Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Département Génie Civil et Hydraulique

Filière : HYDRAULIQUE

Spécialité : RESSOURCES HYDRIQUES

Thème

OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR EVALUER LE RISQUE D'EROSION HYDRIQUE CAS DU BASSIN VERSANT DE LA MEDJERDA-MELLEGUE (NORD-EST DE L'ALGERIE)

Présenté par :

CHERHABIL Madani

SELMANE Taki Eddine

SEGGAI Sofiane	**MCA**	**UKM Ouargla**	**Président**
FORTAS Taher	**MCA**	**UKM Ouargla**	**Examinateur**
BOUAMRANE Ali	**MCB**	**UKM Ouargla**	**Encadreur**
DERDOUS Oussama	**MCB**	**UKM Ouargla**	**Co- Encadreur**
EL FERGOUGUI M	**MCB**	**UKM Ouargla**	**Invité**
BENLARBI.D	**MCB**	**UKM Ouargla**	**Invité**

Année Universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

Nous commençons par remercier dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et l'amour du savoir pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nos plus vifs remerciements vont à BOUAMRANE Ali et DERDOUS Oussama pour avoir accepté de nous encadrer et nous diriger tout le long de la réalisation de ce projet, et pour Tous les conseils instructifs et judicieux et leur disponibilité.

Nous tenons à remercier également les membres de Jury:

***SEGGAI Sofiane** et **FORTAS Taher** pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

A tous les enseignants du département Hydraulique et Génie civil qui ont contribué à notre formation.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à mes chers
parents. Ma mère pour m'avoir mis au
Monde et pour m'avoir accompagné tout le
long de ma vie. Je lui dois une fière
Chandelle. Mon père qui sans lui je ne serais
pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours
Rester fidèle aux valeurs morales qu'il m'a
apprises.
Mes très chères sœurs et frères et toute ma famille.
Mes très chers amis et
Mes camarades de la promo d'hydraulique
De 2018/2019
Je dédie ce modeste travail.

Madani

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à mes chers
parents. Ma mère pour m'avoir mis au
Monde et pour m'avoir accompagné tout le
long de ma vie. Je lui dois une fière
Chandelle. Mon père qui sans lui je ne serais
pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours
Rester fidèle aux valeurs morales qu'il m'a
apprises.
Mes très chères sœurs et frères et toute ma famille.
Mes très chers amis et
Mes camarades de la promo d'hydraulique
De 2018/2019
Je dédie ce modeste travail.

Taki Eddine

Table des matières

Liste des Tableaux

Liste des figures

Introduction générale……..1

Chapitre 1 : Recherche bibliographique.

1. Introduction 3
2. Notions sur l'érosion du sol 3
3. Définition l'érosion hydrique 4
4. Mécanismes de l'érosion hydrique 4
   4.1. Détachement :.....*5*
   4.2. Transport *5*
   4.3. Dépôt *5*
5. Processus d'érosion 6
   5.1. Érosion entre rigoles (en nappe).....*6*
   5.2. Érosion en rigoles.....*6*
   5.3. Érosion par ravinement *6*
6. Facteurs à l'origine d'érosion :.....7
   6.1. • Le climat 7
   6.2. • La nature du sol *7*
   6.3. • La topographie *7*
   6.4. • Couvert végétal *7*
   6.5. • Activités humaines : *7*
7. Conséquences de l'érosion hydrique 7
   7.1. • Dégradation de la qualité de l'eau 8
   7.2. • L'envasement des barrages 8
   7.3. • Les pertes de sols par érosion hydrique 8
   7.4. • Des mouvements de terrain.....8
8. Approches et méthodes de quantification de l'érosion hydrique 9
   8.1. Mesures de terrain *9*
   8.2. Recherche d'indicateurs d'érosion *9*
   8.3. Utilisation de l'imagerie satellitaire.....9
   8.4. Méthodes et approches existantes 10

9.Conclusion……..……..….10

Chapitre 2 : Caractéristiques de zone d'étude

1. Introduction 11
2. Caractéristiques de la zone d'étude.....12
2.1. Situation géographique.....*12*
2.2. Géologie *14*
2.3. Paramètres hydrographiques *14*

3. Climatologie et occupation du Sol 18
3.1. Les ensembles morphologiques *18*
3.2. Couvert végétal *19*
3.3. Agriculture *19*
3.4. Le sol.....*20*
3.5. Climat.....*22*
4. Conclusion.....26

Chapitre 3 : Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par l'approche RUSEL

1. Introduction :..... 27
2. Méthodologie 28
3. Extraction des facteurs de l'R-USLE 29
3.1. Facteur d'érosivité de la pluie R 29
3.2. Facteur d'érodibilité du sol K..... 30
3.3. Facteur topographique LS..... 31
3.4. Facteur du couvert végétal C..... 32
3.5. Facteur des pratiques antiérosifs P 32
4. Résultats 34
4.1. Cartographie des facteurs de RUSLE 34
4.1.1. Facteur R..... 34
4.1.2. Facteur K..... 35
4.1.3. Facteur LS 36
4.1.4. Facteur C..... 37
4.2. Carte de risque potentiel d'érosion..... 38
5.Conclusion……..40

Chapitre 4 : Cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique

1. Introduction 41
2. Méthodologie 41
3. Préparation et extraction des données 43

4. Cartes d'inventaire de l'érosion des sols 43
5. Facteurs d'érosion 45
5.1. Indice d'humidité topographique *45*
5.2. Aspect de la pente *45*
5.3. Distance des rivières *45*
5.4. Altitude *45*
5.5. Occupation du sol *45*
5.6. Pluie *46*
5.7. Le type de sol *46*
5.8. Indice de végétation par différence normalisé (NDVI) *46*
5.9. Pente *46*
5.10. Indice de puissance de flux *47*
5.11. Indice de transport des sédiments *47*
5.12. Distance de la route *47*
6. Standardisation 48
7. Pondération des facteurs et combinaison des couches 48
8. Méthode Hiérarchique Multicritère (AHP) 49
8.1. Principe de la Méthode *49*
8.1.1. Fondements de la méthode 49
8.1.2. Résultats obtenues *51*
8.1.3. Discussion *57*
9. Validation de la carte de susceptibilité à l'érosion des sols 57
9.1. La courbe ROC *57*
9.2. Résultats et discussion *58*
10. Conclusion 58
Conclusion générale 59

ملخص

يعد تآكل التربة أحد أخطر المشاكل البيئية المعقدة في العالم لأنه يهدد إمكانيات المياه والتربة. في الجزائر، حجم هذه الظاهرة كبير، حيث تتعرض حوالي 6 ملايين هكتار للتآكل. الهدف من هذه الدراسة هو تطوير أداة لدعم اتخاذ القرار، لتقييم وتحديد المناطق المعرضة لخطر التآكل باستخدام أدوات الاستشعار عن بعد ونظام المعلومات الجغرافية والنماذج الرياضية وشبه الكمية. تم إعداد خريطة جرد باستخدام الصور الجوية والمسوحات الميدانية لتقييم أداء الخرائط التي تم إنشاؤها.سوف تساعد نتائج هذا التحليل في تصنيف المناطق التي تمت دراستها وتحديد الأولوية لمكافحة التآكل.

الكلمات المفتاحية:

تآكل، دعم اتخاذ القرار، نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد، النماذج الرياضية.

Résumé

L'érosion des sols est l'un des problèmes environnementaux les plus graves/complexes du monde car elle menace les potentialités en eau et en sol. En Algérie, l'ampleur de ce phénomène est considérable, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active. L'objectif de cette étude est de développer un outil d'aide à la décision pour évaluer et cartographier les zones à risques d'érosion hydrique en utilisant les outils de télédétection, le système d'informations géographiques et des modèles mathématiques et semi-quantitatif. Une carte d'inventaire a été préparée à l'aide de photographies aériennes et des enquêtes sur terrain afin d'évaluer les performances des cartes générées. Les résultats de cette analyse permettront de classer les zones étudiées et de définir des ordres de priorités en matière d'aménagements antiérosifs .

Mot clés :

Erosion, Aide à la décision, SIG, télédétection, modèles mathématiques.

Abstract

Soil erosion is one of the most serious / complex environmental problems in the world because it threatens water and soil potential. In Algeria, the magnitude of this phenomenon is considerable about 6 million hectares are exposed to active erosion.

The aim of this study is to develop a decision support tool to assess and map areas at risk of water erosion using remote sensing tools, geographic information system and mathematical and semi-quantitative models. An inventory map was prepared using aerial photographs and field surveys to evaluate the performance of the generated maps. The results of this analysis will help to classify the areas studied and to define priority orders for erosion control.

Keywords:

Erosion, Decision support tools, GIS, remote sensing, mathematic models.

LISTE DES FIGURES

Figures	Page
Fig.1.1 Mécanismes de l'érosion Hydrique	**5**
Fig.1.2. Les phases de l'érosion Hydrique	**6**
Fig.2.1.Le grand bassin Medjerda Algero-Tunisienne.	**12**
Fig.2.2. L'unité hydrographique du Constantinois-Seybousse-Mellegue.	**13**
Fig.2.3. Oueds Principales du bassin versant de Medjerda.	**13**
Fig.2.5. Réseau hydrographique du bassin Medjerda-Mellegue.	**16**
Fig.2.6. Longueur des principaux oueds par sous bassin .	**17**
Fig.2.7. Stations Pluviométriques du Bassin Versant Medjerda-Mellegue.	**24**
Fig.3.1. Organigramme méthodologie SIG/RUSLE.	**29**
Fig.3.2. Programmation R-studio.	**31**
Fig.3.3. Carte NDVI.	**33**
Fig.3.4. Carte du facteur d'érosivité de pluie R.	**34**
Fig.3.5. Carte du facteur d'érodibilité du sol K.	**35**
Fig.3.6. Carte du facteur topographique LS.	**36**
Fig.3.7. Carte du facteur du couvert végétal C.	**37**
Fig.3.8. Carte d'aléa d'érosion hydrique du bassin versant.	**39**
Fig.3.9. Carte des classes d'érosion hydrique du bassin versant.	**40**
Fig.4.1. Organigramme de la méthode de l'AHP.	**42**
Fig.4.2. Carte d'inventaire d'érosion.	**44**
Fig.4.3. Le processus de standardisation.	**48**
Fig.4.4. Carte aspect de la pente.	**53**
Fig.4.5. Carte Indice d'humidité topographique.	**53**
Fig.4.6. Carte distance de la rivière.	**53**
Fig.4.7. Carte distance de la route.	**53**
Fig.4.8. Carte de l'élévation.	**54**
Fig.4.9. Carte érodibilité de sol.	**54**
Fig.4.10. Carte Occupation de sol.	**54**
Fig.4.11. Carte de pluie.	**54**
Fig.4.12. Carte NDVI.	**55**
Fig.4.13. Carte SPI.	**55**
Fig.4.14. Carte de pente.	**55**
Fig.4.15. Carte de TWI.	**55**
Fig.4.16. Cartes de susceptibilité de l'érosion de Bassin Versant Medjerda-Mellegue.	**56**
Fig.4.17. Courbe ROC.	**58**

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
Tableau 2 .1. Caractéristique morphologique des bassins versant de la Medjerda Mellegue	**18**
Tableau 2.2. Répartition des superficies agricoles dans la région d'étude en (Ha).	**20**
Tableau 2.3. Caractéristiques des stations pluviométriques.	**23**
Tableau 2.4. Moyennes mensuelles des précipitations en mm dans les stations.	**25**
Tableau.3.1. La répartition des classes d'érosion au niveau de tout le bassin.	**38**
Tableau.4.1. Sources des données utilisées dans l'étude.	**43**
Tableau.4.2. Sources des données utilisées dans l'étude.	**47**
Tableau. 4.3. Échelle à 9 valeurs de Saaty.	**50**
Tableau. 4.4. Valeur de l'indice aléatoire IA.	**51**

Introduction générale

Les sols sont des ressources naturelles non renouvelables soumises à des menaces de plus en plus nombreuses. Ce qui signifie que leur perte et leur dégradation ne sont pas récupérables au cours du temps (1). Cette problématique se complique davantage du fait de l'extension des activités humaines et les conditions écologiques peu favorables (sécheresse prolongée, sol peu fertile …etc.). Selon l'enquête de GLASOD (the expert-based Global Assessment of Human-Induced Soil Degradation), environ 15% des terres a l'échelle mondiale sont soumises à la dégradation physique (Oldman et al. 1991). Malheureusement la zone méditerranéenne est l'une des régions les plus vulnérables à l'érosion des sols. En ce sens, depuis les dernières années, plusieurs chercheurs au niveau international s'orientent vers établir des études afin d'évaluer de la dégradation des terres dans cette région, à savoir : (Driss, (2018); Souidi et al, (2017); Hasbaia, et al, (2012); Bachaoui,et al, (2007); Ousmana et al, (2017); Ouallali, et al, (2016); Chikhaoui et al (2007); El Hage Hassan et al, (2016); Charbel et al, (2018) et Boughalem, (2012)).

L'Algérie à l'instar de ces pays observe des taux d'érosions parmi les plus élevés à l'échelle mondiale du fait de la conjonction des différents facteurs favorables au phénomène de l'érosion, et ce, malgré les efforts de luttes antiérosives telle que le reboisement et la reforestation de et l'aménagement de banquettes (Roose, et De Noni,2004).

Selon les statistiques, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active, et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportées annuellement par les eaux. Les pertes annuelles en capacité de stockage des eaux dans les barrages algériens sont estimées à environ 20 millions de m3 (Benblidia, 1993).

Pour une meilleure planification spatiale en matière d'aménagements antiérosifs, la cartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique constitue un outil indispensable d'aide à la décision qui permet d'intervenir de façon efficace et précise afin de lutter contre ce phénomène et localiser les endroits les plus vulnérables.

Le but de cette étude est d'évaluer les pertes en sols causées par l'érosion hydrique dans le bassin versant Medjerda-Mellegue et ce, par l'emploi du modèle empirique RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) et la méthode hiérarchique multicritères (AHP) dans un système d'information géographique (SIG).

Ce mémoire se compose de quatre chapitres. Le chapitre 1 présente une étude bibliographique concernant les risques d'érosion, ainsi que les outils de la modélisation. Le chapitre 2 est dédié à la présentation de la zone d'étude , la description des caractéristiques physiques (Typologie et occupation des sols) et climatiques (climat, pluviométrie, température) du bassin versant. Finalement, le troisième et le quatrième chapitre sont consacrés à la cartographie de la perte en sol causée par l'érosion hydrique sur l'ensemble du bassin versant Medjerda-Mellegue en employant le modèle empirique RUSLE et le l'approche d'évaluation qualitative AHP sous Arc GIS.

Chapitre. I : Recherche bibliographique.

- *Introduction*
- *Notions sur l'érosion du sol*
- *Définition l'érosion hydrique*
- *Mécanismes de l'érosion hydrique*
- *Processus d'érosion*
- *Facteurs à l'origine d'érosion*
- *Conséquences de l'érosion hydrique*
- *Approches et méthodes de quantification de l'érosion hydrique*
- *Conclusion*

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse bibliographique qui décrit le fondement du risque d'érosion du sol ainsi que le mécanisme et les processus du phénomène ainsi que les facteurs influent et les conséquences engendré.

2. Notions sur l'érosion du sol

L'érosion est un phénomène naturel complexe de dégradation des sols, qui menace particulièrement les potentialités en eau et en sol. Il regroupe l'ensemble des phénomènes externes qui enlèvent tout ou une partie des terrains existants et modifient le relief. Donc on peut définir l'érosion comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt (Laflen et Roose. 1997).

Selon UN-FAO (1965) , on peut distinguer deux types d'érosion, l'érosion de masse et l'érosion superficielle. L'érosion de masse englobe toutes les formes d'érosion dans lesquelles les particules tendent à se déplacer en masse, essentiellement sous l'effet de la pesanteur. Elle comprend en règle générale divers types de glissements de terrain, ainsi que les formes d'érosion qui ne sont pas en rapport avec les pluies (solifluxion sèche). L'érosion de surface correspond à la mise en mouvement de particules de sol par des forces autres que la seule pesanteur, par exemple par l'écoulement de l'eau à la surface du terrain et l'impact des gouttes de pluie. Dans le cadre de nos travaux sur l'érosion des sols , nous travaillons principalement sur les processus d'érosion physique responsables du détachement, du transport et de la sédimentation des particules de sol, sous l'action de l'eau (érosion hydrique).

3. Définition l'érosion hydrique

L'érosion hydrique du sol peut se définir comme étant le phénomène par lequel le sol perd, sous l'action de l'eau, certaines ou toutes ses particules. Cette érosion se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (INRA et IFEN, 2002).Selon Demangeot, (1994) l'érosion hydrique consiste en une dissociation du matériaux rocheux ou terreux, ensuite en un transport et dépôt des débris arrachés .La dissociation peut se faire sous forme chimique (altération chimique et dissolution) ou physique (désagrégation mécanique et enlèvement des débris). L'érosion hydrique dépend de la présence simultanée de plusieurs facteurs qui sont la topographie, le type de formation meuble, le type de sol, la couverture végétale, l'agressivité climatique et l'action anthropique.

4. Mécanismes de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique résulte de divers processus que sont le détachement, le transport et le dépôt ou la sédimentation. (Fig.1.1)

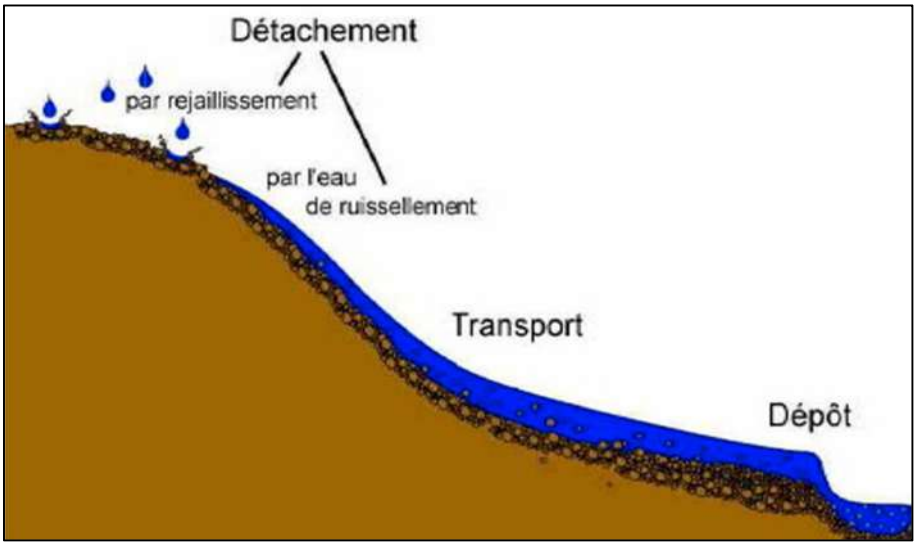

Fig.1.1. Mécanismes de l'érosion Hydrique. (Dautrebande, 2011)

4.1. Détachement :

Le détachement des particules du sol se produit lorsque les gouttes de pluie brisent les agrégats (splash) ou quand la force de cisaillement de la lame d'eau à la surface du sol dépasse les possibilités de résistance au détachement de ce sol. L'action cisaillant de l'écoulement de l'eau est d'autant plus importante que la vitesse du courant est forte. (Dahmani 2015).

4.2. Transport

Les particules issues de la dissociation, grossières ou fines, sont ultérieurement déplacées vers l'aval sous l'action de la gravité. Certains, comme les cailloux d'éboulis et les blocs d'éboulement, tombent directement. D'autres, les plus fins, sont véhiculés par un agent de transport, l'eau. La force du véhicule règle naturellement la taille des sédiments ; (Demangeot, 2000).

4.3. Dépôt

Il s'effectue lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux issus du détachement diminue ou s'annule (Demangeot, 2000). Les particules arrachées se déposent entre le lieu d'origine et les flots. Elles se déposent en général dans l'ordre suivant : Sable, sable fin, limon. Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où ils se déposent soit après évaporation de l'eau, soit après floculation (Belarbi, 2010).

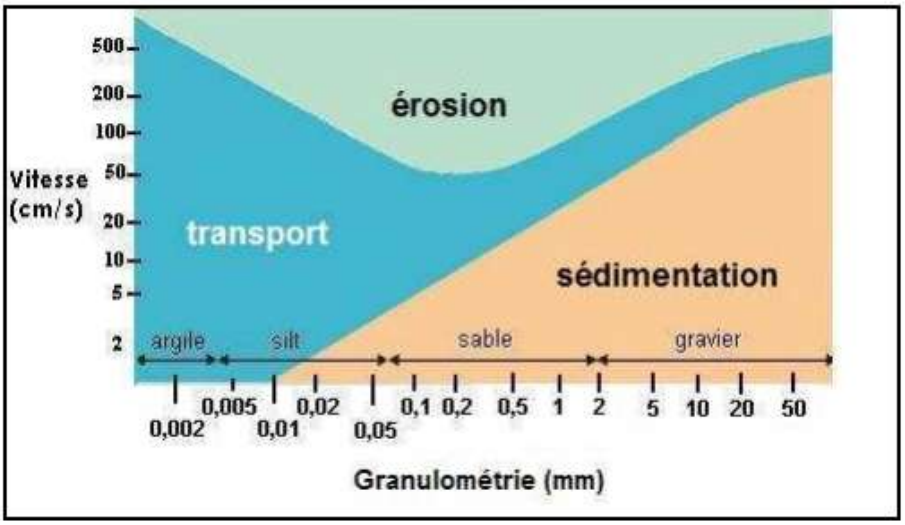

Fig.1.2. Les phases de l'érosion Hydrique. (Cheggour, 2008)

5. Processus d'érosion

Dans la littérature, on distingue trois grands types d'érosion, soit l'érosion entre rigoles (en nappe), l'érosion en rigole et le ravinement (Hudson, 1981).

5.1. Érosion entre rigoles (en nappe)

L'érosion entre rigoles se caractérise par l'effet des gouttes de pluie sur le sol. Lorsque les gouttes de pluie entrent en contact avec le sol, leur énergie compacte, détruit et disperse ses agrégats qui peuvent par la suite être transportés par l'eau de ruissellement. L'énergie des gouttes de pluie peut prendre deux formes : potentielle et cinétique.

5.2. Érosion en rigoles

Lorsque la capacité d'infiltration du sol a été dépassée, l'eau s'accumule à la surface du sol et pourra ruisseler sur l'effet de la pente. Cette eau de ruissellement peut provoquer des entailles à la surface du sol. Si le sol n'est pas protégé, certaines de ces entailles, surtout celles produites dans de petites dépressions, deviendront des rigoles.

5.3. Érosion par ravinement

L'érosion par ravinement est le résultat de l'érosion en rigole. Elle est la forme la plus dramatique d'érosion hydrique du sol. Les ravines se forment une fois que l'eau de ruissellement s'accumule dans les rigoles non traitées. Sous l'effet du volume et de la vitesse de l'eau de ruissellement, ces rigoles deviendront plus larges et plus profondes, formant ainsi des ravines.

