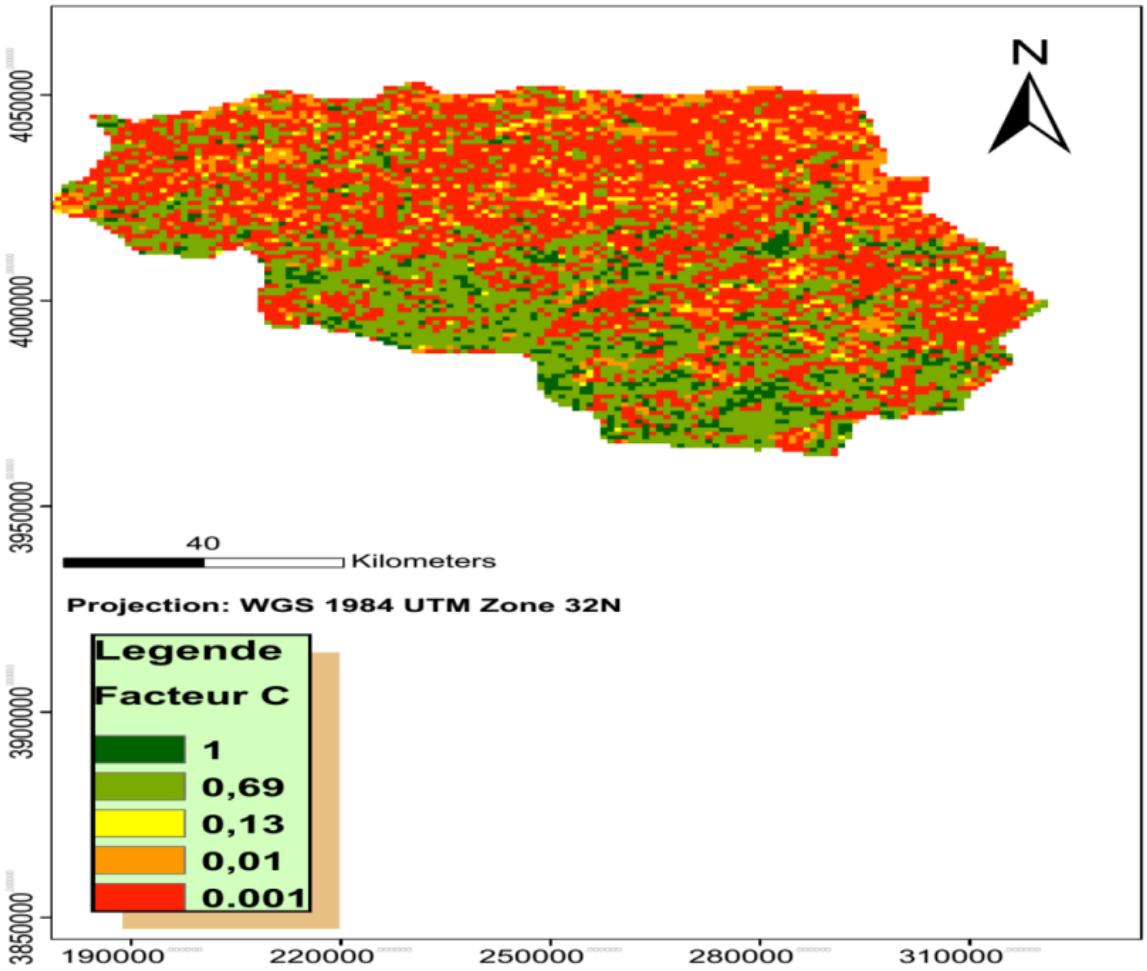

Figure 55 : Carte du facteur C (Couvert végétal) du bassin versant de Beni Haroun.

