

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB – BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE L'EAU ET ENVIRONNEMENT



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Ressources hydrauliques

Par

AMEDDAH Hamza

Intitulé :

**Impact du changement de l'occupation du sol à différents
scenarios sur l'évolution de l'érosion hydrique**

Devant le jury, composé de :

Mr. HADDAD Ali	MCB	Président
Mr. BOUZERIA Housseyn	MCB	Promoteur
Mr. KHELFI Mouhamed El Amine	MCB	Examineur

Blida, Juin 2021

Résumé. L'écosystème mondial est gravement touché par l'augmentation du taux d'érosion des sols et de transport de sédiments. Le changement de l'occupation des sols est considéré comme la cause responsable de l'érosion hydrique et du transport des sédiments. Cette étude vise à estimer l'effet de l'occupation des sols sur le potentiel érosif au cours des 3 décennies (1992, 2002 et 2012), en utilisant l'équation universelle de perte en sol révisée (RUSLE) basé sur le système d'information géographique (SIG). Différents facteurs ont été analysés pour étudier l'effet de chaque facteur, notamment le facteur R, le facteur K, le facteur LS, et le facteur de couvert végétal sur le processus d'érosion. Les cartes générées montrent les changements de la gravité de la perte en sol dans le bassin versant étudié. Les résultats trouvés montrent qu'environ 5 % de la superficie était soumis à un risque d'érosion très fort en l'an 1992 qui est passé à presque 16 % en l'an 2012. Une augmentation de terres nues (de 16% en 38%) a été observée au cours des 30 ans, d'autre part, une diminution de couverture végétale, ce qui montre que les activités humaines affectent la zone d'étude. Ces résultats aideront les décideurs de contrôler la déforestation et de prendre d'autres mesures nécessaires pour minimiser le taux d'érosion des sols.

Mot clé. Occupation des sols ; Changement ; RUSLE ; SIG ; Erosion ; Bassin versant.

Abstract. The global ecosystem is severely affected by increasing rates of soil erosion and sediment yield. The change in land use is considered to be the cause responsible for water erosion and sediment yield. This study aims to estimate the effect of land use on erosive potential over 3 decades (1992, 2002 and 2012), using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) based on the Geographic Information System (GIS). Several factors were analyzed to study the effect of each factor, including R factor, K factor, LS factor, and vegetation cover factor on the erosion process. The generated maps show the changes in the severity of soil loss in the studied watershed. The results found show that about 5% of the area was subject to a very high risk of erosion in the year 1992 which rose to almost 16% in the year 2012. An increase in bare land (from 16% in 38%) has been observed over the past 30 years, on the other hand, a decrease in vegetation cover, which shows that human activities are affecting the study area. These findings will help policymakers to control deforestation and take other necessary actions to minimize the rate of soil erosion.

Keyword. Land use; Change; RUSLE; GIS; Erosion; Watershed.

ملخص. يتأثر النظام البيئي العالمي بشدة من خلال زيادة معدلات تآكل التربة ونقل الرواسب. يعتبر التغيير في استخدام الأراضي هو السبب المسؤول عن تآكل المياه ونقل الرواسب. تهدف هذه الدراسة إلى تقدير تأثير استخدام الأراضي على إمكانية التعرية على مدى العقود الثلاثة (1992 و 2002 و 2012)، باستخدام المعادلة العالمية لتعرية التربة المعدلة (RUSLE) استنادًا إلى النظام المعلومات الجغرافية (GIS). تم تحليل عوامل مختلفة لدراسة تأثير كل عامل، بما في ذلك عامل الامطار R، عامل التربة K، عامل التوبوغرافيا LS، وعامل الغطاء النباتي على عملية التعرية. تظهر الخرائط الناتجة التغييرات في شدة فقدان التربة في مستجمعات المياه المدروسة. تبين النتائج التي تم العثور عليها أن حوالي 5% من المساحة كانت معرضة لخطر الانجراف الشديد في عام 1992 الذي ارتفع إلى ما يقارب 16% في عام 2012. وقد تم زيادة مساحة الأراضي العارية (من 16% في 38%). لوحظ على مدى الثلاثين سنة الماضية، من ناحية أخرى، انخفاض في الغطاء النباتي، مما يدل على أن الأنشطة البشرية تؤثر على منطقة الدراسة. ستساعد هذه النتائج صانعي القرار في السيطرة على إزالة الغابات واتخاذ الإجراءات الضرورية الأخرى لتقليل معدل تعرية التربة.

الكلمات مفتاحية. استخدام الأراضي، التغيير RUSLE، نظم المعلومات الجغرافية، التعرية، الحوض المائي.

Dédicaces



*Avant tout à mes chers parents, qui m'ont soutenue durant
toutes ces années de formation.*

A toute la famille Ameddah.

A toute la famille Mellak

*A toutes les meilleures personnes qui m'aiment et qui m'aident
dans ma vie, sans oublier ses familles.*

*A tous mes amies et toute ma famille de l'université Saad Dahlab Blida.
Et a toute la promotion 2020/2021 de la spécialité ressources hydrauliques*



AMEDDAH .H

Remerciements



Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon encadreur Monsieur **Bouzeria Housseyn** de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé judicieusement.

Je tiens à remercier en particulier, tous le corps enseignants et qui veillent sur notre bonne formation.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Pour finir, j'adresse mes vifs remerciements à mes parents pour leur soutien constant et leur présence quotidienne tout au long de mes études.

Je n'y serais pas arrivée sans eux et j'espère qu'ils trouveront en ce modeste travail, la récompense de tout ce qu'ils m'ont enseigné.



Sommaire

Résumé..... I
Abstract.....I
Dédicace.....II
Remerciements.....III
Sommaire.....IV
Liste des tableaux.....VI
Liste des figures.....VII
Introduction générale.....1

Chapitre I. Recherche bibliographique sur l'érosion

I.1 Introduction..... 3
I.2 Définition : 3
I.3 Processus de l'érosion hydrique 3
 I.3.1 Le détachement..... 4
 I.3.2 Le transport..... 4
 I.3.3 La sédimentation..... 5
I.4 Les différents types d'érosion 6
 I.4.1 L'érosion éolienne : 6
 I.4.2 L'érosion aratoire ou mécanique sèche : 6
 I.4.3 L'érosion hydrique : 7
I.5 Causes d'érosion et facteurs de résistance du milieu..... 8
I.6 Impact de l'érosion dans différentes régions..... 9
I.7 Facteurs de l'érosion hydrique..... 9
 I.7.1 Les activités humaines : 9
 I.7.2 La régression du couvert végétal : 10
 I.7.3 Les facteurs climatiques : 10
 I.7.4 Les facteurs géomorphologiques et hydrologiques 10
I.8 Conséquences de l'érosion hydrique en Algérie..... 11
I.9 Moyens de lutte contre l'érosion 12
I.10 Modélisation de l'érosion hydrique 12
 I.10.1 La modélisation de l'érosion hydrique par le modèle de Wischmeier 12
 I.10.2 L'équation universelle des pertes en terre modifiée (MUSLE) : 14
 I.10.3 L'équation universelle des pertes en terre révisée (RUSLE) : 14
I.11 Conclusion 14

Chapitre II. Description générale de la zone d'étude

II.1	Introduction.....	15
II.2	Situation géographique.....	15
II.3	Sols et végétation.....	16
II.3.1	Type de Sols :.....	16
II.3.2	Couvert végétal.....	17
II.4	Analyse des pentes.....	18
II.5	Les caractères physiques et morphologiques.....	19
II.5.1	Coefficient de forme.....	19
II.5.2	Rectangle équivalent.....	20
II.5.3	Le relief.....	20
II.5.3.1	Courbe hypsométrique.....	20
II.5.3.2	Indice de pente global.....	22
II.5.3.3	Dénivelée spécifique DS.....	23
II.5.3.4	Intégrale hypsométrique.....	23
II.5.4	Paramètres physiographiques.....	23
II.5.4.1	Densité de drainage Dd.....	24
II.5.4.2	Fréquence des talwegs.....	24
II.5.4.3	Rapport de confluence.....	25
II.5.4.4	Rapport des longueurs.....	25
II.5.4.5	Coefficient de torrentialité.....	25
II.5.4.6	Temps de concentration.....	25
II.6	Analyse climatique.....	26
II.6.1	Précipitation.....	26
II.6.2	Températures.....	29
II.6.3	Diagramme ombrothermique.....	30
II.7	Conclusion.....	30

Chapitre III. Matériels et méthodes

III.1	Méthodologie.....	32
III.1.1	Facteur R.....	33
III.1.2	Facteur K.....	34
III.1.3	Facteur LS.....	35
III.1.4	Facteur C.....	37
III.1.5	Facteur P.....	38
III.2	Conclusion.....	38

Chapitre IV. Discussion des résultats

IV.1	Introduction.....	39
IV.2	Facteur R.....	39
IV.3	Facteur K.....	40
IV.4	Facteur LS.....	41
IV.5	Facteur C.....	42
IV.6	Facteur P.....	44
IV.7	Estimation des pertes de sols.....	44
IV.7.1	Année 1992.....	45
IV.7.2	Année 2002.....	46
IV.7.3	Année 2012.....	47
IV.8	Conclusion.....	49
	Conclusion générale.....	50
	Références bibliographiques.....	54

Liste des tableaux

Tableau I.1.	Formes d'érosion hydrique selon la profondeur.....	8
Tableau I.2.	Processus de dégradation, causes, les facteurs de résistance du milieu.....	8
Tableau II.1.	Classes des pentes et pourcentages des surfaces occupées du bassin versant...19	
Tableau II.2.	Classes d'altitudes et surfaces cumulées.....	21
Tableau II.3.	Classification du relief selon Ig de l'O.R.S.T.O.M.....	23
Tableau II.4.	Classification du relief selon Ds.....	23
Tableau II.5.	Résultats de la classification du réseau hydrographique selon STRAHLER....	24
Tableau II.6.	Récapitulatif des caractéristiques du bassin versant.....	26
Tableau II.7.	Caractéristiques des stations pluviométriques.....	27
Tableau II.8.	Tmax, Tmin et Tmoy au niveau de la station Soumaa.....	29
Tableau III.1.	Calcul de facteur K selon la texture de sol.....	35
Tableau III.2.	Le facteur P en fonction de la pente (Shin, 1999).....	38
Tableau IV.1.	Indices de l'érosivité des pluies R calculés à partir des stations pluviométriques sur l'ensemble du bassin versant.....	40
Tableau IV.2.	Classe de facteur K et pourcentage de surface.....	41
Tableau IV.3.	Pourcentages des surfaces occupées par chaque classe d'érosion.....	45

Listes des figures

Figure I.1. Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau, ou effet splash d'après Leguédou (2003).....	4
Figure I.2. Le transport des particules dans un cours d'eau.....	5
Figure I.3. Le mécanisme de sédimentation.	6
Figure II.1. Situation géographique de la zone d'étude.....	16
Figure II.2. Extrait de la carte des sols d'Algérie sur une échelle 1/500 000	17
Figure II.3. Changement de l'occupation du sol pendant les années 1992, 2002 et 2012.....	18
Figure II.4. Carte des pentes	19
Figure II.5. Courbe hypsométrique du bassin versant	21
Figure II.6. Carte hypsométrique du bassin versant.....	22
Figure II.7. Carte de réseau hydrographique du bassin versant.....	24
Figure II.8. Variabilité des pluies moyennes annuelles des stations pluviométriques	28
Figure II.9. Carte des pluies moyennes annuelles.	28
Figure II.10. Répartition mensuelle des températures.....	29
Figure II.11. Diagramme pluvio-thermique.....	30
Figure III.1. Organigramme de la méthodologie	33
Figure III.2. Carte de facteur L	36
Figure III.3. Carte de facteur S.	36
Figure III.4. Carte des indices NDVI.	38
Figure IV.1. Carte de facteur d'érosivité des pluies	39
Figure IV.2. Carte de facteur d'érodibilité des sols.	41
Figure IV.3. Carte de facteur topographique.	42
Figure IV.4. Cartes des facteurs de couverture végétale	43
Figure IV.5. Répartition des classes de facteur du couvert végétal.	43
Figure IV.6. Carte de facteur de pratique antiérosif.	44
Figure IV.7. Carte du risque érosif (Année 1992).	46
Figure IV.8. Carte du risque érosif (Année 2002).	47
Figure IV.9. Carte du risque érosif (Année 2012).....	48
Figure IV.10. Distribution des classes de risques érosifs (1992, 2002 et 2012).	48

Introduction générale

Le phénomène de l'érosion épuise la capacité de stockage des réservoirs et des barrages, ce qui diminue finalement la capacité de production d'électricité. Il perturbe également la production agricole et la vie aquatique en polluant l'eau des rivières. Il existe de nombreux facteurs influençant l'érosion du sol, notamment la pente, l'élévation, les précipitations, la densité de drainage, la lithologie. Cependant, l'occupation des terres et les changements climatiques sont les deux facteurs plus importants qui affectent le transport des sédiments vers les rivières. Il est prédit que les actions de l'homme perturberont de manière significative le climat et l'occupation des sols. Par conséquent, il est très important d'évaluer l'effet de ces changements sur le potentiel d'érosion. Selon les recherches faites, il a été observé que les caractéristiques du paysage sont responsables d'environ 65% à 74% des changements dans le rendement en sédiments et l'érosion des sols. Les changements des débits dans les cours d'eau dus à l'occupation des terres augmentent l'intensité de l'érosion des sols. Habituellement, on observe que les zones avec plus de prairies sont moins vulnérables à l'érosion des sols, alors que les terres arables sont plus sensibles. Le changement de l'occupation des sols est le principal facteur d'influence qui contribue à l'augmentation du taux d'érosion. Il nuit à l'environnement en perturbant l'approvisionnement en eau, la capacité du bassin de stockage, le rendement agricole et de la disponibilité de l'eau douce dans la région.

Au cours des dernières années, plusieurs modèles ont été mis au point pour prédire l'érosion. Par conséquent, l'estimation des facteurs d'érosion et les zones exposées aux risques d'érosion du sol peut être très utile pour identifier l'échelon et le degré des risques afin, d'établir des mesures de conservation et les plans de gestion de l'eau et du sol (Belasri .A et Lakhouili .A, 2016). L'utilisation des méthodes classiques pour évaluer les risques d'érosion des sols est coûteuse et prend du temps. L'intégration des modèles existants de l'érosion du sol, les données de terrain et les données fournies par les techniques de télédétection et les systèmes d'informations géographiques (SIG) semble être un atout pour d'autres études (Fernandez et coll. 2003; Gitas et al, 2009; Xu et coll, 2009; Ganasri .B.P et Ramesh .H, 2016). Les chercheurs ont développé de nombreux modèles de prévision qui permettent d'estimer la perte de sol et d'identifier les zones où des mesures de conservation ont le plus grand impact sur la réduction de la perte de sol pour les évaluations de l'érosion du sol (Angima et al 2003).

Pour l'estimation de la perte annuelle moyenne de sol, le modèle empirique de Wischmeier USLE et ses versions modifiée et révisée (MUSLE et RUSLE) sont les plus populaires utilisés par les chercheurs, les ingénieurs et les planificateurs. En raison de sa simplicité, sa facilité d'utilisation et l'intégration de différents facteurs affectant l'érosion des sols, le modèle RUSLE est préféré à de nombreuses autres méthodes utilisées pour l'estimation de la perte de sol. Il se compose de six paramètres dont le facteur de longueur de pente (LS), facteur de pratiques antiérosifs (P), facteur d'érodabilité du sol (K), facteur de gestion de la couverture (C) et facteur d'érosivité de précipitations (R), qui permet de calculer

la perte moyenne annuelle de sol. La valeur de chaque facteur est adaptée pour les données statistiques et empiriques avec l'intégration du SIG ou est tiré de la littérature.

Dans cette étude, on a fait appel à la télédétection et aux systèmes d'information géographiques (SIG) pour évaluer et cartographier l'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol révisée RUSLE dans un bassin versant du centre en Algérie. RUSLE est le modèle dominant appliqué dans le monde entier pour l'estimation des pertes en sols, en raison de sa facilité d'application et la compatibilité avec le SIG (Millward et al 1999; Jain et al 2001 ; Jasrotia, A.S, Singh R, 2006; Dabral et coll, 2008 ; Kouli et al 2009; Pandey et al 2009; Bonilla et al 2010). Bien qu'il s'agit d'un modèle empirique, non seulement il prédit les taux d'érosion des bassins versants non jaugés en utilisant les caractéristiques et les conditions hydro climatiques des bassins versants, mais présente également l'hétérogénéité spatiale de l'érosion du sol qui est trop faisable à des coûts raisonnables et une meilleure précision dans les grandes superficies (Angima et al 2003). Ce dernier est une multiplication des cinq facteurs spécifiques qui décrivent les caractéristiques du bassin versant à savoir l'érosivité de la pluie, l'érodibilité du sol, l'inclinaison et la longueur de pente, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisés pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. L'intégration des cartes thématiques des facteurs du modèle RUSLE dans le SIG permet de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol dans le bassin. Enfin, la validation reste le principal problème pour les modèles du risque d'érosion, en raison de l'indisponibilité des données pour comparer les résultats d'évaluations avec les pertes de sol actuelles (Lazzari et al 2015).

Chapitre I : Recherche Bibliographique sur l'érosion

I.1 INTRODUCTION

Tous les sols sont naturellement soumis à l'érosion qui renvoie à l'amincissement de la couche arable d'un champ sous l'effet des forces érosives naturelles de l'eau et du vent, ou sous l'effet des activités agricoles, comme le travail du sol. Quel que soit la cause de l'érosion eau, vent ou travail du sol, dans tous les cas, le sol : se détache, se déplace, puis se dépose. La couche arable, fertile, vivante et riche en matière organique, est emportée ailleurs sur le terrain, où elle s'accumule avec le temps, ou hors du terrain, dans les réseaux de drainage. L'érosion du sol abaisse la productivité de la terre et contribue à la pollution des cours d'eau, des terres humides et des lacs adjacents.

Le phénomène peut être lent et passer relativement inaperçu. Il peut aussi se produire à un rythme alarmant et causer alors de lourdes pertes de terre arable. Le compactage du sol, l'appauvrissement du sol en matière organique, la dégradation de la structure du sol, un mauvais drainage interne, des problèmes de salinisation et d'acidification du sol sont d'autres causes de détérioration du sol qui en accélèrent l'érosion.

I.2 DEFINITION :

L'érosion hydrique est un phénomène complexe causé généralement par l'action combiné de pluie et de ruissellement qui ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol. l'érosion peut être définie comme un phénomène de déplacement des matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, du vent, de l'homme ou simplement de la gravité (Girard et al., 2005). C'est un phénomène naturel caractérisé par des processus de détachement des particules du sol par les précipitations et le ruissellement, leur transport par les eaux superficielles qui ruissellent et leur dépôt le long du trajet suivi par les eaux superficielles sur les versants et dans les cours d'eau (Foster et Meyer, 1972). La pluie est l'agent causal primaire des phénomènes d'érosion par son énergie cinétique qui fait intervenir à la fois la hauteur et l'intensité des précipitations pendant un certain temps (Roose, 1973). Alors que le ruissellement est l'agent de transport de particules arrachées, il entraîne le sol érodé vers les drains agricoles et les fossés dont il peut altérer la qualité, puisque les particules de sol en suspension augmentent la turbidité de l'eau. En dehors de la pluie et le vent, l'érosion du sol peut aussi être causée par l'intensification de l'utilisation des terres, travail du sol, les structures de construction, le surpâturage, l'utilisation des terres et la déforestation (Roose et al., 1993). L'érosion des sols en termes réels met en danger la sécurité alimentaire, la productivité subsistance du sol, la surface stockage de l'eau, la qualité de l'eau de surface, la beauté du paysage et l'équilibre écologique naturel. Sa solution réside dans l'adaptation des pratiques de conservation (Toumi, 2013).

I.3 PROCESSUS DE L'EROSION HYDRIQUE

L'érosion hydrique est le résultat de trois principaux mécanismes : le détachement des particules, leur transport et leur sédimentation.

I.3.1 Le détachement

Le détachement des particules du sol se produit sous l'action de deux agents érosifs, la pluie et le ruissellement :

La pluie, qui est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols (Ellison, 1944 ; Ekeren, 1950). L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface (Boiffin, 1976; Le Bissonais, 1988). Le potentiel érosif de la pluie est désigné par le terme général d'érosivité (Bergsma et al. 1996), qui dépend de l'intensité et des caractéristiques des gouttes de pluie comme la taille et la vitesse.

L'impact des gouttes de pluies sur la surface de sol provoque le détachement des particules de sol qui seront éjectés de la surface et transportés, avant de se déposer à la surface. Ce rejaillissement d'eau et de sol est désigné par le terme de **splash**. Sur les surfaces horizontales, le rejaillissement des particules par le "splash" ne provoque pas d'érosion, alors que sur les terrains en pente, il se produit un transport préférentiel vers le bas des versants (De Ploey, 1968).

Le ruissellement est un moteur essentiel de l'érosion, il détache, transporte et exporte des fragments de sol (Leguédois, 2003). Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement.



Figure I.1. Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau, ou effet splash d'après Leguédois (2003).

