



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Institut des sciences de la nature et de la vie

Département des Sciences agronomiques, foresterie et de l'environnement

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master académique en

Domaine : Science de la nature et de la vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Présenté par : DJAOUI Faïçal

Thème

***Apport de SIG pour la cartographie du risque de
dégradation des sols par l'érosion hydrique
Cas du Canton Rond point Parc National de Theniet el Had Wilaya
de Tissemsilt***

Soutenu le : 29/06/2026

Devant le Jury :

Mr. TALEB Amine	Président	MCA	U.tissemsilt
Mr. FELLAH Sahnoun	Encadreur	MCA	U.tissemsilt
Mr. OUBEL Habib	Co-Encadreur	MCA	U.tissemsilt
Mr. ARDJANE Tadj eddine	Examineur	MCB	U.tissemsilt

Année universitaire : 2025-2026

Remerciements

*Avant toute chose, je remercie notre dieu ﷻ de m'avoir
donné la puissance et la capacité pour combler cet travail
,et aussi je remercie mon estimé monsieur **Mr : FELLAH***

Sahnoune

*pour son aide et son encadrement de mon mémoire de fin
d'études*

*je remercie tous ceux qui ont contribué, directement ou
Indirectement au combler cet travail, avec je remercie tous
les travailleurs et l'ensemble du personnel de l'université
de tissemsilt, et plus particulièrement de l'institut des
sciences de la nature et de la vie .*



Dédicace

*grâce à notre dieu « allah » j'ai terminé mon mémoire de
fin d'étude j'adresse mes salutations à mes parents en
témoignage de ma gratitude pour tous les sacrifices qu'ils
ont faits pour moi et je dédie ceci à mes frères , et aussi je
dédie mes grand-mères*

je dédie mon encadrement, et je dédie ma famille



Faiçal Djaoui

Liste des abréviations

an : années

C° : degrés celsius

EVI : enhanced vegetation index

ha : hectares

Km : kilomètre

m : mètre

MNT : modèle numérique de terrain

MO : matière organique

NDVI : normalized difference vegetation index

NDWI : normalized difference water index

PNTH : parc national de theneit el-had

RULSE : revised universal soil loss equation

SIG : système d'informations géographique

T : température

t : tonne

USLE : universal soil loss equation

WEPP : water erosion predication project

Listes des figures

Figure n°01 : les effets de vent sur le sol	7
Figure N°02 : Les Etapes De L'érosion Hydrique	10
Figure N°03 : Les Effet De Splash.....	12
Figure N°04 : Image Represente L'érosion En Nappe.....	15
Figure N°05 : Les Principaux Formes De L'érosion Hydrique	17
Figure N°06 : Image Represente Envasement De Barrage De Derivation	19
Figure N°07 : Types Des Capteurs De Teledetection	28
Figure N°08 : Les Composants D'un Sig.....	40
Figure N°09 : Modes De Donnees	43
figure. 10: les principaux facteurs de modelisation et ses besoins	56
Figure N° 11 : Localisation De La Wilaya De Tissemsilt En L'algerie	60
Figure N°12 : Situation Geographique Du Parc National De Theniet El Had	61
Figure N° 13 : Les Zonages De Le Pnht	62
Figure N°14 : Carte Des Pentes Du Parc National De Theniet El-Had.....	63
Figure N° 15 : Carte Du Sol Du Parc	64
Figure N°16 : Les Precipitation Mensuelles A La Region Etude Pour La Periode 2018-2026.	66
Figure N°17 : Temperature Mensuelles Maximales Et Minimales De Region D'etude Pour La Periode 2018-2026	67
Figure N° 18 : Localisation De Zone Etude	69
Figure N° 19 : Les Cantons De Parc National De Theniet El-Had	70
Figure N°20 : Carte Du Facteur D'erosivite K	80
Figure N°21 : Carte Des Pentes.....	82
Figure N°22 : Carte Du Facteur Ls	83
Figure N°23 : Carte Du Facteur D'couverture Vegetale C	84
Figure N°24 : Carte Du Facteur D'erosivite R.....	87
Figure N°25 : Carte Des Pertes En Sol A.....	88

Listes des tableaux

Tableau N°01 : Les Principaux Consequences D'érosion Hydrique Avec Ses Causes	20
Tableau N°02 : Comparatif Des Modeles D'érosion Hydrique	52
Tableau 03: L'image Satellitaire De La Region Utilise	71
Tableau N°04 : Les Pluies Moyennes Dans 7 Stations	72
<i>Tableau 05: Variation De L'erodibilite Du Sol (K) En Fonction Du Type De Sol</i>	<i>78</i>

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE	1
I. GENERALITE SUR L'EROSION	5
I.1 INTRODUCTION.....	5
I.2 LES DIFFERENTES CLASSES ET TYPES D'EROSION	6
I.2.1 Définition de l'érosion éolienne:	6
I.2.2 Définition de l'érosion hydrique :.....	7
I.3 LES ETAPES DE FORMATION DE L'EROSION HYDRIQUE	8
I.3.1 détachement des particules du sol.....	8
I.3.2 Transport des particules	9
I.3.3 dépôt des sédiments	9
I.4 LES PRINCIPAUX FACTEURS INFLUENÇANT L'EROSION HYDRIQUE	10
I.4.1 intensité et agressivité des précipitation	11
I.4.2 le ruissellement	12
I.4.3 Pente et longueur de pente	12
I.4.4 infiltration et propriétés du sol.....	13
I.4.5 couverture végétale	13
I.4.6 activités humaines	14
I.5 FORMES DE L'EROSION HYDRIQUE	14
I.5.1 érosion en nappe (sheet erosion).....	14
I.5.2 érosion linéaire.....	15
I.5.3 érosion en rigoles (rill erosion)	15
I.5.4 érosion en rigoles et inter-rigoles.....	16
I.5.5 érosion en ravines (gully erosion).....	16
I.5.6 érosion en masse (mouvement de masse)	17
I.6 CONSEQUENCES DE L'EROSION HYDRIQUE.....	17
I.6.1 dégradation des sols	18
I.6.2 envasement des barrages.....	18

I.6.3 dégradation de la couverture végétale.....	19
I.6.4 impacts socio-économique.....	20
I.7.1 méthodes directes.....	21
I.7.1.1 Simulation des pluies	21
I.7.1.2 Mesure des sédiments	21
I.7.2 méthode indirectes	22
II. UTILISATION DE LA TELEDETECTION ET LES SIG POUR L'ETUDE DE L'EROSION HYDRIQUE	24
II.1. INTRODUCTION : TELEDETECTION ET SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG)	24
II.2 HISTORIQUE DE LA TELEDETECTION	24
II.3 QU'EST-CE QUE LA TELEDETECTION ?.....	25
II.4PRINCIPE DE LA TELEDETECTION	26
II.5 TYPES DE TELEDETECTION	27
II.5.1 Télédétection passive.....	27
II.5.2 Télédétection active	27
II.6LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA TELEDETECTION	28
II.6.1. Agriculture et gestion des ressources agricoles	28
II.6.2. Étude de l'environnement et des changements climatiques	30
II.6.3. Gestion des ressources en eau	31
II.6.4. Cartographie de l'occupation des sols et urbanisation	32
II.6.5. Géologie et exploration minière	33
II.6.6. Foresterie et gestion des écosystèmes	34
II.6.7. Étude des risques naturels et de l'érosion.....	35
II.7 IMAGE SATELLITAIRE.....	36
II.7.1. Les traitements préliminaires.....	37
II.7.2. Les corrections géométriques	37
II.8.SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG)	37
II.8.1. Introduction	37
II.8.2. Définition du SIG	38
II.8.3. Composantes d'un Système d'Information Géographique (SIG).....	38
II.8.3. 1. Les données	38
II.8.3.2. Le matériel informatique	38
II.8.3.3. Les logiciels.....	39
II.8.3.4. Les utilisateurs	39

II.8.3.5. Les méthodes et procédures.....	39
II.8.4. Fonctionnement d'un Système d'Information Géographique (SIG)	40
II.8.4.1. Acquisition des données	40
II.8.4.2. Saisie et stockage des données	40
II.8.4.3. Traitement et analyse spatiale.....	41
II.8.4.4. Manipulation et requêtes	41
II.8.4.5. Visualisation et représentation cartographique.....	41
II.8.5.. Importance des Systèmes d'Information Géographique (SIG)	41
II.8.5.1. Aide à la prise de décision.....	42
II.8.5.2. Gestion de l'environnement et des ressources naturelles	42
II.8.5.3. Aménagement du territoire et urbanisme	42
II.8.5.4. Gestion des risques naturels	42
II.8.5.5. Intégration avec la télédétection et autres technologies	42
II.9 LES DIFFERENTS MODES D'UN SIG.....	43
II.9.1 Mode vecteur	43
II.9.2 Mode raster	43
II.10. LES LOGICIELS UTILISES DANS LES SIG	44
II.10.1 ArcGIS.....	44
II.10.2 QGIS.....	44
II.10.3 Autres logiciels SIG et outils géospatiaux.....	44
II.11. CONCLUSION	45
II.12 L'IMPORTANCE DE SIG.....	45
II.13. APPORT DE LA TELEDETECTION ET DES SIG DANS L'ETUDE DE L'EROSION HYDRIQUE.....	45
III. LES MODELES UTILISER POUR LA QUANTIFICATION DE L'EROSION HYDRIQUE	48
III.1 INTRODUCTION	48
III.2 LES MODELES A BASE PHYSIQUE POUR ESTIMER L'EROSION HYDRIQUE.....	49
III.3. LES MODELES EMPIRIQUES POUR ESTIMER L'EROSION HYDRIQUE.....	50
III.3.1. modèle RUSLE	51
III.3.2. Description du modèle USLE (universal soil loss equation)	53
III.3.2.1. Le facteur d'érosivité R	53
III.3.2.2. Le facteur d'érodibilité des sols K	54
III.3.2.3. le Facteur topographique LS	54
III.3.2.4. Le facteur de couverture C	55

III.3.2.5. le Facteur des pratiques antiérosives P	56
IV : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES	59
IV.1 INTRODUCTION	59
IV.2 LOCALISATION DE LA WILAYA DE TISSEMSILT EN L'ALGERIE	59
IV. 3 PRESENTATION DE PARC NATIONAL DE THENIET EL-HAD	60
IV.4 CLASSIFICATION DU PARC PAR DES ZONAGES	61
IV.5 CARACTERISTIQUES PHYSIQUE DE PNTH :	62
IV.5.1 Géologie	62
IV.5.2 Pente	62
IV.5.3 altitude	63
IV.5.4 pédologie	63
IV.6 CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU PNTH	65
IV.6.1 précipitation	65
IV.6.1.1 précipitations mensuelles	65
IV.6.2 Températures moyennes minimales et maximales à theniet et-had	66
IV.7 CARACTERISTIQUES DE LA BIODIVERSITE DE ZONE ETUDE	67
IV.7.1 Flore	67
IV.7.2 Faune	68
IV.8 LOCALISATION DE ZONE ETUDE CANTON ROND-POINT	69
IV.9. DONNEES UTILISEES	70
IV.10. TRAITEMENT DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES	72
IV.11.1 ArcGIS	72
IV.11.2 QGIS	73
IV.11.3. ENVI 5.1 (Environment for Visualizing Images)	74
V.METHODOLOGIE, INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSION...	75
INTRODUCTION	76
V.2. APPLICATION DE LA METHODE USLE	76
V.3. LES FACTEURS DE LA METHODE USLE	77
V.3.1. Le facteur K : indice d'érodibilité des sols	77
V.3.2. Facteur topographique (LS) : longueur et inclinaison de la pente	80
V.3.3. Facteur C : facteur d'occupation et de protection du couvert végétal	83
V.3.4. Facteur P : facteur de conservation et d'aménagement	84
V.3.5. Facteur R : érosivité potentielle des précipitations	85

V.3.6PERTE EN SOL A	87
V.4 DISCUSSION	88
CONCLUSION GENERALE	90
REFERENCES :.....	93

Introduction générale

Introduction générale

L'érosion hydrique constitue l'un des principaux processus de dégradation des sols à l'échelle mondiale. Elle correspond à l'ensemble des mécanismes responsables de l'altération, du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol sous l'action de l'eau (Wischmeier & Smith, 1978 ; Lal, 2015). Ce phénomène débute par l'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol, provoquant la désagrégation des agrégats pédologiques et la réduction de leur cohésion structurale. Les particules arrachées sont ensuite transportées par le ruissellement de surface avant d'être déposées dans les zones de faible pente ou dans les retenues hydrauliques sous forme de sédiments (Morgan, 2005 ; Roose, 1994). L'érosion hydrique représente ainsi une menace majeure pour les ressources naturelles, les terres agricoles et les écosystèmes forestiers, particulièrement dans les régions méditerranéennes et semi-arides (Panagos et al., 2015 ; Nearing et al., 2017).

L'intensité de l'érosion hydrique dépend de plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Le premier facteur est lié aux caractéristiques des précipitations, notamment leur intensité, leur durée et leur énergie cinétique. Des pluies abondantes et agressives favorisent l'augmentation du ruissellement et accélèrent le processus érosif (Wischmeier & Smith, 1978). Le relief constitue également un facteur déterminant, puisque la pente et sa longueur influencent directement la vitesse d'écoulement des eaux ainsi que la capacité de transport des particules du sol. Plus la pente est importante, plus les pertes en sol deviennent élevées (Moore & Burch, 1986 ; McCool et al., 1989).

Les propriétés physiques et chimiques des sols jouent aussi un rôle essentiel dans leur sensibilité à l'érosion. Les sols sableux présentent généralement une forte capacité d'infiltration mais une faible cohésion structurale, tandis que les sols argileux se caractérisent par une meilleure stabilité des agrégats malgré une faible perméabilité (Smiri, 1987 ; Duchaufour, 2001). Par ailleurs, la couverture végétale constitue un élément fondamental dans la protection des sols contre les effets du ruissellement. Le couvert végétal réduit l'impact des gouttes de pluie, améliore l'infiltration de l'eau et limite le transport des particules. Ainsi, le maintien et l'amélioration de la végétation représentent parmi les moyens les plus efficaces de lutte contre l'érosion hydrique (Mazour & Roose, 2002 ; Roose et al., 2012). En revanche, les activités humaines telles que la déforestation, le surpâturage, les pratiques agricoles intensives et l'urbanisation accélèrent considérablement les phénomènes érosifs et aggravent la dégradation des sols (Nearing et al., 2017 ; Borrelli et al., 2020).

Les conséquences de l'érosion hydrique sont multiples et affectent aussi bien l'environnement que les activités socioéconomiques. Ce phénomène entraîne une diminution progressive de la fertilité des sols, une réduction de la productivité agricole ainsi qu'une dégradation des écosystèmes naturels et forestiers (Lal, 2003 ; Pimentel, 2006). En Algérie, l'érosion hydrique constitue un problème environnemental majeur, notamment en raison de l'envasement des barrages. Plusieurs études indiquent qu'une grande partie des retenues hydrauliques algériennes subit un envasement précoce lié au transport excessif des sédiments (Demmak, 1982 ; Touaibia, 2010 ; Remini, 2017). Cette situation réduit les capacités de stockage des

barrages et compromet la gestion durable des ressources en eau. De plus, la dégradation des sols et du couvert végétal engendre des impacts directs sur l'économie locale et la sécurité alimentaire, particulièrement dans les régions dépendantes des activités agricoles et forestières (Borrelli et al., 2017 ; FAO, 2023).