La carte du facteur C (**Figure 55**), présentée par la figure, montre des valeurs variant entre0.001 et 1.D'après la carte on peut distinguer cinq types d'occupations majeures qui occupent tout le bassin versant ; la valeur la plus faible de 0.001 demeure dans les zones humides, cependant la valeur 0.13 se localise dans les aires couvertes par les forêts peu denses et espacées. Les coefficients les plus élevés 1 correspondent aux sols nus.

V.7.5.Facteur P :

Le facteur P tient compte des pratiques antiérosives adoptées et qui visent à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion.

Il s'exprime par le rapport entre les pertes en sol sur un champ aménagé et celle d'une parcelle de même taille cultivée dans le sens de la pente[52].

Dans le cas du bassin versant de Beni Haroun il n'existe pas des aménagements antiérosifs. Ainsi le facteur P a été supposé égal à 1.

V.8. Multiplication des facteurs, Résultats et discussion :

La multiplication des différents paramètres de l'USLE sous SIG permet l'obtention de la carte de risque d'érosion (**Figure 56**), informant sur le potentiel d'érosion en t/ha/an par unité spatiale (pixel du MNT) en tout point du bassin versant de Beni Haroun :

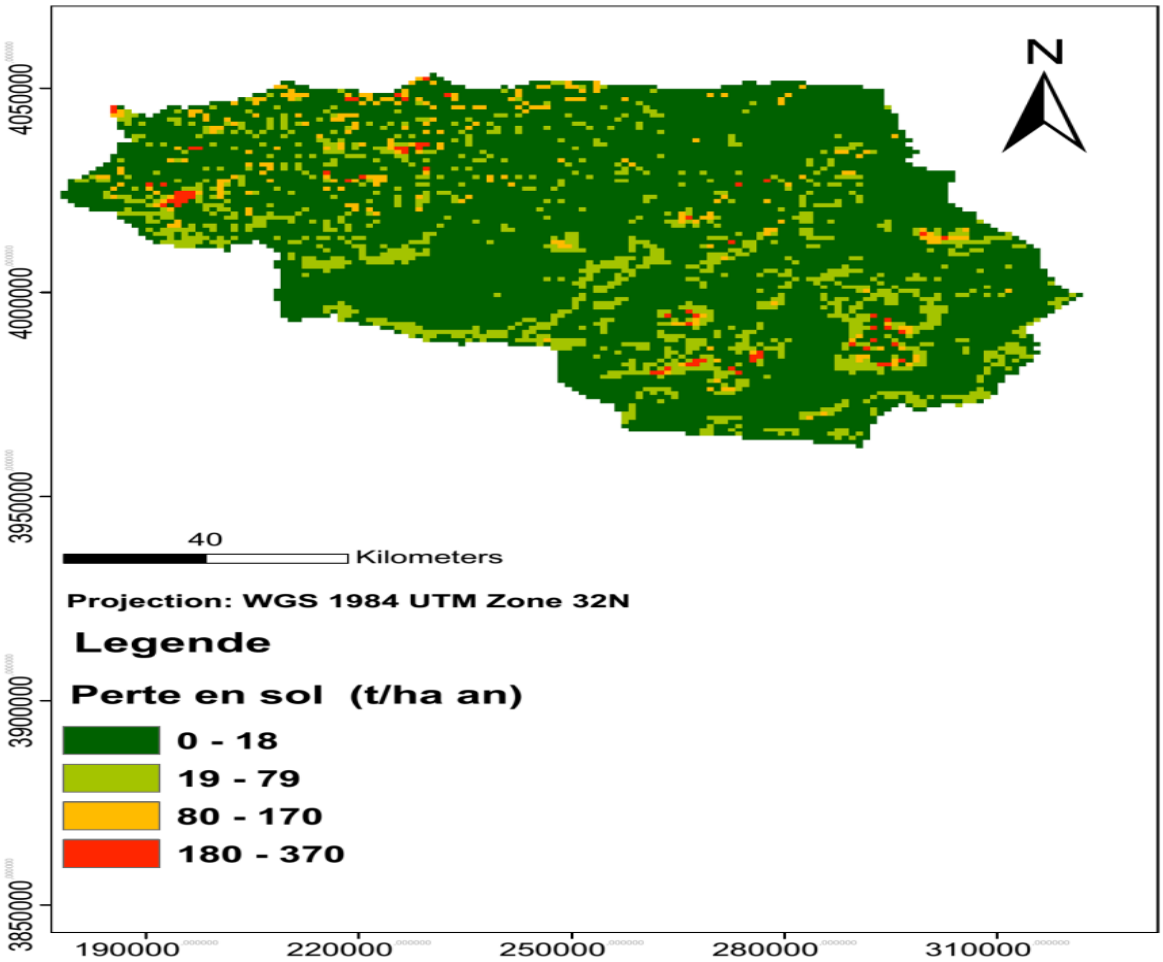

Figure 56 : Carte de perte en sol du bassin versant Beni Haroun

La lecture préliminaire de la carte des classes d'érosion montre une répartition spatiale « éparpillée » des classes d'érosion, ce qui montre clairement l'impact cumulé des différents facteurs responsables de l'érosion. La description et la discussion de carte des classes d'érosion nécessitent obligatoirement une lecture parallèle des cartes des paramètres physiques (pente et altitudes).

L'érosion pour ce secteur varie entre 18 (t/ha/an) comme valeur minimale et 370 (t/ha/an) comme valeur maximale.

Dans la plus part de superficie du bassin, on rencontre une concentration de la classe d'érosion très faible par rapport aux autres classes (< 18 t/ha/an), qui coïncide avec une zone à forêt dense.