6. Facteurs influents l'érosion :

6.1. Le climat

Selon Stone (2000), plus les précipitations sont intenses, plus le ruissellement et les risques d'érosion sont élevés. Selon Arnold et al. (1989), l'impact des gouttes de pluie peut briser les agrégats et disperser les particules de sol les rendant ainsi plus sujettes à l'érosion. En outre, le taux de ruissel1ement est souvent accru si, durant les événements de pluie, l'infiltration est diminuée par la compaction, la formation d'une croûte ou de gel. (Muganza, 2011).

6.2. • La nature du sol

La texture est le principal facteur qui influence la susceptibilité du sol à l'érosion. Certains éléments comme la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle (Stone, 2000). Selon Arnold et al. (1989), les sables grossiers, les loams et les argiles compactes tendent à s'éroder moins que les limons, les sables très fins et certains loams argileux. Par contre, selon Poesen et al (2003), la contribution du ravinement aux pertes totales de terre est plus importante là où le sol est argileux et Là où la texture des sols est plus grossière.

6.3. • La topographie

Selon Stone (2000), plus la pente est forte et longue, plus le risque d'érosion est élevé. En fait, l'augmentation du degré de l'inclinaison de la pente amène un accroissement de la vitesse de ruissellement de l'eau et une diminution du taux d'infiltration, ce qui crée une augmentation de la quantité de ruissellement.

6.4. • Couvert végétal

Selon de Vente et al. (2005), le type de couvert végétal joue un rôle important dans le processus de l'érosion, et ce de différentes façons. Un couvert forestier protège le sol et a une influence bénéfique sur la structure et la capacité d'infiltration du sol. Selon Arnold et al. (1989), le risque d'érosion augmente avec la diminution du couvert végétal et du pourcentage de résidus de culture sur les terres agricoles.

6.5. • Activités humaines :

L'Homme est un agent incontournable de l'érosion hydrique à cause de ses pratiques agricoles et d'utilisation du sol. Il agit par la mise en culture ou en pâture aux dépens de la forêt ou des formations arbustives, mais aussi par la surcharge pastorale. (Ouattara, 2002).

7. Conséquences de l’érosion hydrique

Les conséquences de l’érosion sont multiples et peuvent notamment s’observer à travers les pertes d’épaisseur du sol, de productivité des terres et de qualité de l’environnement (Francis, 2003).Globalement, l’érosion est à l’origine de pertes de sol d’un côté, et de dépôts d’autre part.

7.1. Dégradation de la qualité de l'eau.

L'érosion des sols par les pluies entraîne un afflux de particules dans les milieux lors des épisodes pluvieux. Ces particules de sols, dites « matières en suspension », peuvent impacter la biodiversité des milieux et la qualité de l'eau lorsqu'elles sont présentes en trop grande quantité. En suspension dans l'eau, elles en diminuent la transparence. Cette opacité limite la pénétration de la lumière, ce qui affecte la photosynthèse des plantes immergées. Les capacités respiratoires des animaux aquatiques sont aussi altérées par un excès de matières fines. Lorsque le courant diminue, les particules qui se déposent sur le fond provoquent l'envasement de certains secteurs. Cette couche de sédiments fins « étouffe » le lit du cours d'eau - situation qualifiée de colmatage du lit - et dégrade certains habitats.(2)

7.2. L'envasement des barrages :

Le processus de l'envasement influe sur le volume d'eau utile emmagasiné dans les barrages entrainant une diminution de capacité de stockage de ces derniers. Ce problème de sédimentation est lie au aux phénomènes de l'érosion hydrique dans le bassin versant qui lui-même est conditionné par certain paramètre tel que la nature du sol la couverture végétale la pente de versant, la quantité de précipitation et leur intensité (Medjber, 2011).

7.3. Les pertes de sols par érosion hydrique

Outre la dégradation de la qualité de l'eau, la perte de sols par érosion hydrique est dommageable aux cultures agricoles. Le renouvellement naturel du sol étant très lent, la perte annuelle de plusieurs tonnes de sols dans une parcelle menace sa productivité, parfois même à court terme. L'érosion des sols a une deuxième conséquence indirecte : le carbone contenu dans les particules de sol emportées par l'eau peut être transformé en dioxyde de carbone (CO2) et rejeté dans l'atmosphère. L'érosion des sols contribue ainsi à l'émission de gaz à effet de serre.(2)

7.4. Des mouvements de terrain

Le phénomène d'érosion se manifeste parfois par des mouvements de terrain. Il peut s'agir de ruptures de blocs de roche, d'effondrements, de coulées de boues, de laves torrentielles ou de glissements de terrain. Ces événements naturels - mais qui peuvent être accentués ou déclenchés par les activités humaines - provoquent une destruction locale et plus ou moins durable des espèces vivantes et des habitats naturels. Les mouvements de terrain représentent une menace pour les personnes et les infrastructures. En effet, ces événements peuvent être particulièrement

dévastateurs et provoquer des dégâts matériels très importants sur leur passage, ainsi que des décès.(2)

8. Approches et méthodes de quantification de l'érosion hydrique

8.1. Mesures de terrain

La quantification des pertes de terres peut se faire par mesures directes sur le terrain grâce à l'installation d'une station de jaugeage ou station hydrologique à l'exutoire de la surface d'étude permettant de suivre les flux d'eau et de matières solides associées. Chaque station hydrologique peut par exemple être équipée de capteurs de hauteur d'eau qui permettent de mesurer le débit en continu au droit de déversoirs (pour les faibles débits) et de canaux rectangulaires en béton (pour les forts débits). Le transport solide peut être estimé à partir de mesures de concentration des eaux en matières en suspension (MES) grâce à des préleveurs automatiques asservis aux débits (Ben Slimane, 2008 ; Sauvadet et al., 2012). Dans ce cas, la masse érodée est calculée en intégrant les concentrations obtenues par rapport aux volumes écoulés.

8.2. Recherche d'indicateurs d'érosion

Les dernières années sont marquées par l'introduction du concept d'indicateurs dans les méthodes de suivi de l'érosion. Un indicateur est une variable simple à mesurer, informant sur l'état d'un système ou d'un phénomène complexe (OCDE, 1993). À partir des années 1990, les Nations Unies tentent de rénover leur approche et de remplacer la méthode d'évaluation de la dégradation des terres, par la recherche des indicateurs de qualité des terres – Land Quality Indicators (Brabant, 1992; Glémarec, 2001). La notion d'indicateur sera très utilisée jusqu'à présent. Pour les indicateurs spatialisables, le succès est amplifié par le développement, en parallèle, des systèmes d'information géographique. Une des applications les plus simples de la notion d'indicateurs associés au SIG consiste à lier les risques d'érosion à des indicateurs accessibles sur des cartes préexistantes (géologie, pédologie) (Veihe, 2002).

8.3. Utilisation de l'imagerie satellitaire

L'intérêt grandissant des études à échelle plurikilométrique et les problématiques environnementales associées ont stimulé l'utilisation de la télédétection en pédologie (Bonn et Escadafal, 1996). Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire), mais aussi sur

des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km2 grâce à des modèles spatiaux (King et Le Bissonnais, 1992). Les données satellitaires, aujourd'hui facilement accessibles, peuvent aider à la cartographie des risques érosifs. Cette approche ne peut toutefois en aucun cas dispenser des études de terrain pour établir une compréhension du phénomène et établir des relations entre l'information spectrale et la réalité terrain. Par son caractère spatial et temporel, la télédétection reste une source d'information privilégiée pour la régionalisation de l'érosion.

8.4. Méthodes et approches existantes

Il existe une large palette de modèles pour modéliser les processus de détachement et de transport de sédiments (et des polluants associés). Ces modèles diffèrent en termes de complexité, d'objectif, de description des processus élémentaires et de demande en données d'entrée. En règle générale il n'y a pas de modèle qui soit optimal pour toutes les applications. Le modèle le plus approprié dépendra de l'utilisation voulue, et des caractéristiques de l'environnement modélisé. Les autres facteurs influençant le choix d'un modèle pour une application inclus **:**

- La nature des données d'entrée (incluant les variations temporelles des entrées et sorties)
- La précision et la validité (incluant les hypothèses sous-jacentes)
- Les composants du modèle, qui reflètent ses capacités
- Les objectifs de l'utilisateur (incluant ses capacités à prendre en main le modèle, la nature et l'échelle des résultats escomptés)
- Les besoins en ressource informatique

En général on classe les modèles en trois grandes catégories, en fonction des processus physiques décrits par le modèle, des algorithmes décrivant ces processus et de la dépendance du modèle aux données d'entrée :

- Empirique ou statistique
- Conceptuel
- A base physique

9. Conclusion

À travers de cette synthèse bibliographique, nous avons présenté quelques éléments Essentiels étendus dans le contexte de l'évaluation du risque d'érosion.

Chapitre 2 :

Caractéristiques de zone d'étude

- *Introduction*
- *Caractéristiques de la zone d'étude*
- *Climatologie et occupation du Sol*
- *Conclusion*

1. Introduction

l'érosion des sols constitue un problème complexe. L'utilisation des caractéristiques physiques du milieu est très utile, car elle permet d'expliquer l'ampleur et l'évolution du processus d'érosion sur les versants.

C'est pourquoi nous avons consacré ce chapitre à l'étude des caractéristiques physiques du bassin versant de Medjerda-Mellegue pour montrer l'influence des facteurs de la lithologie, la topographie et l'occupation du sol à la stabilité du milieu. Le tracé hydrographique est fortement influencé par la lithologie et la topographie, leur influence se fait sentir, d'une part, sur le régime des cours d'eau, et d'autre part, sur l'érosion ainsi que sur le transport solide.

Aussi la sensibilité du milieu à l'érosion peut-elle être réduite par la potentialité de la couverture végétale.

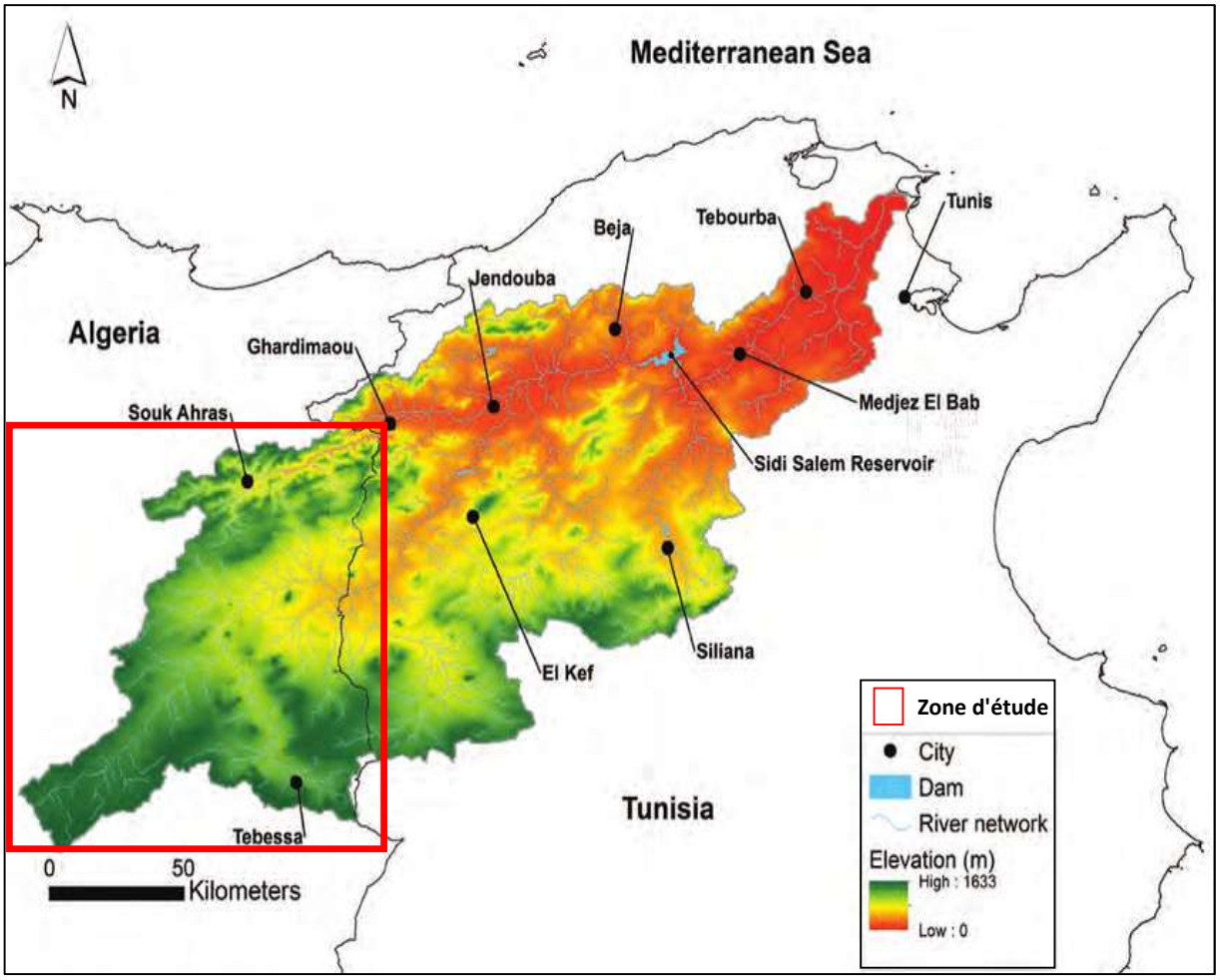

Fig. 2.1.Le grand bassin Medjerda Algero-Tunisien.(Kotti1, 2018)

2. Caractéristiques de la zone d'étude

2.1. Situation géographique

Dans notre étude, on s'intéresse par le bassin Medjerda-Mellegue. Cette zone est située aux frontières Algéro-Tunisiens, d'une superficie de 7841 km² (partie Algérienne). Le bassin Medjerda-Mellégue est limité au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois et à L'Est par la Tunisie, à l'Ouest par les bassins de la Seybouse et des Hauts Plateaux constantinois et au Sud par le bassin du Chott Melrhir (Figure2.3).

La confluence d'Oued Medjerda (Souk-Ahras) et Oued Mellégue donne la naissance d'OuedMedjerda (Cour d'eau principale). Oued Mellégue résulte par la jonction des deux Oueds : le 1er Oued Mellégue Amont qui à une direction SO-NE, le 2éme Oued Mellégue Aval c'est le résultat de la confluence d'Oued Kseub, Oued Horiher, Oued El Baiad, Oued El Harcha. Par ailleurs, la jonction d'Oued Meskiana et aussi Oued Chabro donne la naissance d'Oued Mellégue amont. (Djaba, 2010)

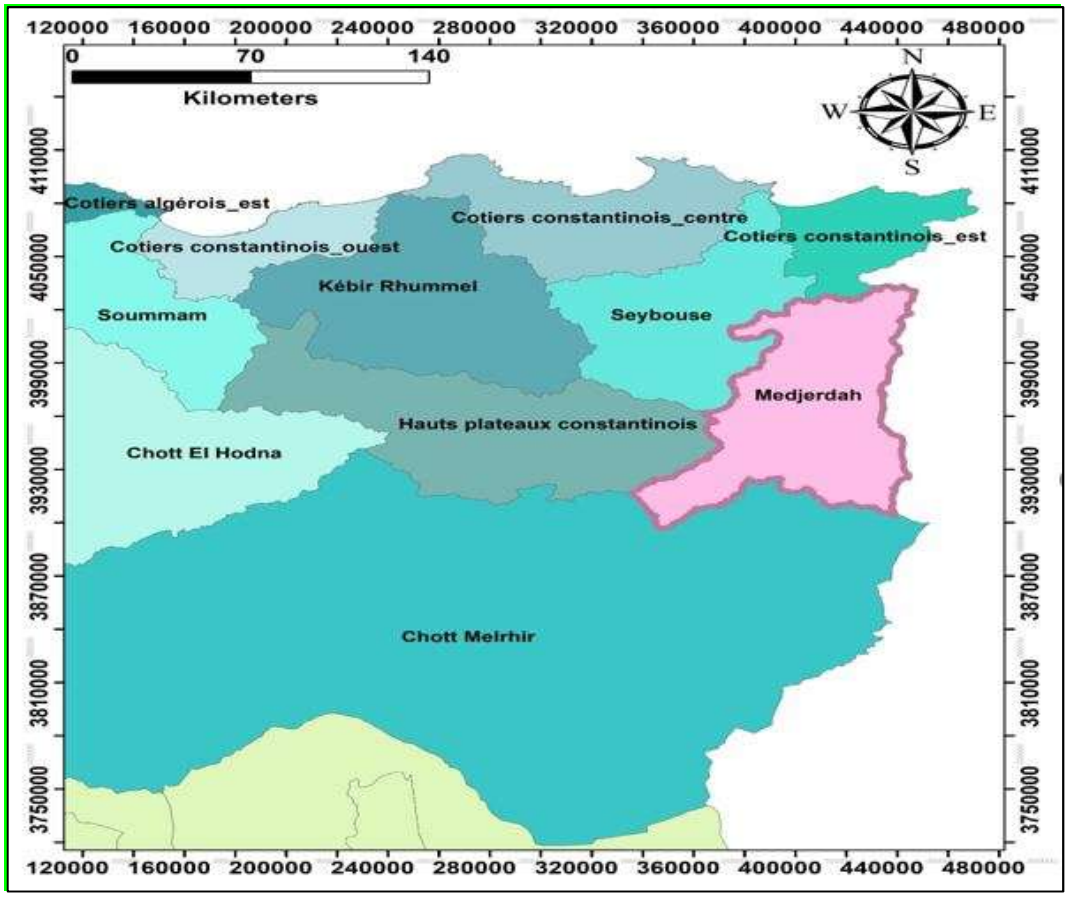

Fig.2.2.L'unité hydrographique du Constantinois-Seybousse-Mellegue

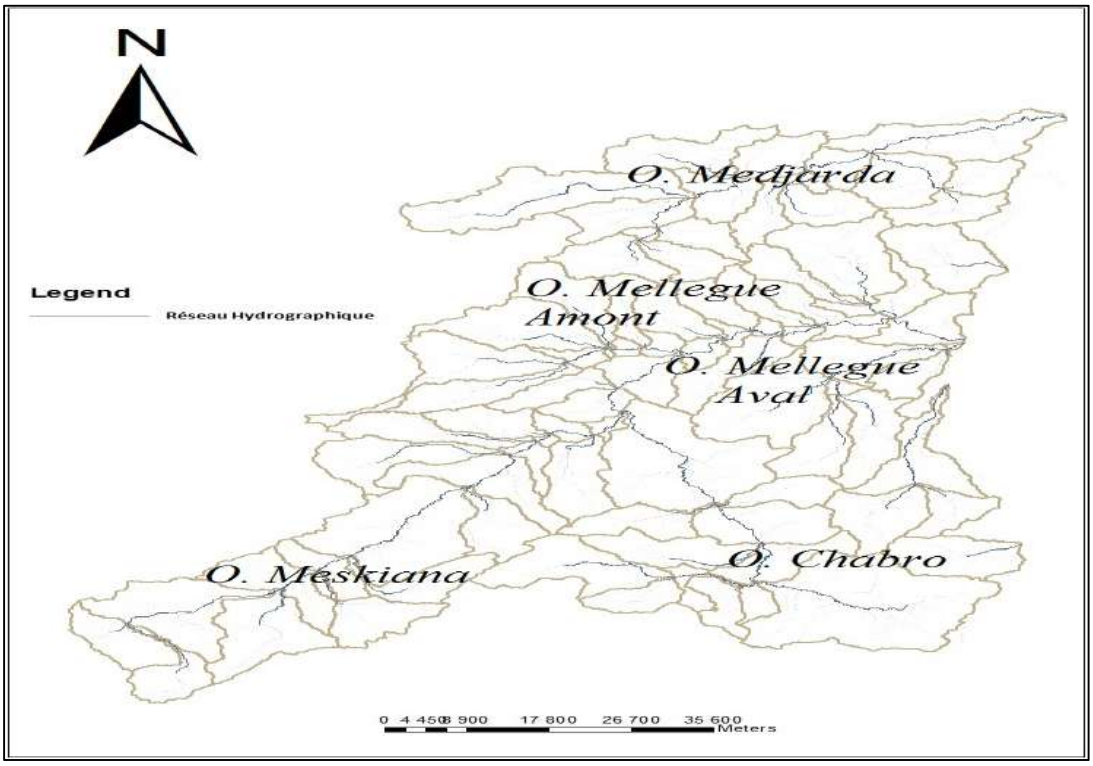

Fig.2.3. Principaux cours d'eau du bassin versant de Medjerda-Mellegue.

2.2. Géologie

Le bassin d'étude constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir : L'Atlas Tellien au Nord et saharien au Sud. Au Nord le bassin d'étude présente un relief accidenté et entouré d'une série de montagnes dont l'altitude varie entre 1400 m et 700 m. Il se caractérise par une végétation très développée et dense. Au Sud, Il présente une structure plissée d'une orientation dominante Sud-ouest, Nord-est. Cette structure est composée d'une série de plis synclinaux larges et d'anticlinaux plus étroits datant du crétacé. Leur couverture est généralement mince.

Selon David (1956) la zone est caractérisée par deux périodes orogéniques, une période pré orogénique caractérisée par un calme parfait, l'autre orogénique très courte et mouvementée ou de nombreuses phases orogéniques se succèdent depuis le Crétacé jusqu'au Quaternaire.

2.3. Paramètres hydrographiques

2.3.1. Périmètre du bassin (P)

Le périmètre du bassin versant est obtenu directement à l'aide de l'Autocade V.2008, est qui est de l'ordre de P = 1262 Km.

2.3.2. Superficie du bassin (S)

La superficie du bassin versant est mesurée à l'aide du logiciel Autocade V.2008, Le basin d'intérêt est d'une superficie A =7841 Km2.

2.3.3. Forme du bassin

La forme du bassin affecte l'hydrogramme afférent à une averse donnée et en particulier le débit de pointe à l'exutoire du dit bassin. Plusieurs efforts ont été déployés afin de développer un facteur permettant de décrire la forme d'un bassin versant. Les bassins tendent en général vers la forme d'une " poire plus ou moins ovale". Cependant des contraintes géologiques peuvent modifier cette forme. Plusieurs indices sont utilisés pour décrire la forme d'un bassin, tel que les suivants.

2.3.4. Indice de compacité de Gravelus (C)

Cet indice, comme son nom l'indique, est censé représenter la plus ou moins grande compacité du bassin. L'indice de compacité est donné par :

$$C = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Où A et P sont respectivement, la superficie (Km2) et le périmètre stylisé (Km) du bassin.
si C < 1,12 : le bassin a une forme ramassé.
si C >1,12 : le bassin a une forme allongé.
Dans notre bassin on a C = 3,99 donc le bassin a une forme allongé.

2.3.5. Rapport de circularité de Miller (1953) (RC)

Cet indice définit par le rapport de la superficie (A) du bassin versant à la superficie du cercle (A_c) ayant le même périmètre (P) que le bassin versant est donné par :

$$RC = 4\pi A/P^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. (2)$$

D'où on obtient RC = 0.06.
Le rapport de circularité de Miller est égal 1 pour un cercle et décroit au fur et à mesure que l'élongation du bassin est importante.