Afin d'évaluer et de quantifier l'érosion hydrique, plusieurs méthodes et modèles ont été développés au cours des dernières décennies. Parmi les approches directes, la méthode de mesure des sédiments permet d'estimer la charge sédimentaire transportée par les écoulements et d'identifier les périodes critiques associées aux épisodes pluvieux intenses (Walling & Fang, 2003). Cependant, l'évolution des technologies géospatiales, notamment la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), a profondément transformé l'étude de l'érosion hydrique en permettant une analyse spatiale et temporelle détaillée des zones vulnérables (Bonn, 1998 ; Vrieling, 2006 ; Ouedraogo et al., 2019).

Parmi les modèles empiriques les plus utilisés dans le monde figure l'USLE (Universal Soil Loss Equation) ainsi que sa version révisée RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Ces modèles permettent d'estimer les pertes moyennes annuelles en sol à partir de plusieurs facteurs, notamment l'érosivité des pluies (R), l'érodibilité des sols (K), la longueur et l'inclinaison des pentes (LS), la couverture végétale (C) ainsi que les pratiques de conservation des sols (P) (Wischmeier & Smith, 1978 ; Renard et al., 1997). L'intégration de ces paramètres au sein des SIG et des techniques de télédétection facilite aujourd'hui la production de cartes thématiques précises permettant d'identifier les secteurs les plus sensibles à l'érosion hydrique (Benchettouh et al., 2017 ; Jemai et al., 2021 ; Fellah et al., 2024).

Dans ce contexte, le présent travail vise à cartographier le risque de dégradation des sols dans un écosystème montagneux particulièrement vulnérable à l'érosion hydrique. L'étude porte sur le canton Rond-Point situé dans le massif du Djebel El Meddad, au sein du Parc National de Theniet El Had, dans le nord-ouest de l'Algérie. Cette recherche repose sur l'utilisation du modèle empirique USLE associé aux techniques des systèmes d'information géographique et de la télédétection afin d'identifier les zones les plus exposées à l'érosion hydrique et de contribuer à la mise en place de stratégies efficaces de conservation des sols et de préservation des écosystèmes forestiers.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres :

- **Chapitre I** : Généralités sur l'érosion hydrique ;
- **Chapitre II** : Utilisation de la télédétection et des SIG dans l'étude de l'érosion hydrique ;
- **Chapitre III** : Présentation des modèles utilisés ;
- **Chapitre IV** : Présentation de la zone d'étude et données utilisées ;
- **Chapitre V** : méthodologie, interprétation des résultats et discussion.

Enfin, ce travail s'achève par une conclusion générale présentant les principaux résultats obtenus ainsi que des perspectives relatives à la gestion durable des sols dans la région étudiée.

Chapitre I :

Généralité sur l'érosion

I. Généralité sur l'érosion

I.1 Introduction

L'érosion constitue l'un des processus géomorphologiques les plus importants façonnant la surface terrestre. Elle regroupe l'ensemble des mécanismes naturels et anthropiques responsables de la dégradation progressive de la couche superficielle de la croûte terrestre, en particulier les sols, entraînant une altération de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (Borrelli et al., 2020 ; Lal, 2015). Ce phénomène joue un rôle fondamental dans la dynamique des paysages, mais devient particulièrement problématique lorsqu'il est accéléré par les activités humaines et les changements environnementaux récents.

Sur le plan scientifique, l'érosion correspond au processus de détachement, de transport et de dépôt des particules solides du sol depuis leur position initiale vers des zones de sédimentation, sous l'action de divers agents naturels tels que l'eau, le vent et la gravité (Panagos et al., 2015 ; Morgan, 2005). Ce processus, bien que naturel, peut être fortement amplifié par la déforestation, le surpâturage, les pratiques agricoles inadaptées et l'urbanisation, ce qui conduit à une dégradation accélérée des sols à l'échelle mondiale.

Les recherches récentes montrent que l'érosion des sols représente aujourd'hui une menace majeure pour la sécurité alimentaire, la durabilité des écosystèmes et la gestion des ressources en eau (Nearing et al., 2017 ; Borrelli et al., 2020). En effet, les pertes en sol entraînent non seulement une diminution de la fertilité des terres agricoles, mais également une réduction de la capacité de stockage de l'eau dans les bassins versants, ce qui accentue les risques d'inondation et de sécheresse.

À l'échelle mondiale, l'érosion hydrique est considérée comme la forme dominante de dégradation des sols, particulièrement dans les régions à climat méditerranéen, tropical et semi-aride. Elle est directement liée à l'intensité des précipitations, à la vulnérabilité des sols et à la couverture végétale (Panagos et al., 2015). Dans les zones dépourvues de protection végétale, l'impact des gouttes de pluie provoque un détachement important des particules du sol, favorisant ainsi le ruissellement et le transport des sédiments vers les cours d'eau.

Par ailleurs, l'érosion éolienne constitue également un processus majeur dans les régions arides et semi-arides. Elle se manifeste par le transport des particules fines du sol sous l'action du vent, entraînant une perte de matière organique et une dégradation de la qualité de l'air. Les travaux récents montrent que ce phénomène peut affecter des régions situées à plusieurs milliers de

kilomètres des zones sources, ce qui en fait un problème environnemental transfrontalier (Middleton & Kang, 2017).

I.2 Les différentes classes et types d'érosion

La classification de l'érosion repose sur plusieurs critères permettant de mieux comprendre la diversité de ses formes et de ses mécanismes. Elle peut tout d'abord être distinguée selon l'agent responsable, ce qui permet d'identifier trois grands types : l'érosion hydrique liée à l'action de l'eau, l'érosion éolienne causée par le vent, et l'érosion gravitaire résultant des mouvements de masse sous l'effet de la gravité. Elle peut également être classée selon le mécanisme d'action, distinguant l'érosion mécanique, l'érosion chimique et l'érosion biologique. Enfin, selon son intensité et sa forme d'expression, on différencie l'érosion diffuse, qui agit de manière uniforme sur la surface du sol, et l'érosion concentrée qui se manifeste sous forme de rigoles et de ravines. Dans ce travail, l'accent est principalement mis sur les deux formes les plus dominantes et les plus étudiées, à savoir l'érosion hydrique et l'érosion éolienne. (Kouri, L., & Bensaid, A. 2015)

I.2.1 Définition de l'érosion éolienne:

L'érosion éolienne, correspond au processus de détachement, de transport et de dépôt des particules du sol sous l'action du vent. Elle est particulièrement active dans les régions arides et semi-arides où la couverture végétale est faible et les sols peu cohésifs (Shao, 2008). À l'échelle mondiale, ce phénomène affecte de vastes superficies, notamment dans les zones désertiques et steppiques, représentant ainsi un enjeu environnemental majeur (UNCCD, 2019). L'érosion éolienne se manifeste à travers trois principaux mécanismes : la saltation, qui correspond au déplacement des particules grossières par bonds successifs, la reptation, qui concerne le déplacement des particules plus lourdes au contact du sol, et la suspension, qui permet le transport des particules fines sur de très longues distances. Les impacts de ce type d'érosion peuvent être distingués en effets sur site et hors site. Sur site, elle entraîne une perte de matière organique, une diminution de la fertilité des sols et une baisse de la productivité agricole. Hors site, elle contribue à la pollution atmosphérique par les poussières, à la réduction de la visibilité, à des risques sanitaires pour les populations humaines et animales, ainsi qu'au transport de polluants et de pathogènes sur de longues distances (Middleton & Kang, 2017). Certaines études ont montré que les tempêtes de poussière peuvent parcourir plusieurs milliers de kilomètres, affectant des régions éloignées des zones sources.

Enfin, bien que l'érosion hydrique et l'érosion éolienne présentent des similitudes dans leurs mécanismes fondamentaux, notamment le détachement, le transport et le dépôt des particules, elles se distinguent par leurs agents d'action et leurs conditions d'apparition. L'érosion hydrique est dominante dans les zones humides et semi-humides, tandis que l'érosion éolienne est plus fréquente dans les zones arides et semi-arides. Toutefois, ces deux formes d'érosion contribuent conjointement à la dégradation des sols et à la diminution de leur productivité.

L'étude de l'érosion revêt ainsi une importance majeure à plusieurs niveaux. Elle permet la préservation des ressources en sols, la garantie de la sécurité alimentaire, la gestion durable des bassins versants, la protection des infrastructures hydrauliques ainsi que la lutte contre la désertification. Selon Lal (2015), la dégradation des sols liée à l'érosion constitue aujourd'hui l'une des principales menaces pour la durabilité des systèmes agricoles à l'échelle mondiale, soulignant ainsi l'importance de sa compréhension et de sa maîtrise.

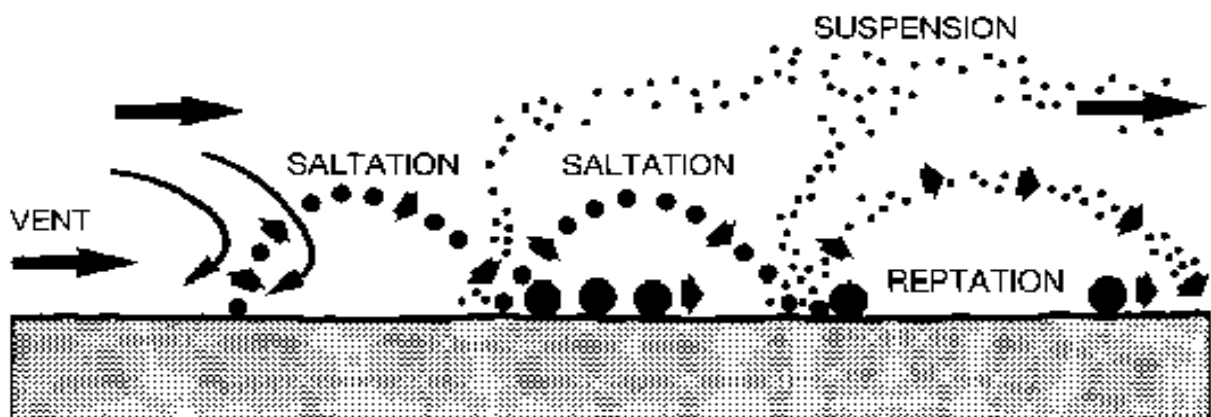


Figure n°01 : les effets de vent sur le sol (source ; www.fao.org)

I.2.2 Définition de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique des sols constitue un processus naturel majeur affectant l'ensemble des surfaces continentales et représentant une menace importante pour les ressources en sol et en eau (Demmak, 1982 ; Panagos et al., 2015 ; Borrelli et al., 2017). Elle se définit comme l'ensemble des mécanismes de détachement, de transport et de dépôt des particules du sol sous l'action de l'eau, en particulier des précipitations et du ruissellement superficiel (Morgan, 2005).

Ce phénomène se déroule en trois étapes fondamentales : le détachement des particules sous l'impact des gouttes de pluie, leur transport par les écoulements de surface, puis leur sédimentation dans les zones de dépôt. Plusieurs études montrent que ces processus dépendent

fortement des interactions entre les caractéristiques du sol, les conditions climatiques et la dynamique hydrologique des bassins versants (Roose, 1994 ; Borrelli et al., 2020 ; Nearing et al., 2017).

En Algérie et plus largement en Afrique du Nord, l'érosion hydrique représente un problème environnemental majeur, particulièrement dans les régions montagneuses et semi-arides où les sols sont fragiles et fortement exposés (Demmak, 1982 ; Meddi & Hubert, 2003). Elle contribue à la dégradation des terres agricoles et forestières sur de vastes superficies, entraînant une perte progressive de fertilité et une diminution des potentialités productives.

L'érosion hydrique est un processus complexe qui participe à la fois à la dégradation des reliefs et à la redistribution des sédiments dans les paysages. Si elle entraîne l'abaissement des zones élevées, elle contribue également à l'enrichissement des vallées et à la formation de plaines alluviales fertiles, essentielles pour l'agriculture (Laouina, 1998 ; Roose et al., 2012). Ainsi, l'objectif n'est pas de supprimer totalement l'érosion, mais de la contrôler afin de la maintenir à un niveau acceptable dans une perspective de gestion durable des sols (Montanarella et al., 2016).

Par ailleurs, l'érosion résulte également de processus physico-chimiques et biologiques qui provoquent la désagrégation des roches et le remodelage progressif du relief. Elle correspond, au sens large, à l'usure de la couche superficielle de la croûte terrestre sous l'action combinée de facteurs naturels, notamment l'eau, principal agent en milieu humide, mais aussi le vent et les activités biologiques (Pimentel, 2006 ; Lal, 2003).

I.3 les étapes de formation de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un processus dynamique et complexe qui se déroule selon une succession d'étapes interdépendantes. De manière générale, elle comprend trois phases fondamentales : le détachement des particules du sol, leur transport par les agents hydriques, et enfin leur dépôt dans des zones de sédimentation. Ces étapes sont conditionnées par les caractéristiques du sol, l'intensité des précipitations, la pente du terrain ainsi que la couverture végétale (Morgan, 2005 ; Nearing et al., 2017 ; Lal, 2015).

I.3.1 détachement des particules du sol

Le détachement constitue la première étape du processus d'érosion hydrique. Il correspond à la séparation des particules du sol de la matrice solide sous l'action des forces externes. Ce phénomène est principalement provoqué par l'impact des gouttes de pluie, qui exercent une

énergie cinétique suffisante pour désagréger les agrégats du sol, phénomène connu sous le nom d'**effet splash**. Cet impact entraîne la rupture des liaisons entre particules et la mise en suspension des matériaux fins.

Outre l'action des précipitations, le détachement peut également résulter des forces de cisaillement exercées par l'écoulement de surface, notamment lorsque le ruissellement devient concentré. Dans certains cas, des processus chimiques tels que la dissolution des agents cimentants du sol (matière organique, oxydes, carbonates) contribuent également à fragiliser la structure du sol et à faciliter la désagrégation des agrégats (Lal, 2015).

Ainsi, le détachement dépend fortement de la stabilité structurale du sol, de sa teneur en matière organique et de son degré d'humidité initial. Les sols nus, pauvres en couverture végétale, sont particulièrement vulnérables à cette phase initiale de l'érosion.

I.3.2 Transport des particules

Le transport représente la deuxième étape du processus d'érosion hydrique. Il correspond au déplacement des particules détachées par l'action de l'eau en mouvement, principalement sous forme de ruissellement de surface, mais également par infiltration latérale (flux hypodermique) dans certains contextes.

Lorsque les précipitations dépassent la capacité d'infiltration du sol, l'eau s'écoule en surface et mobilise les particules détachées. Ces dernières sont alors transportées vers l'aval sous l'effet de la gravité et de la vitesse du flux. La capacité de transport dépend directement de l'énergie cinétique de l'écoulement, elle-même influencée par la pente, la rugosité de la surface et le volume d'eau disponible.

Les distances de transport peuvent varier considérablement : certaines particules ne se déplacent que de quelques millimètres, tandis que d'autres peuvent être transportées sur plusieurs kilomètres dans les réseaux hydrographiques. Le temps entre le détachement et le transport peut également varier de quelques secondes à plusieurs jours selon les conditions hydrologiques et climatiques (Morgan, 2005 ; Nearing et al., 2017).

I.3.3 dépôt des sédiments

Le dépôt constitue la phase finale de l'érosion hydrique. Il se produit lorsque la capacité de transport de l'eau diminue, entraînant la sédimentation progressive des particules en suspension. Cette diminution de l'énergie peut être causée par une réduction de la pente, une baisse de la

vitesse d'écoulement ou la présence d'obstacles naturels tels que la végétation, les roches ou les structures artificielles.

Les particules les plus lourdes et grossières se déposent en premier, tandis que les particules fines, telles que les limons et les argiles, peuvent rester en suspension plus longtemps et être transportées sur de longues distances avant leur dépôt final dans les plaines alluviales, les retenues d'eau ou les zones de faible énergie hydraulique.