D’autres zones se répartissent dans la superficie du bassin et beaucoup plus dans la partie Sud Est, avec une perte en sol comprise entre (19 t/ha/an-79 t/ha/an) coïncidant également avec des zones arbustives (de forêts).

Dans la partie Nord-Ouest la perte en sol variant entre 80 t/ha/an -170 t/ha/an comme classe d’érosion forte , et la classe la plus forte d’érosion se situé au Nord-Ouest et Sud Est .

Par recours aux cartes des pentes de bassin versant de Beni Haroun, on observe dans ces régions des valeurs du facteur topographique élevées traduits par des altitudes et pentes élevées.

L’analyse de la carte des classes de pentes dans le bassin versant montre une dominance des pentes moyennes à fortes dans ces zones ce qui nous permet d’attribuer ces taux élevé d’érosion à l’augmentation de l’effet de la pente, L’impact du facteur topographique apparait clairement dans les zones où coïncide une pente moyenne à forte sur des terres nues ou des terres agricoles. Au niveau de ces deux types d’occupation du sol, les taux d’érosion augmentent sensiblement avec la pente. Et dominance des sols peu évolués manifestant une érodibilité élevée atteignant 0,0230 contribue à accentuer les pertes en sols.

Les résultats obtenus montrent que les sols du bassin versant de Beni Haroun 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 Beni Haroun est soumis à une forte érosion avec des pertes variant de 18 à 370 t/ha/an, résultats qui permettent de cibler les zones qui nécessitent une action prioritaire pour une analyse à plus grande échelle, en vue de trouver les solutions appropriées pour lutter contre l’érosion et protéger le milieu naturel et qui impose aux décideurs d’appliquer des méthodes actives et immédiats pour minimiser l’envasement du barrage.

Conclusion

L’érosion hydrique dans le bassin versant de Beni Haroun résulte de la conjonction de différents facteurs : érodibilité des sols, érosivité des pluies, raideur du relief et faiblesse du couvert végétal. Les facteurs analysés à l’aide du SIG montrent bien la sensibilité du bassin versant de Beni Haroun à l’érosion.