2.3.6. Facteur de forme (FF)

Ce facteur de forme est obtenu par la formule de Zavoianu (1978) suivante :

$$FF = 16A/P^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. (3)$$

donc FF = 0.078 donc la forme du bassin est rectangulaire.
Avec :

- FF = 1 forme de carré,
- FF = 1.277 forme de cercle ;
- FF <1 forme rectangle.

2.3.7. Le réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. Il peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement (nombre et longueur des cours d'eau) et son profil en long (figure 2.5). Le bassin Medjerda - Mellegue présente un chevelu hydro- graphique très ramifié, dense et hiérarchisé, représenté par 47 oueds principaux dont la longueur dépasse 10 km (figure 2.6).

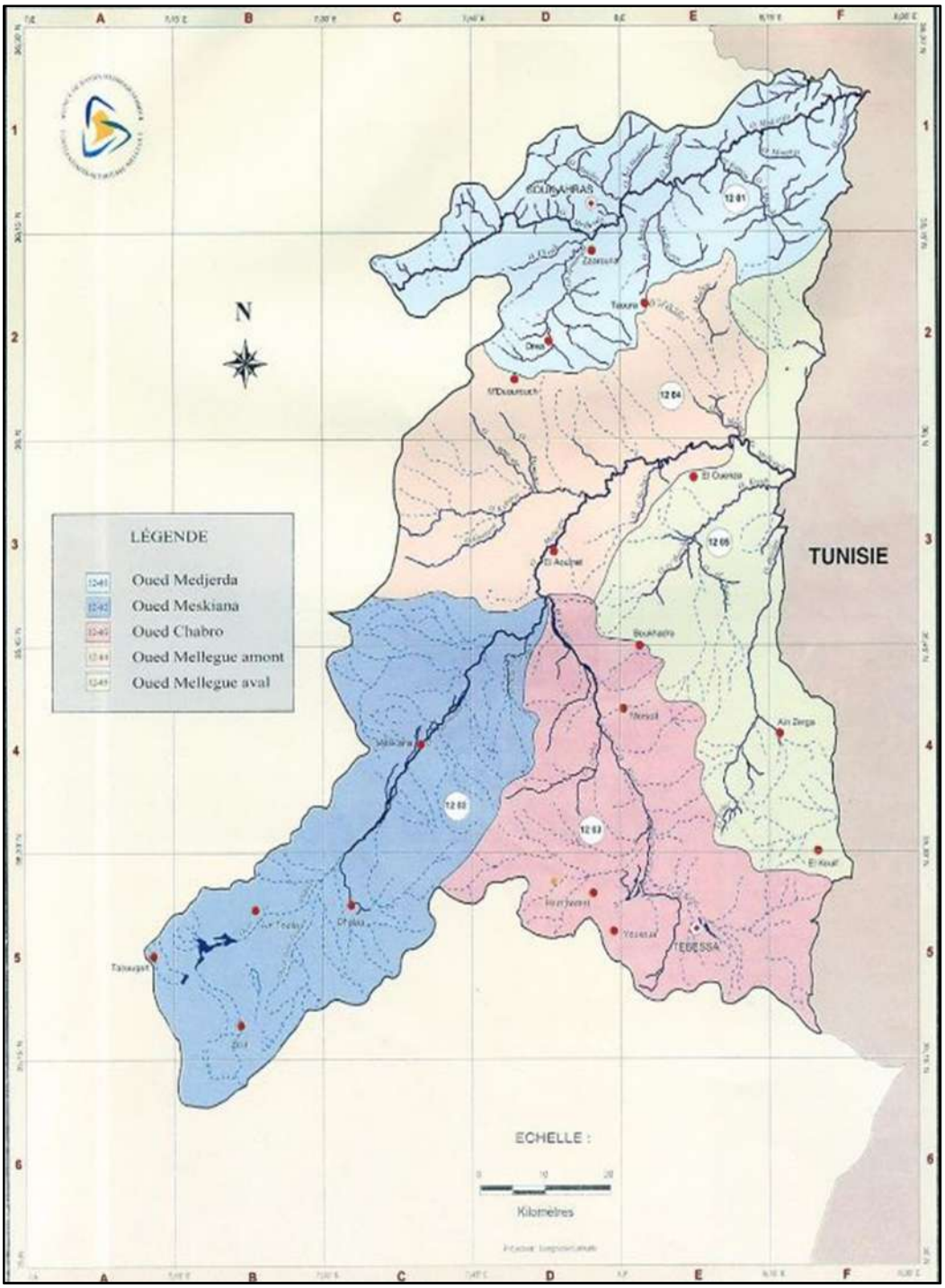

Fig.2.5.Réseau hydrographique du bassin Medjerda-Mellegue (Source : ABH, 2001).

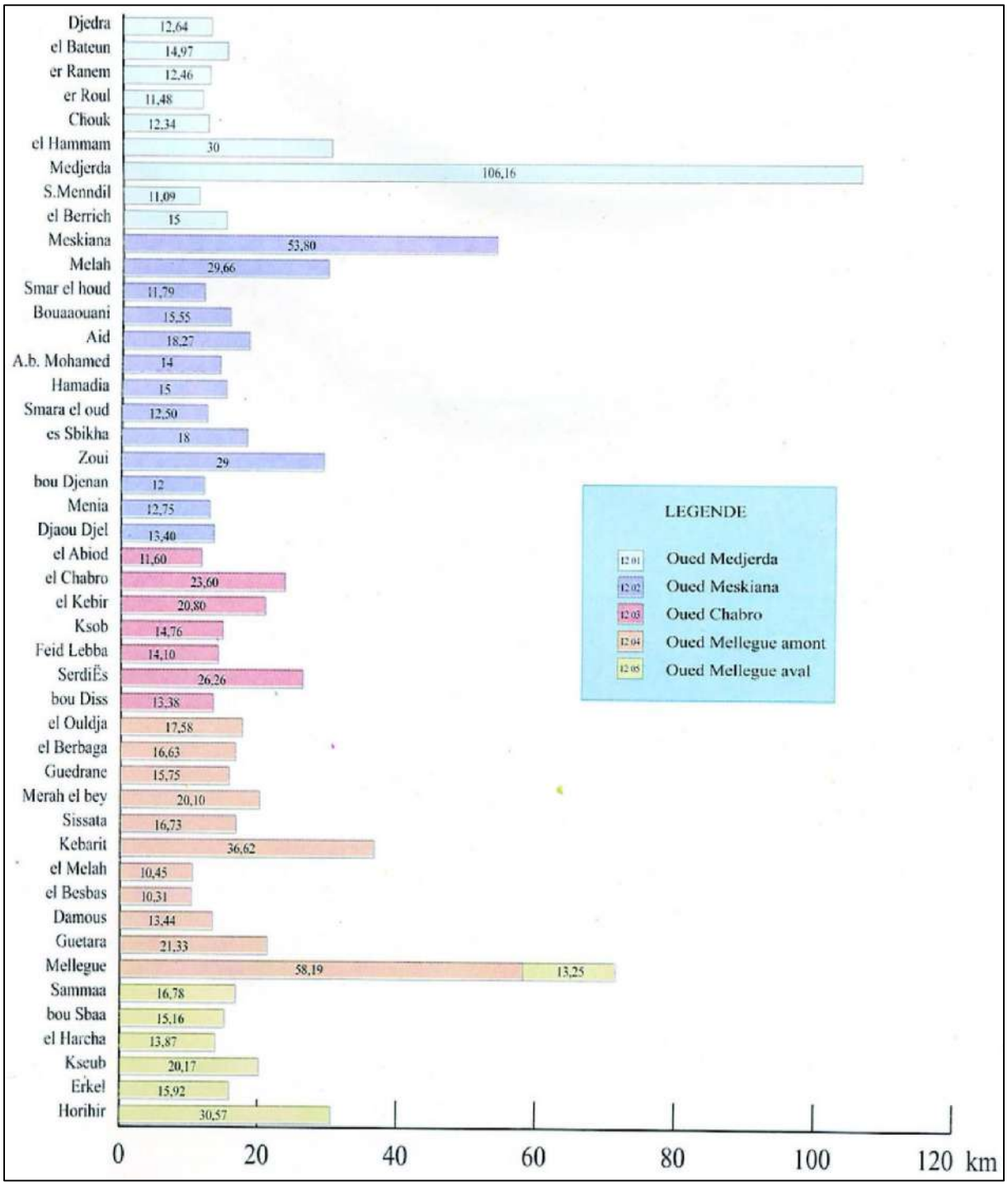

Fig.2.6.Longueur des principaux oueds par sous-bassin (Source : ABH, 2001)

Tableau 2 .1 : Caractéristique morphologique des bassins versants de la Medjerda-Mellegue (Source : ANRH, 2006)

Caractéristique	symbole	unités	Medjerda	Meskianna	Chabro	Mellegue amont	Mellegue aval
Superficie	S	Km^2	1524,72	1831,61	1571,12	1488,21	1395,91
Périmètre	L	Km	266,01	248,24	246,11	235,02	266,88
Longueur chevelue	LS	Km	708,73	1338,34	810,53	737,75	766,86
Indice de compacité de Graveluis	K	-	1,91	1,62	1,74	1,71	2,00
Longueur rectangle equivalent	LRE	Km	120,33	107,00	108,59	103,07	122,00
Largeur rectangle equivalent	LRE	Km	12,67	17,12	14,47	14,44	11,44
Dénivelé	DD	-	0,46	0,73	0,52	0,50	0,55
Altitude min	Hmin	M	250,00	700,00	700,00	500,00	450,00
Altitude max	Hmax	M	1400,00	1550,00	1600,00	1200,00	1400,00
Amtitude moy	Hmoy	M	825,00	1125,00	1150,00	850,00	925,00

2.3.8. La densité de drainage (Dd)

Elle est définie pour un bassin versant donnée de surface « S », comme la longueur totale des cours d'eau de tous les ordres sur la surface drainée, et est exprimée en Km/Km^2.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} Li}{S}$$

Avec : $\sum_{i=1}^{n}$ Li : somme des longueurs de tous les cours d'eau d'ordre i (km)

S : surface du bassin versant (Km^2).

AN : $D_d = 2.76$ Km/Km^2

3. Climatologie et occupation du Sol

3.1. Les ensembles morphologiques

L'analyse orographique du bassin d'Oued Mellegue et Medjerda fait apparaître trois grands ensembles morphologiques :

a) **Les zones de plaine :** C'est la partie la plus dominante, elle est caractérisée par une grande plénitude qui s'étend au Nord et à l'Est des piémonts entrent (600-1000 m) d'altitude, comme plaine de Tiffech, et M'Daourouch).

b) Les zones de montagnes :

Nous avons considéré que la zone de montagnes se situe au-delà de 1400m d'altitude. Le secteur montagneux orienté sensiblement NE-SO est composé des unités suivantes : Mont de Zoui, Mont d'Ouenza Dj Doukhane, Dj Dyr, Dj Metloug, Dj Ragouba, Dj Boubakouch aussi massifs de ras el alia, Tiffech…etc. Ces reliefs dont les continuités spatiales jouent le rôle d'une barrière entre un milieu semi-aride au Nord et les influences franchement Sahariennes au Sud.

c) Les zones de piedmonts :

Les piedmonts correspondent à des zones de transition entre les montagnes et les plaines à des altitudes moyennes qui varient entre (1000-1400m). Ils montrent un développement différent d'un secteur à un autre. Ces piedmonts correspondent en général à un ensemble de glacis d'ablation couverts sous forme de lanières résiduelles, le plus souvent scellés par une croûte calcaire. (Belloula,2007)

3.2. Couvert végétal

La végétation joue le rôle d'écran qui conditionne la rapidité du ruissellement superficiel et amortit son agressivité. Ainsi, les formes et l'importance de l'érosion hydrique sont directement liées, en plus d'autres facteurs, à la répartition de la couverture végétale dans le bassin.

La configuration géographique de la zone d'étude laisse apparaître 3 grands ensembles nettement distincts :

- Nord-est : zone montagneuse faisant partie de la chaîne Tellienne et qui constitue le patrimoine forestier de la région ;
- Sud-est : zone constituée de plaines agricoles et de pâturages ;
- Sud : zone des hauts plateaux

La superficie forestière de la zone d'intérêt est estimée à 114341,03 Hectares soit 44.41 % de la superficie totale des communes et elle est concentrée essentiellement au niveau des communes de Mechroha (75,48 %), Ouled-Moumen (50,01 %), Ain-Zana (52,98 %) et Zaarouria (49,53 %). (Djaba, 2010)

3.3. Agriculture

On constate dans notre bassin que les céréales représentent 87 % des cultures herbacées et que ces derniers représentent 62 % de la superficie agricole utile. Par contre les sols agricoles utiles (S.A.U) représente 86 % de la superficie agricole totale et 55 % de la superficie totale

de la région, tandis que les sols agricoles totaux (S.A.T) représente environ de 65 % de la superficie totale. Dans le tableau (2.2) un exemple sur les surfaces utilisées dans l'agricole.

Tableau 2.2.Répartition des superficies agricoles dans la région d'étude en (Ha) (Djaba,2010)

Nbr	Communes	Sup.	S.A.T	S.A.U	Terres
01	SOUK-AHRAS	4 307	1 495	1 315	641
02	KHEMISSA	5 944	4 351	4127	200
03	MDAOUROUCH	14 572	12 924	10 775	200
04	TIFFECH	14 376	11 988	9 540	375
05	RAGOUBA	10 128	8 125	5 795	350
06	TAOURA	25 096	19 338	18 469	179
07	ZAAROURIA	10 100	8 560	7 552	300
08	DREA	20 000	14 705	13 924	1 088
09	MERAHNA	11 623	9 872	9 168	298
10	OUILLEN	16 260	12 844	11 979	14
11	HEDDADA	15 630	10 139	9 600	383
12	KHEDARA	17 902	8 522	9 280	105
13	O-MOUMEN	13 286	3 813	3 484	972
14	MECHROHA	24 232	10 409	4 453	200
15	HENNENCHA	21 398	16 050	13 243	02
16	OULED-DRISS	15115	7 698	5 235	1 403
17	AIN-ZANA	17 512	5455	3 932	2 006
TOTAL		**257 481**	**166 288**	**141 871**	**7355**

3.4. Le sol

Les unités morphologiques sont caractérisées par des types de sol assez bien définis qui reflètent l'influence de l'évolution morphologique sur les processus pédogénétiques caractéristique des zones à climat aride ou semi-aride de la région Méditerranéenne.

Trois caractères essentiels rendent compte de la nature des sols de la région de l'étude :

a) La texture argileuse :

Les roches marno-calcaires entourant le périmètre donnent naissance à un matériau argileux qui descend par colluvionnement vers la vallée. Il s'opère ainsi un grano-classement des colluvions et alluvions, les plus fines étant entraînées aux points bas, les plus grossiers restant en position moyenne. Les teneurs en argile varient de 40% à 60%. Ces teneurs en argiles constituent un facteur limitant supplémentaire à la production agricole pour les raisons suivantes :

- La perméabilité des sols argileux est faible, et par conséquent la part infiltrée des précipitations est réduite, de plus, l'eau infiltrée reste à faible profondeur et donc aisément reprise par évaporation.
- La teneur en eau au point de flétrissement d'un sol argileux est relativement élevée, une grande partie de l'eau infiltrée se trouve donc retenu par sol sous une forme non disponible pour les plantes, ce qui accentue fortement l'aridité du pédo-climat.

b) Le calcaire :

Le matériau pédologique est extrême riche en calcaire. Les teneurs les plus faibles (sols bruns steppiques) ne descendent pas au-dessous de 15% ; les teneurs les plus élevées (sols peu-évolués, sols salins) atteignent 50 à 60%. En principe, les fortes teneurs en calcaire compensent, dans une certaine mesure les effets sur la structure des teneurs élevées en argile. Malgré cela, la perméabilité reste assez faible. Par ailleurs, l'excès de calcaire a des inconvénients au point de vue de la nutrition minérale des plantes (insolubilisation d'aligoéléments, chlorose des arbres fruitiers).

c) La salure :

La présence de roches salées dans les reliefs entourant le périmètre est responsable de la salure des sols. Les sels, mis en solution dans les eaux de ruissellement ou de drainage profond (nappes phréatiques) sont déposés par le mouvement ascensionnel de l'eau aux points bas .Tous les sols de la partie centrale sont donc salés ; la salure semble due pour l'essentiel à la présence de gypse ou d'ions Cl, plus rarement d'ion Na.

d) Pédo-morphologie :

Les processus qui conduisent à la formation de sols isohumique de climat chaud particulier, « les sols de Steppe » ont subi ici de remarquables influences en liaison avec les variations

climatiques, topographiques, du substrat et de la couverture végétale. C'est ainsi qu'ont pris origine les types de sol qu'on a ensuite classé et décrit selon la terminologie de la classification française. Autrement dit les sols calciques et les sols calcaires humifiés, sont les plus représentés dans la zone d'étude. (Belloula,2007)

e) Tectonique

La zone d'étude est dominée par les plissements anté-miocéne de direction générale Sud Ouest Nord-Est. Alignés sur des axes anticlinaux de cette direction, les calcaires récifaux Aptiens forment d'imposants massifs dominant la platitude des étendues marneuses. Les massifs aptiens sont crevés et disloqués par d'importantes remontées gypseuses du trias diapirique qui ont commencé avec les premiers plissements, des mouvements de direction orthogonales aux plissements, postérieurs à eux, mais encore anté-méocéne, ont donné des failles et des lignes de fractures orientées Sud-Est Nord-Ouest. Ces fractures, alliées aux mouvements du Trias, ont eu pour conséquence le soulèvement actuel et général de la région par la mise en relief des formations continentales Quaternaires et le creusement actuel des lits des Oueds. (Belloula,2007)

3.5. Climat

Le climat de la Medjerda se caractérise par un climat continental à influence méditerranéenne et désertique avec une pluviométrie variant entre 300 et 950 mm/an (Figure 2.7). Le maximum des jours de fortes pluies hivernales et du vent violent rencontré en décembre, janvier, est provoqué par le passage successif des dépressions d'Ouest, de quelques dépressions méditerranéennes. (Khoualdia, 2015)

3.5.1. La Pluviométrie :

Sur le bassin, les pluies sont irrégulières, elles varient de 325 mm au Sud à plus de 1220 mm au Nord. Pour l'ensemble du bassin, il existe vingt-neuf (29) postes pluviométriques et cinq (05) stations hydrométriques suivis par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H).

- **Données disponibles**

Les caractéristiques des stations pluviométriques disponibles pour cette étude sont données dans le Tableau 2.3

Tableau 2.3. Caractéristiques des stations pluviométriques (Source : ANRH, 2014)

N°	Nom de la station	Code	ALT (m)	Années d'observation (1970-2012)
01	AIN DHALAA	120202	980	42
02	AIN EL KEBIRA	120311	1350	42
03	AIN ERKEL	120514	1080	42
04	AIN KISSA	120306	985	42
05	AIN ZERGA	120510	850	42
06	BEKKARIA	120307	895	42
07	BOUKHADRA	120302	900	42
08	DYR DJEMAA	120519	975	42
09	EL AOUINET	120402	650	42
10	EL KOUIF	120504	1100	42
11	GASTEL	120511	950	42
12	HAMMAMET	120304	875	42
13	KHEMISSA	120104	900	42
14	MDAOUROUCH	120403	870	43
15	MESKIANA	120201	845	42
16	MESSLOULA	120405	700	42
17	MORSOTT	120318	/	42
18	OUENZA	120401	520	42
19	RAS EL AIOUN	120501	995	42
20	SAKIET YOUCEF	120503	780	42
21	SOUK AHRAS	120101	590	43
22	TAOURA	120105	850	42
23	TEBESSA	120301	890	36
24	AIN SENOUR	120103	/	42

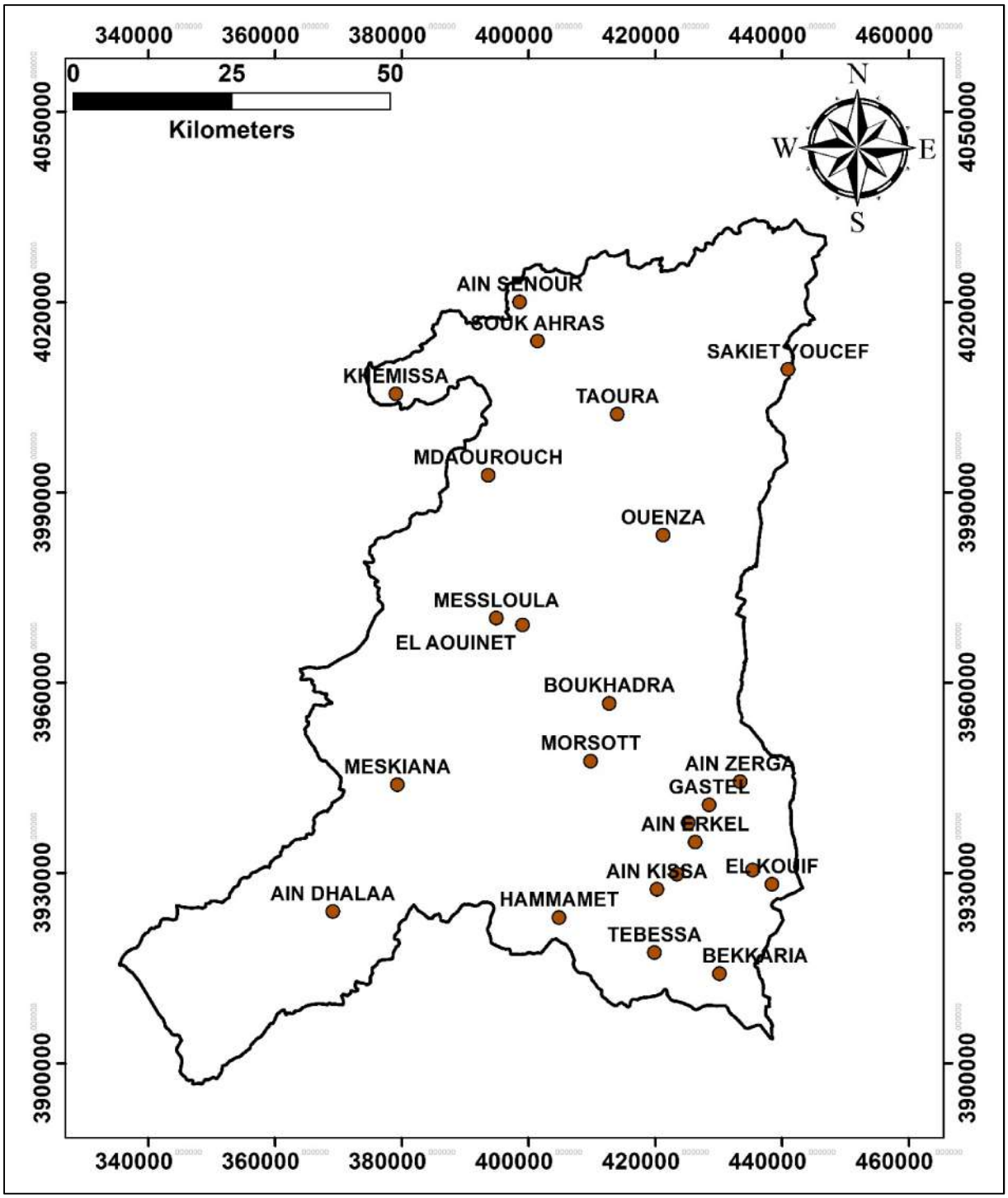

Fig. 2.7. Stations Pluviométriques du Bassin Versant Medjerda-Mellegue (Madani et Taki, 2019).