I.3.2 Le transport

Les particules de sols détachés sont transportées vers le bas des pentes sous l'action des écoulements de surface par suspension, saltation et traction sur des distances plus ou moins importantes. Quand la charge en sédiments est inférieure à la capacité de transport de l'écoulement, les particules de sol peuvent être ainsi transportées et dans le cas contraire, les sédiments en excès se déposent. L'exportation des sédiments par le ruissellement est grandement influencée par le fait que la lame d'eau soit soumise ou non à l'impact des gouttes de pluie. Pour un écoulement en nappe peu épais (érosion diffuse), la pluie tend à augmenter

la concentration et la granulométrie de la charge solide exportée (Chaplot & Le Bissonais, 2000 ; Beuselinck et al, 2002).

Il existe d'autres facteurs moins importants qui favorisent le déplacement et le transport des particules de sol tels que la gravité et le vent.

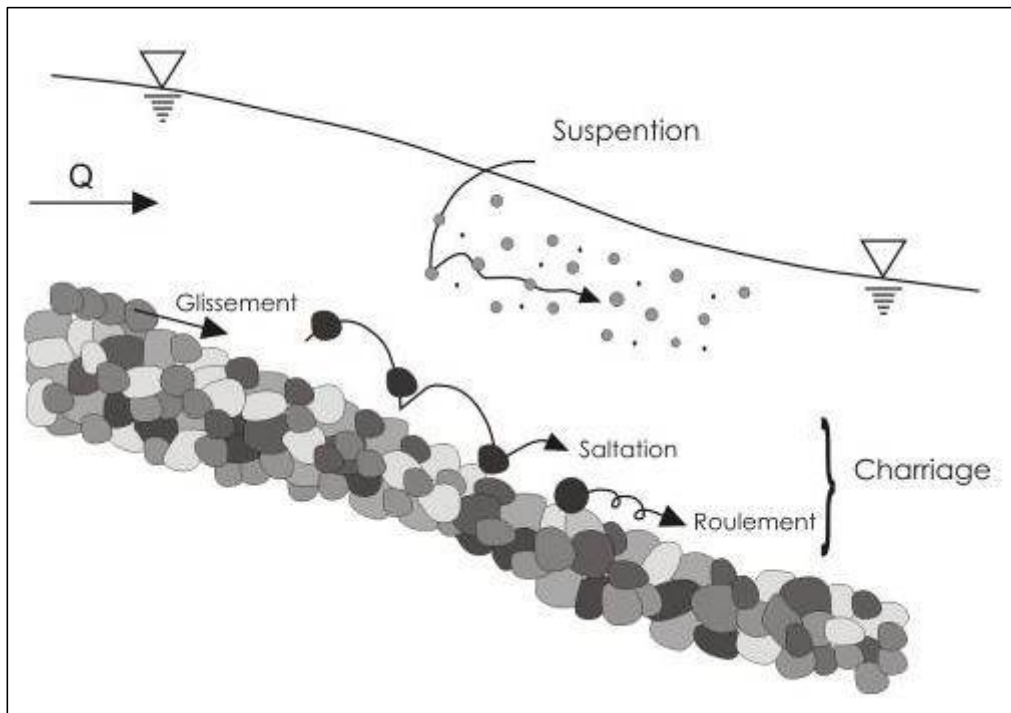


Figure I.2. Le transport des particules dans un cours d'eau.

I.3.3 La sédimentation

La sédimentation est le mécanisme qui contrôle et peut limiter la quantité de sédiments exportés. Elle se produit quand la capacité de transport de l'écoulement est dépassée. Cette troisième phase du processus d'érosion hydrique apparaît donc par exemple lors du ralentissement du ruissellement. Les particules les plus grossières sont les premières à sédimenter, les plus fines étant transportées plus loin. On parle de tri granulométrique (Kaurak Leite 1990).

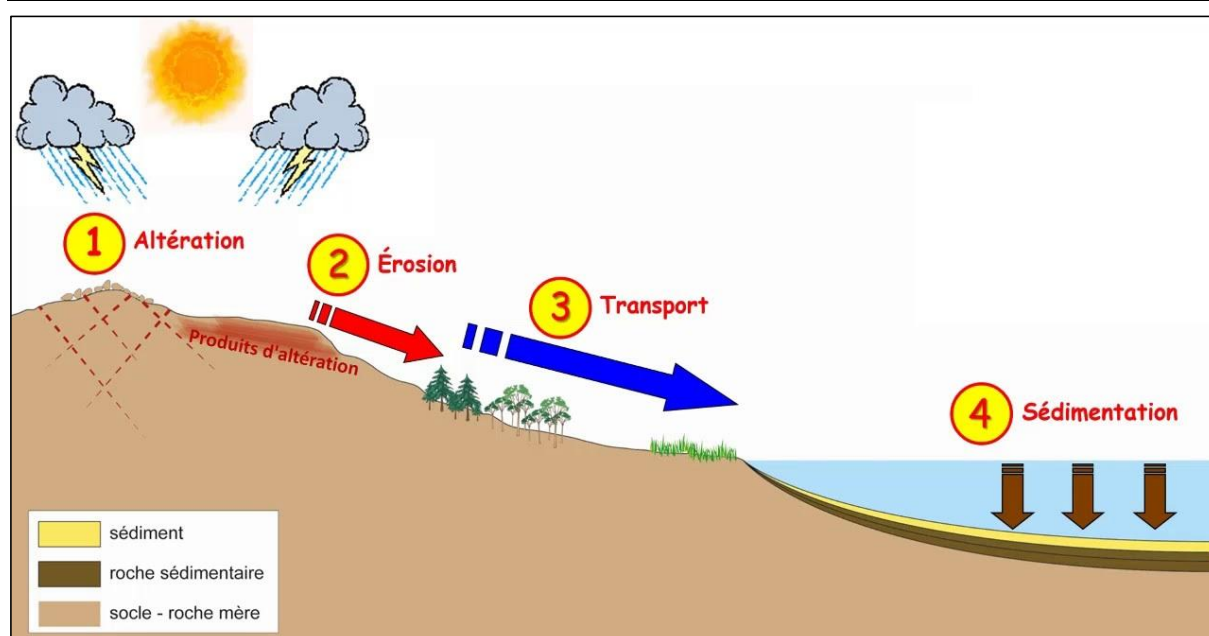


Figure I.3. Le mécanisme de sédimentation.

I.4 LES DIFFERENTS TYPES D'EROSION :

Il existe trois types d'érosion

I.4.1 L'érosion éolienne :

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire subhorizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou se dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière (Heusch, 1988).

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

I.4.2 L'érosion aratoire ou mécanique sèche :

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

❖ **Facteurs d'érosion mécanique**

Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont :

- Le type d'outil ;
- La fréquence des passages ;
- La pente.

Plus la pente est forte, plus les mottes de terres détachées roulent vers le bas. C'est ce qui explique quelques sommets des collines sont souvent décapés.

I.4.3 L'érosion hydrique :

L'élément déclencheur de ce type d'érosion est la pluie, qui provoque le détachement des particules élémentaires du sol. Il existe plusieurs types de l'érosion hydrique :

✓ **Erosion en nappe :**

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 où l'eau ne peut pas concentrer. Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules. La battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante vers l'aval que vers l'amont. Si l'on réalise une moyenne sur l'ensemble des gouttelettes, la vitesse sera dirigée de l'amont vers l'aval. A partir de là, il y aura formation de flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre ce qui entraînera un ruissellement en nappe. Ce type d'érosion en nappe dépend de :

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement ;
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules ;
- La durée des pluies et /ou l'humidité avant les pluies, c'est-à-dire l'état du sol.

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, les conséquences de l'érosion en nappe sont :

- Le nivellement de la surface du sol ;
- La s que lettisation des horizons superficiels ;
- Le décapage entraînant l'apparition de taches claires.

✓ **Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles**

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 : selon la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent. Le tableau I.1, donne les différentes formes d'érosion hydrique (Roose.1994).

Tableau I.1. Formes d'érosion hydrique selon la profondeur.

Profondeur	Forme d'érosion
Quelques centimètres	Griffes
>10cm	Rigoles
10 à20 cm quelques mètres de large	Nappe Ravinant
>50cm	Ravines

I.5 CAUSES D'EROSION ET FACTEURS DE RESISTANCE DU MILIEU :

Le sol est souvent menacé par les problèmes d'érosion. En géomorphologie est le processus de dégradation et de transformation du relief, et donc des roches, l'érosion, qui est causé partout agent externe (donc autre que la tectonique). C'est ainsi qu'on distingue par exemple l'érosion hydrique qui est causée par l'eau et l'érosion éolienne causée par le vent.

Le tableau I.2 présente les processus de dégradation, les causes ainsi que les facteurs de résistance du milieu (Roose, 1994).

Tableau I.2. Processus de dégradation, causes, les facteurs de résistance du milieu.

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

I.6 IMPACT DE L'EROSION DANS DIFFERENTES REGIONS :

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'un site à un autre. Kanwar en 1982 a montré au congrès de l'Association Internationale des Sciences du Sol à New Delhi que sur 13.500 millions d'hectares de surface exondées dans le monde, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (soit 1.500 millions d'hectares). Ces dix dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'à atteindre 7 à 10 millions d'ha/an, suite à l'érosion, à la salinisation ou à l'urbanisation. A ce rythme, il faudrait trois siècles pour détruire toutes les terres cultivables. L'érosion est donc un problème sérieux à l'échelle mondiale mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde, comme c'est le cas au Maghreb et plus particulièrement en Algérie.

Aux Etats-Unis, vers 1930, 20 % des terres cultivables ont été gravement endommagées par l'érosion suite à la mise en culture inconsidérée des prairies de la Grande Plaine par les colons européens, peu habitués à ces conditions semi-arides. C'est l'époque sombre des "dust bowl", nuages de poussières qui obscurcissaient complètement l'air dans la Grande Plaine. Ces phénomènes, impressionnant l'opinion publique, ont poussé le Gouvernement américain à former un grand service de conservation de l'eau et des sols mettant à la disposition des agriculteurs volontaires un appui technique et financier dans chaque canton. Parallèlement, un réseau de stations de recherche a été mis en place, qui, trente ans plus tard, aboutit à la formulation de l'équation universelle de perte en terre, connue sous le nom de USLE (Wischmeier, 1978). En 1986, Lovejoy et al remarquent qu'après cinquante ans d'investissement massif en hommes et en moyens, encore 25 % des terres cultivées perdent plus de 12 t/ha/an, limite reconnue tolérable. Le problème reste donc à l'ordre du jour, même si aujourd'hui on s'intéresse plus à la pollution et à la qualité des eaux qu'à la conservation des sols.

I.7 FACTEURS DE L'EROSION HYDRIQUE

Avant d'adopter l'une ou l'autre des méthodes de lutte antiérosive, il est souhaitable de revenir aux causes de l'érosion et aux facteurs qui en modifient l'expression. Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion. Par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie, de même que la dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Ainsi, pour caractériser l'influence du climat, l'énergie cinétique cumulée des pluies serait probablement le paramètre le plus pertinent, mais il n'est pas disponible, et on retiendra donc les hauteurs de pluie cumulée, pondérées par une information sur l'intensité des précipitations.

Bref, l'érosion résulte de l'interaction des facteurs suivants :

I.7.1 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.

- Les techniques culturales ;
- Le pâturage ;
- L'exploitation minière ;
- L'urbanisation.

I.7.2 La régression du couvert végétal

L'absence du couvert végétal expose le sol à l'action directe des gouttes de pluie. Or, ce ne sont pas les cimes qu'il faut regarder pour savoir si les arbres protègent efficacement les sols, c'est plutôt la végétation au sol et la litière (A. Smiri 1987). Les arbres forestiers ou les plantes cultivées protègent le sol contre l'érosion hydrique. En effet, celles-ci protègent le sol de l'action des gouttes de pluie et les racines maintiennent en place les particules emprisonnées dans un réseau racinaire dense qui accroît ainsi la résistance du sol au cisaillement et limite l'incision (www.ma.auf.org).

- Le défrichement ;
- L'incendie ;
- Le bois de feu.

I.7.3 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.

- Les précipitations ;
- Le ruissellement.

I.7.4 Les facteurs géomorphologiques et hydrologiques :

➤ 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 (A. Smiri 1987).

➤ 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.

➤ **La morphologie du terrain**

Les paramètres topographiques sont fondamentaux pour expliquer l'importance des phénomènes érosifs.

- La déclivité de la pente ;
- La longueur de la pente ;
- La forme de la pente ;

➤ **Le sol**

Les conséquences d'une averse sur l'érosion ne dépendent pas seulement de l'averse elle-même, mais aussi de la nature et de l'état de la surface du sol. Sur des sols fortement encroûtés et humides, une pluie avec une intensité de quelques [mm] par heure peut entraîner un ruissellement et de l'érosion. Lorsque le sol présente une meilleure structure, des intensités de pluies plus élevées sont nécessaires pour provoquer l'apparition de ruissellement et d'érosion. La stabilité structurale du sol dépend de différents facteurs, dont la texture et la teneur en matières organiques sont les plus importantes.

1.8 CONSEQUENCES DE L'EROSION HYDRIQUE EN ALGERIE

Les conséquences de l'érosion hydrique en Algérie sont dramatiques ; nous pouvons citer permis eux :

Réduction de la production agricole (pertes en sol agricole) ;

- ✓ Une dégradation spécifique dépassant les 5000 t/km²/an ;
- ✓ Une quantité de 120 millions de tonnes de sédiments rejeté en mer chaque année par les bassins tributaires de la méditerranée (Demmak, 1982) ;
- ✓ Un exode rural important ;
- ✓ Un rehaussement des lits des oueds provoquant par la suite des inondations, menace les voies de communication et les ouvrages d'arts,...
- ✓ L'envasement précoce des barrages en exploitation.

Bouraba, en 2002, dans une étude de synthèse a montré l'ampleur de ce fléau, tout en justifiant par la présentation des chiffres alarmants de dégradation spécifique dans le nord de l'Algérie. L'étude a porté sur plus de 35 bassins versants ; le calcul est établi sur des cycles hydrologiques différents, généralement, sur un cycle au moyen. L'érosion spécifique varie annuellement de 307 à 5453 t/km² dans le bassin de Cheliff, de 1557 à 9397 t/km² dans le côtiers Algérois, 3990 t/km² dans l'Isser, 248 t/km² dans le Soummam, 252 à 10375 t/km² dans le côtiers Constantinois, 742 t/km² dans le Sybouse, 782 t/km² dans Kebir Rhumel, 164 à 5153 t/km² dans le Chott Hodna, 794 à 2621 t/km² dans le haut plaine Constantinois, 838 à 1260 t/km² dans le Chott Melrhir, 938 t/km² dans le Cotiers Oranais et de 301 à 406 t/km² dans la Tafna.

I.9 MOYENS DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION

Les moyens de lutte utilisés surtout en Algérie sont :

- Le reboisement, la restauration des sols, l'implantation des banquettes, la création des petits barrages (retenues collinaires), la plantation des cultures suivant les lignes de niveau, la plantation des végétations à longue tige dans les oueds.

I.10 MODELISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE

I.10.1 La modélisation de l'érosion hydrique par le modèle de Wischmeier

L'équation universelle des pertes en terre (Universal Soil Loss Equation ou USLE) prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, du système cultural et des pratiques de gestion. L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes en terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple, sans toutefois tenir compte des pertes en terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol. Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence du système cultural et du système de gestion sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers. L'USLE peut servir à comparer les pertes en terre provenant d'un champ donné soumis à un système cultural et à un système de gestion particuliers, à des taux de « pertes en terre tolérables » ou encore aux pertes observées avec un autre système cultural ou un autre système de gestion, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles.

Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes en terre à un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à cet endroit. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs que donne l'USLE représentent avec plus de précision les moyennes à long terme. La topographie (LS), l'agressivité des précipitations (R), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C), les pratiques antiérosives (P), dont l'équation se présente sous la forme:

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

A : les pertes en sol annuelles moyennes possibles à long terme (t.ha.an).

R : l'indice d'érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h.an).

K l'indice d'érodibilité des sols (t.ha.h/ha.MJ.mm).

LS le facteur de déclivité (adimensionnel).

C le facteur de végétation (adimensionnel).

P le facteur de pratique de soutien (adimensionnel).

Facteur d'érosivité (R)

C'est l'indice d'érosivité des précipitations qui intègre deux variables :

- La quantité d'eau de pluie ;
- L'intensité maximale ou tenue sur une période prolongée.

Le facteur R est une mesure de la quantité annuelle totale de pluie érosive à un endroit donné et de la répartition de cette pluie sur l'année. Le facteur R varie selon l'énergie et l'intensité des averses, la quantité de pluie et d'eau de ruissellement pendant les diverses saisons de l'année.

Le facteur R traduit le pouvoir potentiel de la pluie ou du ruissellement de provoquer l'érosion du sol.

Facteur d'érodibilité du sol (K)

Le facteur d'érodibilité du sol (K) représente la résistance des particules du sol au détachement et au transport des particules par l'eau. Cet indice dépend également des caractéristiques intrinsèques du sol et de leur évolution sous l'influence des techniques culturales (Bouguerra, 2018). C'est la mesure quantitative de la sensibilité ou de résistance inhérente du sol à l'érosion et de l'incidence de sol sur la production de ruissellement (sur le volume et le débit de ruissellement). En général, K varie de 0,7 pour les sols les plus fragiles à 0,01 pour les sols les plus stables.

Facteur topographique (LS)

Ce facteur traduit l'effet de l'angle et de la longueur d'accumulation. Le facteur LS est donc une mesure des effets de l'angle, de la longueur et de la complexité de la pente sur l'érosion ; il est lié aux paramètres de terrain. Le facteur de pente a une incidence majeure sur l'érosion. En effet :

-il y a une relation étroite entre l'inclinaison de la pente et le ruissellement. Le ruissellement augmente au fur et à mesure que la pente devient plus inclinée et la perte de sol augmente plus rapidement que le ruissellement. Cela est dû à une vitesse d'écoulement qui s'accroît avec la pente ;

-l'érosion causée par le ruissellement s'intensifie avec l'augmentation de la longueur de pente et une grande accumulation d'eau de ruissellement sur les pentes les plus longues augmente les possibilités de détachement et de transport.

Facteur de végétation (C)

Le couvert végétal protège les sols et assure l'amortissement des gouttes de pluie, le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. Le facteur C est défini comme le rapport entre les pertes en sols nus sous des conditions spécifiques et les pertes en sols correspondants aux sols sous système d'exploitation (Wischmeier et Smith, 1978 ; Abdelkader El Garouani *et al.*, 2008).

Ce facteur varie de 0 (couverts les plus denses) à 1 (pas de couverture du sol).

Facteur de conservation (P)

Le facteur P est une mesure des effets des pratiques visant à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion. Les pratiques de soutien courantes sont : la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternantes, l'aménagement de terrasses et l'aménagement de voies d'eau gazonnées.

I.10.2 L'équation universelle des pertes en terre modifiée (MUSLE) :

L'équation universelle des pertes en sol USLE ne s'applique que pour des données pluviométriques moyennes à l'échelle annuelle. Elle n'est donc pas valable à l'échelle de l'averse. Le modèle MUSLE a été mis au point pour estimer les transports solides de chaque averse. Il ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie mais du volume ruisselé (Williams, 1975). L'équation MUSLE se présente sous la forme suivante pour un événement pluvieux donné sur un bassin versant :

$$SY = 11.8 (Q \times q_p)^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \quad (I.2)$$

SY : production en sédiments d'un événement particulier (tonnes) ;

Q : volume de ruissellement consécutif à l'averse (m³) au niveau du bassin versant ;

q_p: débit de pointe (m³/s) ;

L : longueur du versant ;

Les autres termes, K, C, P et LS sont les mêmes que ceux de l'USLE. L'utilisation de MUSLE nécessite de la métrologie pour connaître les débits et volumes ruisselés.

I.10.3 l'équation universelle des pertes en terre révisée (RUSLE) :

Le modèle RUSLE propose la même formule que l'USLE mais plusieurs améliorations sont réalisées pour la détermination des différents facteurs. Ceci inclus, une approche différente de l'érodibilité des sols K, une nouvelle équation pour le facteur topographique LS, et une nouvelle valeur pour le facteur C et les pratiques de conservation (Renard et al,1997).

La méthode retenue par USLE et MUSLE pour calculer l'influence de la topographie LS ne considère qu'une pente simple alors que RUSLE permet de diviser une pente irrégulière en plusieurs segments. Le facteur des pratiques culturales C est calculé dans l'USLE pour une culture selon la période de croissance et la quantité de résidus au sol, alors que la méthode retenue par RUSLE fait plutôt intervenir l'érosivité des pluies et le rapport de pertes de sol. C'est le rapport entre la perte de sol d'une pratique spécifique durant la période culturale et la perte d'un sol nu dans un contexte similaire (Renard et al, 1997). Le terme représentant l'érodibilité des sols K est quant à lui dépendant de la saison.

I.11 Conclusion

Étant donné le grand nombre de modèles disponibles, la question est alors : quel modèle, où et quand ? Le principal déterminant d'un modèle approprié pour explorer l'aspect de l'érosion et des sédiments. Cela permettra d'identifier les processus qui nécessitent une représentation explicite dans le modèle, ainsi que la résolution spatiale et temporelle au cours de laquelle un modèle doit être appliqué.

De là, la détermination du lieu modèle pour une application nécessite l'examen de l'adéquation du modèle aux conditions locales, exigences de données, la complexité du modèle, la précision et la validité du modèle, les hypothèses du modèle, la variation spatiale et temporelle, les composantes du modèle et les objectifs de l'utilisateur (s) dumodèle.