Enfin, ce travail a pu atteindre son but d’évaluer, à l’échelle d’un bassin versant, les taux d’érosion potentielle, de délimiter les zones à différentes classe de risque et de dévoiler les facteurs déterminants de la dégradation des terres.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'érosion est un phénomène témoin d'une dégradation de la qualité du sol qui est un capital non renouvelable, cette dégradation est considérée comme une perte économique. L'intervention pour tolérer cette perte doit se faire dans des contextes tenant compte des conditions naturelles et celles agro-socio-économiques.

La quantification des pertes en terre se fait par le biais des modèles de perte en sol. Dans notre recherche, nous avons utilisé le modèle de Wischmeier qui devrait prédire les pertes en terre dues à l'érosion.

L'utilisation des systèmes d'information géographique nous a permis de modéliser le phénomène de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant. Cette modélisation a été faite sur la base des unités de taille égale à la résolution définie par les documents utilisés. Le choix de la résolution peut influencer la précision des résultats obtenus.

L'application du modèle de Wischmeier associé à l'utilisation des systèmes d'information géographique nous a permis de déterminer les zones sensibles à l'érosion d'un bassin versant.

Elle permet aussi de choisir les techniques culturales et les méthodes anti-érosives adaptées en tenant compte de la nature de risque (faible, fort ou très fort).

L'érosion pour le bassin versant de Beni Haroun varie entre 18 (t/ha/an) et 370 (t/ha/an) .

Les résultats de ce travail montrent l'intérêt de l'utilisation de la technologie des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion dans la plaine du bassin de Beni Haroun.

La carte du risque d'érosion élaborée pourrait constituer un document de base pour tout aménagement proposé, et la méthode utilisée a permis d'identifier des zones à risque d'érosion dans la nappe du bassin versant de Beni Haroun.

Référances

bibliographiques

[1] **Douffissa Z.**, 2011 ; Estimation des taux d'érosion et de sédimentation a l'aide des techniques isotopiques (137cs) : cas du bassin versant de Moulay Bouchta, rif occidental, Université Cadi Ayyad, Marrakech.3p.

[2] **Abdelouafi k ; Annouar W.,** 2012 ; Quantification de l'érosion hydrique linéaire dans le bassin versant d'Oued El Malleh : cas du micro bassin de Sidi Sbea, Le Centre de recherche forestière, Marrakech.10p.

[3] **Mokhtari E**., 2009 ; Contribution à l'étude du transport solide en suspension Bassin de l'Oued Cheliff – Ghrib, Université Badji Mokhtar, Annaba. 21p.

[4] **Alaux E**., 2003 ; Processus écologique, UVED : Université virtuelle environnement et développement durable.

[5] **Benhammar M.A ; Meziane M.**, 2015 ; Développement d'un logiciel pour l'Estimation des Pertes en Sol : Cas du Bassin Versant oued Harraza, Université Eldjilali Bounaama, Khemis Miliana. 9p.

[6] **Hadir S.,** 2010 ; Modélisation du ruisselement et de l'érosion par le modèle STREAM dans le bassin versant de l'oued Saboun, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat. 9p.

[**7**] **Remmas H**., 2014 ; Contribution à l'étude et à la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique du sous bassin versant de Oued Saida, Université Dr. Tahar Moulay, Saida. 17p.

[**8**] **Elrhaffouli M ; Lazrak B.,** 2016 ; Elaboration d'une carte de sensibilité des sols à l'érosion : cas du département de l'Aisne (France), Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès. 2p.

[9] **Poulenard J**., Conservation des sols, Laboratoire Environnement Dynamique et territoire de la montagne.

[10] **Ammari A**., 2012 ; Vulnérabilité à l'envasement des barrages (cas du bassin hydrologique des côtiers Algérois), thèse de doctorat, université Mohamed Khidar, Biskra. 8p.

[11] **BenaichaA**.,2011 ; Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages, Université Hadj Lakhdar, Batna. pp10 ; 11.

[12] **Houaria M**., 2015 ; Etude des propriétés physico-chimiques des sédiments du Barrage de Sidi M'Hamed Benaouda (W .Relizane) en vue de leur Valorisation, Université Mohamed Boudiaf**,** Oran.6p.