Tableau 2.4. Moyennes mensuelles des précipitations en mm dans les stations (Source : ANRH 2014)**.**

Station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aoû	an
AIN DHALAA	29,8	22,5	29,6	18,0	29,2	24,2	30,2	27,2	33,6	16,9	4,9	14,2	280,2
AIN EL KEBIRA	29,1	28,1	36,3	42,0	36,1	30,0	36,2	37,8	35,6	12,3	3,6	9,0	335,9
AIN ERKEL	37,1	31,5	45,6	39,4	38,3	35,2	52,9	41,0	49,2	26,9	9,2	19,5	425,7
AIN KISSA	32,9	28,1	35,7	34,3	34,9	30,6	48,9	32,9	36,9	26,8	9,0	18,7	369,8
AIN ZERGA	29,7	24,3	35,8	30,1	23,3	23,1	35,9	36,1	32,7	21,9	7,8	17,8	318,4
BEKKARIA	31,4	17,6	18,3	16,9	20,6	13,9	27,2	22,6	25,8	15,4	6,4	8,6	223,7
BOUKHADRA	39,2	27,5	36,0	29,6	31,9	24,2	30,4	40,0	41,0	17,3	5,1	16,5	336,1
DYR DJEMAA	29,8	25,4	37,1	32,1	29,6	28,3	32,6	35,1	36,2	21,6	7,0	18,8	333,6
EL AOUINET	26,3	20,3	23,5	20,6	24,8	25,4	28,7	30,0	41,0	20,7	3,3	10,1	274,6
EL KOUIF	32,3	24,1	34,7	24,6	27,1	27,2	27,9	26,4	27,4	18,0	6,3	13,6	289,7
GASTEL	29,5	20,0	32,6	31,6	27,4	23,3	57,5	30,7	28,8	18,4	4,7	16,8	321,3
HAMMAMET	37,3	29,6	26,4	22,6	27,3	24,4	40,0	30,5	40,4	22,7	8,5	15,7	325,4
KHEMISSA	32,4	38,2	54,1	86,4	73,5	55,2	51,5	47,7	35,8	12,3	1,8	9,1	498,0
MDAOUROUCH	29,0	26,6	29,3	37,8	38,1	37,1	37,8	40,9	34,2	16,5	7,0	15,1	349,5
MESKIANA	27,5	28,6	24,8	26,8	33,9	23,0	28,1	30,0	32,7	18,4	3,2	15,2	292,2
MESSLOULA	23,7	16,9	17,3	13,9	26,3	15,4	25,2	21,3	28,9	13,9	2,4	7,6	212,8
MORSOTT	29,1	22,9	29,6	31,6	32,4	27,3	26,3	23,4	25,5	17,0	5,6	12,7	283,6
OUENZA	30,0	18,8	21,9	18,3	22,5	20,6	26,3	28,0	37,2	17,9	7,1	15,8	264,4
RAS EL AIOUN	34,6	26,3	33,9	29,6	25,0	22,5	34,9	34,3	34,9	17,3	4,6	16,1	314,2
SAKIET YOUCEF	30,8	28,7	43,5	55,0	51,6	55,1	38,2	37,9	33,4	18,5	4,8	11,9	409,6
SOUK AHRAS	34,0	42,9	52,5	82,9	82,1	70,7	73,4	62,0	42,8	15,6	7,1	16,4	582,5
TAOURA	47,2	40,1	52,0	61,6	62,5	54,8	70,8	54,3	41,9	18,1	8,8	14,6	526,6
TEBESSA	38,8	32,3	27,3	29,6	31,8	24,7	39,0	35,4	38,2	28,7	14,2	23,8	363,5
AIN SENOUR	41,8	68,7	111,7	147,0	154,6	133,8	122,8	111,4	69,8	29,3	6,7	12,8	1010,3

3.5.2. Évapotranspiration

Selon la méthode de THORNTHWAITE la moyenne annuelle sur la période 1962-1990 est de 1371 mm à Tebessa et 1369 à Souk Ahras (source : ABH, 2001).

3.5.3. Les débits

Les débits à l'exutoire représentent la réponse d'un bassin à un ensemble complexe de plusieurs processus hydrométéorologiques et hydrologiques. La mesure du débit présente néanmoins une certaine difficulté, puisque ces débits varient sensiblement en fonction du temps, et cela même à l'échelle journalière. Pour le calage du modèle, les données de pluies et d'évapotranspirations sont exprimées en lame d'eau (mm/jour ou mm/mois), les débits observés sont exprimés généralement en m3/s. (Lababsa, 2015)

4. Conclusion

L'étude climatique a été élaborée en se basant sur une série de mesures correspondant à une période de 42 années d'observation (de 1970/2012).

Toutes ces variations climatiques sont liées au caractère du climat méditerranéen subhumide de l'Afrique du Nord.

La torrentialité des pluies de la fin du printemps et du début de l'automne met d'avantage en menace l'équilibre du bassin versant 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 3 : Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par l'approche RUSEL

- *Introduction*
- *Méthodologie*
- *Extraction des facteurs de l'R-USLE*
- *Résultats*
- *Conclusion*

1. Introduction :

Ce chapitre a pour but d'évaluer le risque d'érosion du sol à l'échelle du bassin versant de Medjerda-Mellegue a l'aide les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et l'application du modèle RUSLE. Cette dernière est une multiplication des cinq facteurs d'érosion à savoir l'érosivité de la pluie (5), l'érodibilité du sol (K), l'inclinaison et la longueur de pente(LS), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives(P). Chacun de ces facteurs a été exprimé sous forme de carte thématique. La détection des zones érodées, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et leur caractéristique, sont des tâches complexes, mais pouvant être résolus avec l'intégration de plusieurs sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain et images satellitaires) dans des systèmes de traitement géo-spatiale. Le modèle R-USLE est basé sur des lois mathématiques appliquées en utilisant des facteurs calculés et déterminés à l'aide des observations sur terrain et des analyses aux laboratoires. Celle-ci représente le modèle mathématique le plus couramment employé pour prédire les pertes dues à l'érosion de surface. Il prédit le taux moyen annuel de l'érosion à long terme sur une parcelle de terrain sur la base des facteurs responsables du phénomène : la pluviométrie, le type de sol, la topographie, le système de culture et les pratiques antiérosives.

2. Méthodologie

Dans le cadre de ce travail, la cartographie de l'érosion sera effectuée par l'application du modèle empirique RUSLE, établie par (Wischmeier,1978), toutefois, le modèle RUSLE est sélectionnée parmi les modèles les plus applicables grâce à sa structure très simple et l'entrée économe des données en relation avec les données disponibles et l'échelle de l'investigation. En effet, l'usage de cette équation à l'échelle des bassins versants dans le monde est très remarquable surtout dans les pays d'Afrique (Angima et al. 2003, EL-garouanI et al. 2008, Mhangara et al. 2012, Benkadja et al. 2015, Bouhadeb et al. 2018, …).

L'équation à été intégrée sous un système d'information géographique en fonction de nombreux facteurs tel qu'indiqué dans l'équation universelle : afin de permettre une modélisation et une cartographie exhaustive du phénomène érosif.

$$\mathbf{A = R \times K \times C \times LS \times P} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

A : Moyenne annuelle estimée de perte de sol (t ha^{-1} an^{-1})

R : Facteur d'érosivité de la Pluie (MJ mm ha^{-1} h^{-1})

K : Facteur d'érodabilité du sol (t h MJ^{-1} mm^{-1})

L : Facteur de longueur de la pente

S : Facteur de rugosité de la Pente

C : Facteur de couverte végétale

P : Facteur des aménagements.

Comme indiqué précédemment en introduction, la méthodologie du travail consiste en l'intégration et la représentation des informations cartographiques et descriptives des différents facteurs et paramètres de l'érosion dans une plateforme des systèmes d'information géographiques (figure 3.1).

Une base de données à références spatiales contenant toutes les informations quantitatives concernant la zone d'étude a été créée. Le modèle quantitatif d'érosion à base empirique permet ainsi de fournir une estimation des pertes en sol, en T/ha/an, par unité de surface, qui correspond dans le cas d'utilisation de superposition cartographique sous SIG, au pixel de base du MNT.

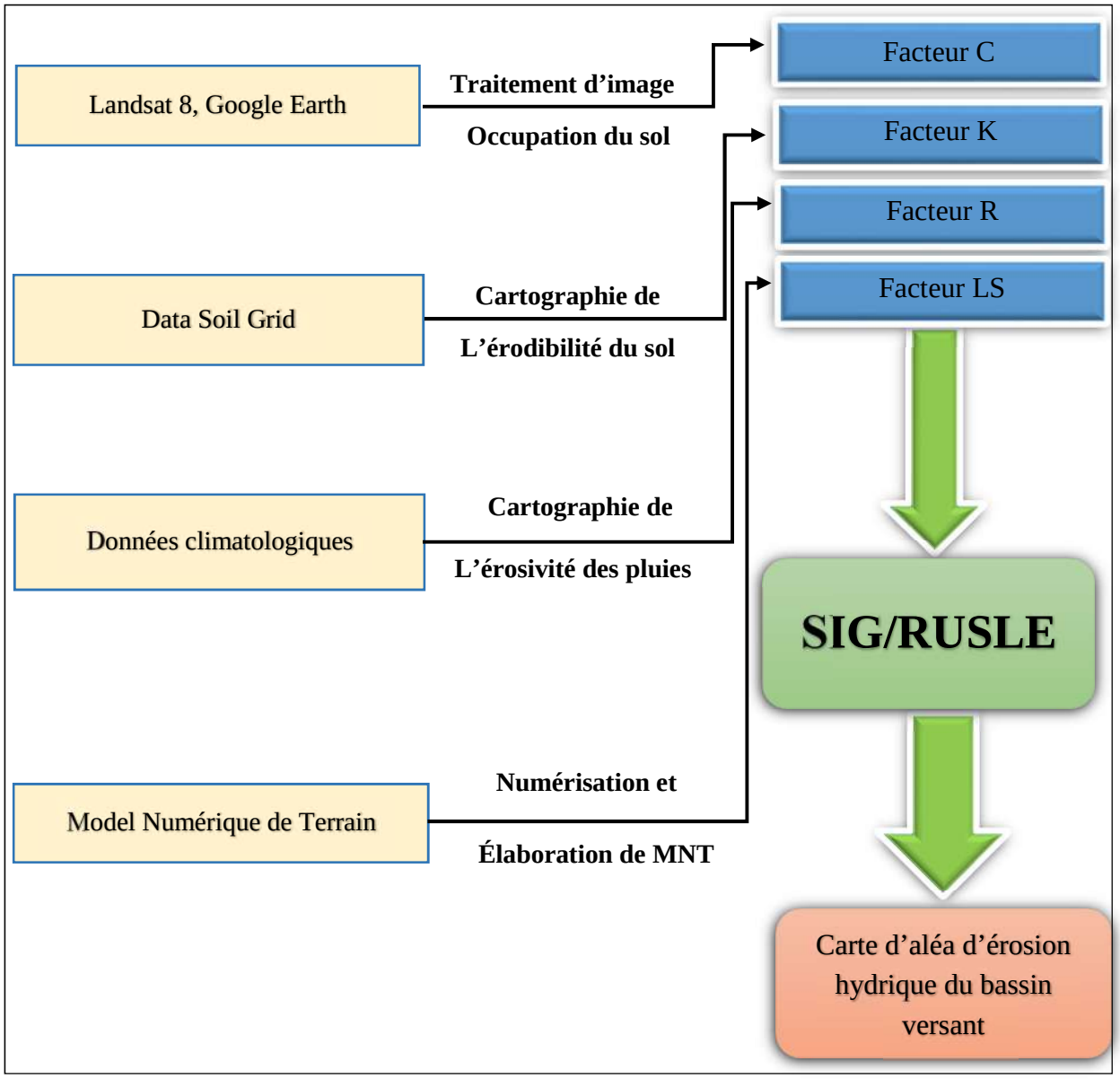

Fig.3.1. Organigramme méthodologie SIG/RUSLE

3. Extraction des facteurs de l'R-USLE

3.1. Facteur d'érosivité de la pluie R

L'érosivité de la pluie est définie comme la capacité potentielle de pluie à causer de l'érosion et donnée comme le produit (EI30) de l'énergie totale de pluie (E) et l'intensité maximale pendant 30 min (I30) (Wischmeier,1978). Cependant, suite au manque de ces données dans plusieurs régions au Monde, y compris notre zone d'étude, en va utiliser la formule de Arnoldus (1977), qui est adéquate avec notre cas d'étude, et qui ne fait intervient que les précipitations moyennes mensuelles et les précipitations moyennes annuelles (ARNH) :

$$R = 0.264 \cdot F^{1.5} \qquad \text{tq :} \quad \mathbf{F} = \sum_{12}^{1} \frac{MR_i^2}{AR} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Où : MR : Précipitations moyennes mensuelles ;

AR : Précipitations moyennes annuelles.

Ainsi, des données de précipitations de 24 stations climatologiques réparties dans la région et étalées sur une période de 42 ans ont été utilisées dans le cadre de cette étude (ARNH).

Le facteur R a été calculé séparément pour chaque station à part, puis on a interpolé les résultats par la méthode d'interpolation « Inverse Distance Weighting » IDW, pour avoir la carte du facteur d'érosivité du bassin versant Medjerda -Mellegue.

La méthode IDW est une technique d'interpolation déterministe locale qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondéré par l'inverse de la distance au point calculé : plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte.

3.2. Facteur d'érodibilité du sol K

L'érodibilité des sols est un indicateur de la facilité avec laquelle les particules de sol se détachent. Selon Wischmeier et al. (1971), le facteur K dépend de plusieurs propriétés du sol tel que la structure du sol, sa texture, sa granulométrie, sa quantité de matière organique et sa perméabilité.

Le facteur d'érodibilité du sol K a été calcul pour notre cas en utilisant l'équation (3) suivante :

$$\mathbf{K} = 0.1317*(0.2+0.3*\, e^{\left[-0.0256*san\left(1-\frac{sil}{100}\right)\right]} *\left(\frac{sil}{cla+sil}\right)^{0.3})*\left[1-\frac{0.25*toc}{toc+e^{(3.72-2.95*toc)}}\right]*\left[1-\frac{0.7*SN1}{SN1+e^{(22.9*SN1-5.51)}}\right]$$

Avec :

.san : pourcentage de sable.

.sil : pourcentage de silt.

.cla : pourcentage de clay.

.toc : pourcentage du carbon organic.

Les données d'entre utilisées dans la formule ont été obtenues sous forme des cartes thématiques à l'aide de la plateforme numérique de site web Soil Gride (https://soilgrids.org/) le pourcentage de sable, le pourcentage de silt, le pourcentage en Clay, le pourcentage du carbone organique pour chaque sol a différentes profondeurs allant de 5 cm jusqu'à la profondeur de 2 m). Dans notre cas en s'intéresse beaucoup plus sur la couche supérieure de sol

qui est susceptible d'être érodé qui s'étend sur une profondeur de 30 cm de la couche de terrain naturel (Stone et Hilborne, 2012) à l'assemblage de différentes couches a été fait à l'aide l'outil de programmation R-Studio (fig.3.2). Le résultat final est présenté sous forme d'une carte thématique globale qui prend en considération tous les paramètres influents l'équation.

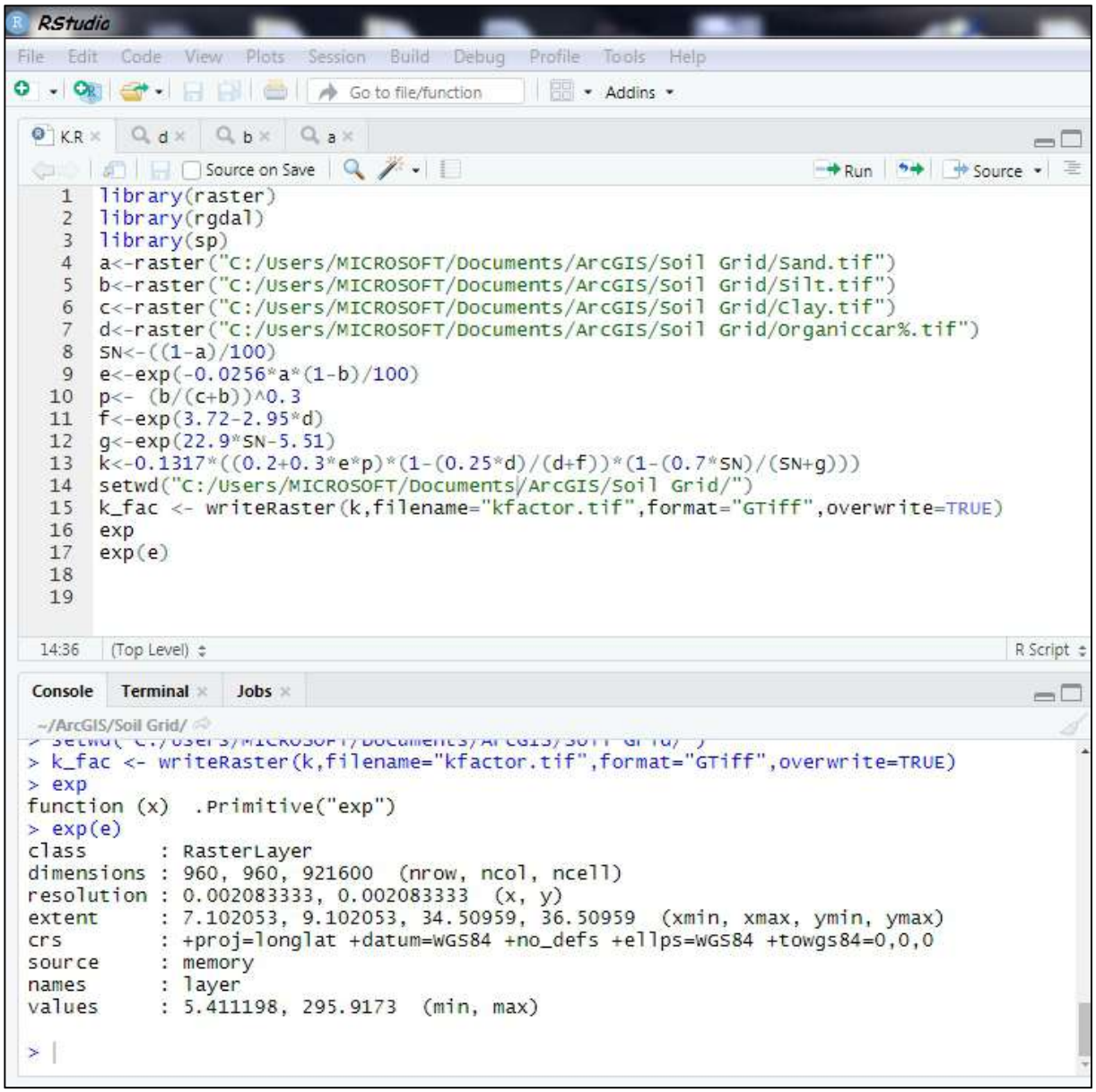

Fig.3.2. Interface de l'outil RStudio (version 1.2)

3.3. Facteur topographique LS

Le critère de pente est utilisé pour mettre en évidence la capacité d'un ruissellement à détacher et transporter des particules de sol : plus la pente est importante, plus le ruissellement érodera le sol. Les études ont montrées qu'il existe une forte relation entre le degré de pente et

sa longueur et l'intensité de ruissellement et par suite, sa capacité de détacher et transporter des particules. Plus la pente est forte et plus elle est longue, plus l'érosion est plus intense.

Le paramètre de topographie, évalué à partir de deux critères : l'inclinaison de la pente et sa longueur, est calculé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30 mètres. Les logiciels informatisés tels que ArcGis ont amplement facilité les calculs de certains paramètres tels que le cas du facteur topographique qui a été calculé à partir du MNT, de la carte des classes de pentes selon l'expression de David (1988) :

$$LS = a + b \times (S_L)^{4/3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Avec :

a = 0.1

b = 0.21

S_L : la pente.

3.4. Facteur du couvert végétal C

L'indice de végétation (NDVI) se révèle être un outil bien adapté pour différencier et hiérarchiser la densité des couverts végétaux (NDVI de 0,3 à 0,8). Il est aussi un bon indicateur pour le suivi régional de la végétation (Haddouche et al., 2011). Le NDVI présente la particularité d'augmenter en présence de végétation dense. La carte d'indice de végétation NDVI ainsi obtenue sur la région d'étude (figure 3.3) montre que les fortes valeurs du NDVI, au-dessus de 0,36 sont attribuées à la végétation dense. Les sols nus ont les faibles valeurs, en dessous de 0,2.

Le facteur C a été calculé selon la formule de Van der Knijff et al. (2000) suivante :

$$C = \exp\left[-\alpha \times NDVI/(\beta - NDVI)\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Avec :

α = 2

β = 1.

3.5. Facteur des pratiques antiérosifs P

Le facteur P décrit les actions humaines conservatrices des sols qui se pratiquent pour contrer l'érosion hydrique. Il varie généralement de 0 à 1, selon la pratique adoptée et selon la pente. Cependant, vu le fait qu'il n'y a pas de pratiques antiérosives adoptées dans tout le secteur d'étude, ce facteur a été considéré comme valeur unitaire égale à 1.