Le processus de sédimentation est également influencé par la densité des particules, leur taille granulométrique et la turbulence de l'écoulement. Une diminution de la turbulence favorise le dépôt rapide, tandis qu'un écoulement turbulent peut maintenir les particules en suspension plus longtemps (Lal, 2015).

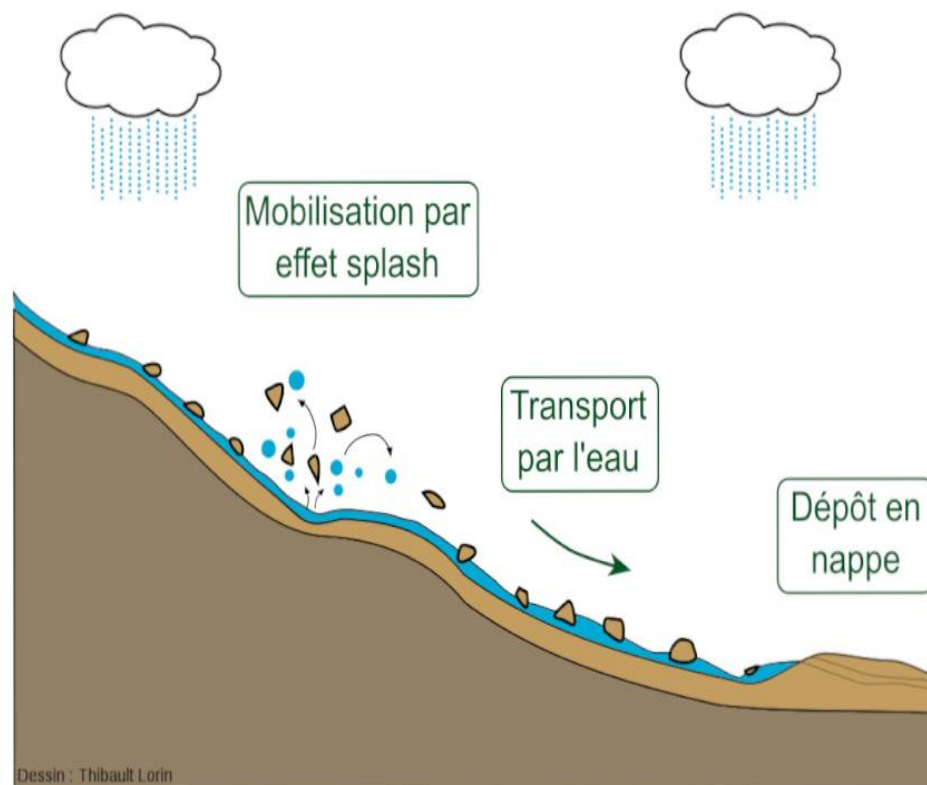


Figure n°02 : les étapes de l'érosion hydrique (source : cultivons-les-couverts.agro)

I.4 les principaux facteurs influençant l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un phénomène complexe résultant de l'interaction de plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Son intensité et sa dynamique ne dépendent pas d'un seul élément isolé, mais de la combinaison de facteurs climatiques, topographiques, pédologiques, biologiques et

humains. Ces facteurs contrôlent les trois processus fondamentaux de l'érosion (détachement, transport et dépôt) et expliquent la forte variabilité spatiale et temporelle de ce phénomène (Morgan, 2005 ; Nearing et al., 2017 ; Borrelli et al., 2020).

I.4.1 intensité et agressivité des précipitation

Les précipitations constituent le facteur déclencheur principal de l'érosion hydrique. Leur rôle ne se limite pas à l'apport d'eau, mais inclut également une énergie mécanique capable de dégrader la surface du sol. L'impact des gouttes de pluie sur le sol provoque le phénomène appelé **effet splash**, qui correspond à la désagrégation des agrégats et à la projection des particules fines.

Cette énergie dépend directement des caractéristiques physiques des gouttes de pluie, notamment leur masse et leur vitesse. Elle peut être exprimée par la relation de l'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

où m représente la masse de la goutte (kg) et V sa vitesse (m/s). L'énergie cinétique des précipitations augmente fortement avec leur intensité, ce qui explique l'agressivité des pluies orageuses dans les régions méditerranéennes et semi-arides.

Des relations empiriques montrent que l'énergie cinétique des pluies est corrélée à leur intensité (Remy et al., 1998), ce qui permet d'estimer leur pouvoir érosif. Lors des premières phases d'une averse, les gouttes de pluie provoquent une modification rapide de la structure superficielle du sol, entraînant trois phénomènes simultanés : la désagrégation des agrégats, la formation d'une croûte de battance réduisant l'infiltration, et l'érosion par rejaillissement des particules (Martin , 1997).

Cette croûte superficielle joue un rôle crucial dans l'augmentation du ruissellement, car elle diminue fortement la perméabilité du sol et favorise la concentration des écoulements en surface.

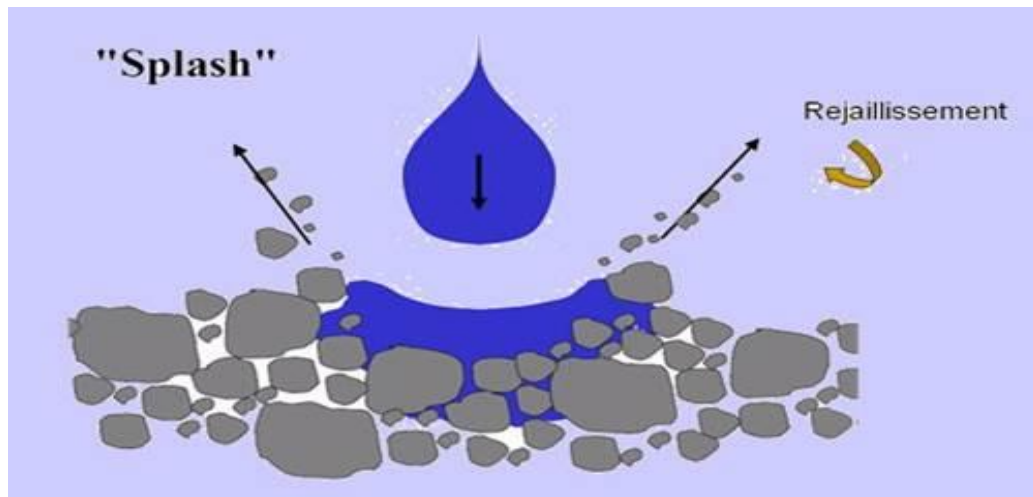


Figure n°03 : les effet de splash (Smiri, 1987)

I.4.2 le ruissellement

Le ruissellement constitue le principal agent de transport des particules érodées. Il correspond à l'écoulement de l'eau à la surface du sol lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration du sol. Ce phénomène est directement influencé par les caractéristiques hydrauliques du sol, notamment sa perméabilité et sa porosité.

Le ruissellement peut être diffus ou concentré. Le ruissellement diffus se produit lorsque l'eau s'écoule en nappe sur de faibles épaisseurs, tandis que le ruissellement concentré se forme lorsque les écoulements se regroupent en rigoles ou en ravines. Ce dernier est beaucoup plus destructeur car il concentre l'énergie hydraulique.

L'intensité du ruissellement dépend fortement de la couverture végétale et de l'état hydrique du sol. Les sols nus présentent des coefficients de ruissellement élevés, alors que les sols couverts par la végétation favorisent l'infiltration. De plus, les sols déjà saturés en eau présentent une capacité d'infiltration réduite, ce qui augmente le ruissellement lors des épisodes pluvieux suivants.

Les pluies de forte intensité peuvent dépasser rapidement la capacité d'absorption du sol, entraînant un ruissellement massif et une érosion concentrée particulièrement active sur les versants pentus (Chebbani et al., 1999).

I.4.3 Pente et longueur de pente

La topographie joue un rôle fondamental dans l'intensification de l'érosion hydrique. La pente influence directement la vitesse d'écoulement de l'eau, tandis que la longueur de versant contrôle l'accumulation progressive du ruissellement.

Plus la pente est forte, plus la composante gravitaire est importante, ce qui accélère le déplacement de l'eau et augmente sa capacité de détachement et de transport des particules. De même, une longue pente permet l'accumulation progressive du volume d'eau, ce qui augmente l'énergie hydraulique disponible en bas de versant.

Wischmeier et Smith (1978) ont démontré que ces deux paramètres sont essentiels dans l'estimation des pertes en sol. Le modèle RUSLE intègre leur effet à travers le facteur LS (Length-Slope), qui quantifie l'impact combiné de la longueur et de la pente sur l'érosion. Renard et al. (1997) ont également montré que l'augmentation de ces paramètres entraîne une croissance exponentielle du risque érosif.

I.4.4 infiltration et propriétés du sol

L'infiltration représente la capacité du sol à absorber l'eau de pluie. Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment la texture, la structure, la porosité et la teneur en matière organique.

Les sols sableux présentent généralement une forte infiltration mais une faible cohésion, tandis que les sols argileux ont une faible perméabilité mais une meilleure cohésion structurale. Les sols issus de formations marneuses ou schisteuses sont particulièrement sensibles à l'érosion en raison de leur faible stabilité et de leur forte sensibilité à la saturation (Smiri, 1987).

La matière organique joue un rôle central dans la stabilité des agrégats. Elle améliore la cohésion des particules, augmente la porosité et favorise l'infiltration de l'eau. Une teneur élevée en matière organique réduit ainsi la susceptibilité du sol à la désagrégation lors des précipitations (Casenave et al., 1989).

I.4.5 couverture végétale

La couverture végétale constitue l'un des facteurs les plus efficaces de protection contre l'érosion hydrique. Elle agit à plusieurs niveaux : elle réduit l'énergie d'impact des gouttes de pluie, limite le ruissellement et améliore la structure du sol grâce au réseau racinaire.

Les racines des plantes stabilisent le sol en augmentant sa cohésion et en créant des macroporosités favorisant l'infiltration. De plus, la végétation protège la surface du sol contre la battance et réduit la vitesse des écoulements.

L'amélioration du couvert végétal, par des pratiques telles que la rotation des cultures, l'introduction de légumineuses ou la gestion de la biomasse, permet de réduire significativement

les pertes en sol. Mazour et Roose (2002) montrent que la présence d'un couvert végétal dense peut réduire de manière importante les risques d'érosion et de ruissellement.

I.4.6 activités humaines

Les activités humaines représentent aujourd'hui l'un des principaux facteurs d'accélération de l'érosion hydrique. Les pratiques agricoles intensives, le surpâturage, la déforestation et l'urbanisation modifient profondément l'équilibre naturel des sols.

Le labour dans le sens de la pente favorise l'écoulement de l'eau et augmente la vitesse du ruissellement. De plus, l'absence de restitution de matière organique entraîne une diminution de la stabilité structurale du sol. Ces pratiques augmentent fortement la vulnérabilité des sols aux processus érosifs.

Selon Smiri (1987), ces interventions anthropiques peuvent transformer des sols relativement stables en surfaces très sensibles à l'érosion, contribuant ainsi à la dégradation accélérée des terres agricoles et à la désertification.

I.5 formes de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un processus progressif et hiérarchisé qui se manifeste sous différentes formes selon l'intensité des précipitations, la pente, la nature du sol et le degré de protection végétale. Ces formes ne sont pas indépendantes mais représentent souvent des stades successifs d'un même processus de dégradation des sols, allant de l'érosion diffuse à des formes gravement concentrées et destructrices (Morgan, 2005 ; Panagos et al., 2015 ; Borrelli et al., 2020).

I.5.1 érosion en nappe (sheet erosion)

L'érosion en nappe constitue la forme la plus diffuse et la plus insidieuse de l'érosion hydrique. Elle se caractérise par une perte uniforme et progressive de la couche superficielle du sol sous l'effet combiné de l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement diffus. Ce processus est difficile à observer directement car il n'entraîne pas immédiatement la formation de structures visibles comme les rigoles ou les ravines.

L'impact des gouttes de pluie provoque la désagrégation des agrégats du sol, tandis que le ruissellement transporte les particules fines sur de courtes distances. Ce mécanisme entraîne une diminution progressive de la teneur en matière organique et en nutriments, ce qui affecte directement la fertilité des sols (Mabit et al., 2002 ; Lal, 2015).

Dans les régions méditerranéennes comme l'Algérie, l'érosion en nappe reste relativement modérée en raison de la nature des sols (riches en argiles et en éléments grossiers) et de l'agressivité variable des pluies. Toutefois, son impact cumulatif est significatif sur le long terme, notamment par la dégradation progressive des horizons superficiels et l'augmentation des sédiments dans les bassins versants (Roose et al., 1993 ; Borrelli et al., 2020).



Figure n°04 : image représente l'érosion en nappe (www.qld.gov.au)

I.5.2 érosion linéaire

L'érosion linéaire représente une forme plus concentrée de l'érosion hydrique, caractérisée par la formation de sillons ou de petites incisions dans le sol. Elle résulte de la concentration progressive du ruissellement diffus en flux linéaires capables d'inciser le sol.

Ce type d'érosion apparaît généralement lorsque la capacité d'infiltration du sol est dépassée et que les flux d'eau commencent à se regrouper. Selon Smiri (1987), l'érosion linéaire est fortement contrôlée par la nature du substrat, la pente et la couverture végétale. Les sols fragiles tels que les argissols et luvisols sont particulièrement sensibles à ce processus.

Les activités humaines jouent également un rôle important dans son déclenchement, notamment le labour dans le sens de la pente, la déforestation et le surpâturage, qui augmentent la concentration des écoulements et accélèrent l'incision du sol.

I.5.3 érosion en rigoles (rill erosion)

L'érosion en rigoles est une forme évoluée de l'érosion linéaire, caractérisée par la formation de petits canaux temporaires créés par la concentration du ruissellement. Ces rigoles apparaissent

lors d'épisodes pluvieux intenses et peuvent disparaître après le travail du sol, mais elles peuvent également évoluer vers des formes plus profondes si les conditions érosives persistent.

Ce processus est particulièrement influencé par les pratiques agricoles et la structure du sol. Roose et al. (1993) soulignent que les rigoles peuvent entraîner des pertes importantes de sol en peu de temps, dépassant largement les taux naturels de régénération des sols.

L'intensification de ce phénomène est liée à la dégradation de la structure superficielle du sol et à la réduction de la couverture végétale, ce qui favorise la concentration du ruissellement.

I.5.4 érosion en rigoles et inter-rigoles

L'érosion en rigoles et inter-rigoles correspond à une phase intermédiaire entre l'érosion diffuse et l'érosion concentrée. Elle se caractérise par un réseau dense de petites rigoles peu profondes séparées par des zones inter-rigoles soumises à une érosion en nappe.

Ce type d'érosion est particulièrement actif lors d'événements pluvieux intenses où les gouttes de pluie et le ruissellement agissent simultanément. Les zones inter-rigoles subissent une désagrégation par splash, tandis que les rigoles concentrent le flux d'eau et transportent les sédiments vers l'aval (Mabit et al., 2002 ; Nearing et al., 2017).

Cette forme d'érosion est considérée comme une étape clé dans la transition vers des formes plus destructrices telles que les ravines.

I.5.5 érosion en ravines (gully erosion)

L'érosion en ravines représente une forme avancée et très destructrice d'érosion hydrique. Elle se manifeste par la formation de canaux profonds et permanents qui ne peuvent plus être effacés par les pratiques agricoles classiques.

Elle résulte de la concentration extrême du ruissellement, combinée à une forte énergie hydraulique capable d'inciser profondément le sol et parfois le substrat rocheux. Les facteurs naturels incluent l'intensité des précipitations, la pente et la nature du sol, tandis que les facteurs anthropiques incluent la déforestation, l'urbanisation et les pratiques agricoles inadaptées (Kuhn et al., 2023).