Chapitre II : Description générale de la zone d'étude

II.1 Introduction

L'étendue du territoire national connaît de différentes formes de dégradation de son milieu naturel avec des particularités spécifiques à chaque territoire (DGF,2009).Le ministère de l'Agriculture et du Développement rural (MADR, 2011) estime à 50millions d'hectares des surfaces menacées par la dégradation due à la désertification et l'érosion hydrique, soit plus de 20% de la superficie totale du pays qui dépasse les 238millions d'hectares, en conséquence, 14 millions d'hectares de zones de montagne au Nord sont touchés par l'érosion hydrique, 32 millions d'hectares en zones steppiques sont directement affectés et/ou menacés par la désertification et 4,1 millions d'hectares de forêts soumises aux menaces des effets des changements climatiques (S.Merdes,2013).

La région étudiée est représentative de l'évolution de l'érosion observée dans les bassins versant en Algérie, Dans ce chapitre on va présenter les caractéristiques physiques et climatiques de notre zone d'étude.

II.2 Situation géographique :

Situé au Nord centre de l'Algérie, le bassin d'étude fait partie du grand bassin versant côtiers algérois Ouest. Il s'étend de 2° 38' 49.076'' à 3° 17' 21.242'' de longitude Est, et de 36° 12' 16.581'' à 36° 48' 56.761'' de latitude Nord. Il est limité au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est dans sa partie haute par le bassin hydrographique Isser et la partie basse par le sous bassin de côtiers cap Matifou, au sud par le bassin de Cheliff et à l'Ouest par les sous bassins de l'oued Djer Bou roumi et côtiers Sahel. Il occupe une superficie totale de 2436 km², qui regroupe cinq sous bassins à savoir Côtiers Bouzaréah, Oued Harrach Maritime,Oued Harrach Amont, Oued Mazafran et Oued Chiffa.

Le bassin a une forme plus au moins allongée d'une orientation Sud-Ouest / Nord-Est et une topographie très hétérogène (figure II.2). Deux principaux cours d'eau alimentent la zone d'étude, Oued Harrach et Oued Chiffa qui rejoint l'Oued Mazafran avant de son embouchure dans la mer Méditerranée.

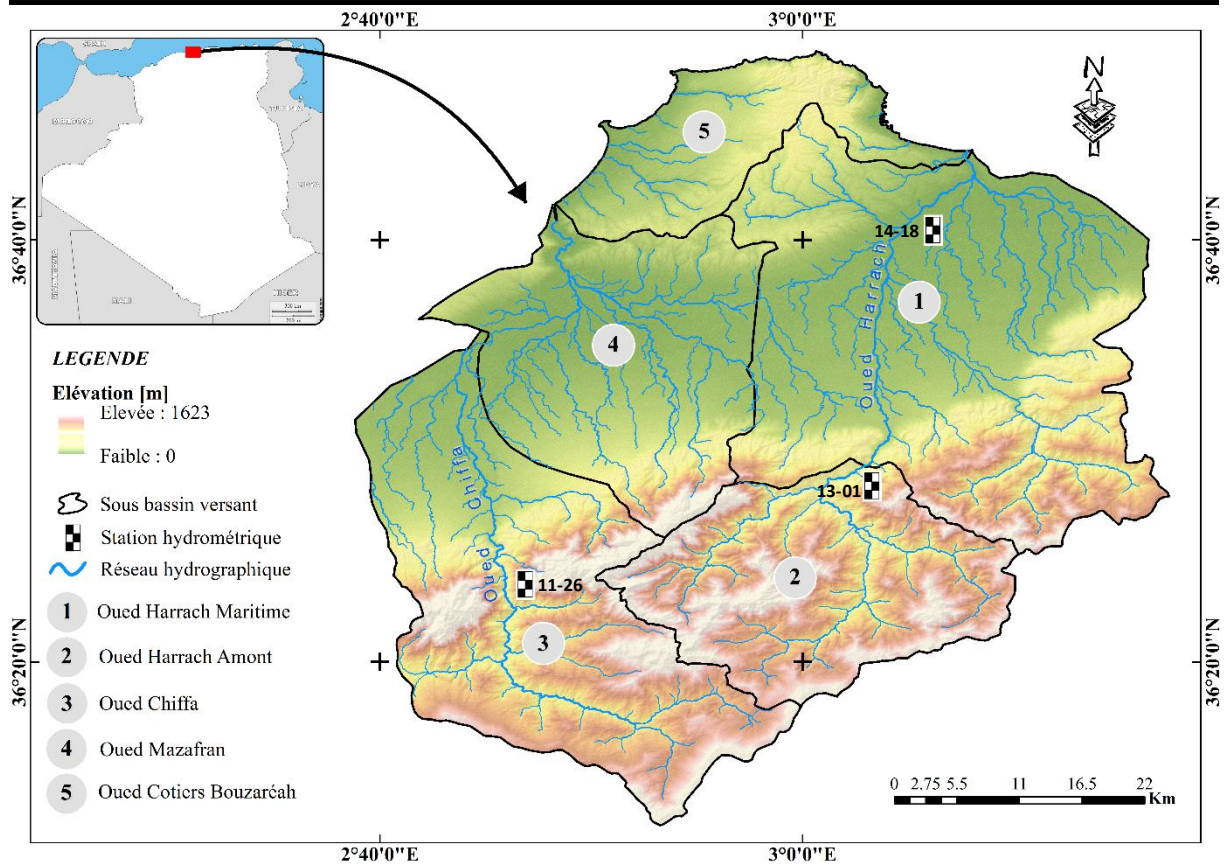


Figure II.1. Situation géographique de la zone d'étude.

II.3 Sols et végétation

II.3.1 Type de Sols :

Le bassin d'étude est constitué par cinq types de sols (figure II.2) : Les sols calcaires présentent la plus grande partie du bassin. En seconde classe, les sols insaturés et les sols alluviaux présentent presque les mêmes pourcentages de couverture. Ils sont concentrés à la partie Sud vers le centre du bassin versant. Les sols de marais avec une faible dominance se développent dans les secteurs central du bassin versant.

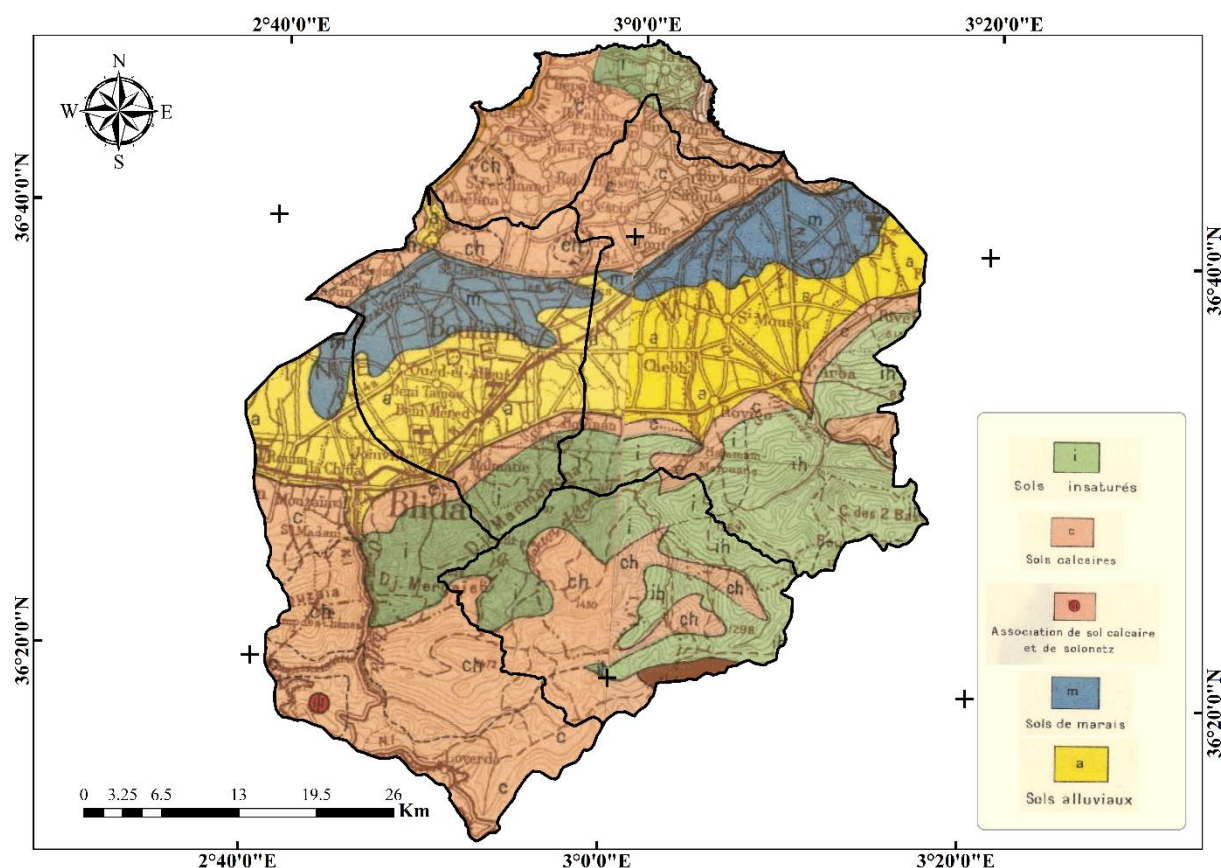


Figure II.2. Extrait de la carte des sols d'Algérie sur une échelle 1/500 000.

II.3.2 Couvert végétal.

La végétation joue un rôle très important dans les études des transports solides. Elle est la résultante des facteurs physico géographiques tel que le climat, le relief, la lithologie aux quels s'ajoute le facteur humain (défrichement, mise en cultures et reboisement).

Cette dernière protège le sol contre l'érosion par son action mécanique du système racinaire qui fait accroître la cohésion de l'érosion humifère et augmenter la porosité. Elle améliore la capacité d'infiltration du sol, diminue le ruissellement superficiel et apporte au sol de la matière organique, soit naturellement dans une agriculture continue. L'humus ainsi produit, améliore considérablement la structure du sol et sa cohésion. D'autre part, la présence d'une couverture végétale empêche la pluie de tomber directement sur le sol et diminue par conséquent l'effet de l'érosion pluviale. La couverture végétale se raréfie du Nord au Sud où prédominent les montagnes.

Les cartes de l'occupation des sols de la zone d'étude ont été établies à partir des classifications des indices de végétation par différences normalisées (NDVI), extraites des images satellitaires LandSat7 ETM+ et LandSat5 TM, à l'aide d'outil ArcGis. La classification de la végétation est réalisée suivant les conditions de seuillage suivantes :

- NDVI < - 0.1 : Eau ;
- 0.1 < NDVI < 0.15 : Sol nu ;
- 0.15 < NDVI < 0.25 : Végétation clairsemée ;

$0.25 < \text{NDVI} < 0.4$: Végétation moyennement dense ;

$\text{NDVI} > 0.4$: Végétation dense.

Les classes d'occupation du sol ont été choisies selon la réflectance spectrale des objets.

La valeur maximale reflète le pourcentage le plus élevé de la couverture végétale et représente aussi le bon état de la végétation. Les régions sans végétation (sol nu et plans d'eau) ont une faible valeur du NDVI. Le NDVI intervient également pour assister la classification d'une image lors du choix de zones d'échantillonnage (Caloz et Collet, 2001).

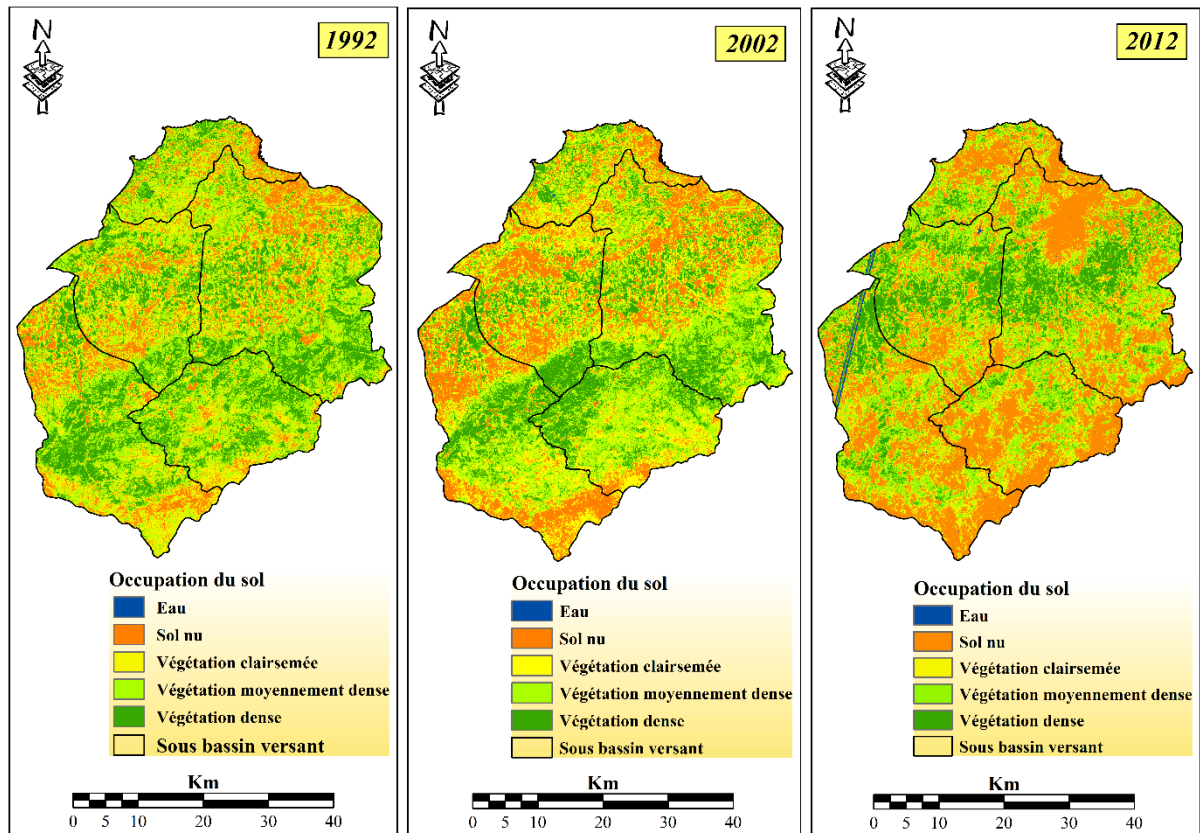


Figure II.3. Changement de l'occupation du sol pendant les années 1992, 2002 et 2012.

II.4 Analyse des pentes.

Le modèle numérique d'élévations (SRTM 1-arc seconde) a été utilisé pour extraire la carte des pentes, à l'aide d'outils ArcGis. L'examen du tableau II.1, montre qu'environ 47 % des terrains du bassin versant présentent des pentes assez faibles (<10 %), et que 14 % des terrains ont des pentes moyennes de 10 à 20 %. Alors que les pentes forte à très fortes représentent 40 % de la surface du bassin versant, ils sont représentés par le nord et Beaucoup plus dans le sud de bassin versant.

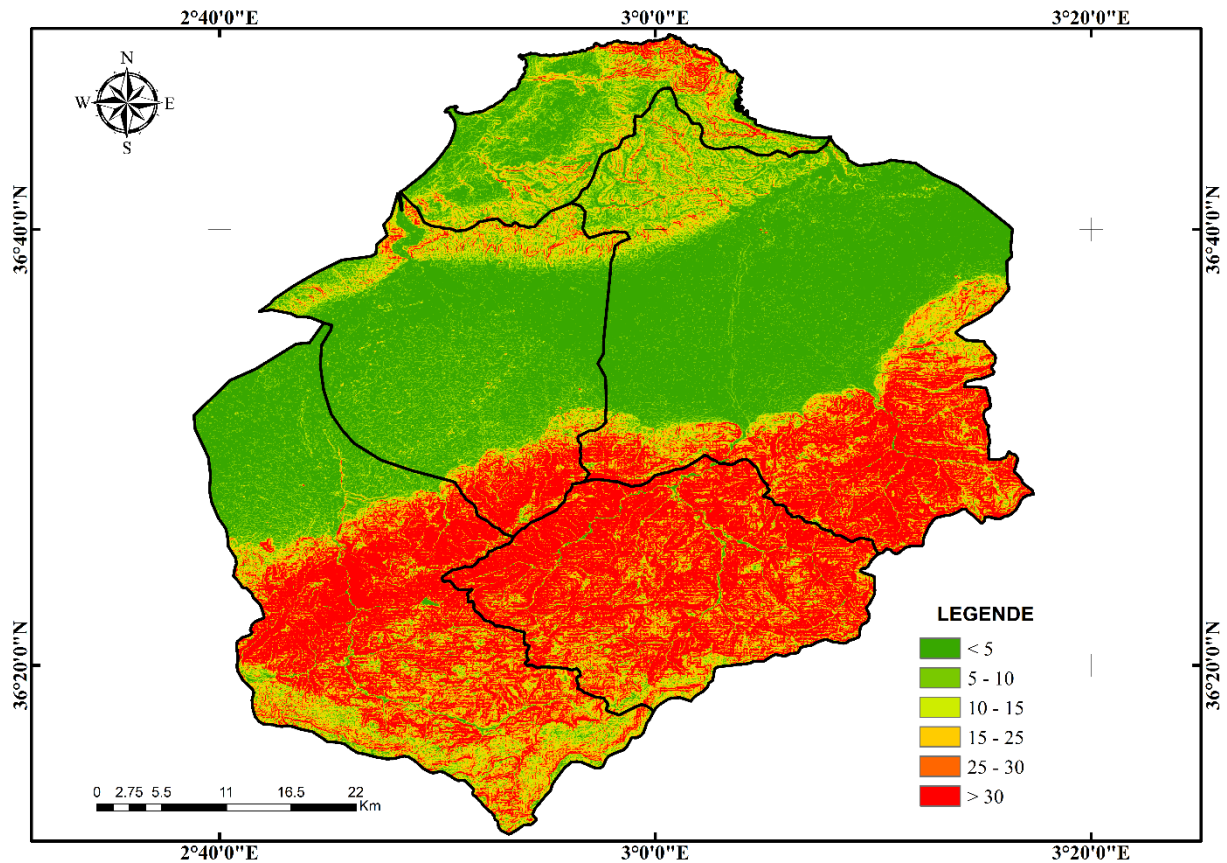


Figure II.4. Carte des pentes.

Tableau II.1. Classes des pentes et pourcentages des surfaces occupées du bassin versant.

Classe des pentes	Surface (km ²)	Surface (%)
0 – 5	838.13	34.41
5 – 10	286.60	11.77
10 – 20	339.47	13.94
20 – 35	407.88	16.74
> 35	563.92	23.15
Total	2436	100

II.5 Les caractères physiques et morphologiques.

II.5.1 Coefficient de forme

Indice de Gravelius « K_c » Appelé aussi indice de forme, cet indice caractérise la forme du bassin, il nous permet de faire une transformation purement géométrique en un rectangle de dimension L et l ayant la même surface que le bassin versant.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

P : le périmètre du bassin versant (Km) ;
S : la surface du bassin versant (Km²).

Si , K_c tend vers 1 : Le bassin est ramassé ;

Si, $K_c > 1$ le bassin est allongé.

Plus ce coefficient s'approche de 1, plus la forme de bassin versant sera ramassée et plus le temps de concentration des eaux seront court. Elle sera allongée dans le cas contraire.

II.5.2 Rectangle équivalent

C'est une transformation purement géométrique du bassin versant en un rectangle de dimensions L et l. Ce dernier permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement. La longueur "L" et la largeur "l" sont données par les expressions II.2 et II.3 :

$$L = K_c \frac{\sqrt{s}}{1.128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c}\right)^2} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$l = K_c \frac{\sqrt{s}}{1.128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c}\right)^2} \right) \quad (\text{II.3})$$

II.5.3 Le relief.

II.5.3.1 Courbe hypsométrique.

Vu que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude, il est intéressant d'étudier l'hypsométrie du bassin versant par tranche d'altitude.

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 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. Le but recherché ici, est la détermination de la classe de relief, les hauteurs moyennes, la médiane et le pourcentage des aires partielles entre les différentes courbes de niveau.

Tableau II.2. Classes d'altitudes et surfaces cumulées.