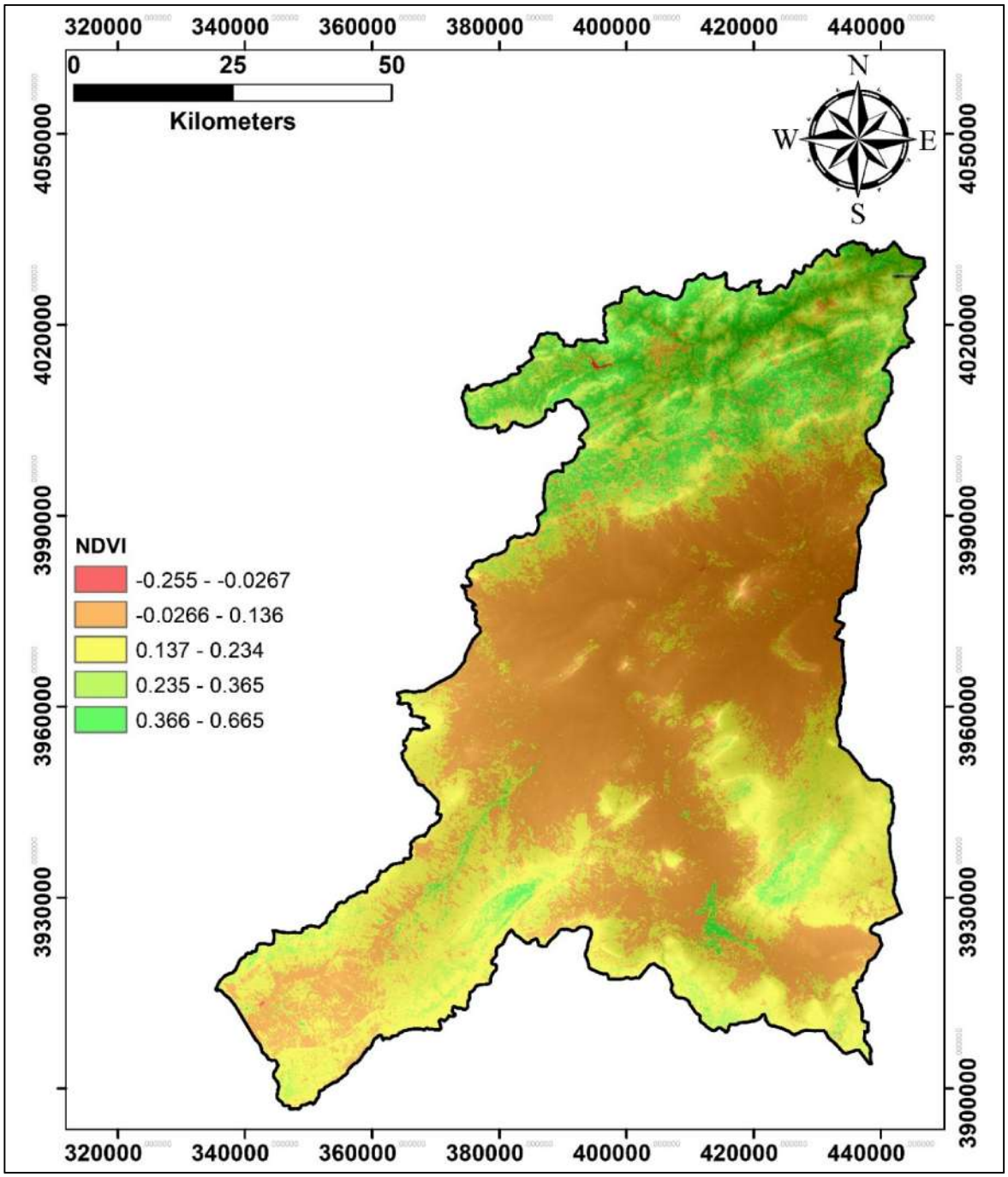

Fig.3.3. Carte de l'NDVI (l'indice de végétation normalisée dérivé du satellite).

4. Résultats

4.1. Cartographie des facteurs de RUSLE

4.1.1. Facteur R

La carte du facteur d'érosivité de la pluie R (Fig. 3.4), avec des valeurs variantes entre 25,23 et 324 montre une augmentation horizontale de Sud vers le Nord, indiquant ainsi l'effet de la continentalité sur les précipitations. Donc, d'une manière générale ; une tendance à la baisse du Nord vers le Sud (selon la loi de l'éloignement par rapport à la mer de la pluviosité en Algérie). En outre, la répartition des précipitations dans l'ensemble du bassin versant varie en fonction de l'altitude et la distance par rapport à la mer.

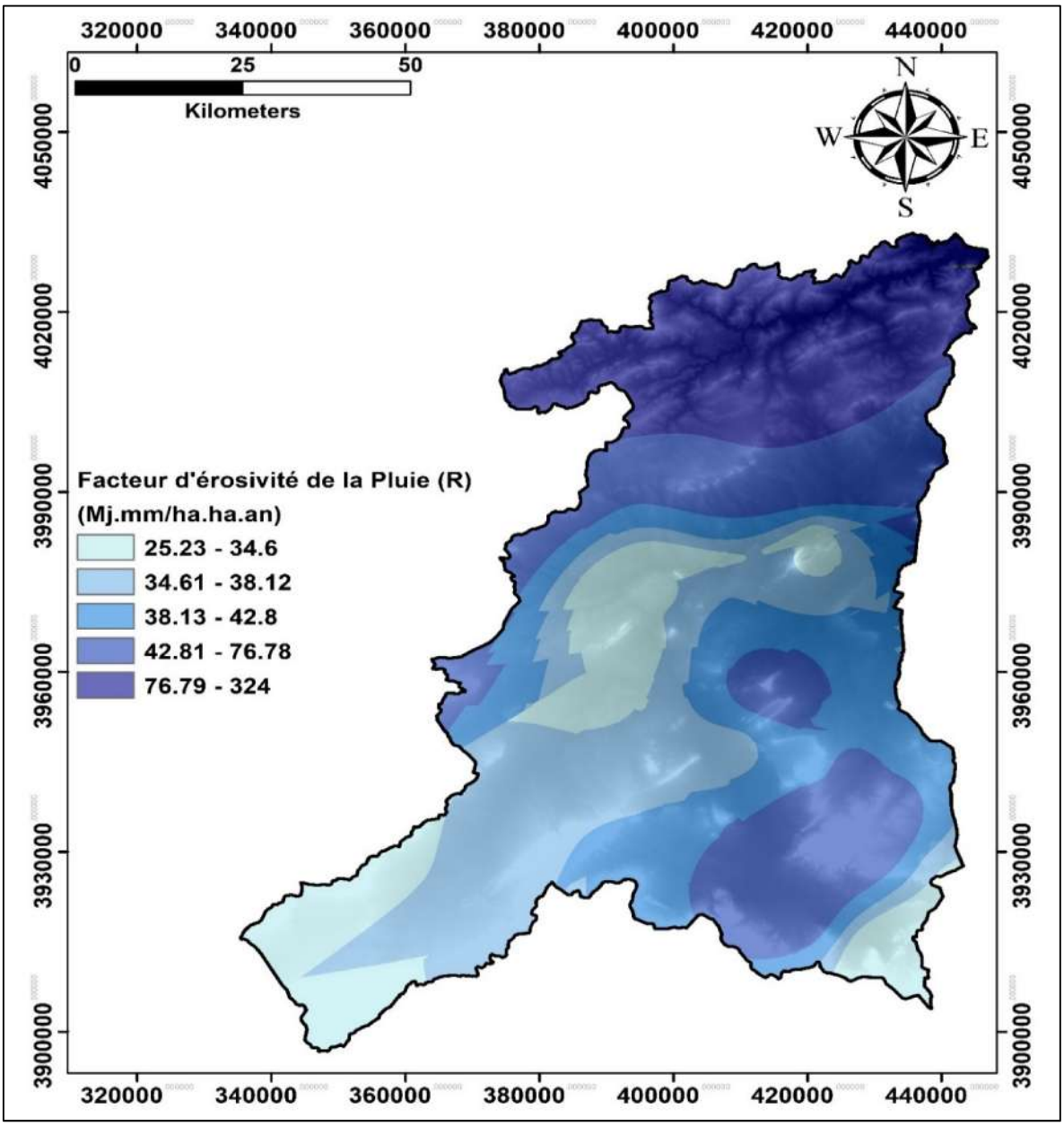

Fig.3.4. Carte du facteur d'érosivité de pluie R.

4.1.2. Facteur K

La figure **3.5** présente la répartition spatiale des différentes classes du facteur K dans le bassin versant. Les valeurs de l'indice d'érodibilité sont comprises entre 0.0218 et 0,045 et sont réparties sur la zone d'étude selon les classes citées au-dessous.

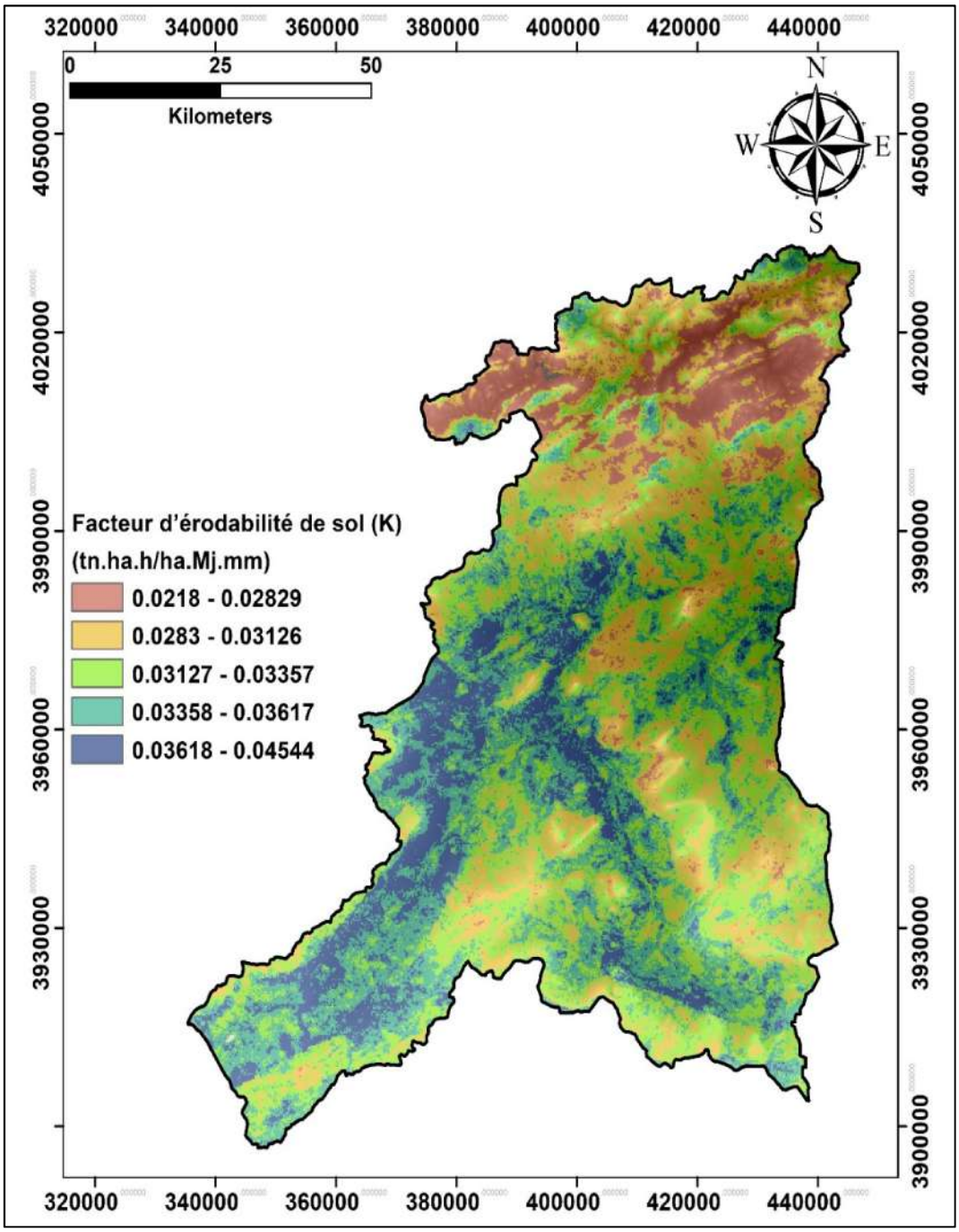

Fig.3.5. Carte du facteur d'érodibilité du sol K.

4.1.3. Facteur LS

Le facteur topographique LS est classé selon des valeurs variantes entre 0,1 à 19,28 La lecture de la carte (Fig.3.6) reflète généralement la topographie du terrain. Les valeurs minimales (0-4) couvrent 15 % de la superficie totale du bassin. Les valeurs comprises entre 4 et 14 sont réparties dans tout le reste du bassin en couvrant la plus grande partie (67 %). Les 18 % restants de la superficie du bassin correspondent aux valeurs supérieures à 14, dispersées dans toute la zone, coïncidant généralement avec des zones à hautes altitudes et pentes élevées.

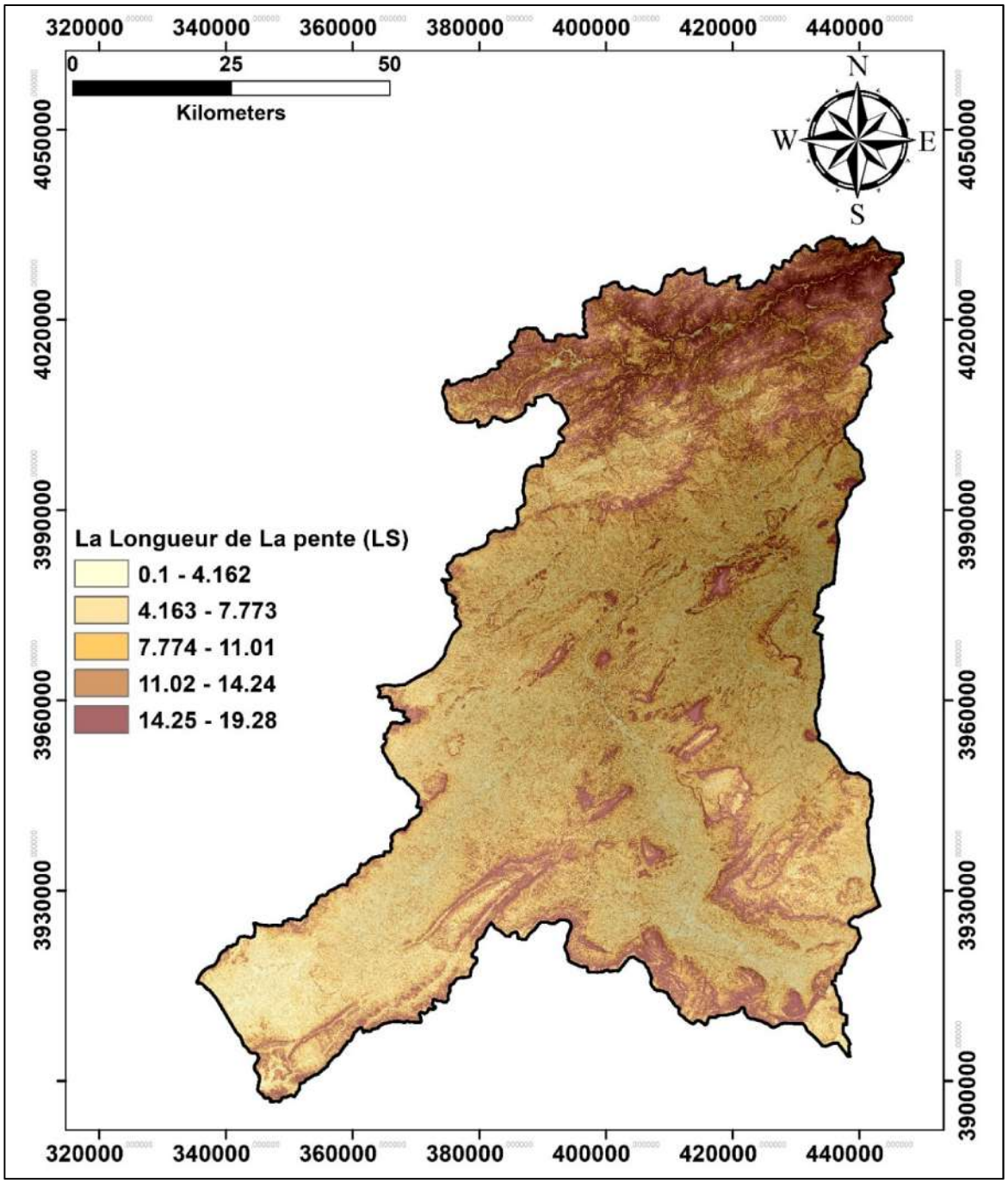

Fig.3.6. Carte du facteur topographique LS.

4.1.4. Facteur C

La carte du facteur C présentée par la figure 3.7, montre des valeurs variant entre 0.017 et 1.5. L'occupation actuelle des sols montre une grande prédominance des parcours et des terres de culture et une faible extension des espaces boisés.

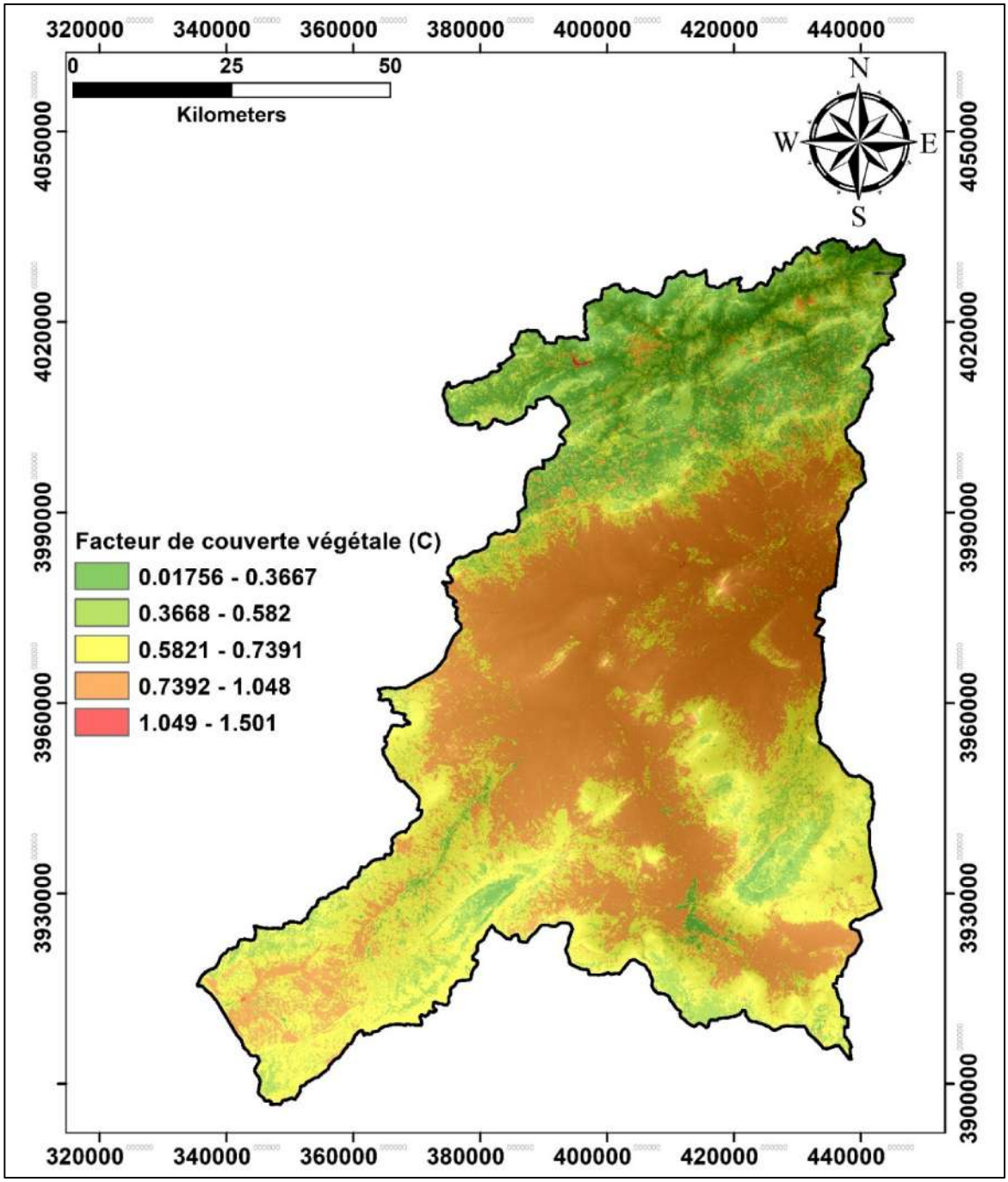

Fig.3.7. Carte du facteur du couvert végétal C.

4.2. Carte de risque potentiel d'érosion

Les résultats de la distribution spatiale de l'intensité d'érosion du sol obtenue à l'aide le modèle RUSLE en multipliant les cinq couches des différents facteurs interagissant sur l'érosion hydrique nous a permis d'établir une carte de pertes en sol sur la totalité du bassin versant où la carte du risque érosif (figure 3.8) montre que le risque n'apparait pas de maniéré homogène sur le bassin versant. Sur la base de la norme de classification publiée par (Sadiki

A, 2004), on a classé ce dernier en cinq degrés du risque à savoir tolérable, faible, moyen, fort et très fort (Tableau.3.1). La valeur moyenne de l'érosion est estimée à 09,36 t/ha/an avec un minimum de 0.007 t/h/an et un maximum de 115.6 t/ha/an. Selon les résultats, nous constatons qu'une forte concentration des classes forte risque à l'érosion occupe la zone nord malgré l'existence importante de la végétation (facteur protecteur). Ces valeurs critiques dans cette région s'expliquent par la forte inclinaison des terrains, mais aussi aux fortes valeurs du facteur R. Alors que les valeurs de faible risque se concentrent dans le sud du bassin versant. Cette région se caractérise par une faible inclinaison de la pente ,une faible valeur du facteur (R) et de faibles valeurs du facteur (C).

Tableau.3.1. La répartition des classes d'érosion au niveau de tout le bassin.