Les sols sableux ou peu cohésifs sont particulièrement vulnérables à ce type d'érosion. Les ravines entraînent une perte irréversible de terres agricoles et modifient profondément les réseaux hydrographiques locaux.

I.5.6 érosion en masse (mouvement de masse)

L'érosion en masse regroupe l'ensemble des mouvements gravitaires de matériaux sur les pentes. Contrairement aux autres formes d'érosion hydrique, elle implique le déplacement de volumes importants de sol ou de roche sous l'effet de la gravité, souvent déclenché par la saturation en eau.

Les principaux facteurs déclencheurs incluent les fortes pentes, les précipitations intenses, la déforestation, les séismes et les activités humaines. L'eau joue un rôle essentiel en augmentant la masse du sol et en réduisant sa cohésion interne, ce qui favorise les glissements de terrain et les coulées de boue.

Ces phénomènes peuvent provoquer des destructions importantes d'infrastructures, des pertes de terres agricoles et une modification durable du relief (Morgan, 2005 ; Borrelli et al., 2020).

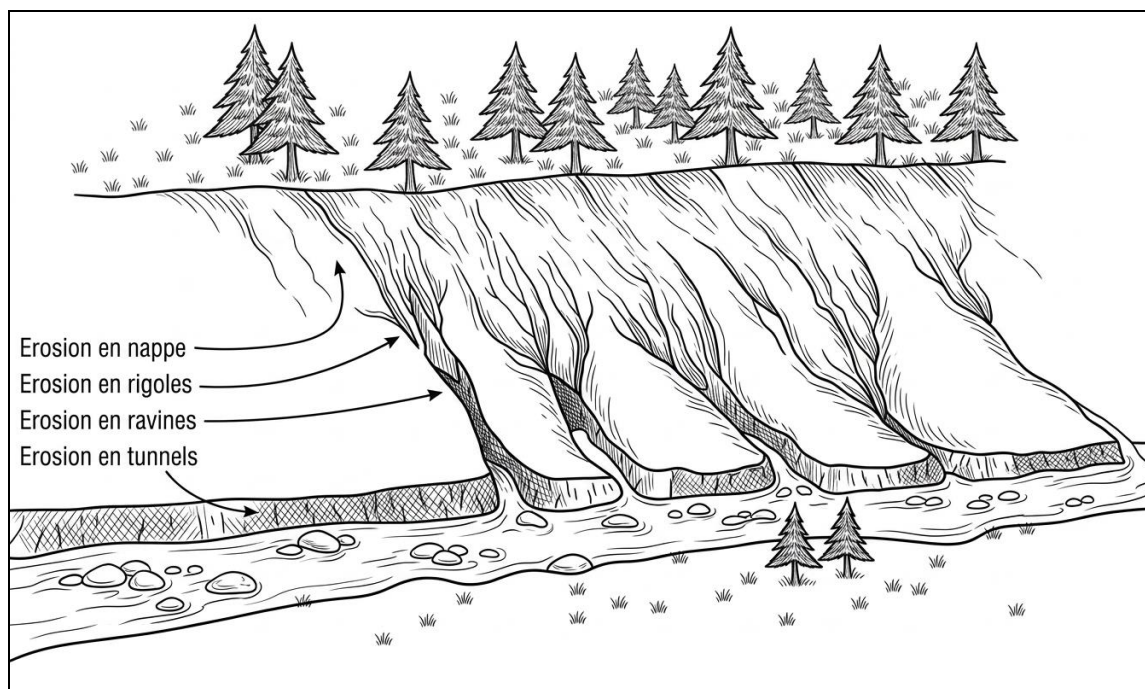


Figure n°05 : les principales formes de l'érosion hydrique (Remmas, 2014)

I.6 conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique correspond à l'ensemble des processus de détachement, de transport et de dépôt des particules du sol sous l'action de l'eau (précipitations, ruissellement et écoulements fluviaux). Ce phénomène engendre des conséquences multiples et interdépendantes, affectant à la fois les systèmes environnementaux, la productivité agricole et les équilibres socio-économiques. Ses impacts peuvent être observés à différentes échelles spatiales, depuis la

parcelle agricole jusqu'aux bassins versants entiers (Lal, 2015 ; Borrelli et al., 2020 ; Nearing et al., 2017).

I.6.1 dégradation des sols

La dégradation des sols constitue l'une des conséquences les plus directes et les plus préoccupantes de l'érosion hydrique. Elle se traduit par la perte progressive de la couche arable (horizon A), riche en matière organique et en éléments nutritifs essentiels au développement des cultures.

Lorsque les sols subissent des périodes de dessiccation intense, leur structure se dégrade, entraînant une diminution de leur capacité d'infiltration. Ainsi, lors des épisodes pluvieux, l'eau ne pénètre plus efficacement dans le sol et s'écoule en surface, favorisant le ruissellement et l'exportation des particules fines. Ce processus entraîne un amincissement progressif du sol et peut aboutir, dans les cas extrêmes, à la mise à nu de la roche mère, notamment dans les zones montagneuses à forte pente (Abdessemed, 1984 ; Morgan, 2005).

À long terme, cette dégradation réduit fortement la fertilité des sols, diminue leur capacité de rétention en eau et compromet leur productivité agricole. Elle contribue également à l'augmentation de la vulnérabilité des écosystèmes face aux aléas climatiques (Lal, 2015).

I.6.2 envasement des barrages

L'envasement des barrages représente une conséquence majeure de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants. Il correspond à l'accumulation progressive de sédiments transportés par les eaux de ruissellement et déposés dans les retenues artificielles.

Dans les régions semi-arides, notamment en Algérie, ce phénomène est particulièrement préoccupant. Plusieurs études indiquent que plus de 50 % des barrages algériens sont affectés par un envasement précoce, entraînant une réduction significative de leur capacité de stockage. La perte totale de capacité est estimée à environ 25 %, soit plusieurs centaines de millions de mètres cubes d'eau (Touaibia, 2010 ; Remini, 2017).

L'envasement entraîne également une réduction de la durée de vie des infrastructures hydrauliques, souvent estimée à moins de 30 ans en l'absence de mesures de conservation des sols. Certains barrages risquent même d'être totalement comblés à court terme, ce qui compromet leur rôle dans l'irrigation, l'alimentation en eau potable et la régulation des crues.

Les impacts socio-économiques sont donc considérables, notamment pour les régions dépendantes de ces ressources (Howell et al., 2019).



Figure n°06 : image représente envasement de barrage de dérivation (touaibia, 2010)

I.6.3 dégradation de la couverture végétale

L'érosion hydrique contribue également à la dégradation de la couverture végétale. En effet, la perte de la couche superficielle du sol entraîne une diminution des nutriments disponibles pour les plantes, ce qui affecte leur croissance et leur développement.

Dans les zones soumises à des conditions climatiques extrêmes, notamment après des périodes de sécheresse, le sol devient compact et imperméable. L'eau de pluie s'écoule alors en surface, emportant les particules fines et accentuant la dégradation du sol. Progressivement, les racines des plantes se retrouvent exposées, ce qui les rend plus vulnérables aux variations de température et aux stress hydriques, pouvant conduire à leur dépérissement (Abdessemed, 1984 ; Lal, 2015).

Dans les régions montagneuses, la combinaison de la pente et de l'érosion accélère ce processus, pouvant conduire à une disparition quasi totale de la végétation et à une exposition directe de la roche mère.

I.6.4 impacts socio-économique

Les conséquences de l'érosion hydrique dépassent le cadre environnemental et affectent directement les systèmes socio-économiques, en particulier dans les zones rurales. La perte de fertilité des sols entraîne une baisse des rendements agricoles, obligeant les agriculteurs à recourir à des intrants coûteux tels que les engrais pour maintenir la production.

Par ailleurs, l'augmentation du ruissellement et le transport des sédiments contribuent à l'envasement des cours d'eau, augmentant ainsi le risque d'inondation. Ces phénomènes peuvent causer des dommages importants aux infrastructures, notamment les routes, les ponts et les habitations, générant des coûts économiques élevés (Nearing et al., 2017 ; Borrelli et al., 2020).

À long terme, l'érosion hydrique peut entraîner une dégradation irréversible des terres agricoles, favorisant l'abandon des terres, l'exode rural et la désertification, particulièrement dans les régions semi-arides comme le Maghreb (Lal, 2015).

Tableau n°01 : les principaux conséquences d'érosion hydrique avec ses causes

Conséquence	Cause
Dégradation du sol	Les effets de l'intensité de l'eau
Dégradation végétale	L'altération de la couche arable du sol
Envasement des barrages	Transport des sédiments
Impact socio-économique	Le perte de couverture végétale

I.7 quantification de l'érosion hydrique

La quantification de l'érosion hydrique correspond à l'évaluation des pertes en sol générées par l'action des précipitations et du ruissellement de surface. Elle constitue une étape essentielle pour comprendre la dynamique de dégradation des sols, évaluer les risques environnementaux et mettre en place des stratégies efficaces de conservation des terres. En effet, la mesure de l'érosion permet d'exprimer les pertes en sol généralement en tonnes par hectare et par an (t/ha/an), ce qui facilite la comparaison entre différents milieux et systèmes de gestion (Morgan, 2005 ; Borrelli et al., 2020).

Les méthodes de quantification se divisent en deux grandes catégories complémentaires : les méthodes directes, basées sur des mesures de terrain, et les méthodes indirectes, reposant sur la modélisation et les technologies géospatiales.

I.7.1 méthodes directes

Les méthodes directes permettent d'observer et de mesurer directement les processus d'érosion à différentes échelles, allant de la parcelle expérimentale au bassin versant. Elles offrent des résultats précis mais restent limitées en termes de couverture spatiale et nécessitent des dispositifs expérimentaux spécifiques.

I.7.1.1 Simulation des pluies

La simulation des pluies constitue une méthode expérimentale fondamentale pour l'étude des processus d'érosion hydrique. Elle consiste à reproduire artificiellement des précipitations à l'aide de dispositifs appelés simulateurs de pluie, permettant de contrôler les paramètres climatiques tels que l'intensité, la durée et l'énergie cinétique des gouttes.

Cette technique permet d'analyser de manière détaillée les mécanismes de détachement des particules (effet splash), de formation du ruissellement et de transport des sédiments. Les expérimentations sont généralement réalisées sur des parcelles de taille variable (de 1 m² à plusieurs dizaines de m²), ce qui permet d'évaluer la réponse des sols à différentes conditions (Touaïbia et al., 1999 ; Nearing et al., 2017).

Des études menées au Maghreb montrent que les coefficients de ruissellement peuvent varier fortement selon l'état de surface du sol, la couverture végétale et l'intensité des pluies, atteignant parfois plus de 70 % dans les conditions de sols dégradés (agrimaroc.org). Ces résultats soulignent l'importance des facteurs de surface dans le déclenchement de l'érosion.

I.7.1.2 Mesure des sédiments

La mesure des sédiments constitue une autre approche directe essentielle pour quantifier l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants. Elle repose sur l'analyse conjointe du débit des cours d'eau et de la concentration en particules solides en suspension.

Cette méthode permet d'estimer la charge sédimentaire totale transportée par les écoulements, fournissant ainsi une estimation intégrée des pertes en sol sur l'ensemble du bassin. Elle permet également d'identifier les périodes critiques d'érosion, généralement associées à des événements pluvieux intenses (Walling & Fang, 2003).

Cependant, cette approche présente certaines limites, notamment la difficulté à localiser précisément les zones sources de sédiments et la variabilité temporelle des flux sédimentaires.

I.7.2 méthode indirectes

Les méthodes indirectes reposent sur l'utilisation d'outils modernes tels que la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles mathématiques. Elles permettent d'estimer l'érosion hydrique à grande échelle et de produire des cartes de vulnérabilité des sols.

L'analyse des images satellitaires et des photographies aériennes permet d'identifier les zones sensibles à l'érosion en fonction de plusieurs paramètres, notamment la pente, l'occupation du sol et la densité de la couverture végétale. Ces facteurs influencent directement l'infiltration et le ruissellement : plus la végétation est dense, plus l'infiltration est favorisée et le ruissellement réduit ([FAOHome](#)).

Par ailleurs, la modélisation mathématique constitue aujourd'hui l'outil le plus utilisé pour quantifier l'érosion hydrique. Le modèle le plus répandu est l'équation universelle des pertes en sol (USLE) et ses versions améliorées (RUSLE). Ces modèles permettent d'estimer les pertes en sol en intégrant plusieurs facteurs déterminants tels que :

l'érosivité des pluies

l'érodibilité des sols

la topographie (pente et longueur de pente)

la couverture végétale

les pratiques de gestion des sols

(Renard et al., 1997 ; Panagos et al., 2015 ; Borrelli et al., 2020).

Ces approches offrent une vision spatialisée et prédictive de l'érosion hydrique, ce qui est particulièrement utile pour la planification territoriale et la gestion durable des ressources naturelles. Toutefois, elles nécessitent une calibration à partir de données de terrain pour garantir leur fiabilité.

Chapitre II :

*Utilisation de la télédétection et
les SIG pour l'étude de
l'érosion hydrique*

II. Utilisation de la télédétection et les SIG pour l'étude de l'érosion hydrique

II.1. Introduction : Télédétection et Systèmes d'Information Géographique (SIG)

La télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) constituent aujourd'hui deux piliers essentiels de la géomatique moderne. Leur développement a profondément transformé les méthodes d'observation, d'analyse et de gestion de l'espace géographique. En combinant ces deux approches, il est désormais possible de passer d'une simple observation descriptive à une analyse spatiale avancée, dynamique et prédictive des phénomènes naturels et anthropiques (Jensen, 2007 ; Longley et al., 2015).

La télédétection repose sur l'acquisition d'informations sur la surface terrestre sans contact direct, grâce à l'enregistrement du rayonnement électromagnétique par des capteurs embarqués sur des satellites, des avions ou des drones. Elle permet une observation globale, répétitive et objective de la Terre, facilitant ainsi le suivi des changements environnementaux tels que l'urbanisation, la déforestation, l'érosion des sols et les variations climatiques (Lillesand et al., 2015).

Les SIG, quant à eux, sont des systèmes informatiques conçus pour collecter, stocker, gérer, analyser et représenter des données géographiques. Ils permettent d'intégrer des informations spatiales et attributaires afin de produire des analyses cartographiques et statistiques utiles à la compréhension des phénomènes territoriaux et à la prise de décision (Burrough & McDonnell, 1998).

L'intégration de la télédétection et des SIG constitue une approche puissante et complémentaire. Les données satellitaires fournissent des informations spatiales actualisées, tandis que les SIG permettent leur traitement, leur analyse et leur visualisation. Cette synergie est largement utilisée dans des domaines variés tels que la gestion des ressources naturelles, l'aménagement du territoire, l'agriculture de précision, l'hydrologie et l'étude des risques naturels. (Meddi, M., & Boucefiane, A. 2012)

Ainsi, la télédétection et les SIG représentent des outils incontournables pour l'analyse et la gestion de l'environnement, contribuant de manière significative à une meilleure compréhension des dynamiques spatiales et à une gestion durable des territoires.

II.2 Historique de la télédétection

L'histoire de la télédétection s'est développée à travers plusieurs étapes majeures marquées par d'importantes avancées technologiques. La première phase débute en 1856 avec la réalisation de la première photographie aérienne depuis un ballon captif. Cette période est caractérisée par les

premières expérimentations de la photographie aérienne verticale ainsi que par le développement des principes de la stéréoscopie et de la photogrammétrie, ouvrant la voie à l'observation et à la représentation de la surface terrestre.