Classe d'altitude	Altitude moy.	Surfaces partielles		Surfaces cumulées		
		Hi - Hi-1	Hi [m]	Si [km ²]	Si [%]	ΣSi [km ²]
1623 – 1500	1561.5		2.86	0.12	2.86	0
1500 – 1350	1425		22.96	0.94	25.82	1
1350 – 1200	1275		45.25	1.86	71.07	3
1200 – 1050	1125		117.47	4.82	188.54	8
1050 – 900	975		201.85	8.29	390.39	16
900 – 750	825		225.75	9.27	616.14	25
750 – 600	675		202.58	8.32	818.72	34
600 – 450	525		154.73	6.35	973.45	40
450 – 300	375		111.75	4.59	1085.20	45
300 – 150	225		288.01	11.82	1373.21	56
150 – 0	75		1062.79	43.63	2436.00	100

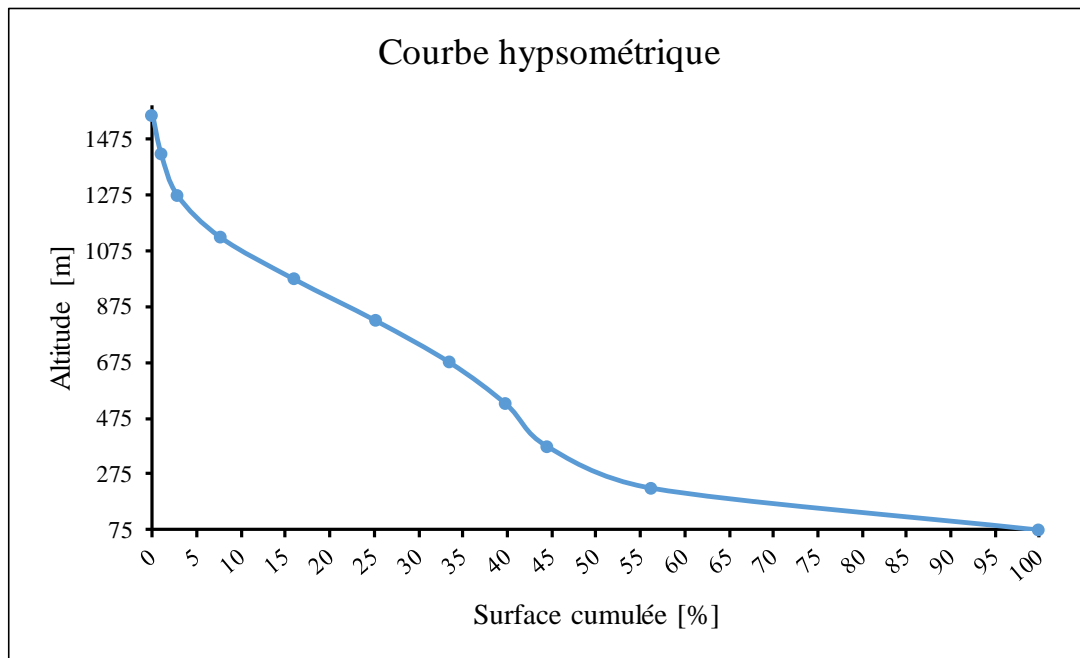


Figure II.5. Courbe hypsométrique du bassin versant.

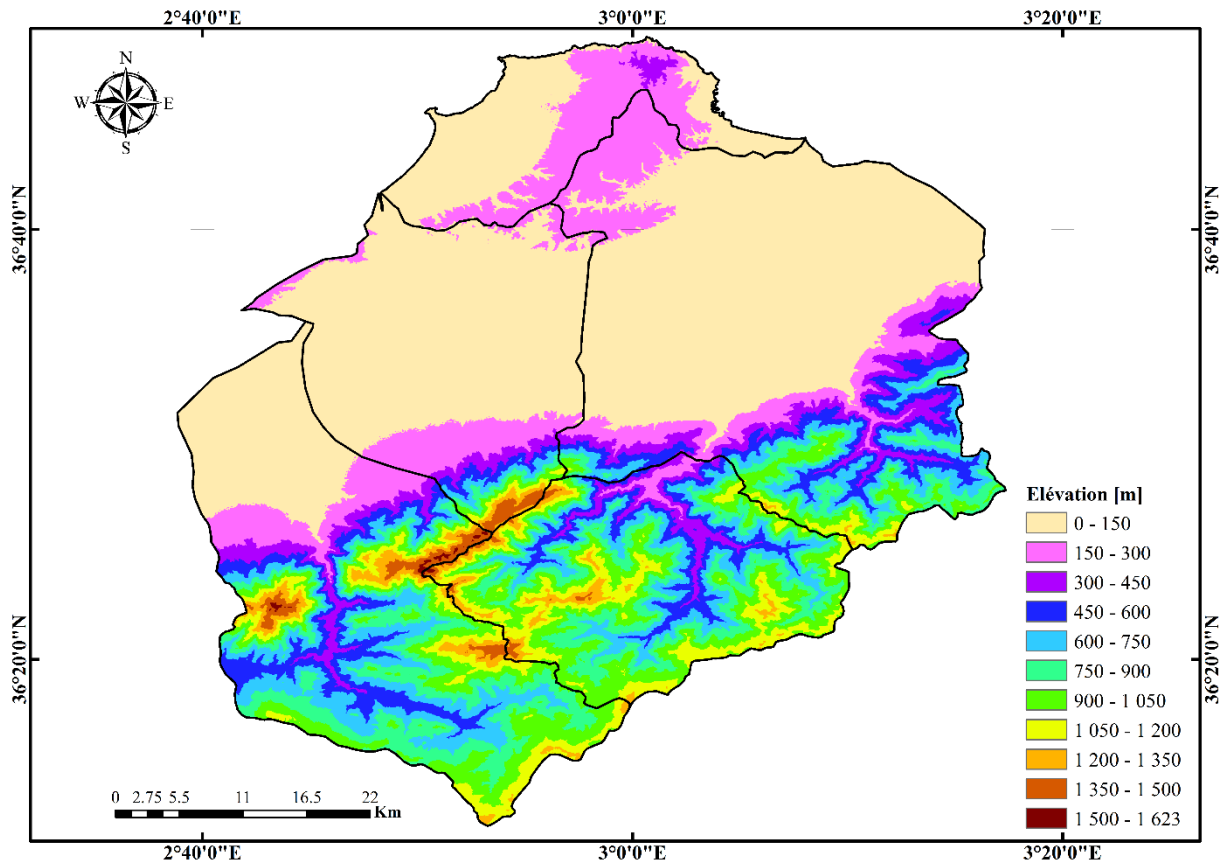


Figure II.6. Carte hypsométrique du bassin versant.

II.5.3.2 Indice de pente global

Il est utilisé pour la classification des bassins versants, cet indice est déterminé par la Formule :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%}$$

D : Dénivelée entre H5% et H95% en m

L : longueur du rectangle équivalent en Km

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$: sont respectivement Les altitudes correspondantes à 5 % et 95%.

L'indice de pente global sert aussi à classer le relief d'un bassin selon IRD, mais pour permettre une comparaison plus efficace et plus poussée du bassin, du point de vue du relief. Il est impératif de passer à la notion de la dénivelée spécifique.

Tableau II.3. Classification du relief selon I_g de l'IRD.

Relief très faible	$I_g < 0,002 \text{ m/Km}$
Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,00 < I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 < I_g < 0,5$
Relief très fort	$I_g > 0,5 \text{ m/Km}$

II.5.3.3 Dénivelée spécifique DS

Puisque l'indice de pente globale décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient.

$$D_s = I_g * S^{1/2} \quad (\text{II.5})$$

Tableau II.4. Classification du relief selon D_s .

Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$D_s > 500 \text{ m}$

II.5.3.4 Intégrale hypsométrique

L'intégrale hypsométrique () exprime le volume actuel du relief qui n'est pas encore consommé par l'érosion, elle est proche de 0 pour les bassins versants très érodé (profil concave) et tend vers le 1 pour les bassins très peu érodé (profil convexe). La valeur de l'intégrale hypsométrique est donc déterminée à l'aide de la relation (II...) développée en 1971 par PIKE et WILSON :

$$HI = \frac{H_{moy} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} * 100 \quad (\text{II.6})$$

II.5.4 Paramètres physiographiques

La détermination des paramètres physiographiques tels-que : la densité de drainage, la fréquence des talwegs élémentaires, le coefficient de torrentialité, les rapports de confluence et de longueurs des cours d'eau, le temps de concentration et la vitesse d'écoulement d'un bassin versant nécessite une classification du réseau de drainage selon la classification de STRAHLER (1957). Cette dernière a été obtenue pour le bassin (figure II.7, tableau II.10) après le traitement d'un modèle numérique de terrain (MNT) sous un système d'information géographique (ArcGIS).

536+

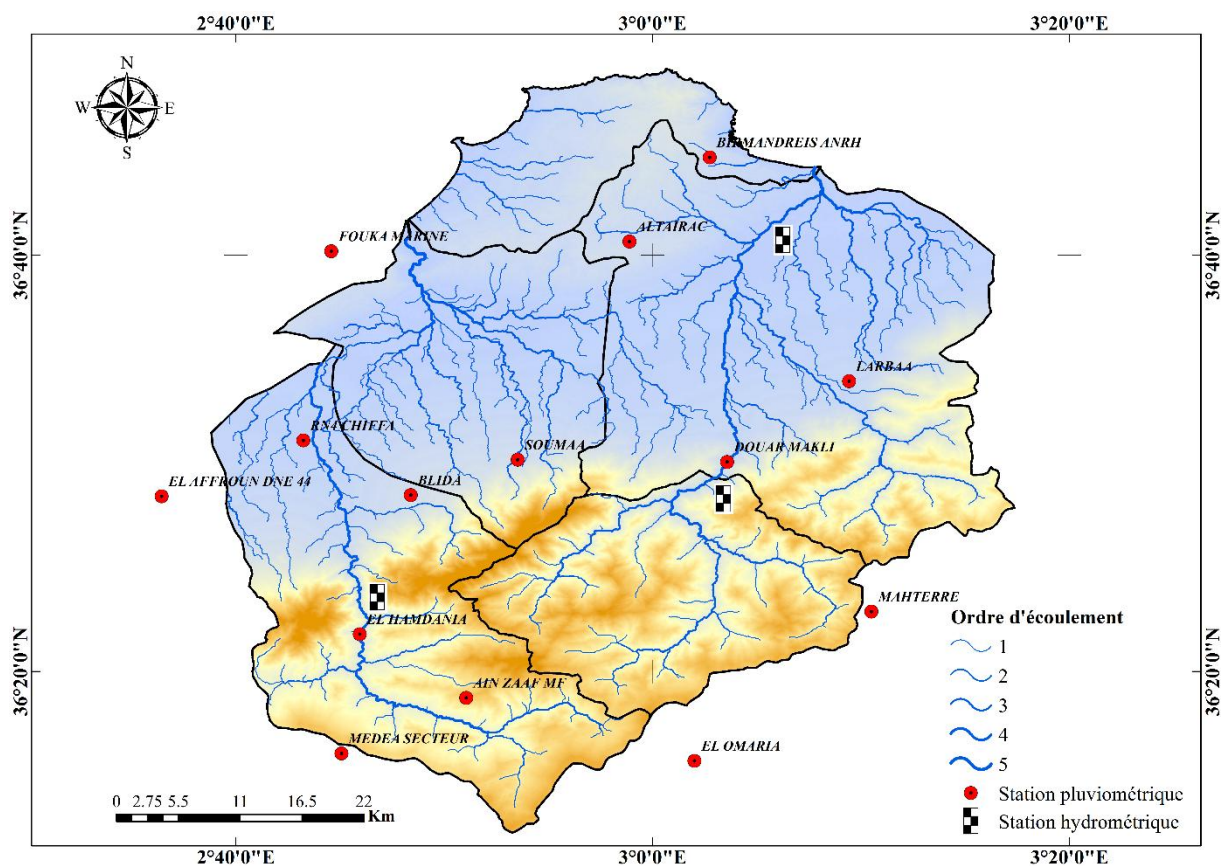


Figure II.7 : Carte de réseau hydrographique du bassin versant.

Tableau II.5. Résultats de la classification du réseau hydrographique selon STRAHLER.

Ordre d'écoulement	Nombre des talwegs	Longueur des talwegs (km)
1	822	1138.98
2	417	639.09
3	218	287.51
4	126	166.89
5	20	22.97
Total	1603	2255.45

II.5.4.1 Densité de drainage Dd

Elle est définie comme étant la longueur totale de tous les talwegs d'ordre i à n "Li", du bassin versant, rapportée à la surface totale " S " du bassin. Elle est donnée par l'expression II.7 et est exprimée en Km/Km².

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{s} \quad (II.7)$$

II.5.4.2 Fréquence des talwegs

Ce paramètre permet l'estimation de la grandeur de l'énergie érosive du cours d'eau.

$$F_t = \frac{N}{S} \quad (\text{II.8})$$

N : Nombre des talwegs d'ordre 1 ;
S : Surface totale du bassin versant.

II.5.4.3 Rapport de confluence

Le rapport de confluence R_c est égal au quotient du nombre de talwegs d'ordre n par celui des talwegs d'ordre supérieur (n + 1). Il est exprimé par la relation suivante :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

R_c : Rapport de confluence ;
 N_n : Nombre des talwegs d'ordre n ;
 N_{n+1} : Nombre des talwegs d'ordre suivant (n+1).

II.5.4.4 Rapport des longueurs

C'est le rapport de longueur des cours d'eau d'ordre N, par celle des cours d'eau d'ordre N+1. il se définit par la formule suivante :

$$R_L = \frac{L_N}{L_{N+1}} \quad (\text{II.10})$$

L_N : Longueur de cours d'eau d'ordre n ;
 L_{N+1} : Longueur de cours d'eau d'ordre n+1.

II.5.4.5 Coefficient de torrentialité

C'est le produit de la densité de drainage par la fréquence de thalwegs élémentaires.

$$C_t = F_t \cdot D_d \quad (\text{II.10})$$

Avec :

F_t : Fréquence des talwegs élémentaires ;
 D_d : Densité de drainage.

II.5.4.6 Temps de concentration (formule de GIANDOTTI)

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On peut l'estimer en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement.

$$T_C = \frac{4\sqrt{S} + 1.5LP}{0.8\sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}} \quad (\text{II.11})$$

LP : Longueur du cours d'eau principal en Km

Tableau II.6. Récapitulatif des caractéristiques du bassin versant.

Paramètre		Symbole	Résultat	Unité
Périmètre		P	250	Km
Surface		S	2436	Km ²
Coefficient de forme		Kc	1.42	/
Rectangle équivalent	Longueur	L	99.67	Km
	Largeur	l	24.44	Km
Indice de pente global		Ig	10.74	m/km
Dénivelée spécifique		D_s	529.84	m/km
Altitudes	Maximum	H_{max}	1623	m
	Moyenne	H_{moy}	417	m
	Minimum	H_{min}	00	m
Densité de drainage		D_d	0.93	Km ⁻¹
Fréquence de talweg		F_t	0.34	Km ⁻²
Rapport de confluence		Rc	1.97	/
Rapport des longueurs		R_L	1.78	/
Coefficient de torrentialité		C_t	0.31	/
Temps de concentration		t_c	16.69	heure

Les résultats des caractéristiques morphométriques, montrent que la densité de drainage est assez importante, de plus le coefficient de torrentialité semble moyen ceci est due certainement au nombre considérable de talwegs de premier ordre. Quant au temps de concentration, il semble important (long) puisque le temps qu'a mis une goutte d'eau pour arriver au point le plus éloigné de l'exutoire est 16.69 heures. Ceci, explique la complication des chenaux qui traversent les différentes structures et la forme allongée de bassin versant. La valeur élevée du coefficient de torrentialité (tableau II.10) correspond au bassin versant issu d'un secteur montagneux et pluvieux. L'examen du même tableau, montre aussi que le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief.

II.6 Analyse climatique

II.6.1 Précipitation

Pour caractériser le climat de la zone d'étude, on s'est basé sur 14 stations pluviométriques comportant de longues séries de données s'étalant de 1970/71 à 2011/12.

Neuf stations sont situées à l'intérieur du bassin, et le reste au voisinage. Le nombre de stations à l'intérieur est satisfaisant, en comparaison avec la superficie globale de bassin (environ 2436 km²). Il représente une moyenne d'un poste pour 270 km² environ. Le nombre élevé des lacunes aux échelles mensuelle et annuelle, le manque de fiabilité de certaines données statistiques et la faible densité du réseau d'observations météorologiques, ont été à l'origine d'une analyse des aspects fondamentaux du climat méditerranéen de bassin versant à partir des documentations collectées des différentes agences.

Pour résoudre ce problème de fiabilité des données, l'emploi d'outils statistiques et graphiques est nécessaire pour contrôler la qualité des échantillons pluviométriques et déceler l'anomalie qui pourrait les affecter en vue de leur homogénéisation.

La reconstitution des données manquantes dans les stations lacunaires est entrepris par trouver des corrélations entre les stations, d'où certaines stations de référence ont été choisies au titre de la série 1970/71-2011/2012, chacune d'entre elles servira de base de comparaison mois par mois avec un groupe de postes se trouvant au voisinage et dans des conditions climatiques comparables. Le tableau suivant représente les caractéristiques des stations pluviométriques utilisées dans cette étude.

Tableau II.7. Caractéristiques des stations pluviométriques.

Stations	Code	X (degrés décimaux)	Y (degrés décimaux)	Z (m)	Précipitations inter2+ annuelles (mm)
MEDEA SECTEUR	01-15-09	2.75	36.27	935	629.17
FOUKA MARINE	02-04-05	2.74	36.67	25	594.67
BIRMANDREIS ANRH	02-05-09	3.05	36.75	140	742.72
EL AFFROUN DNE 44	02-10-26	2.61	36.47	95	452.46
RN4 CHIFFA	02-11-05	2.72	36.52	58	564.19
AIN ZAAF MF	02-11-13	2.85	36.31	940	702.03
EL HAMDANIA	02-11-15	2.77	36.36	400	912.98
BLIDA	02-11-16	2.81	36.47	210	639.92
SOUMAA	02-12-34	2.89	36.50	177	787.58
LARBAA	02-14-03	3.16	36.57	100	659.78
DOUAR MAKLI	02-14-27	3.06	36.50	130	662.66
ALTAIRAC	02-14-43	2.98	36.68	20	575.69
EL OMARIA	09-02-01	3.03	36.26	790	440.62
MAHTERRE	09-02-02	3.18	36.38	875	549.62

Pour les stations qui couvrent la zone de bassin étudié, la moyenne annuelle varie entre 441 mm et 913 mm enregistrées respectivement aux niveaux des stations El Omaria (la zone la moins arrosée), et El Handania (la zone la plus arrosée).

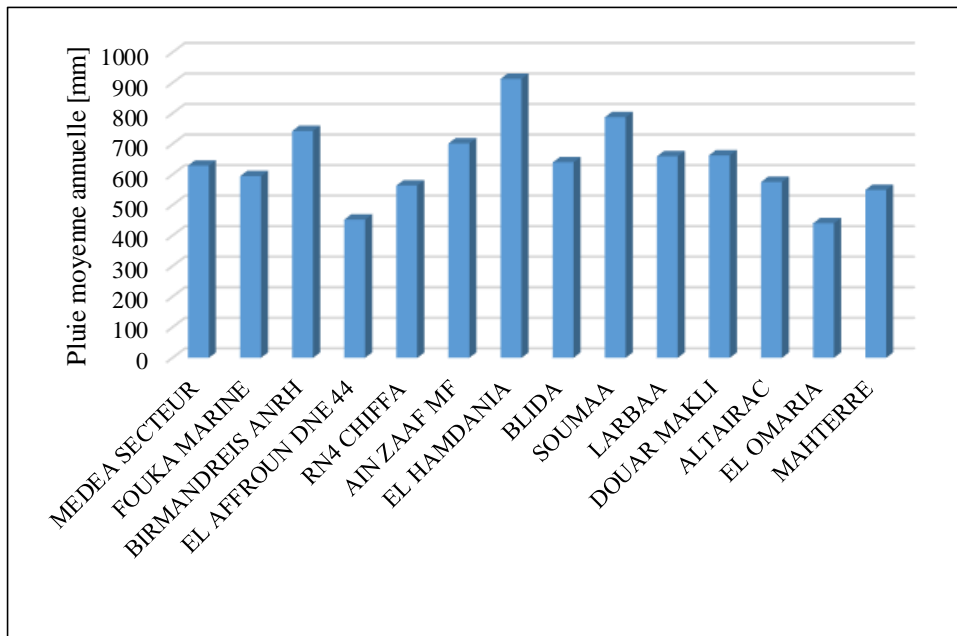


Figure II.8. Variabilité des pluies moyennes annuelles des stations pluviométriques.