Classes	E (t/h/an)	Superficie (Km²)	Superficie (%)
Tolérable	0-7	2953,86	37,67
Faible	7-15	3539,72	45,14
Moyen	15-30	952,22	12,14
Fort	30-60	368,40	4,70
Très fort	> 60	26,80	0,34
Total		7841	100

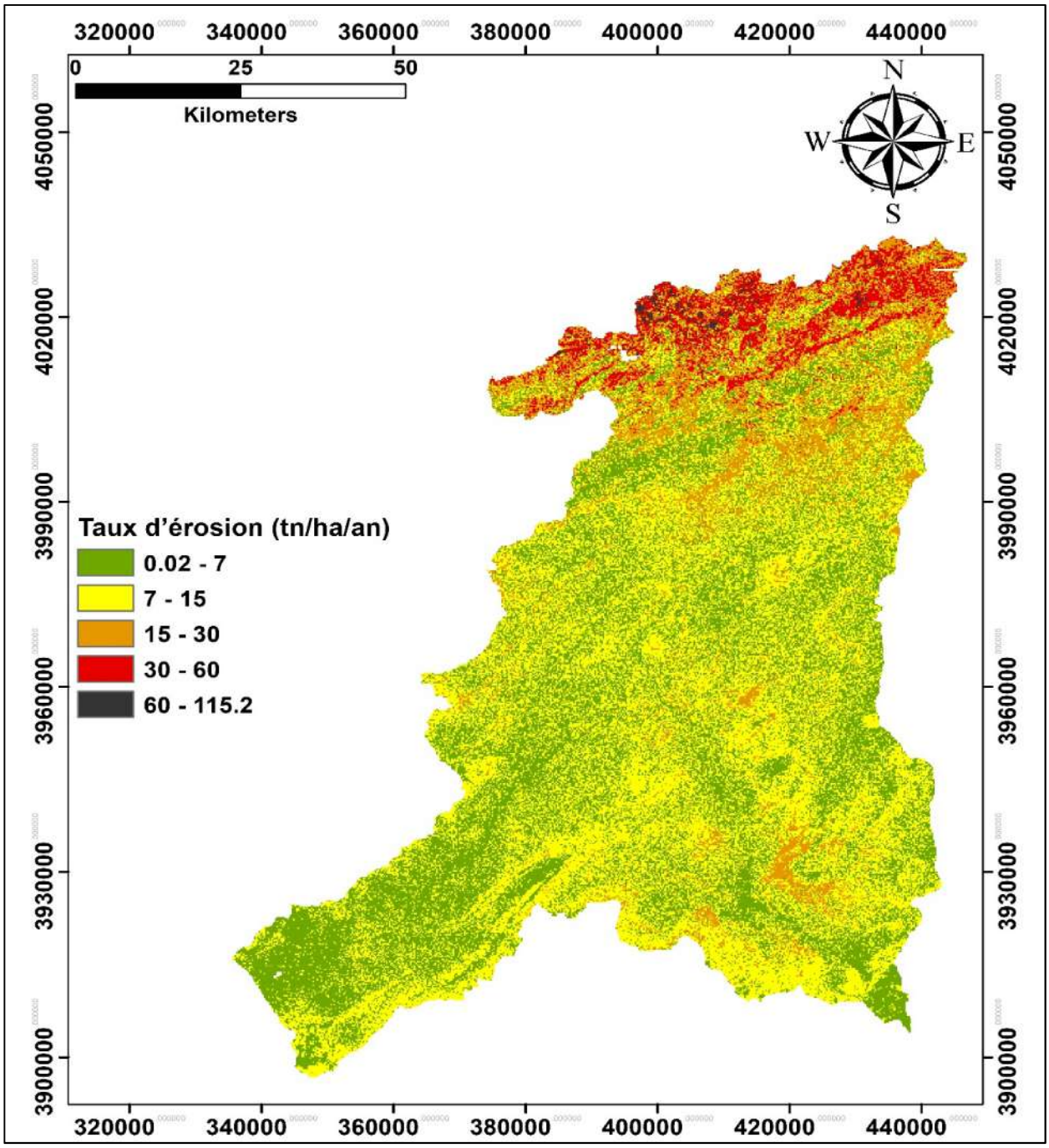

Fig.3.8. Carte d'aléa d'érosion hydrique du bassin versant.

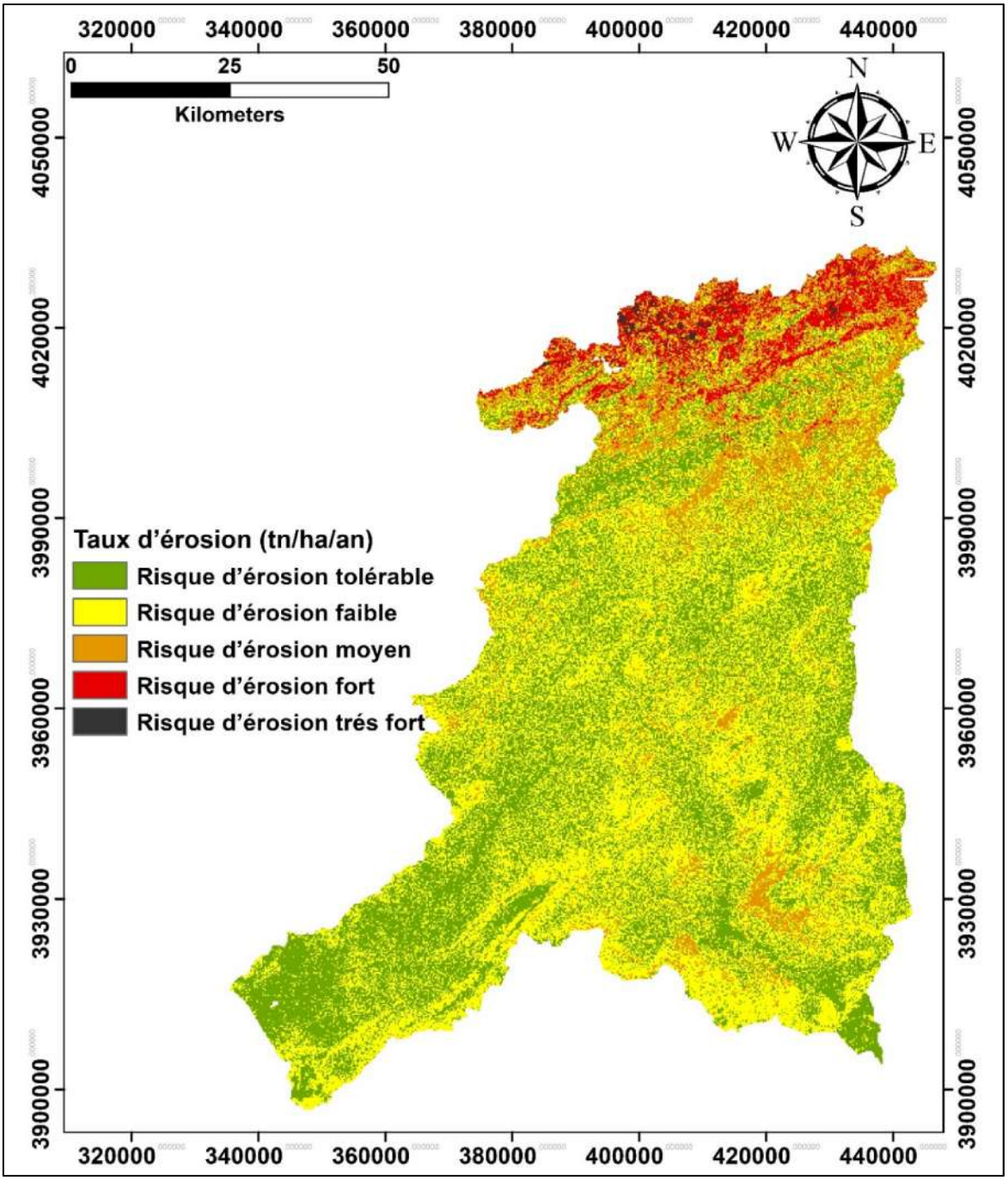

Fig.3.9. Carte des classes d'érosion hydrique du bassin versant.

5. Conclusion

Cette méthodologie d'intégration RUSLE à la fois avec les SIG et la télédétection a permis d'établir une carte de pertes en sol sur la totalité du bassin versant où la carte du risque érosif qui est un outil utile pour évaluer les mesures de risque d'érosion et de proposer les plans de conservation à l'échelle du bassin versant.

Chapitre 4 :
Cartographie de la susceptibilité à l'érosion hydrique

- *Introduction*
- *Méthodologie*
- *Préparation et extraction des données*
- *Cartes d'inventaire de l'érosion des sols*
- *Facteurs d'érosion*
- *Standardisation*
- *Méthode Hiérarchique Multicritère (AHP)*
- *Validation de la carte de susceptibilité à l'érosion des sols*
- *conclusion*

1. Introduction

L'objet principal de ce chapitre est de développer un outil d'aide à la décision (basé sur une analyse multicritères) pour apporter des solutions aux problèmes de gestion du risque d'érosion du sol en Algérie avec une application au cas du bassin versant Medjerda-Mellegue.

2. Méthodologie

L'étude du risque d'érosion d'une zone donnée nécessite une compréhension approfondie sur les facteurs qui l'influencent sur le phénomène et les conditions régionales de la zone d'étude.

A cette fin la structure de la méthodologie proposée pour évaluer/identifier les zones à risque d'érosion dans le bassin versant Medjerda-Mellegue a été mise en œuvre en cinq étapes à l'aide du modèle de prise de décision multicritères AHP et l'environnement SIG.

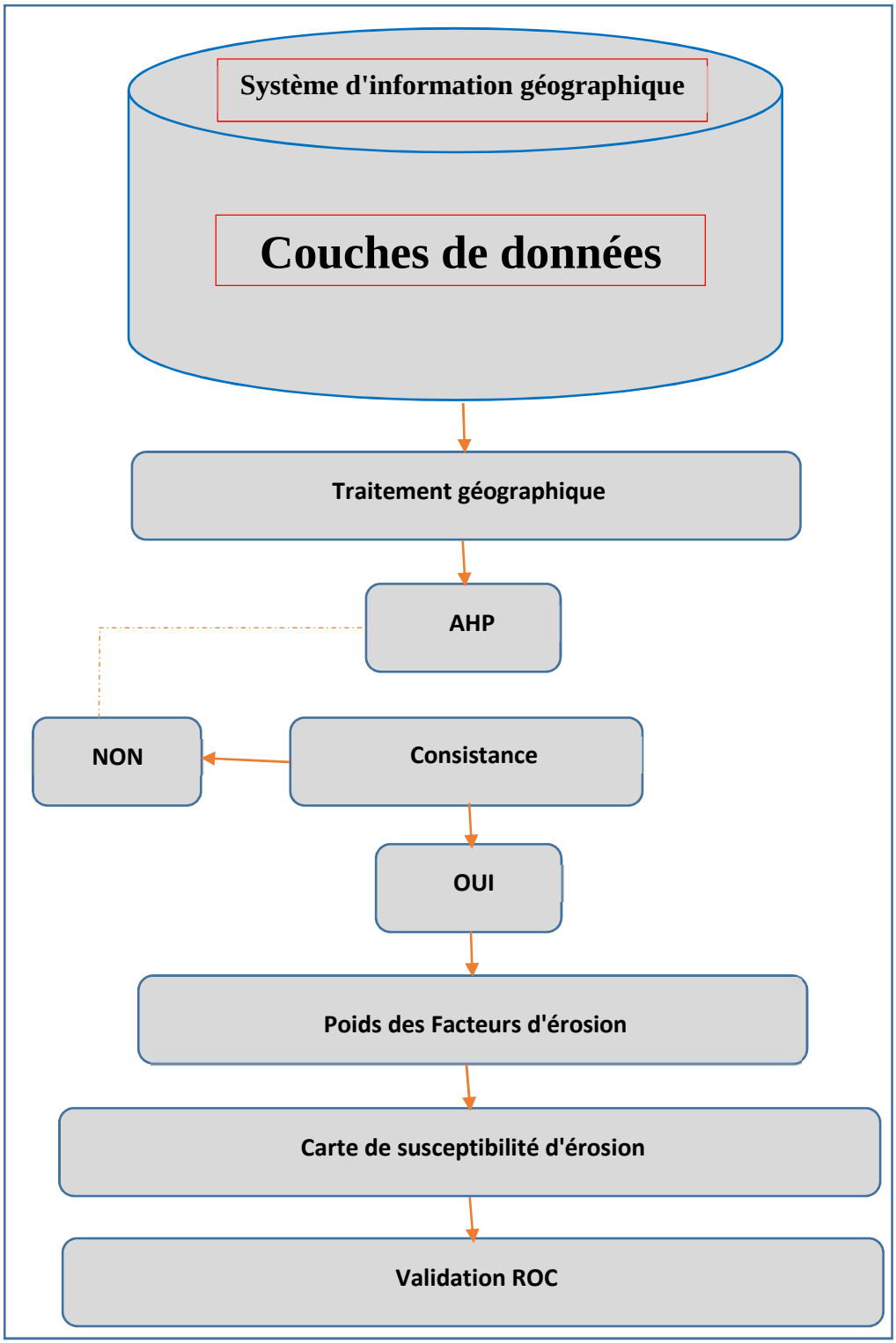

Fig.4.1. Organigramme de la méthode de l'AHP

3. Préparation et extraction des données

La détection des zones érodables, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et leurs caractéristiques sont des tâches complexes, car il existe de nombreux facteurs responsables à l'apparition de l'érosion. Donc il est indispensable de préparer et d'analyser les données qui sont en relation avec ces facteurs et ce phénomène. Pour cela la collecte des données pour notre cas d'étude a été réalisée à partir de plusieurs sources composées par de données spatiales, des enquêtes sur le terrain et des images satellitaires (Tableau 4.1).

Tableau.4.1 Sources des données utilisées dans l'étude

Les données	Sources (URL)	Type	Temps /Période
Modèle Numérique du Terrain	https://www.usgs.gov/earthexplorer	Satellite-borne sensor ASTER	ASTERGDEM V2.0, 15/03/2011
Satellite images	https://www.usgs.gov/earthexplorer	Landsat 8	WRS-Path=194 WRS-Row =035 17 /04 /2018
Pluie	ANRH	/	1969-2012
Carte du Sol	https://soilgrids.org/	Grid data	/

4. Cartes d'inventaire de l'érosion des sols

La création d'une carte d'inventaire des zones érodé par l'eau est importante pour prédire les futures problème d'érosion dans une région (Rahmati et al. 2016). Par conséquent, la carte d'inventaire (Fig.4.2) a été générée sur toute la surface de la zone d'étude, en utilisant une collection de données historiques, travaux antérieurs, travaux sur le terrain et interprétation des images satellitaires Landsat 8 traitées sur l'environnement des SIG.

Cette carte a été utilisée pour examiner la distribution spatiale des zones affecte par l'érosion hydrique et évaluer la relation entre l'érosions et les différents facteurs de conditionnement dans bassin versant Medjerda.

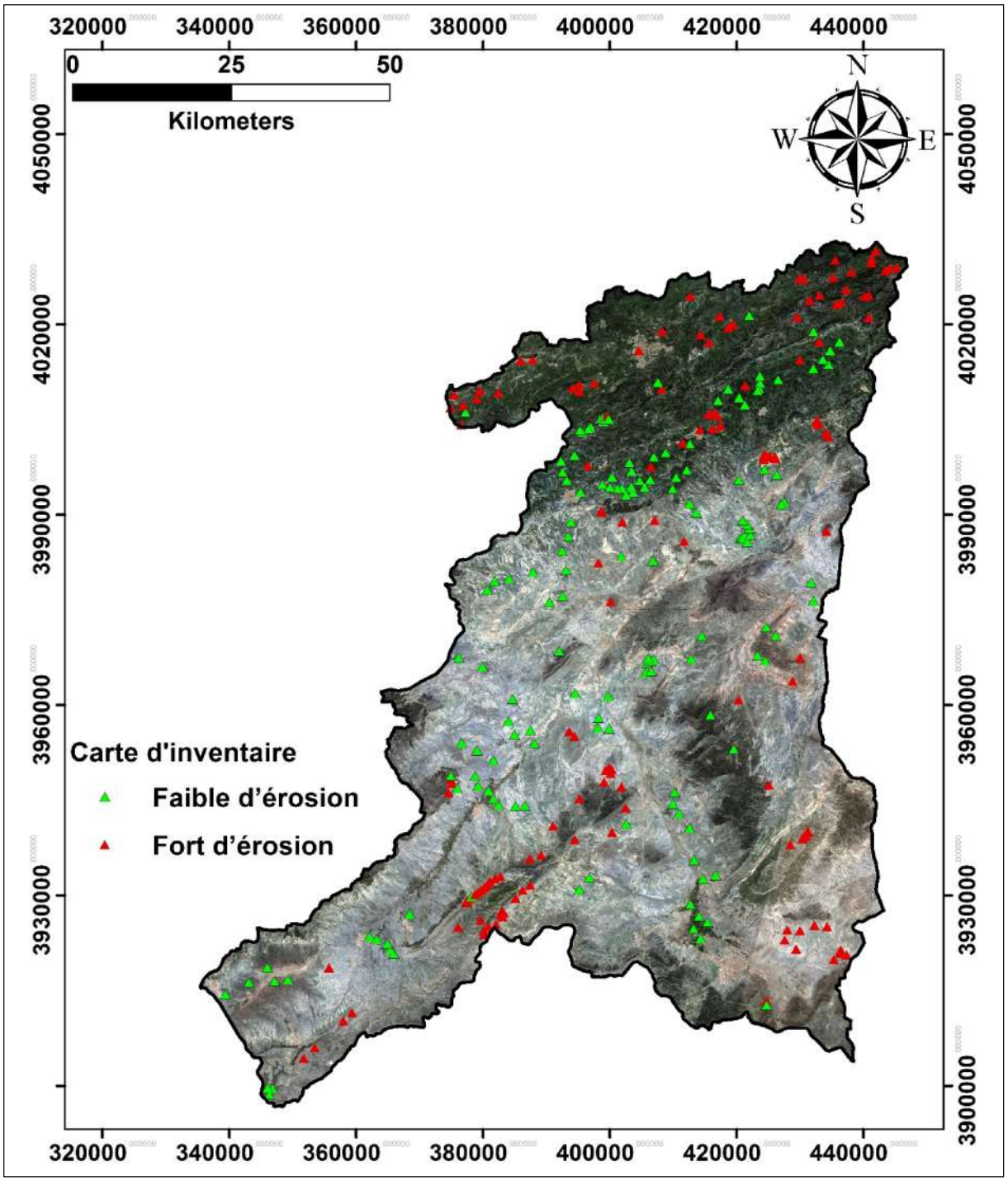

Fig.4.2. Carte d'inventaire d'érosion.

5. Facteurs d'érosion

Dans la présente étude, douze (12) facteurs de conditionnement ont été utilisés pour créer la carte du risque d'érosion. Ces facteurs sont : indice d'humidité topographique, aspect de la pente, distance des rivières, altitude, occupation du sol, pluie, le type de sol, indice de végétation par différence normalisé, pente, indice de puissance de flux, indice de transport des sédiments, distance de la route.

5.1. Indice d'humidité topographique

Facteur d'humidité topographique (Topography wetness index); Le facteur d'humidité topographique est un indice hydrologique classique pour identifier les zones hydrologiquement homogènes et quantifier l'effet de la topographie sur les processus hydrologiques (entre autres l'engorgement des sols) et les autres processus biologiques et chimiques qui en découlent .Il fait ressortir les zones relativement plates et naturellement humides de par leur position dans le bassin versant.

5.2. Aspect de la pente

L’aspect est également considéré comme un facteur important dans la préparation de cartes de susceptibilité à l’érosion des sols (Galli, Ardizzone, Cardinali, Guzzetti, Reichenbach, 2008 etc), Les analyses ont été effectuées à l'aide de cartes d'inventaire d'aspect et d'érosion du sol afin de déterminer la répartition de l'érosion du sol, en fonction de la classe d'aspect, et du pourcentage d'érosion du sol survenu dans chaque classe d'aspect.

5.3. Distance des rivières

La proximité des pentes par rapport aux structures de drainage est également un facteur important en termes de stabilité. Les cours d'eau peuvent nuire à la stabilité en érodant les pentes ou en saturant la partie inférieure des matériaux jusqu'à ce que le niveau de l'eau augmente (Dai, Lee, Li et Xu, 2001; Saha, Gupta et Arora, 2002)

5.4. Altitude

L'élévation est utile pour classer le relief local et localiser les points de hauteur maximale et minimale dans les terrains. Pour calculer les densités d'érosion du sol pour différentes classes de reliefs, la carte de reliefs a été divisée en cinq classes d'altitude (Fig. 4.8) et la zone d'étude révèle que l'altitude varie de 215 à 1637 m au-dessus du niveau moyen de la mer.

5.5. Occupation du sol

Les principaux types d’utilisation des sols dans la zone d’étude sont les réseaux routiers, les cours d’eau / rivières, les zones bâties, les forêts denses, la couverture végétale, les terres nues,

les terres cultivées et les jachères agricoles, comme le montre la figure (4.10). Ces classes d'utilisation des sols sont délimitées à partir des données satellitaires Landsat 8, ainsi que de la vérification sur le logiciel Google earth.

5.6. Pluie

La pluie est un facteur déclencheur d'érosion car il se développe lorsque les eaux de pluie tombent, ou lorsqu'elles ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol, à cause que l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol.

La pluviométrie annuelle moyenne de la zone d'étude avoisine les 372 mm à moyenne terme (1970-2012),pour un max de 1010.29 mm et un min de 212.76 mm la distribution des précipitations ainsi que le gradient de la pente ont un effet direct sur le taux d'infiltration de l'eau de ruissellement, ce qui peut augmenter la possibilité que la zone subit un potentiel d'érosion.

5.7. Le type de sol

Le sol est un facteur important pour délimiter les zones d'érosion du sol (Sar et al., 2015). L'analyse du type de sol révèle que la zone d'étude est principalement recouverte d'une plaine alluviale avec un sol calcairo argileux et alluvion à la plupart des endroits.

5.8. Indice de végétation par différence normalisé (NDVI)

Il est universellement admis que l'indice de végétation normalisée dérivé du satellite (NDVI) est un indice important pour évaluer les conditions de la végétation (Sar et al., 2015). Les conditions complexes de la végétation à tout moment de sa croissance sont influencées par des interactions complexes entre les conditions météorologiques, l'humidité du sol, le type de sol et de culture. L’analyse de l’indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est considérée comme une estimation approximative de la quantité de végétation présente et de la force de résistance à l’érosion des arbres supérieurs le sol a lieu.

5.9. Pente

Le paramètre clé de l'analyse de la stabilité d'une pente est l'angle de la pente (Lee & Min, 2001). L'angle des pentes est très régulièrement utilisé dans les études de susceptibilité à l'érosion des sols, car l'érosion des sols est directement liée à l'angle des pentes (Lee, 2005; Nefeslioglu, Gokceoglu et al., 2008; Yalcin, Reis, Aydinoglu et Yomralioglu, 2011). Pour cette raison, la carte de degré de pente de la zone d'étude est préparée à partir du modèle numérique d'élévation (DEM) et divisée en cinq classes de pente.

5.10. Indice de puissance de flux

L'indice de puissance du flux (SPI) est un attribut topographique composé (Moore et al., 1992). Il s'agit d'une mesure du pouvoir érosif de l'eau courante. Il prédit généralement l'érosion nette dans les zones de convexité profilée et tangentielle (zones d'accélération et de convergence du flux) et le dépôt net dans les zones de concavité de profil (zones de vitesse décroissante du flux).

5.11. Indice de transport des sédiments

L'indice de transport des sédiments caractérise le processus d'érosion et de dépôt. Il est défini par la zone en amont et la pente d'une cellule donnée. La zone en amont est pondérée plus forte que la pente.

5.12. Distance de la route

Semblable à l'effet de l'éloignement des rivières, l'érosion des sols peut se produire sur les routes et sur les pentes touchées par des routes (Ayalew et Yamagishi, 2005; Pachauri, Gupta et Chander, 1998). Un changement de pente dû à l'excavation, à une charge supplémentaire, à un changement d'hydrologie et au drainage peut avoir un effet sur l'état de contrainte et d'équilibrage de la pente.

Tableau.4.2 Sources des données utilisées dans l'étude.