La deuxième phase, s'étendant de 1914 jusqu'à la fin des années 1950, correspond à l'essor de la photographie aérienne comme véritable outil opérationnel de cartographie. Les progrès réalisés dans le domaine de l'aviation et de la chimie photographique, notamment avec l'apparition des émulsions couleur, infrarouges et fausses couleurs, ont permis d'améliorer considérablement l'interprétation des images. Ces avancées ont favorisé l'utilisation de la télédétection dans plusieurs domaines tels que la recherche pétrolière, la cartographie et la surveillance environnementale.

La troisième phase, liée à l'exploration spatiale entre 1957 et 1972, marque un tournant décisif dans l'évolution de la télédétection. Le lancement des premiers satellites a confirmé l'intérêt de l'observation de la Terre depuis l'espace. Durant cette période, des caméras embarquées à bord des vaisseaux spatiaux habités ont permis l'acquisition de nouvelles données d'observation. Cette époque a également été marquée par le perfectionnement des radiomètres imageurs et des premiers radars aéroportés. En 1960, la série de satellites ESSA inaugure les premières applications de la météorologie spatiale.

La quatrième phase correspond à l'avènement de la télédétection moderne entre 1972 et la fin des années 1970. Le lancement du satellite ERTS-1, devenu par la suite Landsat 1, en 1972, marque le début de l'exploitation numérique des ressources terrestres. À partir de cette période, la télédétection devient un outil scientifique et économique indispensable pour l'étude, la gestion et la surveillance globale de la planète.

Enfin, la cinquième phase, amorcée depuis les années 1980 jusqu'à aujourd'hui, se caractérise par un développement continu et une démocratisation des technologies de télédétection. Cette période est marquée par l'amélioration des résolutions spatiales, spectrales et temporelles des images satellitaires, ainsi que par la diversification des capteurs, notamment les radars actifs et les capteurs hyperspectraux. La commercialisation croissante des données satellitaires et l'accessibilité des technologies géospatiales ont largement contribué à l'expansion des domaines d'application de la télédétection (Kergomard, 1990).

II.3 Qu'est-ce que la télédétection ?

La télédétection regroupe l'ensemble des techniques permettant d'obtenir des informations sur la surface terrestre, y compris l'atmosphère et les océans, sans contact direct avec les objets observés. Cette

technologie repose sur l'analyse du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffusé par les différents éléments présents à la surface de la Terre.

Le principe fondamental de la télédétection consiste à mesurer les interactions entre le rayonnement électromagnétique et les objets observés afin d'identifier leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les données collectées sont ensuite traitées et interprétées pour produire des informations utiles dans différents domaines scientifiques et environnementaux.

On distingue principalement deux catégories de capteurs utilisés en télédétection : les capteurs passifs et les capteurs actifs. Les capteurs passifs enregistrent le rayonnement naturel émis ou réfléchi par les objets, notamment dans les domaines du visible, de l'infrarouge et des micro-ondes. En revanche, les capteurs actifs, comme les radars, émettent leur propre rayonnement électromagnétique et analysent l'énergie rétrodiffusée par les objets observés afin d'étudier leurs propriétés (Kergomard, 1990).

II.4 Principe de la télédétection

Le principe de la télédétection repose sur l'acquisition, l'enregistrement et l'analyse de l'information relative à la surface terrestre sans contact direct avec les objets étudiés. Elle se base essentiellement sur l'interaction entre le rayonnement électromagnétique et les éléments de la surface terrestre (sols, eau, végétation, infrastructures), permettant ainsi d'en déduire leurs propriétés physiques et biochimiques (Lillesand et al., 2015).

Le processus fondamental de la télédétection comprend plusieurs étapes successives. Tout d'abord, une source d'énergie, généralement le Soleil dans le cas de la télédétection passive, ou un capteur actif comme le radar, émet un rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement traverse l'atmosphère, où il peut être partiellement absorbé ou diffusé avant d'atteindre la surface terrestre.

Une fois arrivé au sol, le rayonnement interagit avec les objets présents selon trois phénomènes principaux : la réflexion, l'absorption et la transmission. Chaque type de surface possède une signature spectrale spécifique, c'est-à-dire une manière unique de réfléchir et d'absorber les différentes longueurs d'onde. Cette signature permet de distinguer les différents éléments du paysage tels que la végétation, l'eau ou les sols nus (Jensen, 2007).

Le rayonnement réfléchi ou rétrodiffusé est ensuite capté par un capteur embarqué sur une plateforme (satellite, avion ou drone). Ce capteur transforme l'énergie reçue en signal électrique, qui est ensuite numérisé afin de produire une image satellitaire exploitable sous forme de

données numériques. Ces données sont transmises vers des stations au sol pour être stockées, corrigées et analysées.

L'interprétation des images repose sur l'analyse des propriétés spectrales, spatiales et temporelles des objets observés. Les variations de luminance et de couleur dans les différentes bandes spectrales permettent d'identifier et de cartographier les éléments de la surface terrestre avec une grande précision.

Ainsi, le principe de la télédétection s'appuie sur une chaîne complète allant de la source d'énergie jusqu'à l'extraction de l'information, en passant par l'interaction rayonnement-surface-capteur. Cette approche constitue aujourd'hui un outil fondamental pour l'étude des environnements naturels et la gestion des ressources terrestres (Campbell & Wynne, 2011).

II.5 Types de télédétection

La télédétection est une discipline scientifique permettant l'acquisition d'informations sur la surface terrestre sans contact direct avec les objets étudiés. Selon la source d'énergie utilisée, elle se divise principalement en deux grandes catégories : la télédétection passive et la télédétection active.

II.5.1 Télédétection passive

La télédétection passive utilise principalement le Soleil comme source naturelle d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le rayonnement solaire atteint la surface terrestre puis est réfléchi par les différents objets vers le capteur embarqué sur un satellite ou un avion. Les informations recueillies dépendent des propriétés de réflexion des objets observés, ce qui permet de distinguer les différents types de surfaces telles que la végétation, l'eau ou les sols nus.

Pendant la nuit, en l'absence de lumière solaire, certains capteurs passifs continuent néanmoins de fonctionner en détectant les rayonnements infrarouges thermiques émis naturellement par les objets terrestres. Ces rayonnements thermiques permettent d'obtenir des informations sur la température et les caractéristiques thermiques des surfaces observées (Semmoud & Zennaki, 2010).

II.5.2 Télédétection active

Contrairement aux systèmes passifs, la télédétection active repose sur des capteurs capables de produire leur propre source d'énergie. Ces capteurs émettent un rayonnement électromagnétique vers une cible puis enregistrent l'énergie réfléchi ou rétrodiffusée par celle-ci. Cette technologie

permet d'obtenir des informations précises sur la structure, la rugosité et les propriétés physiques des objets observés.

Les systèmes radar constituent l'exemple le plus courant de télédétection active. L'un des principaux avantages de cette technique réside dans sa capacité à fonctionner aussi bien le jour que la nuit, indépendamment des conditions d'éclairement solaire. De plus, certaines longueurs d'onde radar peuvent traverser les nuages, ce qui rend cette technologie particulièrement adaptée aux études environnementales et climatiques dans les régions fréquemment couvertes (Semmoud & Zennaki, 2010).

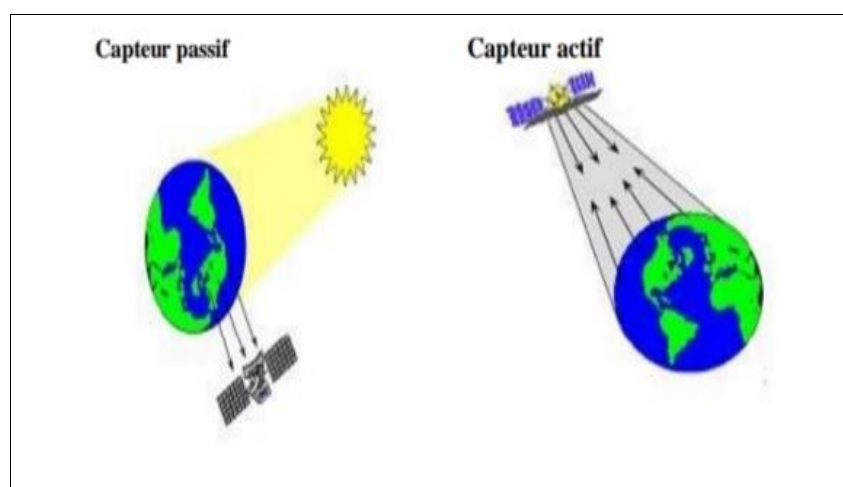


Figure n°07 : types des capteurs de télédétection (CCT, 2018)

II.6. Les domaines d'application de la télédétection

La télédétection constitue aujourd'hui un outil scientifique et technologique incontournable dans de nombreux domaines de recherche et de gestion territoriale. Grâce aux données acquises par les satellites, les avions, les drones et autres capteurs aéroportés, elle permet d'obtenir des informations précises, rapides et répétitives sur la surface terrestre. Son principal avantage réside dans sa capacité à couvrir de vastes espaces géographiques tout en assurant un suivi temporel continu des phénomènes naturels et anthropiques (Lillesand et al., 2015).

II.6.1. Agriculture et gestion des ressources agricoles

En agriculture, le principe de la télédétection est largement exploité pour le suivi des cultures, l'évaluation de la croissance végétale, la détection du stress hydrique et la gestion des ressources agricoles. Cette exploitation repose principalement sur l'utilisation des indices de végétation, qui

sont des combinaisons mathématiques de différentes bandes spectrales permettant d'améliorer l'information sur l'état de la végétation.

Parmi les indices les plus utilisés, on retrouve :

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)** : il permet d'évaluer la vigueur et la densité de la végétation en exploitant les bandes rouge et proche infrarouge. Les valeurs élevées indiquent une végétation dense et saine, tandis que les valeurs faibles traduisent une couverture végétale faible ou dégradée (Rouse et al., 1974).
- **EVI (Enhanced Vegetation Index)** : il améliore le NDVI en réduisant les effets de l'atmosphère et de la saturation dans les zones à forte biomasse, ce qui le rend plus précis dans les régions très végétalisées (Huete et al., 2002).
- **SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)** : il est conçu pour minimiser l'influence du sol nu dans les zones à faible couverture végétale, ce qui le rend particulièrement utile dans les régions arides et semi-arides.
- **NDWI (Normalized Difference Water Index)** : utilisé pour estimer le contenu en eau de la végétation et détecter le stress hydrique des cultures.
- **GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)** : sensible à la teneur en chlorophylle, il est utilisé pour suivre la photosynthèse et la nutrition des plantes.

Ces indices permettent une surveillance fine et continue des cultures agricoles. Ils facilitent la prise de décision en matière d'irrigation, de fertilisation et de gestion des risques agricoles, tout en améliorant la productivité et la durabilité des systèmes agricoles.

Ainsi, le principe de la télédétection ne se limite pas à l'observation de la surface terrestre, mais constitue également un outil puissant d'aide à la décision en agriculture de précision, grâce à l'exploitation des signatures spectrales et des indices de végétation (Campbell & Wynne, 2011 ; Jensen, 2007).

Par ailleurs, la télédétection joue un rôle fondamental dans le développement de l'agriculture de précision, une approche moderne visant à optimiser l'utilisation des intrants agricoles tels que l'eau, les engrais et les pesticides. En combinant les données satellitaires avec les systèmes d'information géographique (SIG), il devient possible de cartographier les variations intra-parcellaires et d'adapter les pratiques agricoles en fonction des besoins réels des cultures. Cette

approche contribue ainsi à améliorer la productivité tout en réduisant l'impact environnemental des activités agricoles (Xue & Su, 2017).

Enfin, la télédétection permet également d'estimer les rendements agricoles en intégrant des données climatiques, phénologiques et spectrales, ce qui en fait un outil stratégique pour la sécurité alimentaire et la planification agricole à l'échelle régionale et nationale.

II.6.2. Étude de l'environnement et des changements climatiques

La télédétection constitue aujourd'hui un outil essentiel dans l'étude de l'environnement et du changement climatique, en raison de sa capacité à fournir des observations continues, homogènes et multispectrales de la surface terrestre. Elle permet de suivre les dynamiques environnementales à différentes échelles spatiales (locale, régionale et globale) et temporelles (journalière, saisonnière et interannuelle), ce qui est indispensable pour analyser les transformations rapides et progressives des systèmes naturels (Jensen, 2007 ; Lillesand et al., 2015).

Dans le domaine climatique, la télédétection est largement utilisée pour l'analyse de la température de surface terrestre (Land Surface Temperature, LST), un paramètre clé pour comprendre les phénomènes d'îlots de chaleur urbains, l'évolution des climats régionaux et les échanges énergétiques entre la surface et l'atmosphère. Les capteurs thermiques embarqués sur les satellites permettent de mesurer ces variations avec une grande précision, contribuant ainsi à la modélisation climatique et à la surveillance des extrêmes thermiques (Voogt & Oke, 2003).

La télédétection joue également un rôle majeur dans le suivi de la déforestation et de la dégradation des écosystèmes forestiers. Grâce à l'analyse des séries temporelles d'images satellitaires, il est possible de détecter les pertes de couvert forestier, d'évaluer les changements d'occupation du sol et de quantifier les pressions anthropiques exercées sur les milieux naturels. Ces informations sont essentielles pour la gestion durable des ressources forestières et la conservation de la biodiversité (Hansen et al., 2013).

Par ailleurs, elle contribue fortement à l'étude de la désertification et de la dégradation des terres, notamment dans les zones arides et semi-arides. L'utilisation des indices de végétation (NDVI, SAVI) permet de suivre l'évolution de la couverture végétale et de détecter les zones en stress hydrique ou en perte de productivité biologique. Ces analyses sont particulièrement importantes pour les régions vulnérables comme le bassin méditerranéen et le Sahel (Xue & Su, 2017).

La télédétection est également utilisée pour surveiller la fonte des glaciers et des calottes polaires, un indicateur majeur du réchauffement climatique. Les satellites permettent de mesurer les variations de surface glaciaire, les changements d'épaisseur et les dynamiques de recul des glaciers, contribuant ainsi aux études sur l'élévation du niveau marin et ses impacts potentiels sur les zones côtières (Zemp et al., 2019).

Ainsi, la télédétection représente un outil stratégique pour la compréhension globale des changements environnementaux et climatiques, en fournissant des données objectives, répétitives et à large couverture spatiale, indispensables pour la recherche scientifique et la prise de décision environnementale.

II.6.3. Gestion des ressources en eau

La gestion des ressources en eau constitue l'un des domaines les plus importants d'application de la télédétection, en raison des enjeux croissants liés à la disponibilité, à la qualité et à la répartition des ressources hydriques. Grâce à sa capacité d'observation synoptique et répétitive, la télédétection permet de suivre les dynamiques hydrologiques à différentes échelles spatiales et temporelles, contribuant ainsi à une meilleure compréhension du cycle de l'eau et de ses variations (Jensen, 2007 ; Lillesand et al., 2015).

Dans le domaine hydrologique, les données satellitaires sont largement utilisées pour la délimitation et l'analyse des bassins versants. À partir de modèles numériques de terrain (MNT) couplés aux systèmes d'information géographique (SIG), il est possible d'extraire les réseaux hydrographiques, de caractériser les pentes et d'analyser les directions d'écoulement. Ces informations sont essentielles pour la modélisation hydrologique et la planification des aménagements hydrauliques.

La télédétection joue également un rôle clé dans la cartographie des zones inondables. Les capteurs radar, notamment ceux à synthèse d'ouverture (SAR), permettent de détecter les surfaces en eau même en présence de nuages ou dans des conditions météorologiques défavorables. Cela facilite le suivi en temps réel des inondations et l'évaluation des risques associés, notamment dans les zones urbaines et agricoles vulnérables (Di Baldassarre., al 2010).