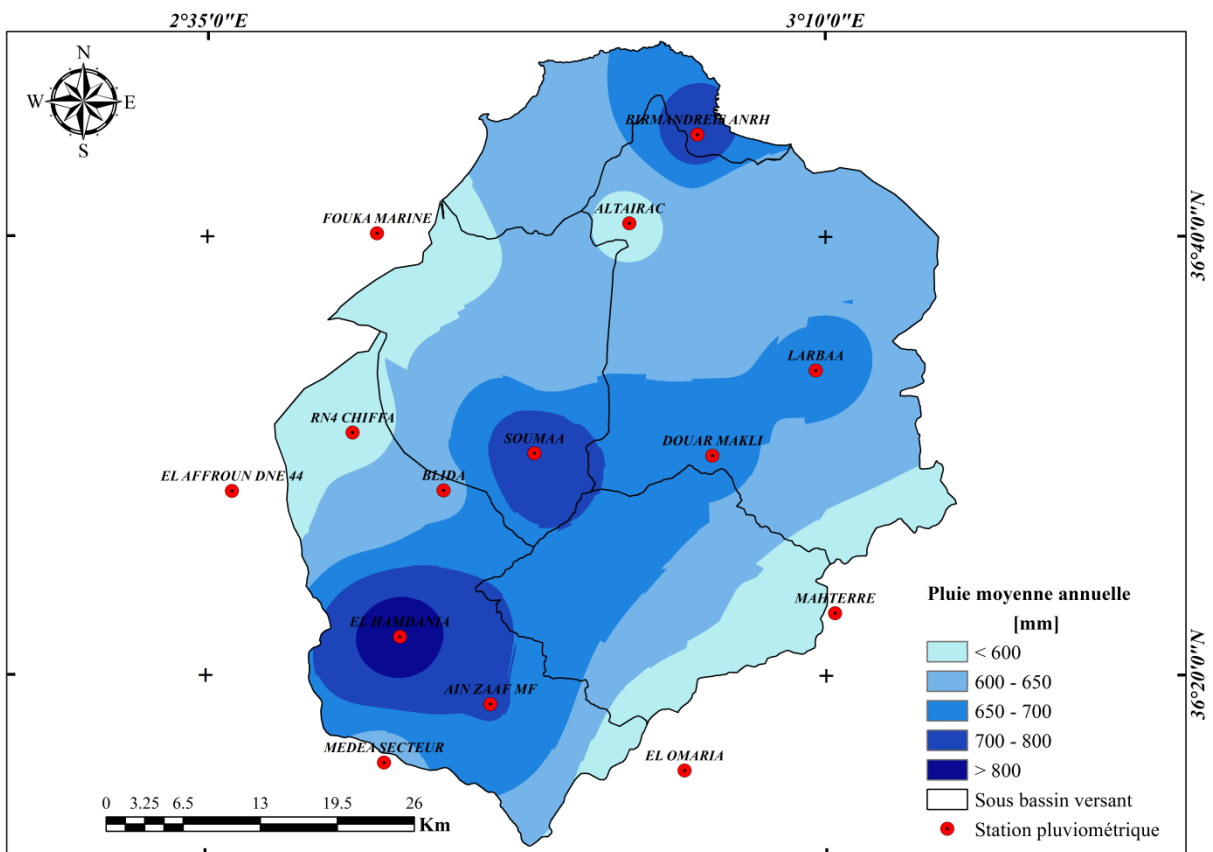


Figure II.9. Carte des pluies moyennes annuelles.

II.6.2 Températures

L'étude des températures est très importante pour l'estimation du bilan hydrologique, étant donné que la température est un facteur climatique indispensable qui contribue aussi à l'approche de l'évapotranspiration.

Au niveau des stations de notre zone d'étude, la mesure thermométrique est pratiquement absente, pour cela on a utilisé les données des observations effectuées au niveau des stations de Soumaa (période 2002/2003 jusqu'à 2017/2018).

Au bassin versant étudié, les températures moyennes annuelles sont supérieures aux moyennes mensuelles de Novembre à Avril. Ces mois représentent les périodes les plus froides et humides de l'année notamment les mois de Janvier et Février. Les périodes chaudes de l'année débutent à partir du mois de Mai jusqu'à Octobre où les températures moyennes mensuelles dépassent les températures moyennes annuelles avec des valeurs maximales observées pendant Juillet et Août.

Tableau II.8. Tmax, Tmin et Tmoy au niveau de la station Soumaa.

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Tmoy	23.8	20.0	15.3	12.1	11.2	11.3	13.8	16.0	19.5	23.7	27.4	27.4
Tmax	30.1	26.2	20.1	16.8	16.1	16.0	19.1	21.8	25.6	30.9	34.6	34.7
Tmin	18.6	15.2	11.3	8.2	7.2	7.1	9.0	10.9	13.9	16.6	21.0	21.4

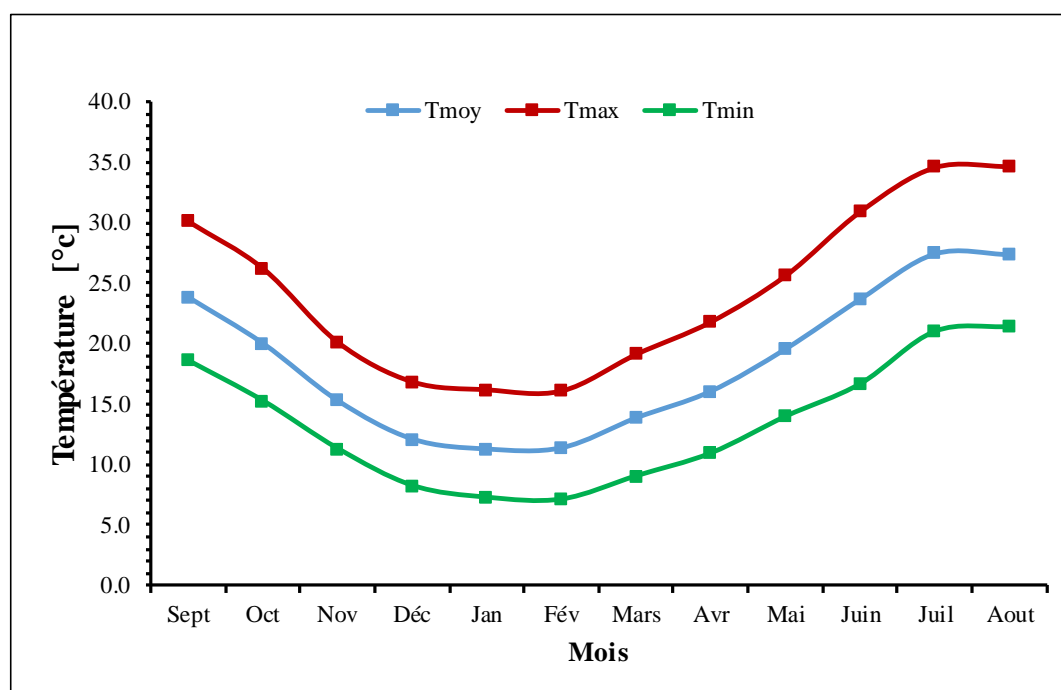


Figure II.10. Répartition mensuelle des températures.

II.6.3 Diagramme ombrothermique

Ce diagramme représente, sur un même système d'axes, la variation des températures et celle des précipitations moyennes mensuelles. Nous avons porté les valeurs des températures moyennes à l'échelle double des précipitations moyennes mensuelles sur l'axe des ordonnées, les différents mois de l'année figureront sur l'axe des abscisses (figure II.11).

L'utilisation de la méthode pluvio-thermique permettra, avec plus de précision, de déterminer les périodes humides et sèches. Les allures des courbes de variation des précipitations sont en opposition avec celles des variations des températures moyennes indiquant la présence, au niveau de la zone d'étude, de deux périodes, l'une humide présente une longue période oscille entre le début Octobre jusqu'à fin de Mai et l'autre sèche pour le reste des mois de l'année.

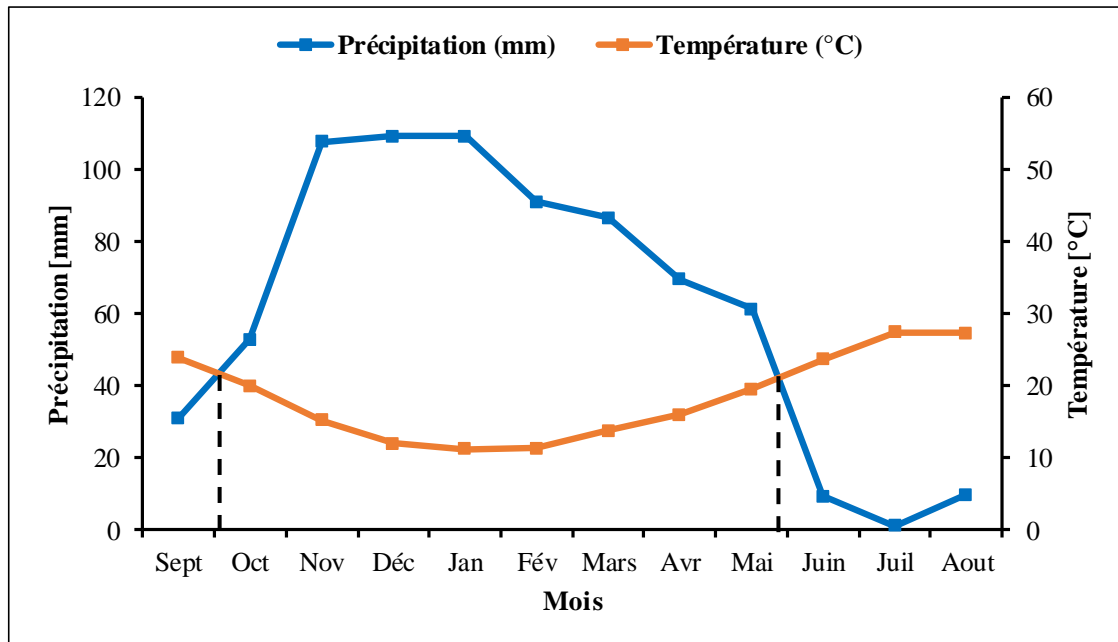


Figure II.11. Diagramme pluvio-thermique.

II.7. Conclusion

L'étude climatique a été élaborée en se basant sur des séries de mesure correspondant à une période de 42 ans d'observation (de 1970 à 2012). Elle montre que le bassin est soumis à un climat méditerranéen caractérisé par deux saisons distinctes : un hiver frais et un été sec et chaud de Juin à Octobre. La variation de la pluviométrie moyenne annuelle enregistrée dans cette période est importante (plus de 645 mm). Il convient de noter que dans cette période, les stations El-Hamdania, Soumaa, Birmandreis et Ain Zaaf enregistrent des valeurs plus élevées de précipitations moyennes interannuelles (913, 788, 743 et 702 respectivement). Bien que les stations El-Affroun et El-Omaria présentent des valeurs moyennes annuelles inférieures à 450 mm. La variation mensuelle des précipitations donne des valeurs plus élevées enregistrées au cours de la période d'Octobre à Mai avec un maximum pour la plupart des stations en Janvier. Ces valeurs ont diminué durant la période de Juin à Septembre avec des hauteurs inférieures enregistrées en Juillet. Ainsi que climat est caractérisé par d'importantes irrégularités interannuelles. Il ressort

également de cette analyse climatique que le bassin versant étudié jouie de conditions relativement privilégiées, surtout en hiver et au printemps. La période humide est caractérisée par des températures très faibles par rapport à la température moyenne annuelle notamment pour le mois de Janvier, et des hauteurs de précipitations maximales observées surtout entre les mois de Novembre et Décembre. En revanche, la période sèche est connue par la rareté des pluies surtout pour les mois de Juin, Juillet et Août, au cours desquels les températures atteignent leurs maxima.

Toutes ces variations climatiques sont liées au caractère du climat méditerranéen subhumide de l'Afrique du Nord. La torrencialité des pluies de la fin du printemps et du début de l'automne met d'avantage en péril l'équilibre des bassins versants et contribue à intensifier l'érosion hydrique surtout lorsqu'elle coïncide souvent avec les activités agricoles où les sols sont dénudés, et que la couverture végétale protectrice est insuffisante.

Chapitre III.

Matériels et méthodes

III.1 Méthodologie

La mise en place du modèle RUSLE nécessite des données climatiques, pédologiques, topographiques et l'occupation du sol. L'une des difficultés majeures à l'élaboration du modèle a été la collecte de données pertinentes. En effet, la zone d'étude et d'une manière générale l'Algérie est relativement peu renseignée par la bibliographie scientifique. Les données géographiques de références sont soit inexistantes, soit incomplètes ou obsolètes à petite échelle et les données numériques géo-référencées sont encore plus rares. Les documents cartographiques ont été pour la plupart réalisés à petite échelle et sans mise à jour récente. Le recours à des bases de données en ligne à l'échelle mondiale constitue dans certains cas une alternative qui est alors intéressante de tester. Un des objectifs de cette étude est donc d'évaluer le potentiel des données existantes et les démarches de production d'information numérique à y associer pour une modélisation spatialisée dans un SIG de l'érosion hydrique des sols.

Selon le modèle RUSLE, l'érosion est une fonction multiplicative tenant compte de l'érosivité des pluies (facteur R) par la résistance du milieu (facteurs C, K, LS, P). Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol en un endroit donné. Cinq facteurs servent à calculer les pertes en sol (A) : la topographie (LS), l'agressivité des précipitations (R), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C), les pratiques antiérosives (P), dont l'équation se présente sous la forme :

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

A : exprimant les pertes en sol annuelles moyennes possibles à long terme (t.ha.an) ;

R : exprimant l'indice d'érosivité des pluies (MJ.mm/ha.h.an) ;

K : exprimant l'indice d'érodibilité des sols (t.ha.h/ha/MJ/mm) ;

LS : exprimant le facteur de déclivité (adimensionnel) ;

C : exprimant le facteur de végétation (adimensionnel) ;

P : exprimant le facteur de pratique de conservation (adimensionnel).

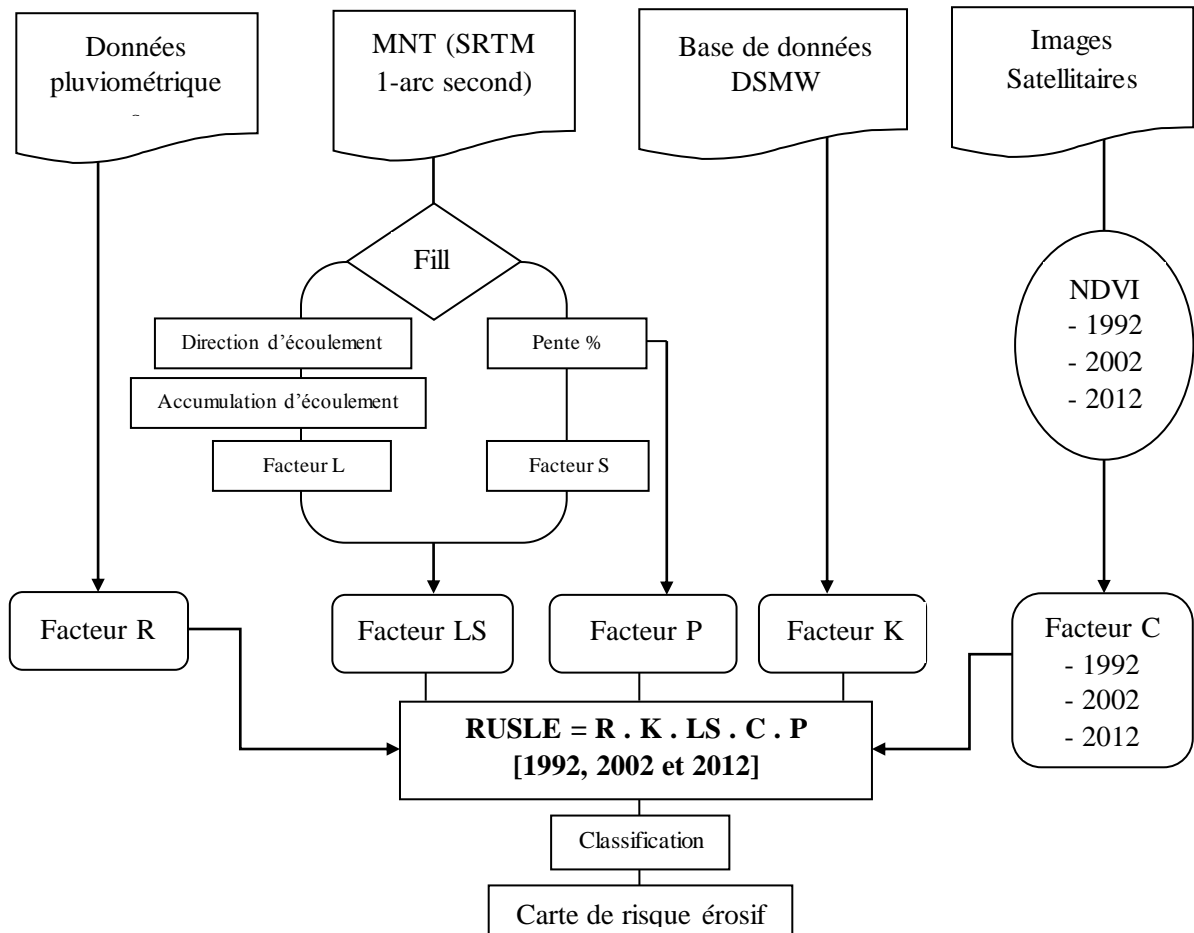


Figure III.1. Organigramme de la méthodologie.

III.1.1 Facteur R

L'érosivité de la pluie est définie comme la capacité potentielle de pluie à causer de l'érosion et donnée comme le produit ($E \cdot I_{30}$) de l'énergie totale de pluie (E) et l'intensité maximale pendant 30 min (I_{30}). Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations dans le bassin ou sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles.

C'est la raison pour laquelle on a utilisé la formule alternative de Rango et Arnoldus (1987) :

$$R = 1.735 * 10 (\text{Log } \Sigma(P_i^2 / P) - 0.8188) \quad (\text{III.1})$$

Où

R : Érosivité des pluies (MJ mm/ha.h.an) ;

P_i : Précipitations mensuelles (mm) ;

P : Précipitations annuelles (mm).

Pour extrapoler les valeurs du facteur R à l'ensemble du bassin versant, des secteurs de même agressivité climatique (isohyètes) ont été tracés selon la méthode déterministe de la Pondération par l'Inverse de la Distance (IDW).

Ainsi, des données de précipitations de 14 stations climatologiques réparties dans la région et étalées sur une période de 42 ans ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

Le facteur R a été calculé pour chaque station, puis on a interpolé les résultats par la méthode d'interpolation IDW, pour avoir la carte du facteur d'érosivité du bassin. Le choix de cette méthode parmi d'autres revient à son adaptation aux variations de terrains.

III.1.2 Facteur K

La carte des sols de la zone d'étude a été préparée à partir des classes de texture du sol à l'aide de la base de données harmonisée des sols du monde, DSMW (Digital Soil Map of the World). Des détails tels que la fraction du sable, de limon, d'argile, de matière organique et de toute autre information relative aux paramètres pour les différentes unités de cartographie ont été pris du le même rapport. L'érodibilité des sols (Facteur K) de la zone d'étude peut être calculé en utilisant les relations entre les classes de texture du sol et la teneur en matière organique Anache et al [2015] :

$$K=A \times B \times C \times D \times 0.1317 \quad (\text{III.2})$$

Où

$$A = \left[0.2 + 0.3 \exp \left(-0.256 SAB \left(1 - \frac{LIM}{100} \right) \right) \right]$$

$$B = \left(\frac{LIM}{ARG + LIM} \right)^{0.3}$$

$$C = \left[1.0 - \frac{0.25 CO}{CO + \exp(3.72 - 2.95 CO)} \right]$$

$$D = \left[1.0 - \frac{0.7 \left(1 - \frac{SAB}{100} \right)}{\left(1 - \frac{SAB}{100} \right) + \exp \left[-5.41 + 22.9 \left(1 - \frac{SAB}{100} \right) \right]} \right]$$

Où SAB, LIM, ARG et CO sont respectivement les pourcentages de sable, limon, argile et carbone organique. Dans un premier temps, une typologie des sols des bassins versants a donc été effectuée. Puis les pourcentages de sable, de limon, d'argile et de matière organique ont ensuite été renseignés à partir des échantillons de la carte pédologique. Disposant d'un seul échantillon pour chaque type de sol, les valeurs ont été attribuées et généralisées aux classes de même type, sans prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle de K (type de végétation, pente). Ces valeurs sont données en tonne/acres (Système US), et nécessitent d'être converties dans le système international, pour ceci un facteur de 0.1317 est multiplié à chaque valeur de K (tableau III.3). Bien que cette méthodologie apporte une approximation dans le calcul du facteur K, elle a cependant pour avantage de se prêter aux contraintes imposées par la zone d'étude.

Tableau III.1. Calcul de facteur K selon la texture de sol.

Texture	Sable (%)	Limon %	Argile %	CO %	A	B	C	D	K-USLE (tonne/acres)	K-FACTOR (t.ha.h/ha/MJ/mm)
Bc	40.10	21.50	38.4	1.44	0.334	0.735	0.825	1.000	0.203	0.027
Jc	39.60	39.90	20.6	0.65	0.363	0.883	0.977	1.000	0.313	0.041
Lo	76.00	9.90	14.1	0.41	0.252	0.767	0.992	0.874	0.167	0.022
BK	81.60	6.80	11.7	0.44	0.243	0.741	0.991	0.735	0.131	0.017

III.1.3 Facteur LS

Le facteur topographique (LS) à l'intérieur de la RUSLE représente la combinaison des effets de la longueur (L) et du gradient (S). Ce facteur évalue les pertes de sol par érosion hydrique, considérant les effets que pourraient avoir la longueur (L) et le gradient (S) de la pente respectivement. Ainsi le facteur (LS) peut être défini comme la relation entre le sol perdu dans une zone avec une pente (p) et longueur (l), dans la parcelle standard correspondante de 22.1 m, utilisée pour le développement de la RUSLE.

Les équations utilisées pour le calcul de LS, par l'outil de calcul dans le logiciel ArcGIS 10.4 sont :

- $F = (\sin(\text{"Pente en degré"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\sin(\text{"Pente en degré"} * 0.01745), 0.8) + 0.56)$
- $m = \text{"F"} / (1 + \text{"F"})$
- $L = (\text{Power}(\text{"Accumulation d'écoulement"} + 625, (m + 1)) * \text{Power}(\text{"Accumulation d'écoulement"}, (m + 1))) / (\text{Power}(25, (m + 2)) * \text{Power}(22.13, m))$
- $S = \text{Con}(\tan(\text{"Pente en degré"} * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \sin(\text{"Pente en degré"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin(\text{"Pente en degré"} * 0.01745) - 0.5))$

En dernier lieu, le facteur LS est obtenu à travers la multiplication du facteur L et S.