Paramètre	Outil / Méthode	Auteur (s)
Pluie	Interpolation	Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis (2005)
Occupation du sol	Plausibilité maximum	Anderson (1971)
Type de sols	Data gride	Soil Grid
Distance par rapporte des cours d'eau	Analyse	Pavelsky& Smith (2008)
Pente	Analyse	Wentworth (1930)
Indice NDVI	$NDVI = \frac{(NIR-red)}{(NIR+red)}$	Carlson &Ripley (1997)
Elévation		Li (2006)
Indice de puissance du courant	$SPI = As \times \tan \beta$	Moore et al. (1991)
Facteur d'humidité topographique	$TWI = \ln(\alpha / \tan \beta)$	Beven& Kirkby (1979); Moore, Grayson, & Ladson (1991)
Distance par rapporte des route	Analyse	Pavelsky& Smith (2008)
Indice de transport des sédiments	$STI = (m + 1) \times (As/22.13)\ m \times \sin(\beta/0.0896)n$	Moore & Burch (1986)
Aspect	Analyse	Burrough and Mcdonnell (1998).

6. Standardisation

La technique de standardisation est utilisée pour traduire diverses entrées d'un problème de décision à une échelle commune, pour permettre une comparaison et surmonter l'incommensurabilité des données (Rahman et al, 2012). Le processus de standardisation permet la mise à l'échelle de toutes les dimensions d'évaluation entre 0 et 1 la standardisation des facteurs a été établie sur la base de la logique floue (Fuzzy logic). Les nouvelles fonctionnalités d'Arcgis dans l'opérateur (Fuzzy member ship) ont été introduites dans la modélisation spatiale du risque d'érosion pour standardiser les facteurs dans la même échelle afin de les mesurer d'une part et de convertir la description sémantique du risque d'érosion hydrique en modèle numérique de prédiction spatiale d'autre part.

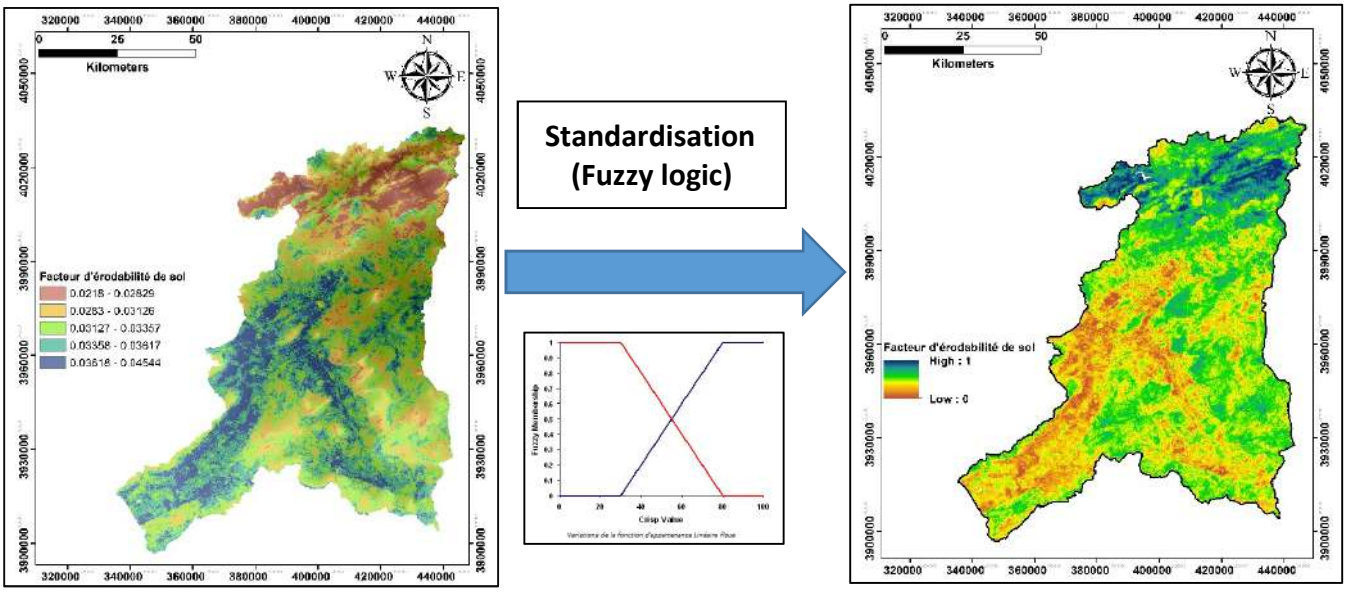

Fig.4.3. Le processus de standardisation.

7. Pondération des facteurs et combinaison des couches

Une fois la standardisation des facteurs terminée, l'étape suivante de l'évaluation multicritère doit envisagée : il s'agit du choix des poids des facteurs. En effet, tous les facteurs interviennent à des degrés différents dans d'évaluation du risque d'érosion.

L'structure de l'AHP (Analytical Hierarchy Process) est la manière la plus simple pour pondérer l'ensemble des facteurs. L'interface se présente sous la forme d'une matrice de comparaison par paires (Matrice de Saaty). Les poids sont attribués pour chaque paire de facteurs, car il est beaucoup plus simple de comparer les facteurs deux à deux plutôt que d'évaluer le poids d'un facteur par rapport à l'ensemble des autres couches d'informations.

Une fois les pondérations déterminées, la technique CLP (Combinaison Linéaire Pondérée) permet de combiner les couches du modèle, en fonction de leur poids.

Dans ce cas-là, la compensation entre facteurs est totale, c'est-à-dire qu'un facteur ayant une aptitude faible pourra être compensé par un autre ayant une aptitude élevée. Le degré de compensation dépendra du poids des facteurs. Cette technique consiste simplement à multiplier chaque facteur standardisé avec son poids puis de les additionner. La somme est divisée par le nombre de facteurs.

8. Méthode Hiérarchique Multicritère (AHP)

8.1. Principe de la Méthode

8.1.1. Fondements de la méthode

Le processus d'analyse hiérarchique (Analytic Hierarchy Process : AHP) a été développé par Saaty dans les années 1980. Cette méthode consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème. Le principe de fonctionnement de la méthode AHP est défini par les six étapes suivantes :

1. Construire la structure hiérarchique : le problème est décomposé sous la forme d'une arborescence hiérarchique des critères, des sous critères et des alternatifs. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.

2. Construire la matrice de décision : cette étape consiste à procéder aux comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire la matrice de comparaison. Les valeurs de cette matrice sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires). La forme générale d'une matrice de décision est exprimée par :

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & x_1 & \dots & \dots & x_{1n} \\ x_2 & x_2 & \dots & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & \dots & x_n \end{pmatrix} a \qquad x_j = \begin{cases} 1 & s \quad i = j; \\ \frac{1}{x_i} & s \quad i \neq j; \end{cases}$$

Les éléments x_{ij} sont obtenus à partir du tableau 4.3, qui contient les niveaux de préférences de 1-9.

Tableau. 4.3 . Echelle à 9 valeurs de Saaty

Valeur numérique	Jugement verbal
1	Important égale
3	Modérément plus important
5	Fortement plus important
7	Très fortement plus important
9	Excrément plus important
2,4,6,8	Valeurs Intermédiaires entre deux jugements, utilisées pour affiner le jugement

3. Construire la matrice de décision normalisée : la matrice normalisée (a_{ij}) est obtenue à partir de la matrice A(x_{ij}), selon la formule suivante :

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_1 & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_2 & a_2 & \dots & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & \dots & a_n \end{pmatrix}$$

4. Déterminer l'importance relative à chaque élément : le poids de chaque facteur i peut être calculé par :

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{n} \qquad et \qquad \sum_{i=1}^{n} Wi = 1$$

Où **n** représente le nombre des éléments comparés.

5. Vérifier la cohérence des jugements : pour tester la cohérence, (Saaty, 1980) a introduit trois paramètres : le ratio de cohérence RC, l'indice aléatoire IA et l'indice de cohérence IC.

- On calcule d'abord, l'indice de cohérence IC.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

- Aussi, nous avons besoin de calculer λ_{max} en utilsant la formule suivante :

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i}{n} \qquad sachant\ que \qquad b_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} W_j * a_{ij}}{W_i}$$

- On calcule le ratio de cohérence RC comme suit :

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Où IA est l'indice aléatoire obtenu à partir du tableau 4.4.

Selon (Saaty, 1980), la valeur de ce dernier doit être au plus égale à 10%. Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions, et la cohérence est dite non acceptée.

Tableau. 4.4 . Valeur de l'indice aléatoire IA

Nombre de critères	3	4	5	6	7	8	9	10	12
IA	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.54

8.1.2. Résultats obtenues

La matrice de comparaison :

	Pluie	Pente	Type de sol	Riviére	NDVI	Elevation	Occ de sol	Route	TWI	STI	Aspet	SPI
Pluie	1,00	2,00	3,00	4,00	4,00	5,00	6,00	6,00	7,00	7,00	8,00	7,00
Pente	0,50	1,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00	5,00	6,00	6,00	7,00	6,00
Type de sol	0,33	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	4,00	4,00	5,00	5,00	6,00	5,00
Riviére	0,25	0,33	0,50	1,00	1,00	2,00	3,00	3,00	4,00	4,00	5,00	4,00
NDVI	0,25	0,33	0,50	1,00	1,00	2,00	3,00	3,00	4,00	4,00	5,00	4,00
Elevation	0,20	0,25	0,33	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	3,00
Occ de sol	0,17	0,20	0,25	0,33	0,33	0,50	1,00	1,00	2,00	2,00	3,00	2,00
Route	0,17	0,20	0,25	0,33	0,33	0,50	1,00	1,00	2,00	2,00	3,00	2,00
TWI	0,14	0,17	0,20	0,25	0,25	0,33	0,50	0,50	1,00	1,00	2,00	1,00
STI	0,14	0,17	0,20	0,25	0,25	0,33	0,50	0,50	1	1	2,00	1,00
Aspet	0,13	0,14	0,17	0,20	0,20	0,25	0,33	0,33	0,5	0,5	1	2,00
SPI	0,14	0,17	0,20	0,25	0,25	0,33	0,50	0,50	1	1	0,5	1

La matrice normalisée :

	Pluie	Pente	Type de sol	Riviére	NDVI	Elevation	Occ de sol	Route	TWI	STI	Aspet	SPI
Pluie	0,2924	0,3663	0,3488	0,3050	0,3050	0,2597	0,2236	0,2236	0,1918	0,1918	0,1720	0,1842
Pente	0,1462	0,1832	0,2326	0,2287	0,2287	0,2078	0,1863	0,1863	0,1644	0,1644	0,1505	0,1579
Type de sol	0,0975	0,0916	0,1163	0,1525	0,1525	0,1558	0,1491	0,1491	0,1370	0,1370	0,1290	0,1316
Riviére	0,0731	0,0611	0,0581	0,0762	0,0762	0,1039	0,1118	0,1118	0,1096	0,1096	0,1075	0,1053
NDVI	0,0731	0,0611	0,0581	0,0762	0,0762	0,1039	0,1118	0,1118	0,1096	0,1096	0,1075	0,1053
Elevation	0,0585	0,0458	0,0388	0,0381	0,0381	0,0519	0,0745	0,0745	0,0822	0,0822	0,0860	0,0789
Occ de sol	0,0487	0,0366	0,0291	0,0254	0,0254	0,0260	0,0373	0,0373	0,0548	0,0548	0,0645	0,0526
Route	0,0487	0,0366	0,0291	0,0254	0,0254	0,0260	0,0373	0,0373	0,0548	0,0548	0,0645	0,0526
TWI	0,0418	0,0305	0,0233	0,0191	0,0191	0,0173	0,0186	0,0186	0,0274	0,0274	0,0430	0,0263
STI	0,0418	0,0305	0,0233	0,0191	0,0191	0,0173	0,0186	0,0186	0,0274	0,0274	0,0430	0,0263
Aspet	0,0365	0,0262	0,0194	0,0152	0,0152	0,0130	0,0124	0,0124	0,0137	0,0137	0,0215	0,0526
SPI	0,0418	0,0305	0,0233	0,0191	0,0191	0,0173	0,0186	0,0186	0,0274	0,0274	0,0108	0,0263

Les poids des facteurs :

Facteur	Pluie	Pente	Type de sol	Riviére	NDVI	Elevation	Occ de sol	Route	TWI	STI	Aspet	SPI
Weights	0,255	0,186	0,133	0,092	0,092	0,062	0,041	0,041	0,026	0,026	0,021	0,023

Maintenant on calcule l'indice de cohérence IC :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} = \frac{12.44 - 12}{12 - 1} = 0.039$$

Donc le ratio de cohérence RC sera :

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{12.44}{1.54} = 0.026$$

Donc selon Saaty la valeur de cohérence est accepté car elle est inférieure à 0,1.

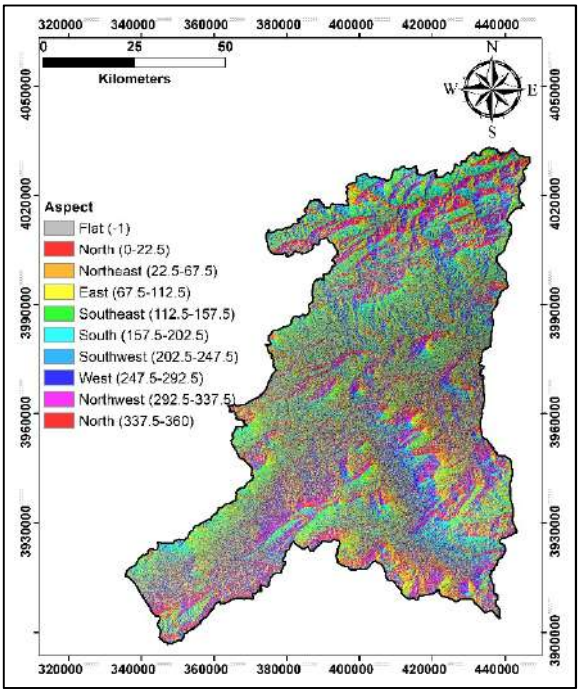

Fig.4.4. Carte aspect de la pente.

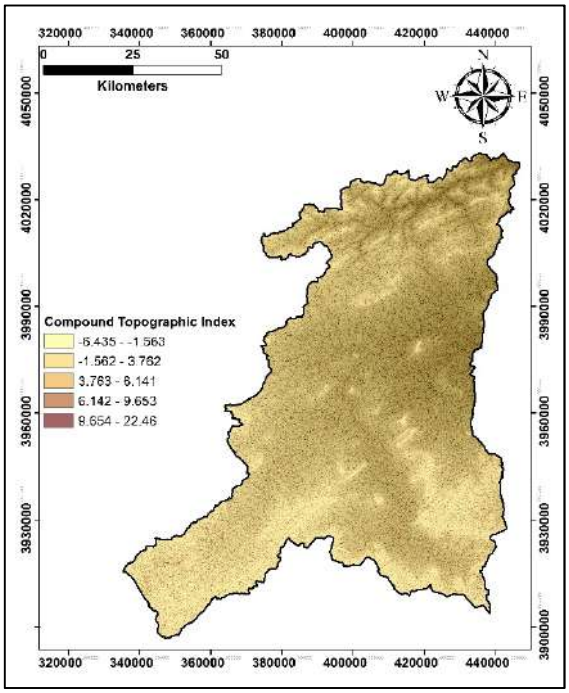

Fig.4.5. Carte Indice d'humidité topographique.

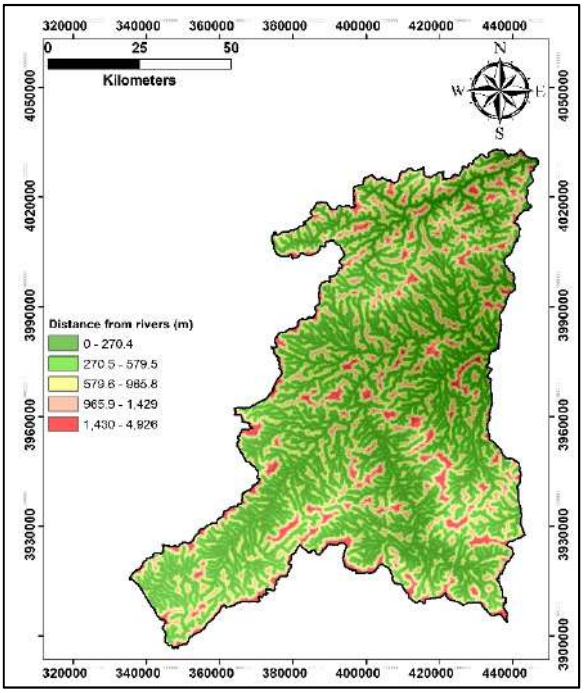

Fig.4.6. Carte distance de la rivière.

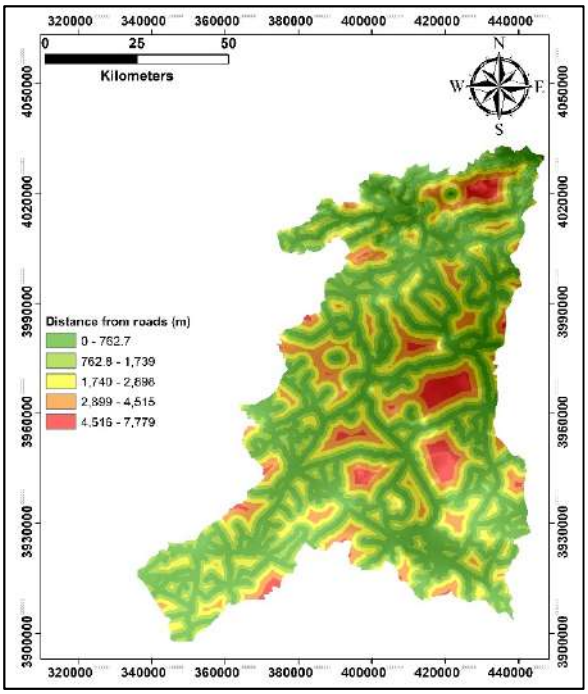

Fig.4.7. Carte distance de la route.

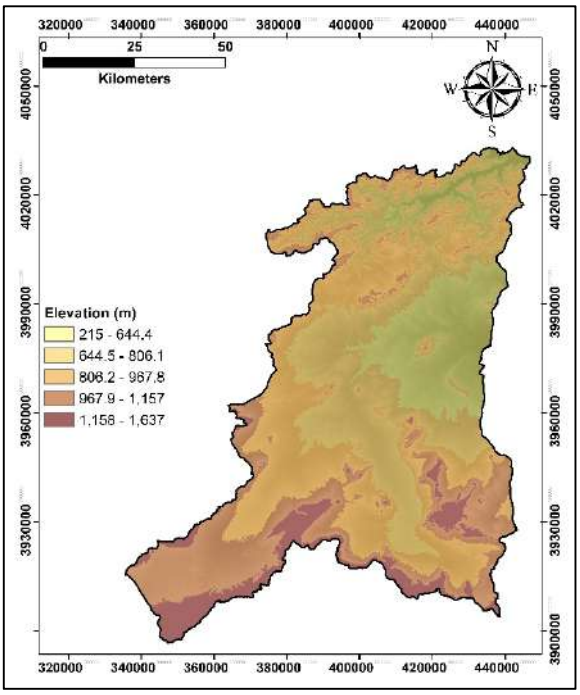

Fig.4.8. Carte de l'élévation.

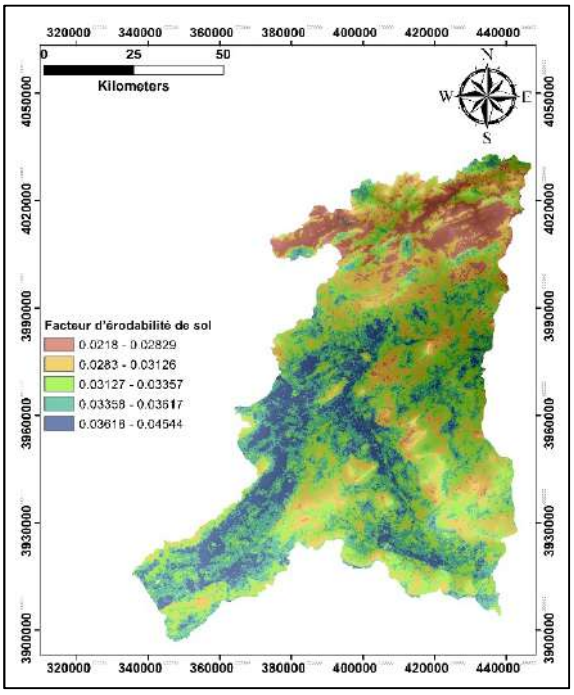

Fig.4.9. Carte érodibilité de sol.

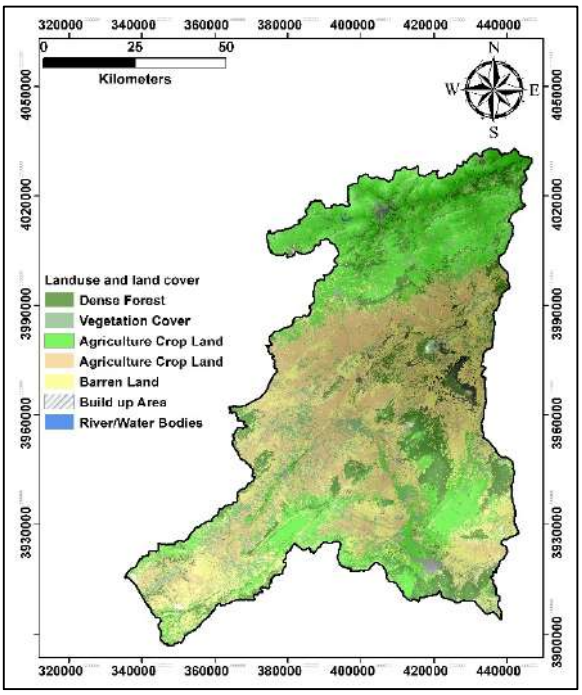

Fig.4.10. Carte occupation de sol.

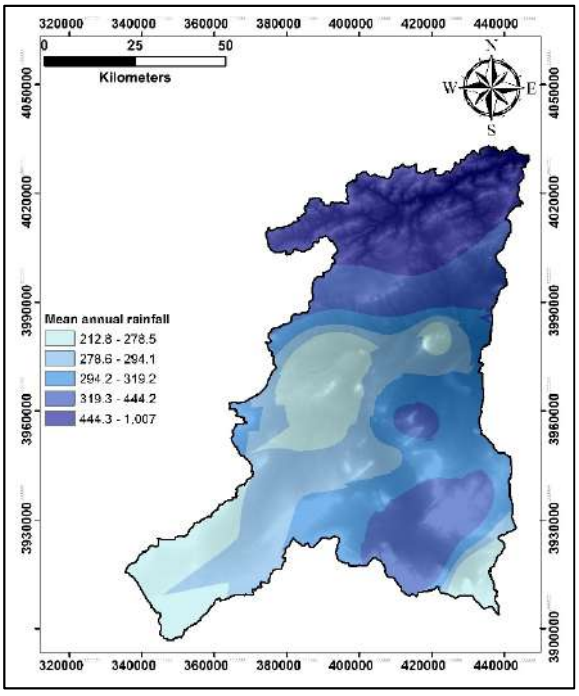

Fig.4.11. Carte de pluie.