Un autre aspect important concerne l'évaluation de l'humidité des sols. Les indices dérivés des bandes infrarouges et micro-ondes permettent d'estimer le contenu en eau des sols, ce qui est essentiel pour l'agriculture, la gestion des sécheresses et la prévision des stress hydriques. Ces informations contribuent à améliorer la compréhension des échanges entre surface et atmosphère, ainsi que la dynamique de l'évapotranspiration (Jackson et al., 2004).

La télédétection permet également de suivre l'évolution des plans d'eau tels que les lacs, barrages et rivières. Grâce à l'analyse des séries temporelles d'images satellitaires, il est possible de détecter les variations de surface en eau, d'évaluer les tendances de régression ou d'expansion des plans d'eau et d'identifier les impacts des changements climatiques et des activités humaines sur les ressources hydriques (Feyisa et al., 2014).

Par ailleurs, la télédétection contribue fortement à la gestion des sécheresses. L'utilisation combinée des indices de végétation, des données climatiques et des observations satellitaires permet de suivre l'intensité et la propagation des épisodes de sécheresse. Ces informations sont essentielles pour la mise en place de systèmes d'alerte précoce et pour la planification des stratégies d'adaptation dans les régions arides et semi-arides.

Enfin, la prévision des crues bénéficie également des apports de la télédétection, notamment grâce à l'analyse des précipitations satellitaires et des modèles hydrologiques spatialisés. Ces outils permettent d'anticiper les événements extrêmes et de réduire les risques liés aux inondations, en améliorant la réactivité des systèmes de gestion des catastrophes naturelles (Di Baldassarre.,al 2010).

Ainsi, la télédétection constitue un outil indispensable pour la gestion intégrée des ressources en eau, en fournissant des informations précises, actualisées et spatialement continues, essentielles pour une exploitation durable et une meilleure résilience face aux changements climatiques.

II.6.4. Cartographie de l'occupation des sols et urbanisation

La cartographie de l'occupation des sols constitue l'un des domaines les plus importants de la télédétection, car elle permet de représenter, analyser et suivre la répartition spatiale des différents types de couverture terrestre. Grâce aux images satellitaires multispectrales et multitemporelles, il est possible d'identifier avec précision les classes d'occupation des sols telles que les zones urbaines, les surfaces agricoles, les forêts, les zones humides et les espaces industriels (Lillesand et al., 2015).

La télédétection repose ici sur l'exploitation des signatures spectrales propres à chaque type de couverture terrestre. Les méthodes de classification supervisée et non supervisée permettent de transformer les données brutes en cartes thématiques, facilitant ainsi l'analyse spatiale et la prise de décision. Ces approches sont largement utilisées dans les systèmes d'information géographique (SIG) pour produire des cartes d'occupation des sols à différentes échelles (Jensen, 2007).

Dans le contexte de l'urbanisation, la télédétection joue un rôle fondamental dans le suivi de l'expansion des villes et des transformations du paysage. L'analyse des séries temporelles d'images satellitaires permet de quantifier l'étalement urbain, d'identifier les zones de croissance rapide et d'évaluer l'impact de l'activité humaine sur les espaces naturels et agricoles. Cette dynamique est particulièrement visible dans les régions en développement où l'urbanisation est rapide et souvent non planifiée (Weng, 2012).

Par ailleurs, la télédétection permet de distinguer les différents types de tissus urbains, notamment les zones résidentielles, industrielles et commerciales, en fonction de leur texture, de leur densité et de leurs propriétés spectrales. L'utilisation de capteurs à haute résolution spatiale améliore considérablement la précision de ces analyses, permettant une représentation détaillée des structures urbaines et de leur évolution dans le temps (Herold et al., 2003).

L'un des apports majeurs de la télédétection dans ce domaine réside dans la détection des changements d'occupation des sols. Les techniques de comparaison multi-temporelle permettent d'identifier les conversions de terres, telles que la transformation de terres agricoles en zones urbaines ou la réduction des surfaces forestières. Ces analyses sont essentielles pour comprendre les pressions anthropiques exercées sur les écosystèmes et pour orienter les politiques d'aménagement du territoire.

Enfin, la cartographie de l'occupation des sols contribue directement à la planification territoriale et à la gestion urbaine durable. Elle fournit aux décideurs des informations précises sur la structure spatiale des territoires, facilitant ainsi la gestion des infrastructures, la protection des espaces naturels et la réduction des risques environnementaux liés à l'urbanisation rapide.

Ainsi, la télédétection représente un outil indispensable pour l'analyse des dynamiques d'occupation des sols et de l'urbanisation, en offrant une vision globale, objective et actualisée des transformations du territoire.

II.6.5. Géologie et exploration minière

En géologie, la télédétection facilite l'identification des structures géologiques, des failles et des formations lithologiques. Les capteurs multispectraux et hyperspectraux sont particulièrement utiles pour la prospection minière et la détection des ressources naturelles telles que les minerais, les hydrocarbures et les matériaux de construction (Sabins, 1999).

II.6.6. Foresterie et gestion des écosystèmes

La foresterie constitue l'un des domaines les plus avancés d'application de la télédétection, en raison de l'importance écologique, économique et climatique des écosystèmes forestiers. Les forêts jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat, le stockage du carbone, la préservation de la biodiversité et la protection des sols contre l'érosion. Dans ce contexte, la télédétection permet une surveillance continue et à grande échelle de ces milieux, ce qui est difficile à réaliser par les méthodes de terrain seules (Lillesand et al., 2015).

Les images satellitaires multispectrales sont largement utilisées pour suivre l'évolution des surfaces forestières et détecter les phénomènes de déforestation et de dégradation. Grâce à l'analyse multi-temporelle, il est possible de quantifier les pertes de couvert forestier, d'identifier les zones de coupe intensive et de surveiller les transformations des écosystèmes naturels en terres agricoles ou urbaines. Ces informations sont essentielles pour la mise en œuvre des politiques de gestion durable des forêts et de lutte contre la déforestation (Hansen et al., 2013).

La télédétection est également utilisée pour la détection et le suivi des incendies de forêt. Les capteurs thermiques et infrarouges permettent d'identifier les foyers actifs, de cartographier les zones brûlées et d'évaluer l'intensité des incendies. Ces données sont cruciales pour la gestion des catastrophes naturelles, la planification des interventions d'urgence et l'évaluation des impacts environnementaux post-incendie (Chuvieco et al., 2008).

Par ailleurs, la télédétection contribue à la surveillance de la santé des forêts. Les indices de végétation tels que le NDVI permettent de détecter les stress hydriques, les attaques parasitaires et les maladies forestières en analysant les variations de la vigueur de la végétation. Cette approche permet une détection précoce des dégradations et facilite la mise en place de mesures de protection adaptées.

Les technologies avancées comme le LiDAR (Light Detection and Ranging) et l'imagerie hyperspectrale ont considérablement amélioré la précision des analyses forestières. Le LiDAR permet de modéliser en trois dimensions la structure des forêts, en fournissant des informations détaillées sur la hauteur des arbres, la densité du couvert et la biomasse. L'imagerie hyperspectrale, quant à elle, permet une identification fine des espèces végétales et une meilleure estimation des propriétés biochimiques de la végétation (Asner et al., 2012).

Enfin, la télédétection joue un rôle important dans l'estimation de la biomasse forestière et du stockage du carbone, contribuant ainsi aux études sur le changement climatique et aux

mécanismes de compensation carbone. Ces informations sont essentielles pour les stratégies internationales de conservation des forêts et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ainsi, la télédétection constitue un outil indispensable pour la gestion durable des écosystèmes forestiers, en fournissant des données précises, répétitives et spatialement étendues permettant une meilleure compréhension et protection des forêts à l'échelle globale.

II.6.7. Étude des risques naturels et de l'érosion

La télédétection occupe une place centrale dans l'étude et la gestion des risques naturels, en raison de sa capacité à fournir des informations rapides, spatialisées et actualisées sur les phénomènes environnementaux. Les risques tels que les inondations, les glissements de terrain, les incendies de forêt et l'érosion hydrique peuvent ainsi être mieux analysés grâce à l'intégration des données satellitaires dans des environnements de systèmes d'information géographique (SIG). Cette approche permet d'améliorer la compréhension des mécanismes d'occurrence des aléas et de leurs impacts sur les populations et les écosystèmes (Petroopoulos et al., 2015).

Dans le cas des inondations, la télédétection permet de cartographier les zones submergées à partir d'images radar et optiques, même en présence de couverture nuageuse. Elle facilite également le suivi en temps réel des événements extrêmes et l'évaluation des dégâts après la catastrophe. Pour les glissements de terrain, l'analyse des images satellitaires combinée aux modèles numériques de terrain permet d'identifier les zones instables en fonction de la pente, de la lithologie et de la couverture végétale.

Les incendies de forêt peuvent également être détectés et suivis grâce aux capteurs thermiques et infrarouges, qui permettent d'identifier les foyers actifs ainsi que les surfaces brûlées. Ces informations sont essentielles pour la gestion des interventions d'urgence et l'évaluation des impacts écologiques post-incendie.

Dans le domaine spécifique de l'érosion hydrique, la télédétection constitue un outil particulièrement efficace pour l'identification des zones sensibles à la dégradation des sols. Elle permet d'analyser les changements de couverture végétale, la fragmentation du paysage et l'évolution de l'occupation des sols, qui sont des facteurs déterminants dans le processus d'érosion. Les images satellitaires, associées aux indices de végétation tels que le NDVI, permettent de suivre la dynamique de la couverture végétale et de détecter les zones exposées au ruissellement intense.

En outre, la combinaison des données de télédétection avec des modèles empiriques et physiques, tels que l'USLE (Universal Soil Loss Equation) ou ses variantes améliorées, permet de cartographier les pertes en sols et de simuler les scénarios d'évolution de l'érosion. Cette approche intégrée améliore la précision des diagnostics environnementaux et facilite la mise en place de stratégies de conservation des sols adaptées aux conditions locales.

Ainsi, la télédétection constitue un outil indispensable pour l'analyse, la prévention et la gestion des risques naturels. Elle offre une vision globale et dynamique des phénomènes environnementaux, permettant d'orienter efficacement les politiques de gestion durable des territoires et de réduction de la vulnérabilité face aux catastrophes naturelles.

II.7 Image satellitaire

Les images satellitaires constituent l'une des principales sources d'information en télédétection. Elles correspondent à des données numériques acquises par des satellites équipés de capteurs capables d'enregistrer le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre. Après l'acquisition des données, les informations collectées sont transmises vers des stations de réception au sol où elles sont stockées, traitées et analysées sous forme d'images numériques (Lillesand et al., 2015).

Une image satellitaire est généralement organisée en scènes couvrant une zone géographique donnée. Chaque scène est composée de plusieurs bandes spectrales enregistrées dans différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique, notamment le visible, l'infrarouge proche, l'infrarouge thermique et les micro-ondes. L'exploitation de ces différentes bandes permet d'identifier et de différencier les éléments présents à la surface de la Terre tels que la végétation, les sols, les ressources hydriques et les zones urbaines (Jensen, 2007).

Les images satellitaires jouent un rôle fondamental dans de nombreux domaines scientifiques et environnementaux, notamment la cartographie, l'agriculture, la gestion des ressources naturelles, l'étude des changements climatiques, la surveillance des catastrophes naturelles et l'analyse de l'érosion hydrique. Leur principal avantage réside dans leur capacité à fournir une observation régulière, synoptique et répétitive de vastes territoires avec une précision spatiale et temporelle de plus en plus élevée grâce aux progrès technologiques des satellites modernes (Campbell & Wynne, 2011).

Avant leur exploitation, les images satellitaires nécessitent plusieurs étapes de traitement afin d'améliorer leur qualité et de garantir la fiabilité des informations extraites. Ces traitements se

divisent généralement en trois grandes catégories : les traitements préliminaires, les corrections géométriques et la réduction des données.

II.7.1. Les traitements préliminaires

Les traitements préliminaires ont pour objectif de corriger les imperfections et les anomalies présentes dans les images brutes acquises par les capteurs satellitaires. Ces défauts peuvent être liés aux perturbations atmosphériques, aux dysfonctionnements des capteurs ou aux erreurs de transmission des données. Parmi les opérations les plus courantes figurent la correction radiométrique, l'élimination des rayures et du bruit numérique ainsi que l'amélioration du contraste des images.

L'analyse des histogrammes est souvent utilisée pour optimiser la qualité visuelle des images en accentuant les contrastes entre les différents objets observés. Ces traitements permettent ainsi d'améliorer l'interprétation visuelle et la précision des analyses numériques (Richards, 2013).

II.7.2. Les corrections géométriques

Les corrections géométriques visent à rendre les images satellitaires conformes à la réalité géographique afin de pouvoir les comparer entre elles ou les superposer à des cartes topographiques et des systèmes d'information géographique (SIG). Ces corrections sont nécessaires car les images peuvent présenter des déformations liées au mouvement du satellite, à la rotation de la Terre, à la topographie ou encore à l'angle de prise de vue.

Cette étape repose sur l'utilisation de points de contrôle au sol appelés « amers », dont les coordonnées géographiques sont connues avec précision. Des transformations mathématiques, notamment les polynômes de correction géométrique, sont ensuite appliquées pour rectifier l'image et assurer son géoréférencement (Gérard, 1987).

II.8. Système d'Information Géographique (SIG)

II.8.1. Introduction

Le Système d'Information Géographique (SIG) constitue aujourd'hui un outil incontournable dans les sciences de la Terre, l'aménagement du territoire et la gestion des ressources naturelles. Son développement est étroitement lié aux progrès de l'informatique, de la géomatique et de la télédétection, qui ont permis de traiter, stocker et analyser de grandes quantités de données spatiales. Les SIG sont largement utilisés pour l'analyse environnementale, la planification urbaine, la gestion des risques naturels et l'aide à la décision (Longley et al., 2015).

II.8.2. Définition du SIG

Un Système d'Information Géographique (SIG) peut être défini comme un ensemble organisé de matériels, de logiciels, de données géographiques et de méthodes permettant de collecter, stocker, gérer, analyser et représenter des informations spatiales et leurs attributs associés. Il permet donc de relier des données géographiques à des informations descriptives afin de produire des analyses spatiales pertinentes (Burrough et McDonnell, 1998).

Selon Longley et al. (2015), un SIG est un système informatique capable d'intégrer, de manipuler et de visualiser des données géoréférencées dans le but de soutenir la prise de décision dans divers domaines. Ainsi, il ne s'agit pas seulement d'un outil cartographique, mais d'un véritable système d'analyse spatiale.

II.8.3. Composantes d'un Système d'Information Géographique (SIG)

Un Système d'Information Géographique (SIG) repose sur un ensemble d'éléments interconnectés qui permettent la collecte, le stockage, le traitement, l'analyse et la représentation des données spatiales. Ces composantes sont indispensables au bon fonctionnement du système et à la production d'informations géographiques fiables et exploitables (Longley et al., 2015).

II.8.3. 1. Les données

Les données constituent la composante centrale d'un SIG. Elles représentent l'information brute utilisée pour les analyses spatiales. On distingue généralement deux types de données :

- **Les données spatiales**, qui décrivent la localisation et la forme des objets géographiques (points, lignes, polygones, images satellitaires) ;
- **Les données attributaires**, qui fournissent des informations descriptives associées aux entités spatiales (nom, population, type de sol, etc.).

La qualité, la précision et l'actualisation des données influencent directement la fiabilité des résultats produits par le SIG (Burrough & McDonnell, 1998).