[13] **Arabi M**., 1991 ; Influence de quatre systèmes des productions sur le ruissèlement et l'érosion en milieu méditerranéen : Médéa (Algérie). Thèse de doctorat, Université de Grenoble III .273P.

[14] **Latreche B**., 2014 ; Contribution à l'étude et à la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique du Mont de Saida, Université Dr Tahar Moulay, Saida. 12p.

[15]**Bouguerra S.,** Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tlemcen), Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen. pp 19 ;76.

[16] **Ritter J.,** 2012, Gestion des sols, Imprimeur de la reine pour l'entario.

[17]**Zaher H**., 2010 ; Ecole nationale forestière d'ingénieure, Département Sol Eau Biodiversité, Maroc.

[18] **Roose E**., 1984 ; Causes et facteurs d'érosion sous climat tropical. Conséquences sur les méthodes antiérosives. Réunion technique 55ème SIMA, Paris. 6p.

[19] **El Hadraoui Y.**, 2013 ; Etude diachronique de l'occupation du Sol et de modélisation des processus érosifs du Bassin versant de Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'observation de la terre, Ecole supérieure des géomètres et topographies .11p.

[20] **Darboux F ; Algayer B.**, L'érosion hydrique des sols, Centre de Recherche d'Orléans, France. 30p

[**21**] **Pius V.B.**, 2012 ; Système d'information géographique (SIG) et évaluation biophysique des terres pour la culture d'ananas (ananas comosus) dans les plantations du Haut Penja (PHP), Université de Dschang, Cameroun.

[22] **Adésir-Schilling M ; Courel M-F ; Robert S**., Le Système d'Information Géographique, support de cours - PRODIG UMR 8586

[23] **Vendé-Leclerc M.**, 2014 ; Les systèmes d'information géographique : SIG, Université de la Nouvelle-Calédonie. 29p

[24] **Schippers C**., 2007 ; Développement d'un système d'information géographique dans le cadre de la mise en place de forêts communautaires au Nord-Est du Gabon, Université des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique.16p

[25] **Antoine D**., 2016 ; Travaux Pratiques sur les Systèmes d'Information Géographique - SIG - Initiation à ArcGIS, Université de Liège (ULg).10p

[26] **MORARD S.,** 2014 ; Analyse d'images satellites à l'aide du logiciel open-source Q-GIS, Projet MITIC « La Terre vue du ciel », Fribourg.16p

[27] **Christine C.,**SIG : définition.

[28] **Godard V**., Fiche Mémo n°1.1. Du cours de Cartographie niveau 2 : Différents types de cartes Université de Paris 8.

[29] **DAO T**., 2008 ; Systèmes d'information géographique et possibilités d'applications en sciences sociales au Việt Nam : états des lieux et enjeux, Université des sciences de HàNội. 90p.

[30] **Tchioffo K.G.,**2008 **;** Conception et réalisation d'une application de Webmapping d'Analyse Territoriale sur des SIG et Bases de Données Open Source : Cas du territoire Camerounais, Complexe Universitaire SIANTOU Yaoundé, Paris

[**31**] **TATSO R**., 2011 ; Intégration d'un observatoire urbain sur Google Maps, Université de Paris-Est Marne La Valléé.

[32] **Tewo S**., 2015, Ecole national des sciences géographiques Etude exploratoire des Systèmes d'Informations Géographiques décisionnels (SIG décisionnels).5p

[33] **Tonarelli P.**, 2005 ; Les Systèmes d'Information Géographique, L'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France.

[34] **Dure E ; Bordin B.,** Système d'Information Géographique (SIG): définition et principes de base, Ecole Nationale des Sciences Géographiques.

[35] **Ben ayed D ; Mezghani S.,** 2012, Systèmes d'Information à Référence Spatiale, ISI : institut supérieure d'informatique.