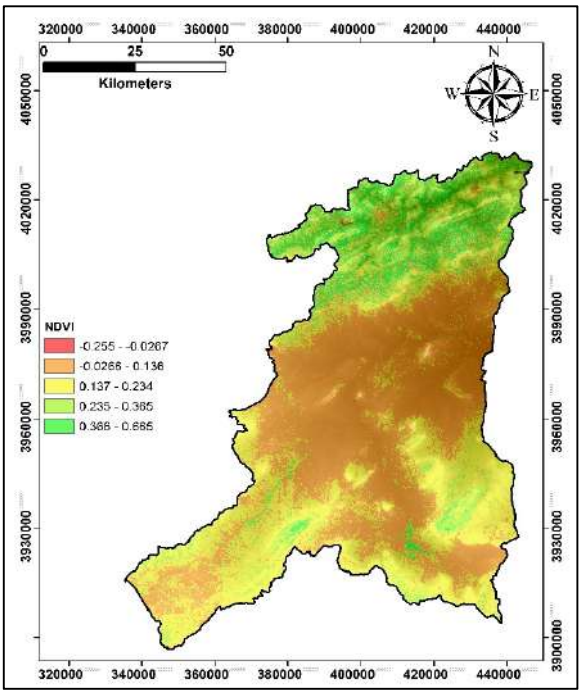

Fig.4.12. Carte NDVI.

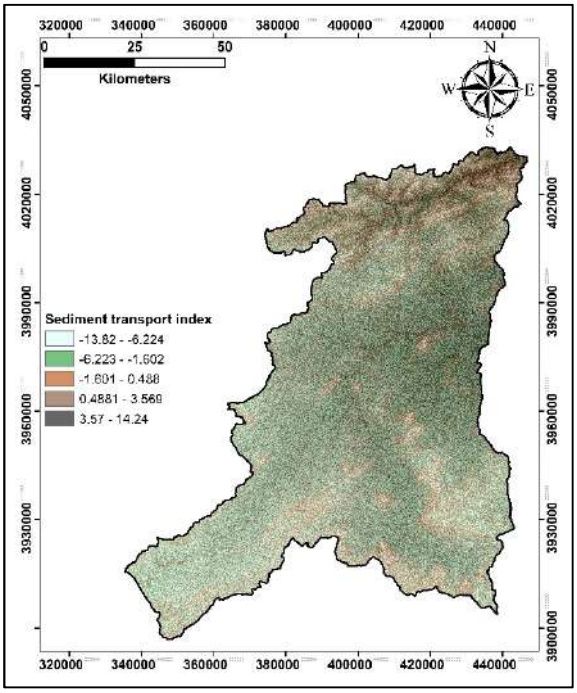

Fig.4.13. Carte SPI.

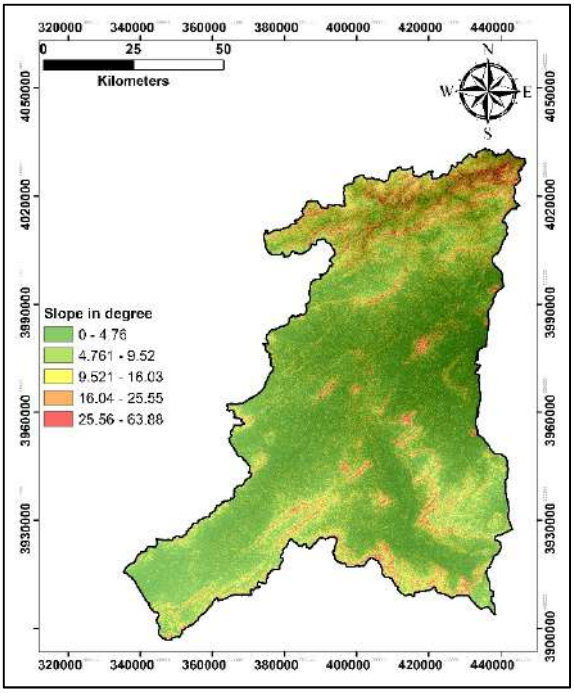

Fig.4.14. Carte de pente.

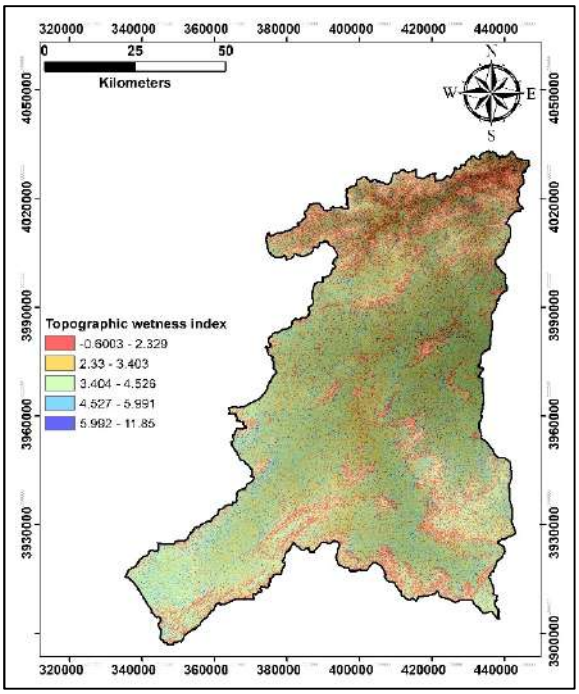

Fig.4.15. Carte de TWI.

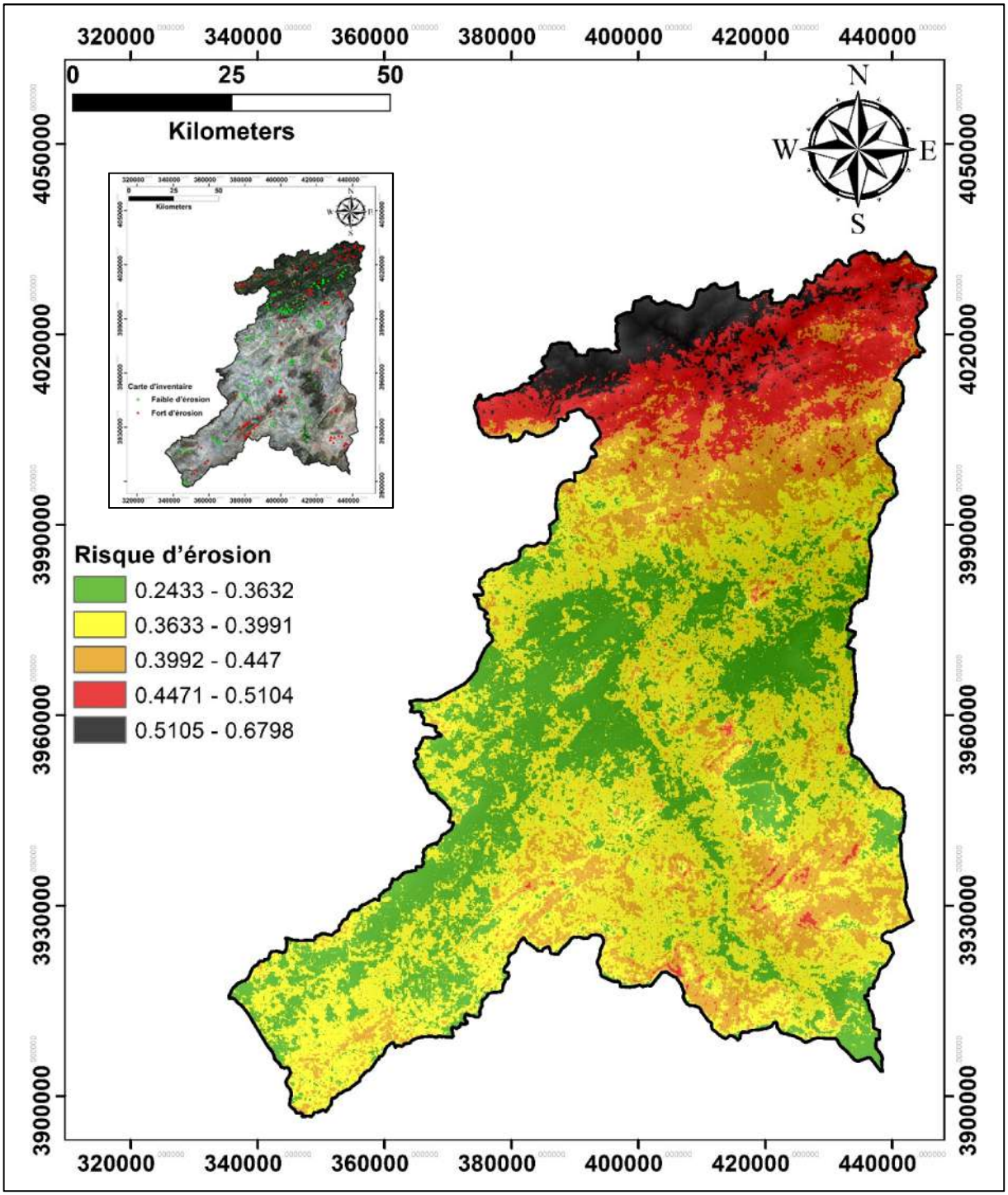

Fig.4.16. Cartes de susceptibilité de l'érosion de Bassin Versant Medjerda-Mellegue.

8.1.3. Discussion

La méthode AHP intégrée dans un SIG est utilisée pour identifier les zones à risque d'érosion. La carte obtenue (Figure 4.16) a été subdivisée en cinq classes allant du risque «très faible» au risque «très élevé». Selon les résultats nous constatons que 1,95% de la superficie totale a été placée dans des classes de susceptibilité très élevées ; 5,15% en grande classe ; 14,5% en classe modérée ; 25,91% en classe basse ; et 52,48% en très faible classe. À travers ces résultats, on peut distinguer que les régions à haut risque d'érosion se situent en grande partie dans le nord du bassin versant qui se caractérisent par des précipitations fortes et extrêmement irrégulières et abondantes, et des pentes relativement fortes. par contre à l'échelle de la région sud et sud-ouest du bassin versant des zones à faibles et moyennes risques sont apparus et se caractérise par un climat aride se distingue par des précipitations toutefois faibles et irrégulières , des reliefs monotones et des cours d'eau assez larges et peu profonds et des sols nus . À la lumière de ces résultats, nous pouvons donc conclure que les précipitations ne pas un effet linéaire sur l'érosion.

9. Validation de la carte de susceptibilité à l'érosion des sols

9.1. La courbe ROC

L'évaluation de la performance des modèles de sensibilité à l'érosion des sols est considérée comme une étape cruciale de la sélection et de la comparaison des modèles (sar et al, 2016).

La cartographie de la susceptibilité à l'érosion des sols est considérée comme une classification binaire dans laquelle les indices de susceptibilité ont été séparés en deux classes (c.-à-d. aucune érosion du sol et érosion du sol), la courbe ROC est utilisée pour mesurer la performance de la classification. La courbe ROC est construite en traçant le taux réel positif (sensibilité) par rapport au taux faux positif (spécificité de 100) avec les différents seuils de coupure. L'aire sous la courbe ROC (AUC) pourrait être utilisée pour la comparaison quantitative de ces modèles. Une valeur de AUC égale à 1 indique un modèle parfait et lorsque AUC égale à 0, elle indique un modèle non informatif.

9.2. Résultats et discussion

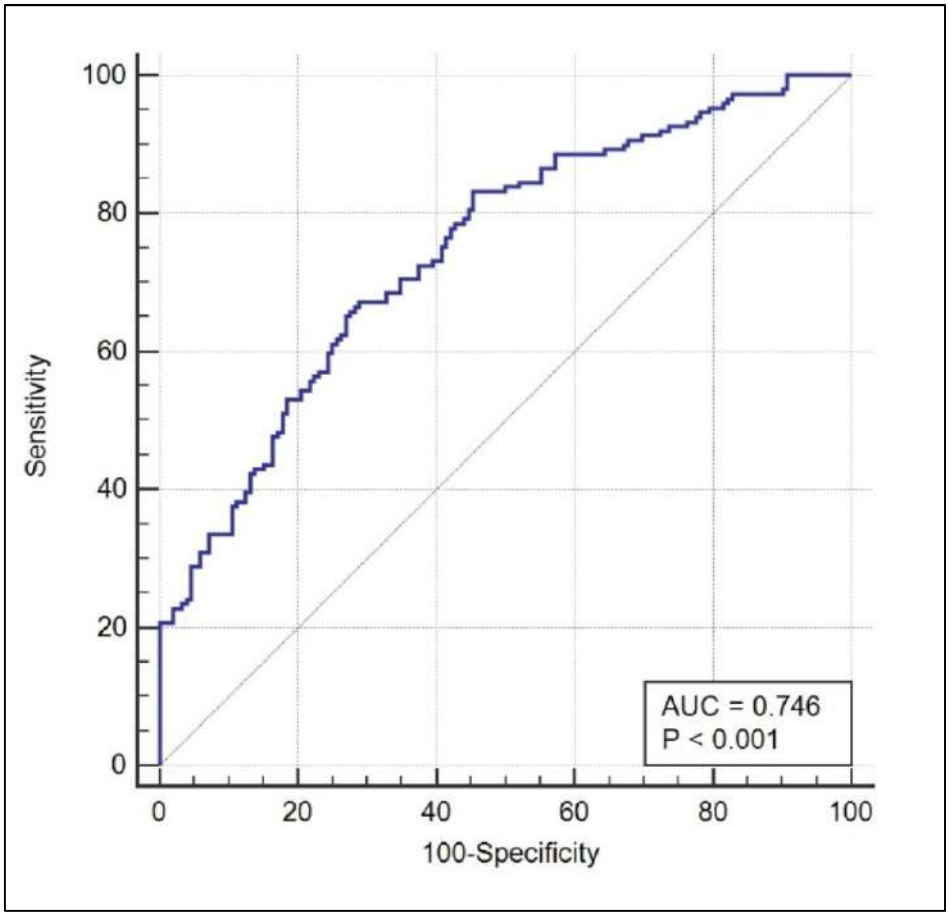

Fig.4.17. Courbe ROC.

Les résultats des courbes de taux de réussite et de taux de prédiction pour le modèle AHP sont illustrés aux Fig.4.17. Le modèle avec AHP a une valeur de 0.746 (74,60%), ce qui présente une assez bonne précision pour prédire la susceptibilité aux risques.

10.Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour établir la carte de susceptibilité à l'érosion du sol à l'aide d'un processus de hiérarchie analytique (AHP) intégrant la télédétection (RS) et le système d'information géographique (SIG) pour une étude de cas du bassin versant de Medjerda.

Et aux fins de valdation et de précision, la courbe (ROC) et l'aire sous la courbe ont été utilisés.

Conclusion générale

L'érosion est un risque majeur aux conséquences envrionmontal, humaines et matérielles préjudiciables. Dans le cadre d'une stratégie de prévention contre l'érosion, on a eu recours à la modélisation comme un outil largement connue pour délimiter l'emprise des zones sensibles à l'érosion dans le bassin versant de Medjerda. D'où, la modélisation constitue un axe primordial dans la connaissance de risque pour aboutir enfin à la limitation des dommages.

Dans la présente étude, nous essayons de comparer et appliquer deux modèles différents à savoir : AHP et RULSE pour cartographier les zones à risque d'érosion. Selon les résultats, cinq classes de susceptibilité ont été générées telles que très faible, faible, modérée, élevée et très élevée. (Très faible (37.67 %), faible (45.14 %), modérée (12.14 %), élevée (4.70 %) et très élevée (0.34 %)). Les résultats de l'analyse montrent qu'il y a une superficie considérable menacée par l'érosion hydrique surtout dans la partie Nord a proximité de cours d'eau principale (Oued Medjerda) ou la déclivité de terrain est haute et la vitesse d'écoulement est maximale. Par rapport aux valeurs Min et Max de chaque paramètre de L'USLE, on observe que les facteurs de la pluie et le facteur de la pente sont les facteurs responsables de la génération du phénomène d'érosion dans le bassin versant du Medjerda-Mellegue.

Selon la valeur moyenne d'érosion générée dans le bassin versant du Medjerda-Mellegue (9.36 T/ha/an) est une valeur considérable à cause qu'elle est au-dessus aux taux de tolérance de perte en sol dans le bassin méditerranéen (≈ 7 T/ha/an).

La validation des modèles utilisés a été menée à l'aide du modèle ROC, a montré que la méthode AHP est fiable pour prédire la sensibilité aux érosions dans le bassin versant de Medjerda-Mellegue, car elle avait une valeur a haut degré de précision (74,60 %). L'application de cette méthode a donné des résultats respectables qui peuvent apporter une aide précieuse, à coûts très bas, aux décideurs pour simuler des scénarios d'évolution et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion hydrique dans le bassin de Medjerda-Mellegue.

Dans les études futures, une attention particulière devrait être accordée aux variations à long terme de la vulnérabilité par la mise en place d'un outil capable d'intégrer les données géographiques de manière automatique et dynamique.

Références bibliographiques

- Agence de bassin hydrographique constantinois-seybousse-mellegue, le bassin de Medjerda-mellegue
- Angima SD, Stott DE, O'Neill MK, Ong CK, Weesies GA (2003)Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. Agric Ecosys Environ 97:295–308
- Arnold, J.B., Wall, G., Moore, N., Baldwin, C.S., et Shelton, I.J. (1989) « Fiche technique : L'érosion du sol - Causes et Effets », Ministère de !'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de]'Ontario, Division Agriculure et Affaires Rurales, Guelph, 7 p.
- Belarbi. F. 2010: Etude de la pluviométrie journalière dans le bassin versant de la TAFNA Magister en hydraulique Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen
- BELLOULA Moufida. Modélisation des écoulements et perspectives de prévention contre les risques d'inondation dans quelques bassins de la Medjerda (confins Algéro-tunisiens), mémoire de magister, 2007-2008.
- Benblidia, et al : eau et developement durable, 1993.
- Bonn, F. et G. Escadafal (1996). La télédétection appliquée aux sols. In : Précis de télédétection, Vol. 2 (Applications) (Bonn F éd), PUQ/AUPELF, 91-135.
- CHEGGOUR, A., 2008. Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Marrakech: Faculté des sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad.
- Pr Sylvia Dautrebande, Hélène Cordonnier, Marc Thirion, Pr Charles Bielders; Lutter contre l'érosion des terres, 2011.
- De Vente, J., Poesen, J., et Verstraeten, G. (2005) « The application of semiquantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain », Journal ofHydrology, 305: 63-86.
- DEMANGEOT, J., 1996. Les milieux "naturels" du globe. Paris: A. Colin. Collection U, ISSN 0750-7763 ; 307. ISBN 2-200-01416-3.
- Demangeot, Jean (1994) Les milieux « naturels » du globe. Paris, Masson (Coll. « Géographie »), 5e édition, 313 p. (ISBN 2-225-84503-4).
- DJABA Hichem, Ressources en eau et perspectives de gestion integree dans le bassin versant de medjerda, mémoire de magister, 2010.

• EL GAROUANI A., CHEN H., LEWIS L., 2007 – “The impacts of land use/land cover changes and climate regime on the spatial patterns of erosion and deposition by remote sensing and GIS: Case of Tlata river catchment (Morocco)”. 2nd International Conference of GIS/RS in Hydrology, Water Resources and Environment, Guangzhou, China, September 7-13, 2007.

• Fatma Kouttil et al, Etude de l’impact des barrages sur la réduction des transports sédimentaires jusqu’à la mer par approche paléohydrologique dans la basse vallée de la Medjerda, Avril 2018.

• FOX, 2008. La dégradation des sols dans le monde.

• FRANCHIS, L. de, 2003. Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens : étude bibliographique. Plan bleu pour la Méditerranée. Valbonne: Plan bleu. Les Cahiers du Plan bleu, ISSN 1630-5329 ; 2. ISBN 2-912081-13-0.

• Haddouche I, Benhanifia K, Gacemi M (2011). Analyse spatiale de la régénération forestière post-incendie de la forêt de Fergoug à Mascara, Algérie [Spatial analysis of post-fire regeneration in the forest of Fergoug in Mascara, Algeria]. Bois et Forêts des Tropiques 65 (307): 23-31.

• Hilborn, D . (1996) « Fiche technique: Lutte contre l'érosion en ravin », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculure et Affaires Rurales, Guelph, 10 p.

• Hudson, N. 198 1. Soil Conservation. Second Edition. Comell niversity Press, Ithaca,New York.

• Jim MUGANZA IGUNZI, L'usage des gouttières, comme moyen de lutte contre l'érosion hydrique dans la ville de Bukavu. Cas de la cellule muhungu ii en commune d'Ibanda, 2011.

• KHOUALDIA Wacila, Contribution à l’étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas d’oued Medjerda nord-est Algérie » Thèse de doctorat, année : 2014/2015.

• King D, Le Bissonnais Y. Rôle des sols et pratiques culturales dans l' infiltration et l'écoulement des eaux: exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. CR Acad Agric Fr 1992; 78 : 91 -105.

• LABABSA Salima et TOUAFCHIA Boutheina, Regionalisation des parametres statistiques appliquee aux donnees hydrologiques nord est algerien, mémoire de master, 2015.

• Laflen, J. M. and Roose, E. J. (1998) Methodologies for Assessment of Soil Degradation Due to Water Erosion

• Le Bissonnais Y., 2002 : L'érosion hydrique des sols, IFEN-INRA, pp10 -15

• OCDE 1993. Jeu de base d'indicateurs de l'OCDE pour l'étude de performance environnementale. OECD Environment Monographs, 83. OCDE Paris.

• Oldeman LR, Hakkeling RTA, Sombroek WG (1991) World map on the status of human induced soil degradation, with explanatory note (second revised edition). ISRIC Wageningen, UNEP, Nairob

• OUATTARA T., J-M. DUBOIS et J. HUGH (2003). MEH-SAFER : un nouveau modèle d'érosion hydrique pour les milieux semi-arides de forte énergie à partir d'images multisources et de données auxiliaires. Télédétection, 2-3-4, p. 151-163.

• P. Mhangara, V. Kakembo and K. Lim, "Soil Erosion Risk Assessment of the Keiskamma Catchment, South Africa Using GIS and Remote Sensing," Environment al Earth Science, Vol. 65, No. 7, 2012, pp. 2087-2102.

• Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., et Valentin, C. (2003) « Gully erosion and environmental change: importance and research needs », Catena, 50 : 91-133.

• Rahmati O, Haghizadeh A, Pourghasemi HR, Noormohamadi F (2016) Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. Nat Hazards 82(2):1231–1258

• Roose, E., & De Noni, G. (2004). Les effets d'actions incitatives de lutte contre l'érosion en Afrique du nord et en Amérique Latine/The effects of incentive schemes in the fight against erosion in North Africa and Latin America. Revue de géographie alpine, 92(1), 49-60.

• Sauvadet et al.: Déterminisme du ruissellement et de l'érosion hydrique 2012

• Stone, R.P. (2000) « Equation universelle des pertes en terre (USLE) », Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario, Division Agriculure et Affaires Rurales, Guelph, 9 p.

• VEIHE A. (2002). The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. Geoderma, 106, 101-120.

• Wischmeier, W.H. et D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses -- A guide to conservation planning. Agricultural handbook No. 537, USDA, Washington.

(1) http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/fr/c/278960/

(2) https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-lerosion.