Ci-dessous, la distribution spatiale des facteurs L et S :

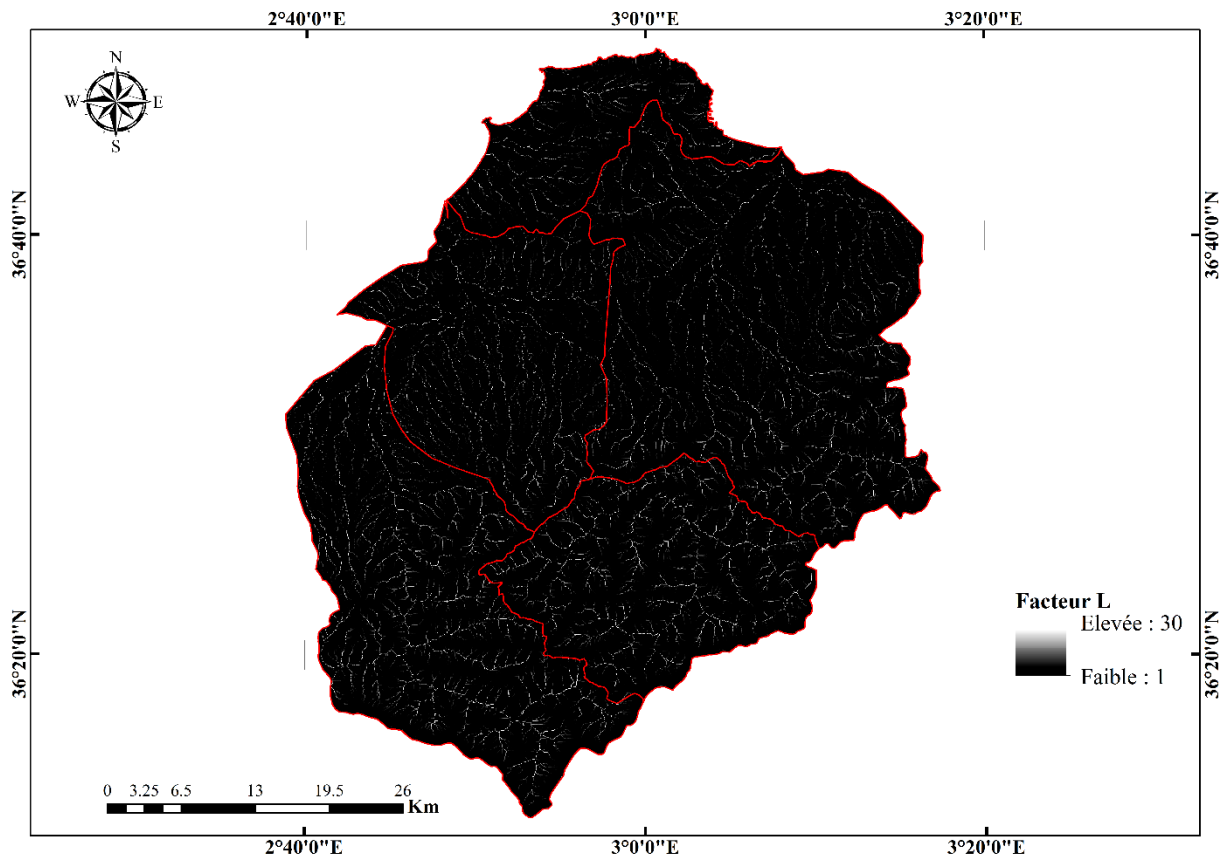


Figure III.2. Carte de facteur L.

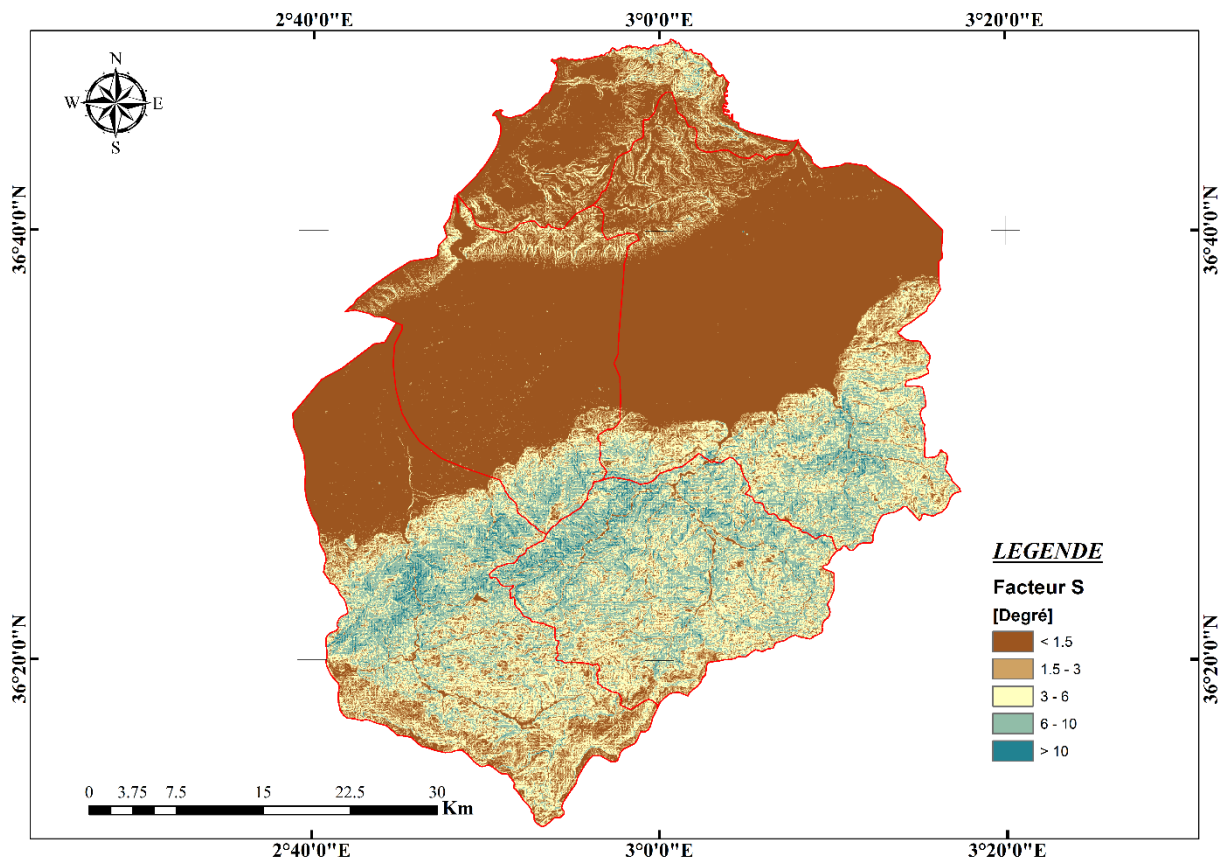


Figure III.3. Carte de facteur S.

III.1.4 Facteur C

Le facteur du couvert végétal C a été évalué sur l'ensemble du bassin versant à partir de l'indice de végétation par différence normalisé NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) en utilisant des images satellitaires. Les dates d'acquisition des images satellites coïncident avec les mois d'octobre ou novembre, période à laquelle on estime que le sol est prédisposé à l'érosion vu qu'il se trouve sec après une longue période estivale et devient sensible aux premières pluies d'automne et d'autant plus que les paysans labourent leur terrain en cette période. Le travail de choukri et al. (2016) dans le bassin versant Saboun, confirme ce constat et démontre que la saison la plus érosive est l'automne, avec une valeur maximale enregistrée durant le mois d'octobre. Les indices NDVI sont des mesures quantitatives, basées sur les propriétés spectrales de la végétation qui tentent de mesurer la biomasse ou la vigueur végétative Agapiou et Hadjimitsis [2011]. Comme une estimation indirecte de la densité végétale, le NDVI, qui se rapproche de la densité, de la chlorophylle a été calculé pour la zone d'étude est généré à partir des images Landsat OLI/TIR d'une résolution spatiale de 30 mètres, sont acquis au cours de la saison humide, et sont plus adaptés pour cette application étant donné que l'érosion est la plus active et la végétation est à son apogée au cours de cette saison.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (III.3)$$

Où NIR est l'intensité de la lumière en proche infra-rouge, et RED est l'intensité de la lumière en canaux rouge. Cet indice est un indicateur de l'énergie réfléchié par la terre, liée à différentes conditions de types de couverture. Lorsque la réponse spectrale mesurée de la surface de la terre est très similaire dans les deux bandes, les valeurs NDVI approche de zéro. Une grande différence entre les deux bandes résulte des valeurs de NDVI aux extrémités de la plage de données. La formule suivante proposée par Van et al [2000] ; Van Leeuwen et al [2004] ; Prasannakumaret al [2012] a été utilisé pour générer le facteur C à partir des valeurs de NDVI.

$$C = \exp\left(-a \times \frac{NDVI}{b - NDVI}\right) \quad (III.4)$$

Où a = 2 et b = 1.

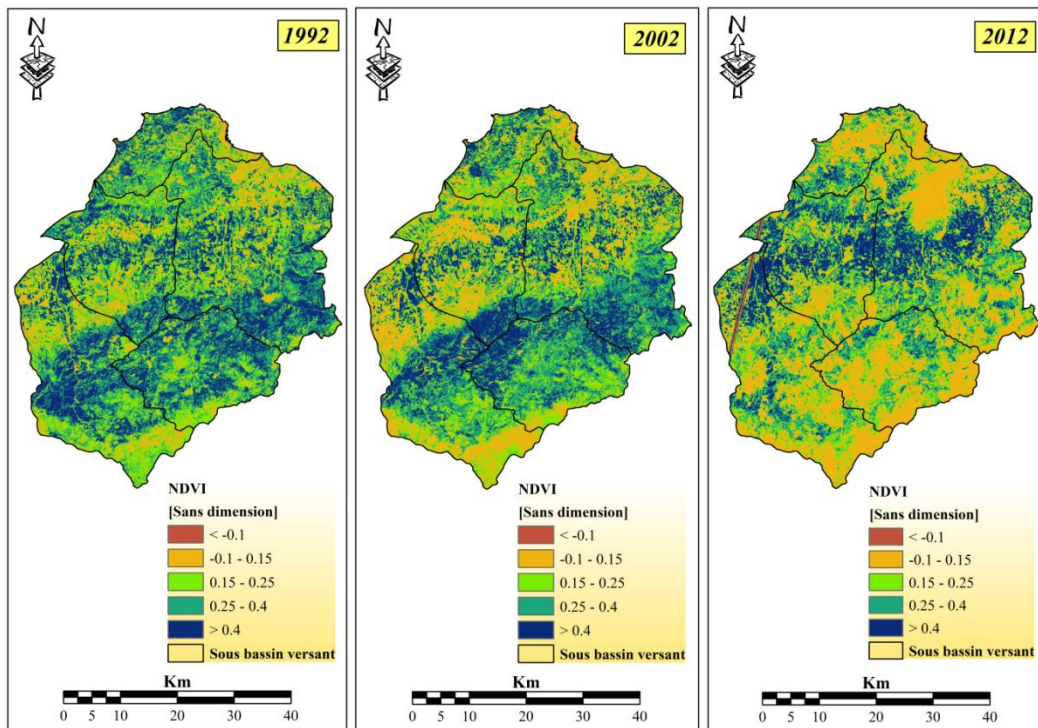


Figure III.4. Carte des indices NDVI.

III.1.5 Facteur P

Il est le rapport de la perte de sol avec un soutien spécifique pratiqué sur les terres agricoles à la perte correspondante avec labour de pente parallèle (Wischmeier et Smith, 1978). Le facteur P varie dans notre cas entre 0.55 et 1 (contour) selon les classes des pentes (Tableau III.).

Tableau III.2. Le facteur P en fonction de la pente (Shin, 1999).

Pente (%)	Contour	La culture en bande	Terrassement
0 – 7	0.55	0.27	0.10
7 – 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 – 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 – 26.8	0.90	0.45	0.18
> 26.8	1.00	0.50	0.20

III.2 Conclusion

Le SIG permet de gérer d'une façon rationnelle, une multitude de données, à référence spatiale, relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols, ce qui nous a permis de conclure que ces facteurs principaux (R, LS, K, C, P) influencent l'érosion hydrique.

L'application du modèle RUSLE donne des résultats relativement très fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, à coûts très bas, aux décideurs et aménageurs du territoire dans le but de simuler des scénarios d'évolution, et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion.

Chapitre IV.
Discussion des résultats

IV.1 Introduction

Les couches de données (cartes) extraites pour les facteurs K, LS, R, C, et P du modèle USLE ont été intégrées à l'aide de l'équation III.1 dans ArcGIS qui effectue des analyses spatiales pour quantifier, évaluer, et générer les cartes des risques d'érosion du sol, ainsi que le degré de gravité pour les bassins versant étudié. En général, une valeur élevée reflète un taux plus élevé de production de sédiments, et l'inverse.

IV.2 Facteur R

La carte d'érosivité, synthétisée à partir de la spatialisation des stations hydrologiques, montre que la valeur du facteur R varie de 184 à 660 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹ (tableau. IV.1). Les valeurs élevées sont enregistrées au sud-ouest dans le sous bassin de l'oued Chiffa, alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées au nord de l'oued Mazafran, oued Cotiers Bouzaréah et le plein sud de l'oued Harrach Amont et oued Harrach Maritime. En effet, les valeurs de R subissent un double gradient du centre vers l'amont et du centre vers l'aval (figure. IV.1).

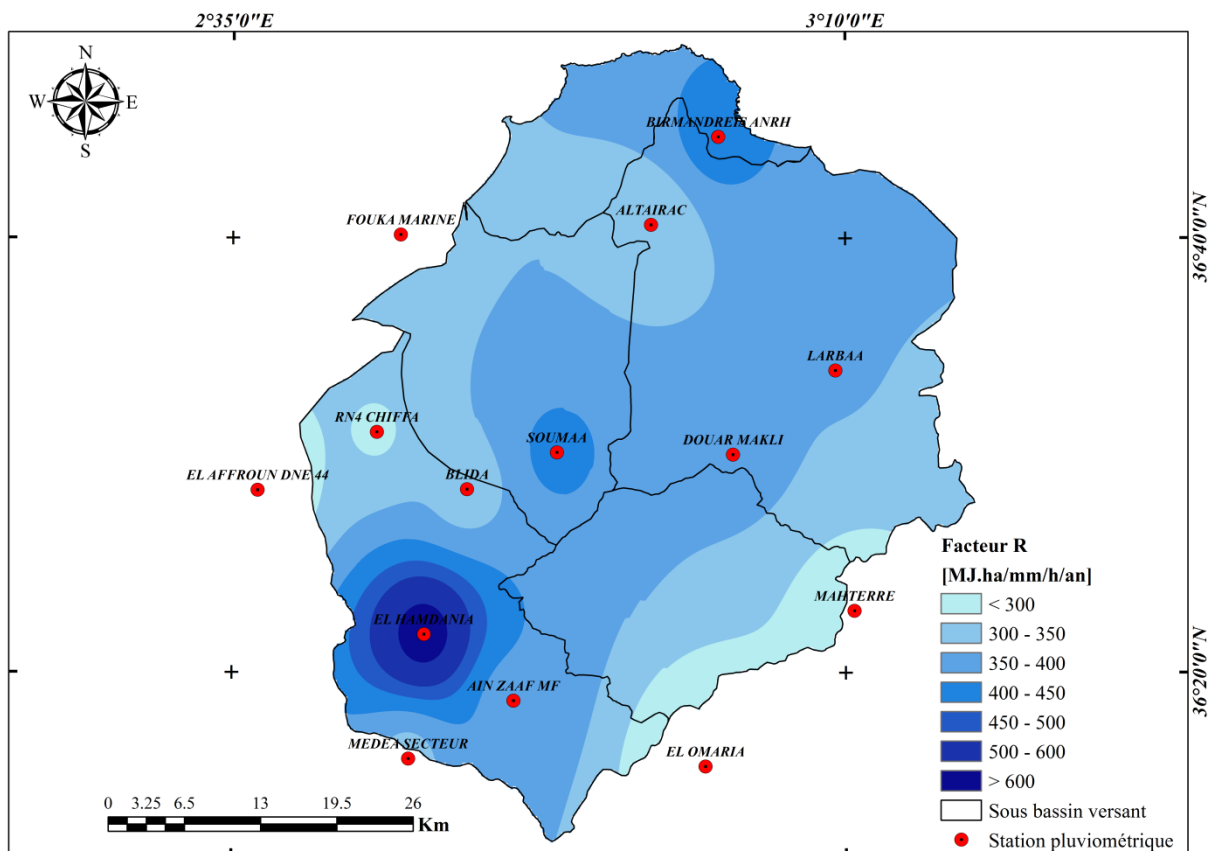


Figure IV.1. Carte de facteur d'érosivité des pluies.

Tableau IV.1. Indices de l'érosivité des pluies R calculés à partir des stations pluviométriques sur l'ensemble du bassin versant.

Stations	x (degrés décimaux)	y (degrés décimaux)	z (m)	Précipitations interannuelles (mm)	Facteur R (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹ .an ⁻¹)
MEDEA SECTEUR	2.75	36.27	935	629.17	330.31
FOUKA MARINE	2.74	36.67	25	594.67	319.69
BIRMANDREIS ANRH	3.05	36.75	140	742.72	428.76
EL AFFROUN DNE 44	2.61	36.47	95	452.46	219.78
RN4 CHIFFA	2.72	36.52	58	564.19	292.87
AIN ZAAF MF	2.85	36.31	940	702.03	375.88
EL HAMDANIA	2.77	36.36	400	912.98	660.79
BLIDA	2.81	36.47	210	639.92	318.25
SOUMAA	2.89	36.50	177	787.58	417.41
LARBAA	3.16	36.57	100	659.78	352.39
DOUAR MAKLI	3.06	36.50	130	662.66	372.31
ALTAIRAC	2.98	36.68	20	575.69	305.52
EL OMARIA	3.03	36.26	790	440.62	184.3
MAHTERRE	3.18	36.38	875	549.62	257.79

IV.3 Facteur K

L'érodibilité des sols est une estimation quantitative de l'érodabilité des particules de sol et le principal facteur qui influe sur la capacité du sol à éroder. Cependant, les autres facteurs qui influent sur le facteur K, sont la structure du sol, la perméabilité et le contenu en matière organique. La carte de facteur (figure IV.2) a été préparée à partir de la base de données DSMW (Digital Soil Map of the World). La distribution des types de sols dans la zone d'étude est regroupée en trois grandes classes de texture à savoir, Sable, sable limoneux, et sable argileux. Généralement, les sols argileux ont des valeurs modérées de K parce qu'ils sont résistants au détachement. Les sols sableux ont également de faibles valeurs de K en raison des taux d'infiltration et le ruissellement réduit, et parce que les sédiments érodés de ces sols ne sont pas faciles à transporter. Les sols limoneux ont des valeurs de K modérées à élevées où le détachement des particules de sol est facile à modéré, l'infiltration est de modérée à faible ce qui donne des écoulements modérés à élevés, et le transport des sédiments est modéré à facile.

Le bassin d'étude comprend quatre différents types de sol (tableau IV.2) ayant différentes caractéristiques. Les valeurs d'érodibilité des sols ont été attribuées à différents types de sol en fonction des textures, perméabilités et humidités antérieures du sol. La carte du sol a été reclassifiée avec les valeurs affectées de facteur K. Ces valeurs varient de 0.017 à 0.041 t.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹, où les valeurs proches de 0 reflètent des sols moins érodables.