II.8.3.2. Le matériel informatique

Le matériel informatique regroupe l'ensemble des équipements nécessaires au fonctionnement du SIG. Il comprend les ordinateurs, serveurs, dispositifs de stockage, ainsi que les équipements de collecte de données tels que les GPS ou les drones. Avec l'évolution technologique, les capacités de traitement et de stockage ont considérablement augmenté, permettant de gérer des volumes importants de données géospatiales (Heywood et al., 2011).

II.8.3.3. Les logiciels

Les logiciels SIG constituent les outils essentiels permettant de manipuler et d'analyser les données géographiques. Ils offrent des fonctionnalités variées telles que la numérisation, la classification, l'analyse spatiale, la modélisation et la cartographie. Parmi les logiciels les plus utilisés, on peut citer ArcGIS, QGIS ou encore GRASS GIS.

Ces logiciels permettent de transformer les données brutes en informations structurées et exploitables pour l'aide à la décision (Longley et al., 2015).

II.8.3.4. Les utilisateurs

Les utilisateurs représentent une composante essentielle du SIG, car ce sont eux qui définissent les objectifs, manipulent les outils et interprètent les résultats. Ils peuvent être des géographes, urbanistes, ingénieurs, environnementalistes ou décideurs politiques.

Leur expertise est déterminante pour garantir une bonne utilisation des données et une interprétation correcte des résultats produits par le système (Heywood et al., 2011).

II.8.3.5. Les méthodes et procédures

Les méthodes regroupent l'ensemble des techniques, modèles et procédures utilisés pour analyser les données géographiques. Elles incluent les méthodes de traitement spatial (superposition, interpolation, buffer), les modèles d'analyse (modèles d'érosion, d'inondation, d'urbanisation) et les protocoles de gestion des données.

Ces méthodes permettent de structurer l'analyse spatiale et d'assurer la cohérence des résultats obtenus. Elles jouent un rôle clé dans la transformation des données en informations utiles pour la prise de décision (Burrough & McDonnell, 1998).

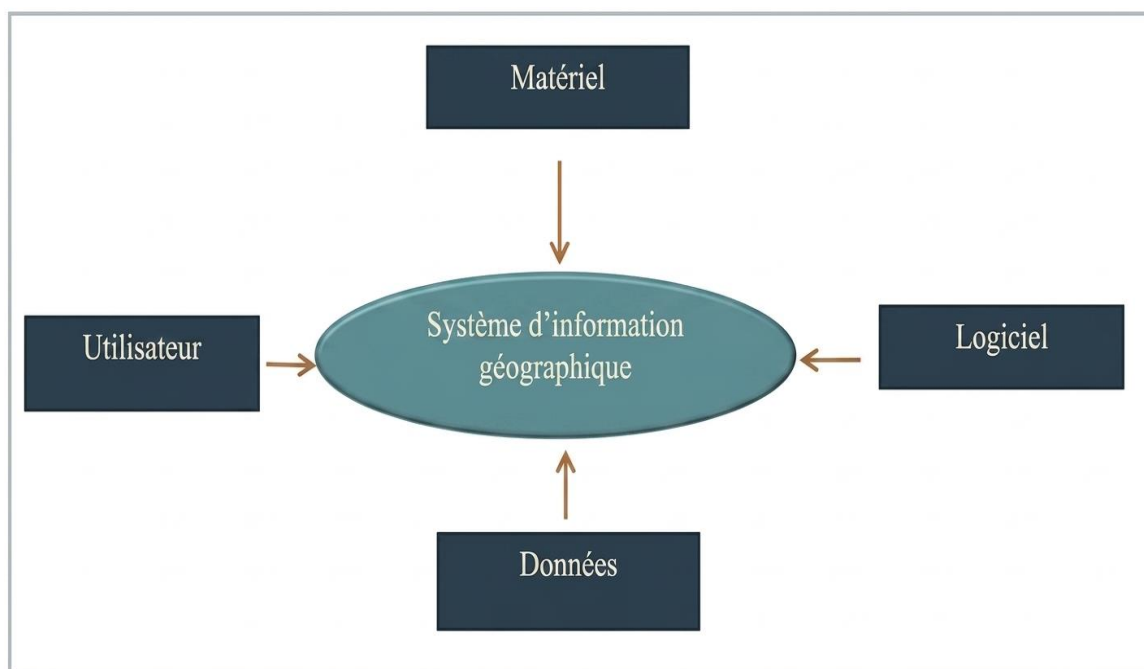


Figure n°08 : les composants d'un SIG

II.8.4. Fonctionnement d'un Système d'Information Géographique (SIG)

Le fonctionnement d'un Système d'Information Géographique (SIG) repose sur un ensemble structuré d'opérations permettant de transformer des données géographiques brutes en informations utiles pour l'analyse et la prise de décision. Ce processus s'appuie sur l'intégration de données spatiales et attributaires, leur traitement informatique, puis leur représentation sous forme de cartes ou de modèles analytiques (Longley et al., 2015).

II.8.4.1. Acquisition des données

La première étape du fonctionnement d'un SIG est la collecte des données géographiques. Celles-ci peuvent provenir de différentes sources telles que les levés de terrain, les GPS, les cartes topographiques, les images satellitaires ou les photographies aériennes.

Les données peuvent être structurées sous forme vectorielle (points, lignes, polygones) ou raster (images matricielles), selon la nature des phénomènes étudiés. Cette diversité de sources permet d'obtenir une représentation complète et précise de l'espace géographique (Heywood et al., 2011).

II.8.4.2. Saisie et stockage des données

Une fois collectées, les données sont saisies dans le système et stockées dans des bases de données géographiques. Cette étape comprend la numérisation, la géoréférenciation et l'organisation des informations selon des structures normalisées.

Le stockage organisé des données permet leur accès rapide, leur mise à jour et leur gestion efficace, tout en assurant leur intégrité et leur cohérence (Burrough & McDonnell, 1998).

II.8.4.3. Traitement et analyse spatiale

Le traitement des données constitue le cœur du fonctionnement d'un SIG. Il regroupe un ensemble d'opérations permettant d'exploiter l'information géographique, notamment :

- la superposition de couches d'information ;
- l'analyse de proximité ;
- l'interpolation spatiale ;
- la classification et la modélisation des phénomènes.

Ces techniques permettent d'identifier des relations spatiales, de détecter des tendances et de simuler des scénarios environnementaux ou territoriaux (Longley et al., 2015).

II.8.4.4. Manipulation et requêtes

Les SIG permettent également d'effectuer des requêtes spatiales et attributaires. Ces requêtes consistent à interroger la base de données pour extraire des informations spécifiques selon des critères définis (localisation, type d'occupation du sol, altitude, etc.).

Cette fonctionnalité est essentielle pour l'aide à la décision, car elle permet de répondre rapidement à des problématiques complexes liées à l'espace géographique (Heywood et al., 2011).

II.8.4.5. Visualisation et représentation cartographique

La dernière étape du fonctionnement d'un SIG est la visualisation des résultats. Les données traitées sont représentées sous forme de cartes thématiques, graphiques, tableaux ou modèles 3D.

La cartographie produite permet de synthétiser l'information spatiale et de faciliter son interprétation par les utilisateurs, notamment les chercheurs, les gestionnaires et les décideurs. La qualité de la représentation cartographique joue un rôle essentiel dans la communication des résultats (Burrough & McDonnell, 1998).

II.8.5.. Importance des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) occupent aujourd'hui une place centrale dans l'analyse spatiale et la gestion des territoires. Leur importance réside dans leur capacité à intégrer, traiter et analyser des données géographiques complexes afin de produire des

informations utiles à la prise de décision dans de nombreux domaines scientifiques, économiques et environnementaux (Longley et al., 2015).

II.8.5.1. Aide à la prise de décision

L'un des principaux apports des SIG est leur rôle dans l'aide à la décision. En permettant la visualisation et l'analyse de données spatiales, ils facilitent la compréhension des phénomènes complexes et l'évaluation de différentes options de gestion. Les décideurs peuvent ainsi s'appuyer sur des cartes thématiques et des analyses spatiales pour planifier des actions plus efficaces et adaptées au terrain (Heywood et al., 2011).

II.8.5.2. Gestion de l'environnement et des ressources naturelles

Les SIG sont largement utilisés dans la gestion des ressources naturelles telles que l'eau, les sols, les forêts et la biodiversité. Ils permettent de suivre l'évolution des écosystèmes, d'identifier les zones sensibles et de proposer des stratégies de conservation durable. Dans le domaine de l'environnement, ils sont également essentiels pour le suivi de la dégradation des sols, la déforestation et la pollution (Burrough & McDonnell, 1998).

II.8.5.3. Aménagement du territoire et urbanisme

Dans le domaine de l'urbanisme, les SIG jouent un rôle clé dans la planification et la gestion des espaces urbains. Ils permettent d'analyser la croissance urbaine, de localiser les infrastructures, d'évaluer les besoins en services publics et de gérer les zones à risque. Cette approche contribue à un développement urbain plus structuré et durable (Longley et al., 2015).

II.8.5.4. Gestion des risques naturels

Les SIG sont également indispensables dans la cartographie et la gestion des risques naturels tels que les inondations, les glissements de terrain, les incendies de forêt et l'érosion. En combinant différentes couches d'information (topographie, climat, occupation du sol), ils permettent d'identifier les zones vulnérables et de produire des cartes de risque utiles à la prévention et à la gestion des catastrophes (Smith & Petley, 2008).

II.8.5.5. Intégration avec la télédétection et autres technologies

L'importance des SIG est renforcée par leur intégration avec d'autres technologies comme la télédétection, le GPS et les modèles numériques de terrain. Cette synergie permet d'améliorer la précision des analyses spatiales et d'élargir les domaines d'application, notamment en agriculture de précision, hydrologie et changement climatique.

II.9 Les différents modes d'un SIG

Un système d'information géographique (SIG) fonctionne principalement selon deux modes de représentation des données, mode raster et mode vecteur

II.9.1 Mode vecteur

Ce sont des données vectorielles désignée à des entités sous forme des points, des lignes et des polygones dans une aire géographique, les entités vectorielles sont accompagnées de leurs données attributaires descriptifs de types alphanumériques standard (**Raper et Maguire, 1992**) et les données attributaires représentent sous forme des informations texte ou numérique.

II.9.2 Mode raster

Les données raster désignées des images obtenant par les satellites, des photographie aérienne, ses images ou données continues représentant des phénomènes comme température ou l'altitude, le mode raster représente des images numérique stockant les informations géographiques dans des cellules contigües généralement carrées, ces cellules sont donc l'unité élémentaire appelées pixel, chaque pixel possède une valeur qui traduit une couleur (photographies, scan) ou une énergie électromagnétique captée dans intervalle de longueur d'onde à partir d'un satellite

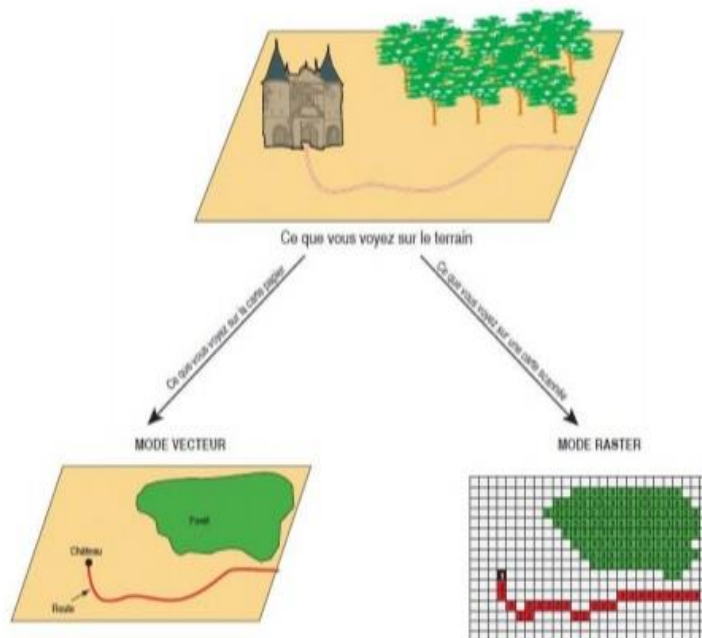


Figure n°09 : modes de données (Youbi, 2019)

II.10. Les logiciels utilisés dans les SIG

Les logiciels de Systèmes d'Information Géographique (SIG) jouent un rôle central dans le traitement des données spatiales. Ils permettent la collecte, l'analyse, la gestion et la représentation cartographique des informations géographiques. En plus d'ArcGIS et de QGIS, plusieurs autres logiciels SIG et outils de traitement géospatial sont largement utilisés dans les domaines de la recherche, de l'aménagement du territoire et de la gestion environnementale.

II.10.1 ArcGIS

ArcGIS est une suite logicielle développée par Esri (Environmental Systems Research Institute), leader mondial dans le domaine des SIG. Elle offre des outils avancés d'analyse spatiale, de modélisation et de cartographie. ArcGIS comprend plusieurs plateformes complémentaires telles qu'ArcGIS Desktop, ArcGIS Online et ArcGIS Server, permettant respectivement le traitement local, le partage de données en ligne et la gestion de systèmes SIG à grande échelle.

Grâce à sa puissance et à sa richesse fonctionnelle, ArcGIS est largement utilisé dans l'urbanisme, la gestion des ressources naturelles, l'hydrologie et l'analyse environnementale (Khan & Mohiuddin, 2018).

II.10.2 QGIS

QGIS (Quantum GIS) est un logiciel libre et open-source de SIG, permettant la visualisation, l'édition et l'analyse de données géospatiales sur différentes plateformes (Windows, macOS et Linux). Son architecture modulaire et ses nombreuses extensions (plugins) en font un outil très flexible et largement utilisé dans le domaine académique et professionnel.

Développé en 2002, QGIS est devenu une alternative majeure aux logiciels propriétaires grâce à sa gratuité, sa communauté active et ses mises à jour régulières (QGIS Development Team, 2024).

II.10.3 Autres logiciels SIG et outils géospatiaux

a) GRASS GIS

GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) est un logiciel open-source spécialisé dans l'analyse spatiale avancée, la modélisation environnementale et le traitement des données raster et vectorielles. Il est particulièrement utilisé en recherche scientifique pour les analyses complexes de terrain, hydrologie et modélisation écologique (Neteler & Mitasova, 2008).

b) ENVI

ENVI est un logiciel spécialisé dans le traitement des images satellitaires et la télédétection. Il est largement utilisé pour la classification des images, l'analyse spectrale, la détection de changements et l'extraction d'indices de végétation (NDVI, SAVI, etc.). Il est particulièrement adapté aux études environnementales et agricoles (Harris Geospatial Solutions, 2023).

II.11. Conclusion

L'ensemble de ces logiciels SIG et outils de télédétection constitue un écosystème complémentaire permettant de répondre à une grande variété de problématiques géospatiales. Leur utilisation combinée améliore considérablement la précision des analyses, la qualité des cartes produites et l'efficacité des études environnementales et territoriales.

II.12 L'importance de SIG

L'importance des systèmes d'information géographique (SIG) réside dans leur capacité à transformer des données brutes en intelligence spatiale, et à faciliter la détermination des emplacements géographiques et SIG très utile dans plusieurs domaines scientifiques et administratif parmi ces domaines la protection de l'environnement contre les polluants et l'estimation des catastrophes, focalisée sur la collecte l'organisation et le stockage des données, les requêtes sont simples, apparition d'analyses spatiales et statistiques complexes sur plusieurs couches de données et le système devient un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires, utilisant la modélisation pour tester des scénarios (Maguire, 1991).