[36] **Chakroun H**., 2014, Introduction aux SIG et à la teledetection en génie civil, école nationale d'ingénieurs de Tunis.

[37] **Latreche B**., 2014 ; Contribution a l'étude et a la cartographie des zones sensibles a l'érosion hydrique du mont de Saida, Université Dr. Tahar Moulay, Saïda. 24p

[**38**] **Tchioffo kodjo G**., 2008 ; Conception et réalisation d'une application de webmapping d'analyse territoriale sur des SIG et bases de données open source : cas du territoire camerounais ESIG, Complexe Universitaire SIANTOU, Paris.

[39] Agence national d'intermédiation et de régulation foncière, Rubrique Monographie Wilaya, Wilaya de Mila, 2011.

[40] Google Earth

[41] **Kerdoud S.,** 2006 ; le bassin versant de Beni Haroun : Eau et pollution, Université Mentouri, Constantine. 7p

[42] **Melghit M**., Qualité physico-chimique, pollution organique et métallique des compartiments Eau / Sédiments de l'Oued Rhumel, et des barrages Hammam Grouz et Beni Haroun, Université Mentouri, Constantine. 42p

[43] Fiche technique, Beni Haroun (Données obtenues de la direction de Barrage de Beni Haroun).

[44] **Benchabane N**., 2015 ; Relation Barrage-Nappes. Etude de cas : Barrage Beni Haroun, Wilaya de Mila, Université des frères Mentouri, Constantine.

[45] **Layadi N ; Boulares L**., 2015, Caractéristiques morpho métrique des bassins versants par les systèmes information géographique SIG :cas bassin versant de Mila. Est Algérie, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila.8p

[46] **Aissaoui A**., 2013 ; Evaluation du niveau de contamination des eaux de barrage hammam Grouz de la région d'Oued Athmania (Wilaya de Mila) par les activités agricoles, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. pp 31 ; 22.

[47] **Gouaidia L**., 2008 ; Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est Algérien, Université Badji Mokhtar, Annaba. 29p.

[48] **Otmani K**., 2013 ; Contribution à l'étude de la diversitéavienne nicheuse dans la subéraie de Hafir (Tlemcen), Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen. 32p.

[**49**] **Nzanzu R ; Ronald M.,** 2011 ; Caractérisation et évaluation de la dynamique érosive du bassin versant de Vihuli en RDC, Université catholique du Graben, RDC.

[50] **Mourjane M.,** 2010 ; Modélisation hydraulique de la vallée du tronçon urbain de Oued Jeouna (Taza, Maroc), Faculté des Sciences et Techniques, Fès.

[51]**Kisangala M .,** 2009**,** Analyse des paramètres morphométriques, climatologiques et hydrométriques du bassin du Kasaà¯ dans sa partie congolaise**,** Université de Kinshasa - Troisième Cycle (MSc).

[52]**El Hamzaoui L**., 2015, Utilisation du SIG pour la cartographie et l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin de l'Oued Larbaa (Taza, Maroc), Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès. 43p.

[53]**Abbas S**., 2014, Contribution à l'étude des indices de la biodiversité végétale au niveau des formations forestières de la daira d'Ouled Brahim (cas de la commune d'Ouled Brahim et Ain Soltane, Wilaya de Saida), Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen. 24p.

[54] **Yjjou M ; Bouabid R ; El Hmaidi A ; Essahlaoui A ; El Abassi M .**, 2014. Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. The International Journal Of Engineering And Science (IJES), issue 8, vol 3, 3p.

[55]**Riad S**., 2003, Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc, Université Ibnou Zohr d'agadir, Maroc. 31p

[56]**Ait Elkadi M ; El kedmiri A.,** Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du barrage Mly Abdellah (Haut atlas occidental, Maroc), Université de Maroc.

[57]Rapport de l'étude sur l'érosion des sols MUSLE ; Unité hydrographique Aquin-Saint Louis du Sud, 5p.