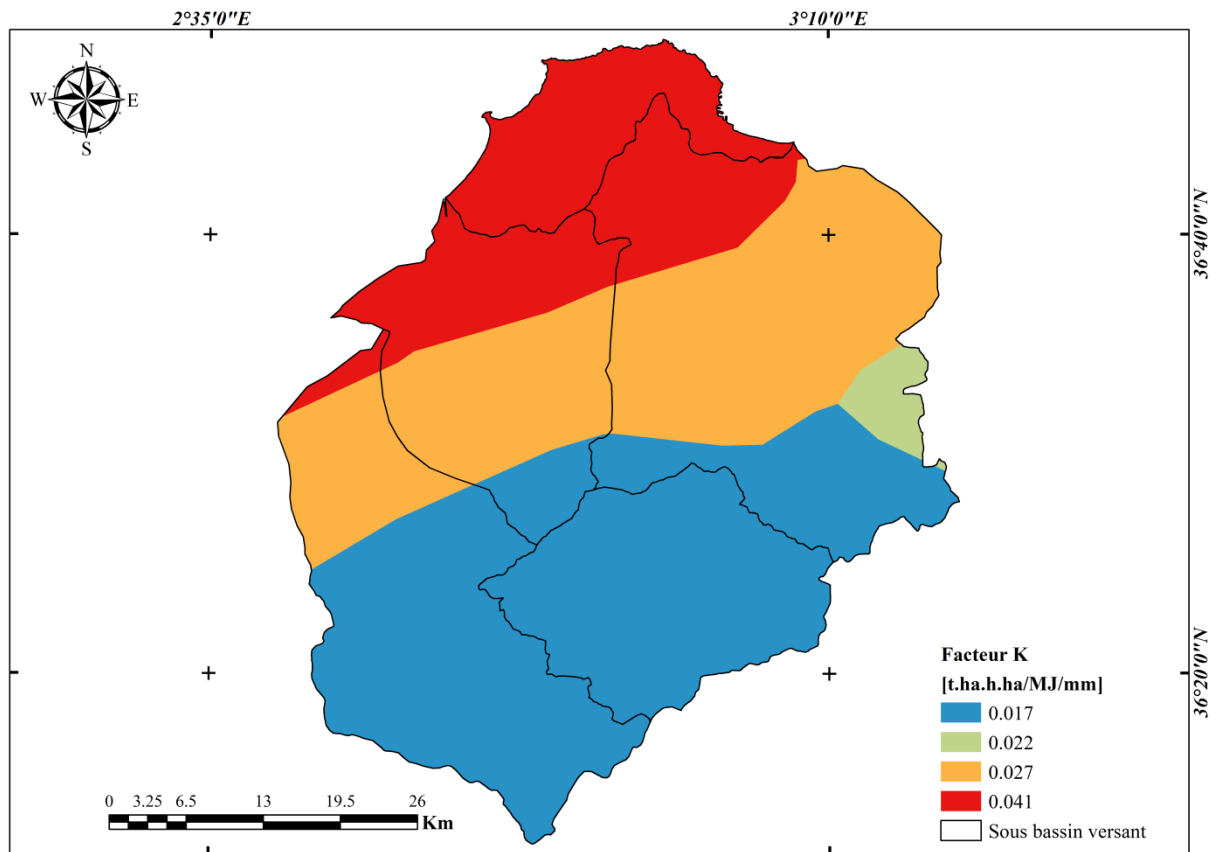


Figure IV.2. Carte de facteur d'érodibilité des sols.

Tableau IV.2. Classe de facteur K et pourcentage de surface.

Classe K factor	Surface (km ²)	Surface (%)
0.017	1059.85	43.81
0.022	44.21	1.83
0.027	780.40	32.26
0.041	534.56	22.10

IV.4 Facteur LS

Le facteur LS montre l'importance de la longueur et l'inclinaison de la pente dans le processus d'érosion. L'utilisation de la formule empirique citées précédemment abouti à l'estimation du facteur topographique comprise entre 0.03 et 20 cet écart s'explique par l'hétérogénéité du relief dans notre secteur d'étude (figure IV.3).

En moyenne le bassin versant a une valeur du facteur LS de l'ordre de 3.15. Les plus grandes valeurs sont localisées fréquemment dans la partie Sud-Est / Sud-Ouest du bassin versant où prédominent les pentes de classes fortes à très fortes.

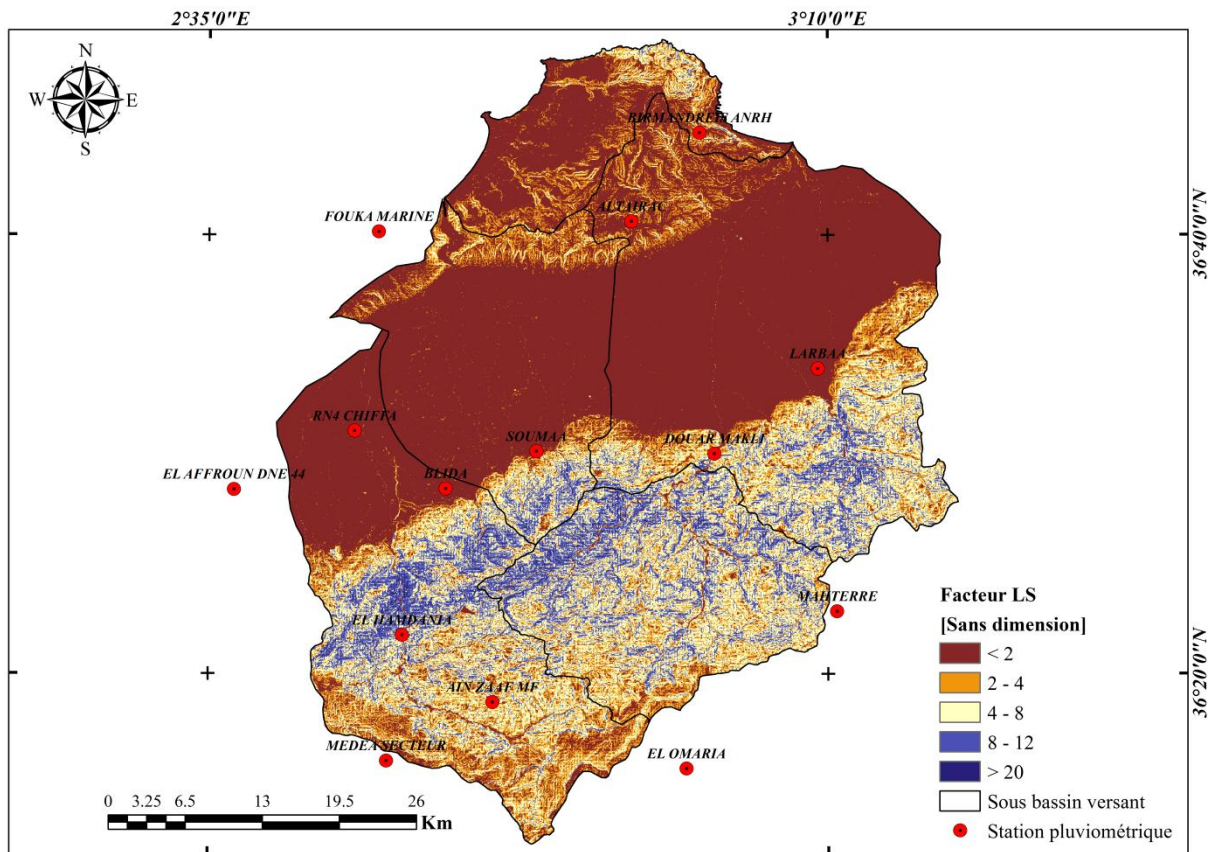


Figure IV.3. Carte de facteur topographique.

IV.5 Facteur C

Le facteur du couvert végétal C (figure IV.4) a été évalué sur l'ensemble du bassin versant sur la base des indices NDVI pour les périodes 1992, 2002 et 2012. Les valeurs de ce facteur varient entre 1 sur un sol nu et 0 sur un sol protégé par une couverture de forêt dense. Les valeurs moyennes relativement élevées estimées à 0.45, 0.48 et 0.58 respectivement pour les années 1992, 2002 et 2012.

L'histogramme ci-dessous (figure IV.5) ; montre qu'environ 44%, 39% et 28% de la superficie du bassin versant présente un indice du couvert végétal faible à très faible, ces terres sont occupées généralement par des Végétation dense qui sont réparties un peu partout.

Les valeurs modérées de facteur C présentent environ 1/4 de la superficie pour les 3 périodes 1992, 2002 et 2012. Ces terrains sont occupés généralement par des végétations clairsemées. Alors que, des pourcentages de 30% (1992), 37% (2002) et 51%(2012) sont caractérisés par des facteurs C élevés à très élevé généralement ces terres sont improductives (Sols nus, Eau..).

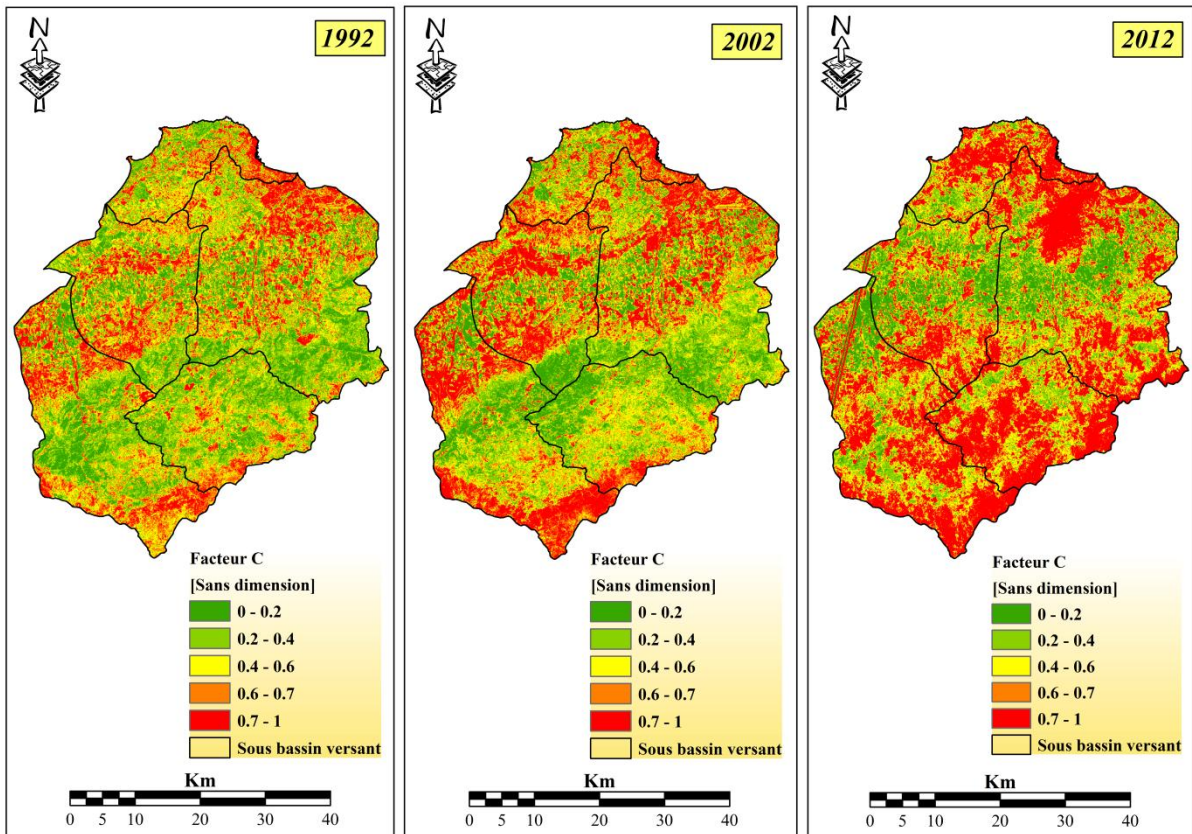


Figure IV.4. Carte des facteurs de couverture végétale.

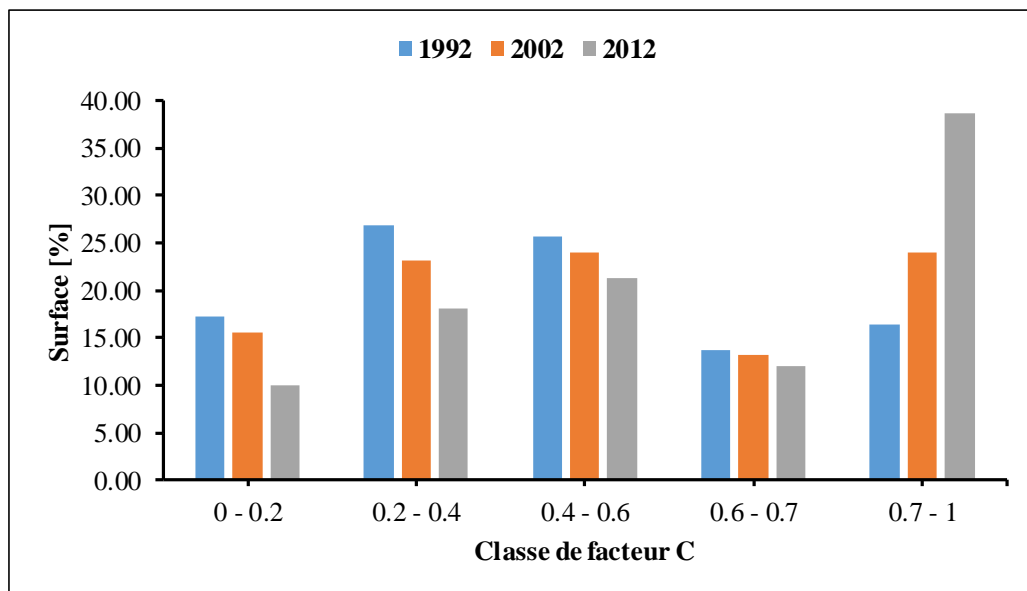


Figure IV.5. Répartition des classes de facteur du couvert végétal.

IV.6 Facteur P

Le dernier facteur (P) de l'équation universelle des pertes en sol spatialisé dans le bassin versant varie en fonction des pratiques culturales rencontrées et de la classe des pentes qui est inférieure à 1 dans les secteurs aménagés. Le facteur P a une valeur moyenne élevée (0,62) au niveau du bassin versant, cette valeur est expliquée par l'absence de pratiques culturales antiérosives sur une grande partie de la surface totale du bassin où le facteur P vaut 1 (figure IV.6).

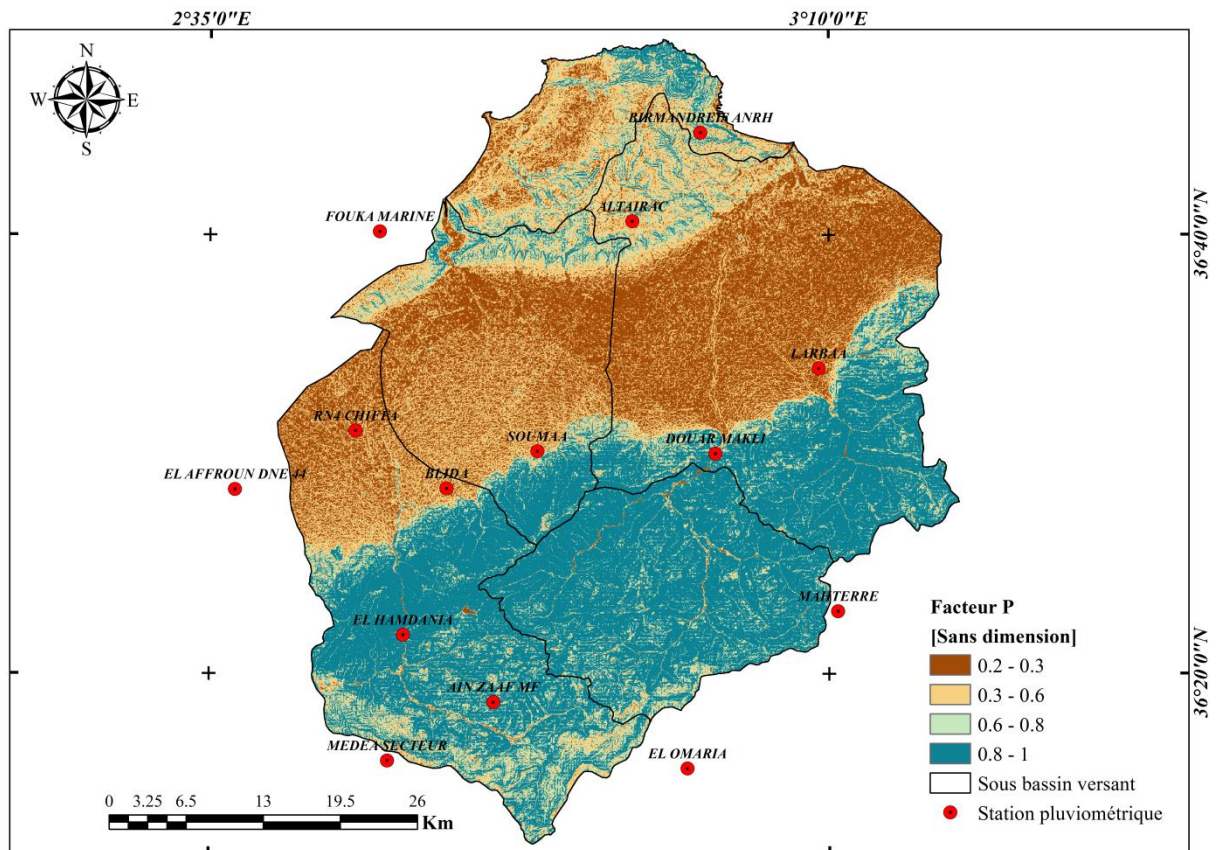


Figure IV.6. Carte de facteur de pratique antiérosif.

IV.7 Estimation des pertes de sols

Les cartes de pertes en sols résultantes de la superposition des cartes de facteurs du modèle RUSLE, notamment l'agressivité climatique R, l'érodibilité des sols K et l'effet combiné du degré et de la longueur de la pente LS, la couverture végétale C et les pratiques antiérosives P. La combinaison et le traitement sous SIG de ces facteurs ont permis d'élaborer à l'échelle du bassin versant étudié les cartes de risques d'érosion pour les périodes 1992, 2002 et 2012. Les cartes de l'érosion ont donné une valeur moyenne du taux d'érosion de 7.90 t/ha/an, 8.46 t/ha/an et de 13.07 t/ha/an respectivement pour les années 1992, 2002 et 2012. Les valeurs obtenues à l'échelle de bassin versant ont ensuite été regroupées à savoir la gravité, en 5 classes de valeurs : très faible, faible, modérée, forte et très forte.

Tableau IV.3. Pourcentages des surfaces occupées par chaque classe d'érosion.

Classe	Erosion (t/ha/an)	1992		2002		2012	
		Surface (km ²)	Pourcentage (%)	Surface (km ²)	Pourcentage (%)	Surface (km ²)	Pourcentage (%)
Très faible	< 5	1345.85	55.86	1306.27	54.21	1180.59	49.00
Faible	5-10	358.93	14.90	339.10	14.07	223.38	9.27
Modérée	10-20	425.23	17.65	451.49	18.74	368.89	15.31
Fort	20-30	164.57	6.83	188.47	7.82	260.29	10.80
Très fort	> 30	114.58	4.76	124.23	5.16	375.98	15.61

IV.7.1 Année 1992

- Une première classe regroupe les zones ayant un taux d'érosion inférieur à 5 t/ha/an. Elle constitue 55.86 % de la superficie du bassin et couvre principalement le secteur Nord-Ouest et le centre du bassin suivant une direction Nord-Est Sud-Ouest où le couvert végétal est très riche.
- Une deuxième classe qui regroupe les zones avec un taux d'érosion compris entre 5 et 10 t/ha/an. Elle constitue environ 15% de la superficie totale et se focalise principalement au Nord et au Sud du bassin versant.
- Une troisième classe qui regroupe les zones avec un taux d'érosion compris entre 10 et 20 t/ha/an. Elle représente plus de 17 % de la superficie. La quatrième classe qui regroupe les zones avec un taux d'érosion compris entre 20 et 30 t/ha/an. Elle représente 7 % de la superficie du bassin. Elles se focalisent au Nord et sur les zones à terre friable généralement à l'exutoire du bassin versant. La dernière classe qui montre un taux d'érosion supérieur à 30 t/ha/an, avec seulement un pourcentage presque 5 %. Elle occupe principalement le secteur Sud et Sud-Ouest du bassin versant. L'analyse des cartes de risque d'érosion, en comparaison avec les cartes des différents facteurs, montre une nette et importante influence du couvert végétal sur le comportement érosif des sols, suivi par les facteurs d'érodibilité et la topographie, surtout la pente.

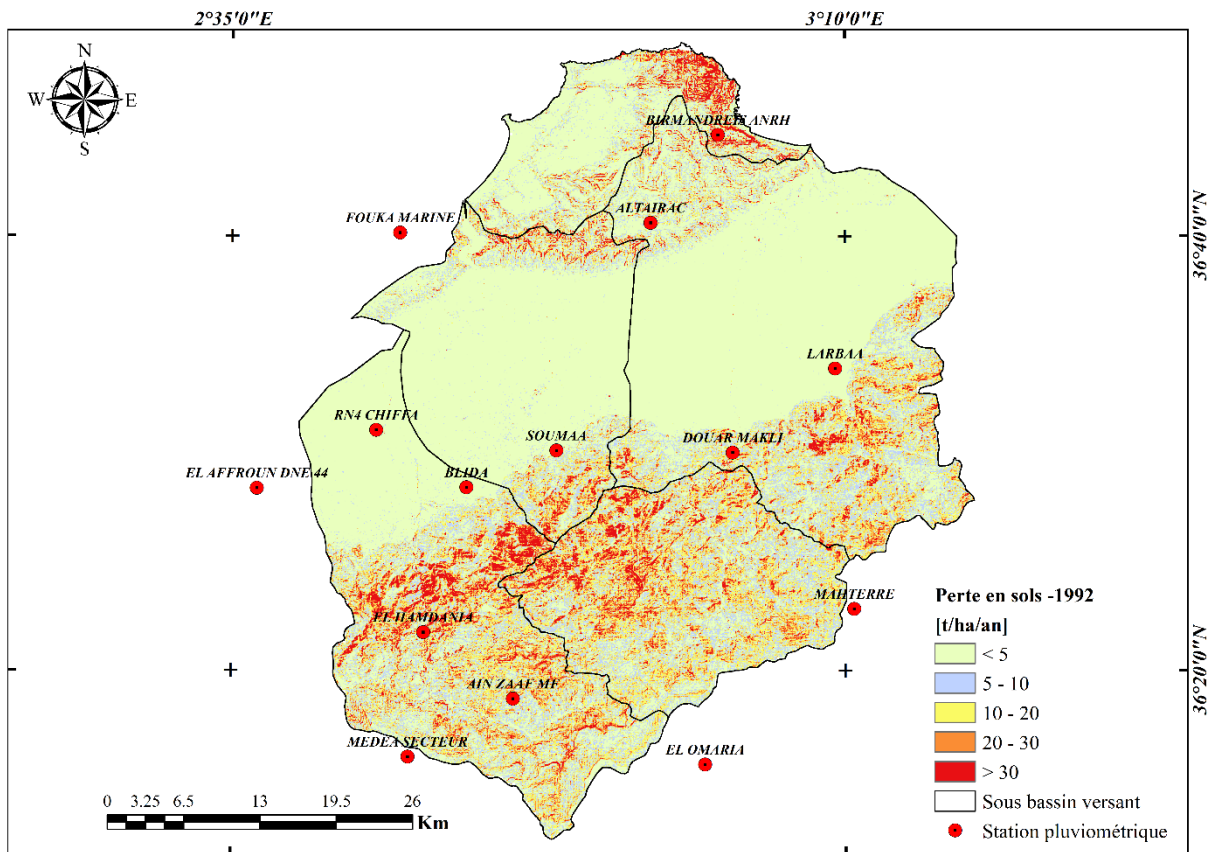


Figure IV.7. Carte du risque érosif (Année 1992).

IV.7.2 Année 2002

- La classe regroupe un taux d'érosion très faible (<5t/ha/an), occupe 54 % de la surface du bassin versant.
- La classe 5-10 t/ha/an présente 14 %.
- La classe 10-20 t/ha/an présente 18 %.
- La classe 20-30 t/ha/an présente 8 %.
- La classe supérieure à 30 t/ha/an présente 5 %, Concentre principalement au secteur Sud du bassin versant.

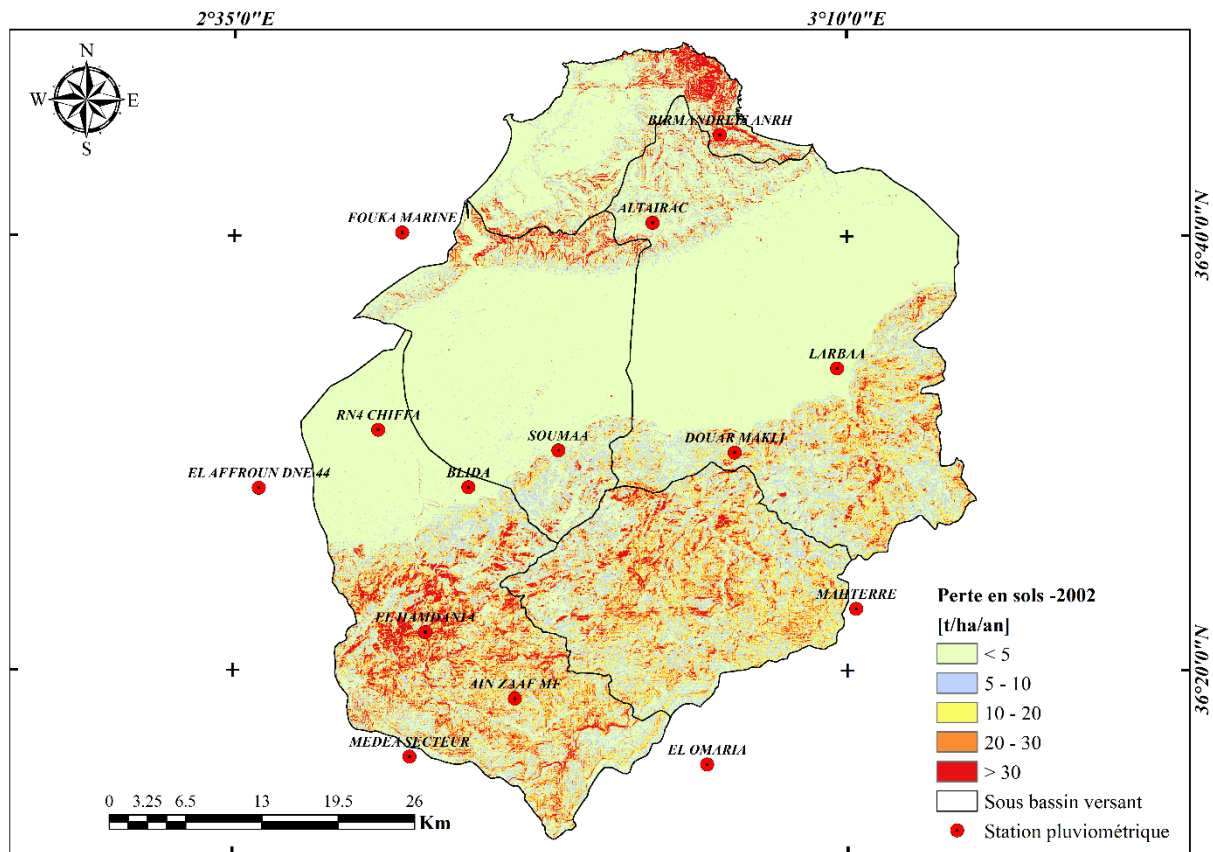


Figure IV.8. Carte du risque érosif (Année 2002).

IV.7.3 Année 2012

- La classe regroupe un taux d'érosion très faible (<5t/ha/an), occupe 49 % de la surface du bassin versant.
- La classe 5-10 t/ha/an présente 9 %.
- La classe 10-20 t/ha/an présente 15 %.
- La classe 20-30 t/ha/an présente 11 %.
- La classe supérieure à 30 t/ha/an présente 16 %, Concentre principalement au secteur Sud du bassin versant.

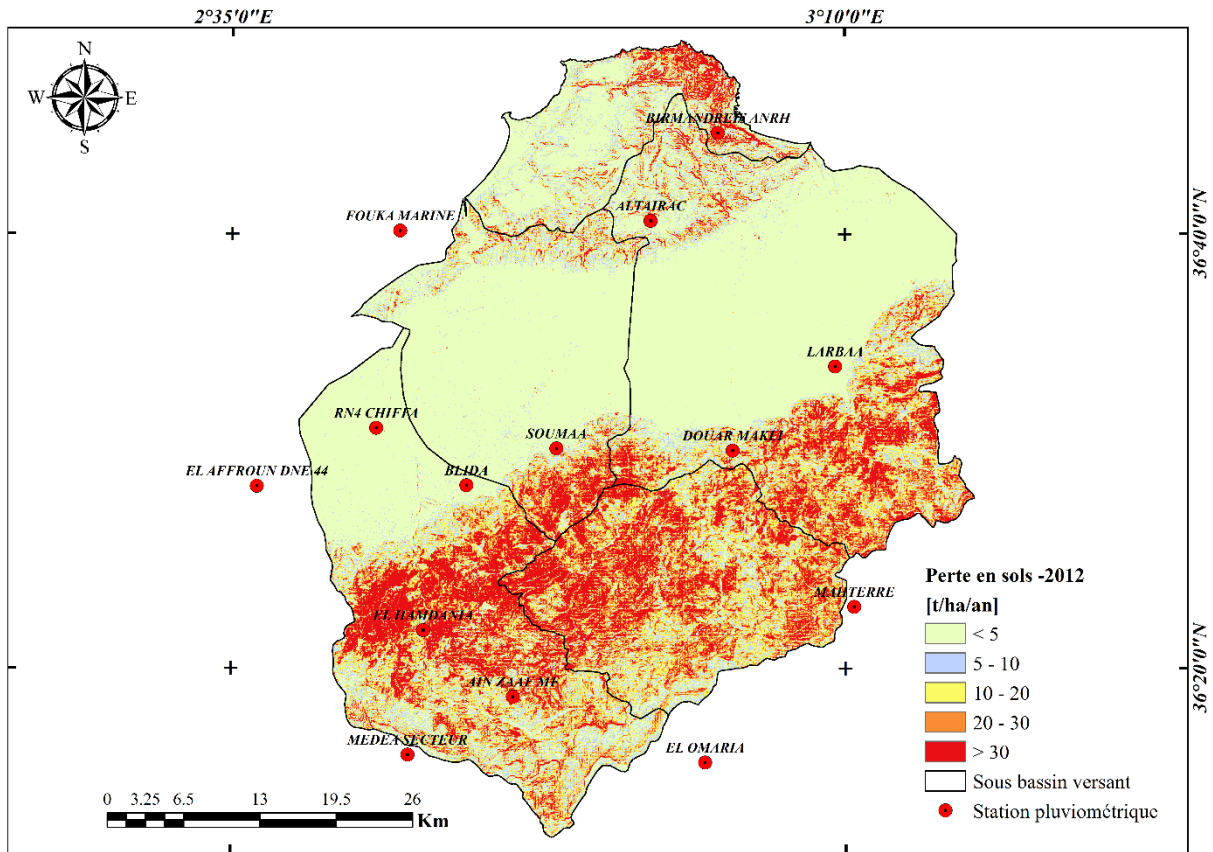


Figure IV.9. Carte du risque érosif (Année 2012).

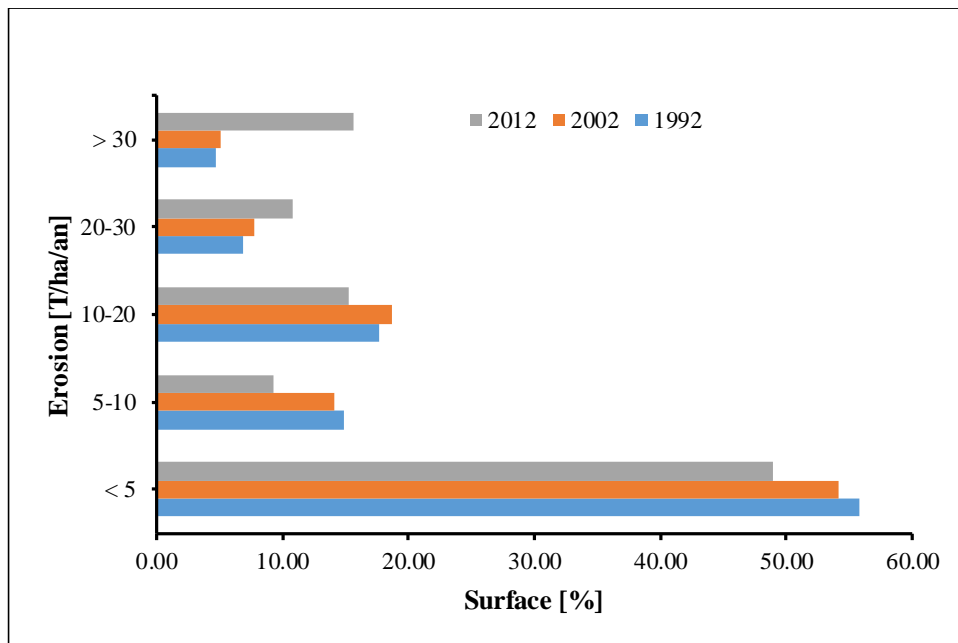


Figure IV.10. Distribution des classes de risques érosifs (1992, 2002 et 2012).

IV.8 Conclusion

Les résultats obtenus par l'application du modèle RUSLE montrent que la perte moyenne des sols par l'érosion hydrique de l'ordre de 7.90 t/ha/an, 8.46 t/ha/an et de 13.07 t/ha/an respectivement pour les années 1992, 2002 et 2012 au bassin versant étudié dépassent la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique (7 t/ha/an). Environ 12 % (1992), 13 % (2002) et 26.41 % (2012) de la zone étudiée marquée par un taux d'érosion supérieur ou égal 20 t/ha/an, sont sérieusement menacées par le phénomène érosif et sont caractérisées par des terres à fortes pentes et plus érodées. Contre 70.76 % (1992), 68.29 % (2002) et 58.28 % (2012) des terres qui montrent une perte de sol tolérable inférieur à 10 t/ha/an, ces terres sont bien protégées par une couverture végétale et reposent sur des pentes douces.

Conclusion générale

La présente étude s'articule sur l'impact du changement de l'occupation du sol à différents scénarios sur l'évolution de l'érosion hydrique dans un bassin versant situé dans la partie centrale du Nord Algérien, et occupe une superficie de 2436 km², par l'utilisation du modèle RUSLE sous SIG. Donc à la lumière de cette étude, on peut conclure les points suivants :

La zone étudiée est marquée par un relief hétérogène, accidenté où prédominent les pentes de classes moyennes à très fortes sur environ 53.83 % de la superficie totale de bassin versant.

Le bassin présente un coefficient de torrentialité assez moyen, de 0.31, ce qui traduit une faible accumulation des eaux et un écoulement très important. Le régime climatique est à dominance méditerranéenne avec un été sec et chaud et un hiver humide et frais. Les précipitations moyennes annuelles durant la période 1970-2012 varient entre 505 et 913 mm, avec une moyenne de 645 mm et sur l'ensemble du bassin.

Les températures moyennes mensuelles varient entre 11.2 et 27.4 °C avec une moyenne interannuelle de 18.5 °C.

L'application du modèle RUSLE sur le bassin versant sous ArcGIS a permis de :

- ✓ Enregistrer une base de données multi-information, spatialisée sur l'ensemble du bassin versant ;
- ✓ Cartographier tous les facteurs impliqués dans le processus d'érosion à savoir l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P) ;
- ✓ Établir une carte de pertes en sol sur la totalité du bassin versant ;
- ✓ Hiérarchiser les différents secteurs du bassin versant selon leur sensibilité à l'érosion hydrique ;
- ✓ Identifier les secteurs de forte dégradation qui nécessitent des interventions très urgentes ;
- ✓ Mettre à la disposition des autorités responsables un support de base pour l'aide à la décision dans les futurs projets d'aménagements anti érosif du bassin versant.

L'étude présentée dans ce mémoire a met l'accent sur l'évaluation rapide des changements de l'occupation des sols et leur conséquences sur le potentiel d'érosion des sols dans le bassin étudié. À cette fin, le modèle RUSLE a été utilisé en combinaison avec le SIG, qui s'est avéré être un outil efficace pour montrer l'impact de changements d'occupation des sols sur la perte en sols. Les résultats obtenus démontrent que les changements de l'occupation du sol ont été importants au cours de la période de 1992 à 2012. Les risques d'érosion des sols ont été accrus de 11%. Le potentiel d'érosion moyen pour l'ensemble du bassin versant est passé de 4.76 tonnes/ha/an en 1992 à 15.61 tonnes/ha/an en 2012.

La déforestation massive, la diminution de la couverture végétale et l'augmentation des terrains nus pourraient être considérées comme les plus importantes raisons de l'augmentation de la perte en sol au cours de la période d'étude. Cela exige une attention immédiate des

parties prenantes, les décideurs réglementaires et les groupes de gestion environnementale à proposer directives complètes pour un éventuel contrôle de l'occupation des sols.

Les agriculteurs doivent disposer de programmes de la capacité de développement pour élever leur niveau de sensibilisation. Les cartes de risques de perte en sol générées dans cette étude pourraient également être utiles pour développer des stratégies pour surmonter les problèmes de l'érosion dans le futur.

Références bibliographiques

- Angima.S. D, Stott .D. E, O’Neill .M. K, Ong.C. K andWeesies .G. A. (2003). Soil Erosion Prediction Using RUSLE for Central Kenyan Highland Conditions,” Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. 97, No. 1-3, pp. 295-308.
- A.Smiri .(1987). Type of erosion and quantification of soil losses. Université internationale de Casablanca.
- Belasri Asma, Lakhouli Abdellah. (2016). Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. Journal of Geographic Information System, 8, 98-107.
- Bonilla, C.A, Reyes, J.L, Magri .A. (2010). Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, central Chile. Chilean Journal of Agricultural Research 70 (1), 159-169.
- Bouguerra, H, (2018). Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d’érosion hydrique par utilisation d’un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est Algérien). Thèse de doctorat. Université de Tlemcen.
- Bouraba M. (2002) Comparaison de la charge solide en suspension dans les oueds Algériens : Essai de synthèse. Bulletin Réseau Erosion 21, IRD Montpellier (France), pp: 358 – 374.
- Caloz, R. et Collet, C., (2001). Précis de teledetection, Traitement numerique d’images de teledetection. Québec: Presses de l’université du Québec, Tome3.
- Chaplot, V., and Bissonnais Y. L. (2000). Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes, Earth Surf. Processes and Landforms, 25 (2), 145-153.
- Choukri F., Chikhaoui M., Naimi M., Raclot D., Pepin Y. & Lafia K. (2016). Impact du changement climatique sur l'évolution de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental (Nord Du Maroc). European Scientific Journal, 12(32) : 79-93.
- Conservation Planning ». Agriculture Handbook, n° .537, Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia USA. U.S..
- Dabral, P.P., Baithuri, N., Pandey, A. (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. Water Resources Management 22, 1783-1798.
- Demmak, A, (1982). Contribution à l’étude de l’érosion et de transport solide en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat-Ingénieur, Univ. Paris, France, 323 pp.
- De Ploey J. and Savat J. (1968). Contribution à l’étude de l’érosion par le splash. Z. Géomorphologie , 12:174-193.
- Abdelkader El Garouani, Hao Chen L. A. Lewis and Mohamed Abharour ; 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrisi au Nord-Est du Maroc

- Ellison W.D. (1944). Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 25: 131-136.
- Fernandez, C., Wu, J.Q., McCool, D.Q., Stockle, C.O.(2003). Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation* 58 (3), 128-136.
- Girard, M.-C., Walter, C., Rémy, J.-C., Berthelin, J. et Morel, J.-L. (2005). *Sols et environnement*. Paris, DUNOD, 816 p.
- Gitas, Ioannis Z., Douros, Kostas, Minakou, Chara, Silleos, George N., Karydas, Christos G., (2009). Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSel eProceedings* 8, 40-52.
- Ganasri.B.P, Ramesh.H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers* xxx 1-9.
- Heusch B. (1988). *Aménagement d'un terroir. Techniques de lutte contre l'érosion*. CNEARC, Montpellier, France, 199 p.
- Jain, S.K., Kumar, S., Varghese, J. (2001). Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using GIS technique. *Water Resources Management* 15, 41-54.
- Jasrotia, A.S., Singh, R.(2006). Modeling runoff and soil erosion in a catchment area, using the GIS, in the Himalayan region, India. *Environmental Geology* 51, 29-37.
- Kouli, M., Soupios, P., Vallianatos, F. (2009). Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology* 57, 483-497.
- Lazzari, M., Gioia, D., Piccarreta, M., Danese, M., Lanorte, A. (2015). 2015-sediment yield and erosion rate estimation in the mountain catchments of the Camastra artificial reservoir (Southern Italy): a comparison between different empirical methods. *Catena* 127, 323-339.
- Leguédou, S, (2003). *Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés*, Phd thesis, Université d'Orléans.
- Le Bissonnais, Y., J. Thorette, C. Bardet et J. Daroussin, (1988), *L'érosion hydrique des sols en France*, INRA, IFEN, 106 p.
- Millward, A.A., Mersey, J.E. (1999). Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *CATENA* 38 (2), 109e129.
- Merdas,S, Mostephaoui,T, 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 à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin-versant d'el Hamel (Boussaâda) Algérie.
- Pandey, A., Mathur, A., Mishra, S.K., Mal, B.C. (2009). Soil erosion modeling of a Himalayan watershed using RS and GIS. *Environmental Earth Sciences* 59 (2), 399-410.
- Roose, E. (1993). Erosion: a current environmental problem. The GCES, a new strategy for fighting erosion to resolve this dilemma of a growing society. In: S. Wicherek (Editor),

- Farm and land erosion: in temperate plains environment and hills. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 571-585
- Roose E.(1973). Dix-sept années de mesure de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse Doct. Ing. fac. sci. Abidjan n°20, ORSTOM, N° 125p.
- Roose E.(1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols(GCES). Bulletin pédologique de la FAO. N° 70, 420p.
- Rango,A. & H.M.J. Arnoldus (1987): Aménagement des bassins versants. – In : Cahiers techniques de la FAO: 1-11.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC; (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook No. 703, USDA-ARS
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weessies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. (eds).(1997). Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 703.
- Shin.G. J. (1999). The Analysis of Soil Erosion Analysis in Watershed Using GIS, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Gang-Won National University, Chuncheon.
- Toumi, Samir.(2013). Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Mina. Thèse de doctorat, école nationale de l'hydraulique. p9 et 36.
- Van der Knijff, J.M., Jones, R.J.A. & Montanarella, L; (2000). Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau, Joint Research Center of the European Commission. .
- Van Leeuwen WJD, Sammons G; (2004). Vegetation dynamics and soil erosion modeling using remotely sensed data (MODIS) and GIS. Tenth Biennial USDA Forest Service Remote Sensing Applications Conference, 5–9 April 2004, Salt Lake City, UT. US Department of Agriculture Forest Service Remote Sensing.
- Wischmeier, W.H., et D.D. Smith. (1978). « Predicting Rainfall Erosion Losses - À Guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture.
- Williams, (1975). Class anthozoa, p. 85-93. In: Light's manual; intertidal invertebrates of the central California coast. S. F. Light, R. I. Smith, and J. T. Carlton (eds.). University of California Press, Berkeley.
- Wischmeier W. H., Smith D. D., (1978). Predicting rainfall erosion losses - à guide to conservation planning. US Department of Agriculture, agricultural hand-book n° 537, Science and Education Administration USDA, Washington DC.58 p
- Xu, Y.Q., Shao, X.M., Peng, J. (2009). Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Maotiao River watershed, Guizhou Province, China. Environmental Geology 56, 1643-1652.