[58] **Roose E.,** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), Service des sols - ressources, aménagement et conservation.

[59] **Sadjania D**., 2015, Cartographie des risques d'érosion pouvant impacter la qualité de l'eau de la Gimone, Université de Toulouse.

[60] **Sadiki A ; Bouhlassa S ; Auajjar J ; Faleh A ; Macaire J**., 2004, Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, n°26. 71p

[61] **Markhi A ; Laftouhi N ; Soulaimani A ; Fniguire F**, 2015, Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. Application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc), European scientific journal, vol.11, no.29.p

[62]**Meliho M ; Khattabi A ; Mhammdi N ; Hongming Z**., 2016, Cartographie Des Risques De L'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Révisée Des Pertes En Sols, La Télédétection Et Les Sig Dans Le Bassin Versant De L'ourika (Haut Atlas, Maroc) , Europeen Scientific Journal , vol.12, No.32,.281p.

[63]**Mostephaoui T ; Merdas S ; Sakaa B ; Hanafi M.T ; Benazzouz M.T**., 2013, Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol a l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'el Hamel (Boussaâda) Algérie. Journal algérien des régions arides.138p

[64] **Khali Issa L ; Ben Hamman Lech-Hab K ; Raissouni A ; El Arrim A.,** 2016, Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental), Laboratoire d'Environnement, d'Océanologie et de Ressources Naturelles. Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, BP 416, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc. 2784p.

[65] **Toumi S ; Meddi M. ; Mahé Gil ; Brou Y.T**., 2013, Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG, Hydrological Sciences Journal, vol 58, n°7.1549p

[66]**R.P. Stone ; D. Hilborn,** 2000, Equation universelle des pertes en terre (USLE) ,1p.

[67]**Cherni S ; Samaali H.,** 2012, Estimation des paramètres de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et du SIG : cas du bassin-versant de l'Oued Tlil(Nord-Est de la Tunisie), Revista de géomorphologie, vol.14.32p.

[68] **Bouguerra S ; Bouanani A**., 2016, Cartographie qualitative de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique : Cas du bassin versant oued Boukiou (nord-ouest de l'Algérie), Étude et Gestion des Sols, Volume 23, 96P.

[69] **J.M. van der ; Jones R.J.A ; Montanarella L.,** 2000, Estimation du risque d'érosion en Italie, European Soil Bureau.8p.

[**70**] **Onotamba kondjo P**., 2007 ; Topographie et cartographie géoréférencée de différents types de végétation des inventaires du bloc UH 48 de la Réserve de Biosphère de Luki/Bas-Congo/ RDC, Université de Kinshasa, Congo.

[71] **Antoine D**., 2016, Travaux Pratiques sur les Systèmes d'Information Géographique - SIG - Initiation à ArcGIS, Université de Liège (ULg).

[72]**Babacar K.B**., Qu'est-ce que Arcgis desctop

Sites internet :

[*Site web* 1] https://geo.valdemarne.fr/portail/sites/default/files/quest-ce_quun_sig_.jpg (Date de consultation: Mars 2017)

[*Site web* 2] http://www.sig-geomatique.fr/sig-sig.html (Date de consultation : Mars 2017)

[*Site web* 3] http://www.esrifrance.fr/sig2.asp (Date de consultation : Mai 2017)

[*Site web* 4] http://nuagemotsclesferriercassezl3.unblog.fr/ (Date de consultation : Avril 2017)

[*Site web* 5] https://sites.google.com/site/pastoraldz/cartographie-gps/initiation-au-systeme-d-information-geographique/definitions-des-s-i-g (Date de consultation : Avril 2017)

[*Site web* 6] http://www.ecosociosystemes.fr/aridite.html (Date de consultation : Mars 2017)

[*Site web* 7] http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116 (Date de consultation: Mais 2017)

[*Site web* 8] http://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-google-earth-3988/ (Date de consultation: Mai 2017)