II.13. Apport de la télédétection et des SIG dans l'étude de l'érosion hydrique

L'étude de l'érosion hydrique constitue un enjeu majeur en géosciences et en gestion environnementale, en raison de ses impacts importants sur la dégradation des sols, la perte de fertilité et l'envasement des barrages. Dans ce contexte, la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) apportent des contributions essentielles en permettant une analyse spatiale fine, rapide et à différentes échelles du phénomène (Jensen, 2007 ; Morgan, 2005).

La télédétection joue un rôle fondamental dans l'identification et le suivi des zones sensibles à l'érosion hydrique. Grâce aux images satellitaires multispectrales, il est possible d'analyser la couverture végétale, la rugosité du sol, l'humidité et les changements d'occupation des terres. Les indices de végétation tels que le NDVI permettent notamment d'évaluer la densité du couvert végétal, un facteur clé dans la protection des sols contre le ruissellement et l'érosion (Rouse et al., 1974 ; Xue & Su, 2017).

Par ailleurs, les données issues de la télédétection permettent de suivre l'évolution temporelle des paysages et d'identifier les zones de dégradation progressive des sols. L'analyse multi-temporelle des images satellitaires aide à détecter la disparition du couvert végétal, l'intensification des activités agricoles ou encore l'urbanisation, autant de facteurs qui aggravent les processus d'érosion.

Les SIG, quant à eux, constituent un outil indispensable pour l'intégration et l'analyse des différents facteurs contrôlant l'érosion hydrique. Ils permettent de croiser plusieurs couches d'information telles que la pente, la lithologie, l'occupation du sol, les précipitations et le réseau hydrographique. Cette intégration spatiale facilite la modélisation des risques d'érosion et la production de cartes de vulnérabilité des sols (Burrough & McDonnell, 1998).

L'un des apports majeurs de la combinaison télédétection–SIG est la mise en œuvre de modèles empiriques et spatialisés tels que l'USLE (Universal Soil Loss Equation) et ses versions améliorées (RUSLE). Ces modèles permettent d'estimer quantitativement les pertes en sols en intégrant des paramètres dérivés des images satellitaires et des bases de données géographiques. Ainsi, il devient possible de cartographier les zones les plus exposées à l'érosion et de simuler différents scénarios d'aménagement.

De plus, cette approche intégrée facilite la prise de décision en matière de conservation des sols et de gestion durable des bassins versants. Elle permet de proposer des mesures adaptées telles que le reboisement, les aménagements antiérosifs ou la modification des pratiques agricoles dans les zones à risque élevé.

En résumé, la télédétection fournit les données spatiales et temporelles indispensables à l'observation de la surface terrestre, tandis que les SIG assurent leur intégration, leur analyse et leur modélisation. Leur combinaison constitue ainsi un outil puissant pour la compréhension, la quantification et la gestion de l'érosion hydrique.

Chapitre III :

Les modèles utiliser pour la
quantification de l'érosion
hydrique

III. Les modèles utiliser pour la quantification de l'érosion hydrique

III.1 introduction

L'érosion hydrique est processus naturel aujourd'hui est largement causé par les activités anthropiques. La déforestation, l'exploitation forestière non durable, les pratiques agricoles inappropriées telles que le labour intensif ou dans le sens de la pente, ainsi que le surpâturage, contribuent à fragiliser les sols et à réduire leur capacité de résistance face aux agents érosifs (Bouhadeb et al., 2018 ; Yan et al., 2018).

Dans de nombreuses régions, notamment méditerranéennes et semi-arides, cette combinaison de facteurs naturels et humains entraîne une accélération significative des taux d'érosion, posant ainsi un problème majeur pour la gestion durable des terres et la conservation des ressources en sols.

Au cours des dernières décennies, la quantification de l'érosion hydrique a connu des avancées significatives grâce au développement de méthodes de modélisation spatiale intégrées aux outils de géomatique. Ces approches reposent principalement sur l'utilisation combinée des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection, qui permettent d'analyser de manière fine et spatialisée les facteurs contrôlant l'érosion ainsi que sa distribution dans l'espace (Benchettouh et al., 2017 ; Ouedraogo et al., 2019 ; Khaoula & Sihem, 2021). L'intégration de ces technologies a profondément amélioré la compréhension des processus érosifs en facilitant la manipulation de grandes bases de données environnementales (topographie, sols, climat, occupation du sol) et en réduisant les contraintes liées aux méthodes de terrain traditionnelles, souvent coûteuses et limitées spatialement.

Par ailleurs, ces outils permettent aujourd'hui d'assurer un suivi spatio-temporel précis de l'évolution de l'érosion hydrique, en mettant en évidence les dynamiques de dégradation des sols à différentes échelles d'analyse. Les travaux pionniers de Bonn (1998) ont montré l'intérêt des approches spatialisées pour la compréhension des processus érosifs, tandis que Vrieling (2006) a démontré le potentiel de la télédétection pour l'évaluation de l'érosion des sols à grande échelle. Ainsi, l'association SIG-télédétection constitue aujourd'hui un cadre méthodologique incontournable pour l'étude, la cartographie et la gestion durable des phénomènes d'érosion hydrique.

III.2 les modèles à base physique pour estimer l'érosion hydrique

Parmi les principales approches développées pour la modélisation de l'érosion hydrique, les modèles à base physique et semi-physique occupent une place centrale dans la recherche en géomorphologie et en gestion des bassins versants. Ces modèles visent à représenter de manière plus réaliste les processus hydrologiques et érosifs en simulant les mécanismes de détachement, de transport et de dépôt des particules de sol, tout en intégrant les interactions entre les facteurs climatiques, édaphiques, topographiques et anthropiques (Merritt et al., 2003 ; Morgan, 2005).

Le modèle ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation), développé par Beasley et Huggins (1982), est l'un des premiers modèles distribués permettant de simuler les processus hydrologiques et érosifs à l'échelle du bassin versant. Il repose sur une discrétisation spatiale du bassin en cellules homogènes, facilitant l'analyse des flux de ruissellement et de sédiments en fonction des conditions locales du terrain.

Le modèle EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator), proposé par Williams (1985), constitue une avancée importante en intégrant non seulement les pertes en sol dues à l'érosion, mais aussi leurs effets sur la productivité agricole. Il permet ainsi d'évaluer l'impact à long terme des pratiques agricoles sur la durabilité des sols, notamment en milieu agricole intensif.

Le modèle AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model) développé par Young et al. (1987) est un modèle événementiel distribué qui simule le ruissellement, l'érosion et le transport des nutriments et polluants d'origine agricole. Il est particulièrement utilisé pour l'évaluation des impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau dans les bassins versants.

Le modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project), élaboré par Foster et Lane (1987) puis développé par Flanagan et Nearing (1995), est un modèle physique continu qui simule les processus d'érosion en nappe, en rigoles et en ravines. Il repose sur des équations fondamentales issues de la physique des sols et de l'hydrologie, ce qui lui confère une grande précision dans la représentation des processus érosifs.

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool), développé par Arnold et al. (1998), est aujourd'hui l'un des modèles hydrologiques les plus utilisés au monde. Il permet de simuler les impacts des changements d'occupation des sols, du climat et des pratiques agricoles sur les flux d'eau, de sédiments et de nutriments à l'échelle des grands bassins versants.

Dans un contexte méditerranéen, le modèle SEMMED (Soil Erosion Model for Mediterranean Regions) proposé par De Jong et al. (1994) a été conçu spécifiquement pour tenir compte des conditions climatiques caractérisées par une forte variabilité des précipitations et une sensibilité

élevée des sols à l'érosion. Il constitue un outil adapté aux régions semi-arides et méditerranéennes.

Enfin, le modèle RMMF (Revised Morgan–Morgan–Finney Model) développé par Morgan (2001) représente une amélioration des modèles conceptuels d'érosion en intégrant une estimation simplifiée mais efficace de l'énergie des précipitations, du détachement des particules et du transport des sédiments. Il est largement utilisé pour des études à l'échelle locale et régionale en raison de sa relative simplicité et de ses faibles exigences en données.

L'ensemble de ces modèles constitue aujourd'hui une base méthodologique essentielle pour l'analyse, la simulation et la gestion des processus d'érosion hydrique, chacun présentant des avantages spécifiques en fonction de l'échelle d'étude, de la disponibilité des données et des objectifs de recherche.

III.3. Les modèles empiriques pour estimer l'érosion hydrique

Parmi les approches empiriques les plus utilisées pour l'évaluation de l'érosion hydrique, le modèle **USLE (Universal Soil Loss Equation)** occupe une place centrale dans la littérature scientifique. Développé initialement par Wischmeier et Smith (1978), ce modèle constitue une relation empirique permettant d'estimer la perte moyenne annuelle en sol sous l'effet de l'érosion hydrique à partir de l'interaction de plusieurs facteurs explicatifs. Il repose sur une formulation multiplicative intégrant l'érosivité des précipitations (R), l'érodibilité des sols (K), la topographie représentée par la longueur et la pente des versants (LS), le couvert végétal et les pratiques culturales (C et P). Malgré sa simplicité conceptuelle, l'USLE demeure un outil robuste, largement adopté en raison de sa facilité d'application et de la disponibilité relativement accessible des données nécessaires à son paramétrage (Pham et al., 2018 ; Bensekhria & Bouhata, 2022).

L'un des principaux atouts de l'USLE réside dans son intégration avec les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection, ce qui a permis son extension spatiale sous forme de modèles dérivés tels que **RUSLE** et **MUSLE**. Cette combinaison a considérablement renforcé la capacité d'analyse spatiale des processus érosifs, en permettant la cartographie fine des zones sensibles à l'érosion et la quantification des pertes en sol à différentes échelles spatiales (Koussa et al., 2019). L'utilisation des SIG facilite notamment la superposition et l'analyse des différents facteurs de l'équation USLE, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des dynamiques spatiales de l'érosion hydrique.

Les facteurs intégrés dans le modèle USLE traduisent les principaux contrôles physiques de l'érosion hydrique. L'érosivité des pluies représente l'énergie cinétique des précipitations et leur capacité à détacher les particules du sol. L'érodibilité des sols reflète la sensibilité intrinsèque du sol à la désagrégation et au transport. Le facteur topographique (LS) exprime l'influence combinée de la pente et de sa longueur sur l'accélération du ruissellement. Enfin, le couvert végétal ainsi que les pratiques culturales jouent un rôle protecteur essentiel en réduisant l'impact direct des pluies et en limitant le ruissellement de surface (Roose & Lelong, 1976 ; Vrieling, 2006 ; Boukheir et al., 2006 ; Sheikh et al., 2011). Ainsi, l'USLE permet d'estimer les pertes de sol moyennes annuelles généralement exprimées en tonnes par hectare et par an, constituant un indicateur clé pour l'évaluation de la dégradation des terres (Toumi et al., 2013).

En raison de sa simplicité et de son efficacité opérationnelle, l'USLE et ses versions améliorées sont largement utilisées dans les régions méditerranéennes, caractérisées par une forte sensibilité des sols à l'érosion et une variabilité climatique importante. En Algérie, de nombreuses études ont démontré la pertinence de ce modèle pour la cartographie du risque érosif dans différents contextes géographiques (Arar & Chenchouni, 2014 ; Benchettouh et al., 2017 ; Djoukbala et al., 2018 ; Bouderbala et al., 2018 ; Toubal et al., 2018 ; Djoukbala et al., 2019 ; Nehai & Guettouche, 2020 ; Saoud et al., 2022 ; Mahleb et al., 2022). Des applications similaires ont été réalisées en Tunisie (Gaubi et al., 2017 ; Khemiri & Jebari, 2021 ; Sonia et al., 2022), au Maroc (Sadiki et al., 2004 ; Markhi et al., 2015 ; Elaloui et al., 2017 ; Bou-Imajjane & Belfoul, 2020 ; Meliho et al., 2020), ainsi que dans d'autres pays méditerranéens et européens, notamment au Liban (El Hage Hassan et al., 2018), en Italie (Rellini et al., 2019), en Turquie (Fistikoglu & Harmancioglu, 2002 ; Erdogan et al., 2007 ; Ozcan et al., 2008 ; Farhan & Nawaiseh, 2015) et en Espagne (Fernández & Vega, 2016 ; Martínez-Graña et al., 2021 ; Milazzo et al., 2022). Cette large diffusion confirme le rôle fondamental de l'USLE comme modèle de référence pour l'évaluation et la spatialisation du risque d'érosion hydrique à l'échelle mondiale.

III.3.1. modèle RUSLE

Le modèle RUSLE (**équation universelle de perte de sol révisée**) **version modifié** du modèle USLE estime la perte annuelle de sol (A) à l'aide de six facteurs fondamentaux la force motrice de la pluie et du ruissellement, la sensibilité intrinsèque du sol à l'érosion, variant désormais de façon saisonnière dans RUSLE, combine la longueur (L) et l'inclinaison (S) de la pente, reflète l'impact des cultures et des pratique de gestion et évalue l'efficacité de pratiques comme le contournage ou les terrasses (**Renard et Ferreira, 1993**), et la différence entre le modèle USLE et RUSLE c'est réside principalement dans la précision des calculs et l'intégration de nouvelles

technologies de données, bien que l'équation de base reste identique la manière de calculer chaque facteur a considérablement évolué.

Tableau N°02 : comparatif des modèles d'érosion hydrique

Critères	USLE	RUSLE	WEPP	SWAT
Nom complet	Universal Soil Loss Equation	Revised Universal Soil Loss Equation	Water Erosion Prediction Project	Soil and Water Assessment Tool
Type de modèle	Empirique	Empirique amélioré	Physiquement basé (process-based)	Semi-distribué, conceptuel/physique
Échelle spatiale	Parcelle / bassin simple	Parcelle à bassin versant	Parcelle + bassin versant	Grand bassin versant
Échelle temporelle	Moyenne annuelle	Moyenne annuelle améliorée	Continue (événementiel + long terme)	Continue (journalière à annuelle)
Principes	Relation empirique entre facteurs	Amélioration des facteurs USLE	Simulation physique des processus hydrologiques et érosifs	Simulation hydrologie + sédiments + nutriments
Équation de base	$A = R \times K \times LS \times C \times P$	$A = R \times K \times LS \times C \times P$ (facteurs révisés)	Équations physiques (ruissellement, détachement, transport)	Modèle hydrologique basé sur bilan d'eau
Données requises	Faibles	Moyennes	Élevées	Très élevées
Complexité	Faible	Moyenne	Élevée	Très élevée
Paramètres principaux	Pluie, sol, pente, couverture	Idem USLE mais mieux calibré	Climat, sol, végétation, hydraulique	Climat, sol, gestion des terres
Précision	Faible à moyenne	Moyenne à bonne	Élevée	Élevée (selon calibration)
Spatialisation SIG	Oui (simple rasterisation)	Oui (fortement utilisé avec SIG)	Oui (modélisation spatiale détaillée)	Oui (HRU – unités de réponse hydrologique)
Processus simulés	Érosion moyenne annuelle	Érosion moyenne améliorée	Ruissellement, détachement, transport, dépôt	Hydrologie + érosion + nutriments
Avantages	Simple, rapide, peu de données	Plus précis que USLE	Physiquement réaliste	Très complet (gestion bassin versant)

Limites	Trop simplifié	Toujours empirique	Complexe et données lourdes	Calibration difficile
Utilisation principale	Cartographie rapide de risque	Cartographie améliorée de l'érosion	Recherche scientifique détaillée	Gestion intégrée des bassins versants

III.3.2. Description du modèle USLE (universal soil loss equation)

L'équation universelle des pertes en sol, Universal Soil Loss Equation (USLE) de Wischmeier and Smith (1978) a été appliquée pour estimer les pertes en sol (A) en (tonnes/hectare/an). Cette méthode est une fonction multiplicative de cinq facteurs au format raster ayant une incidence sur la vitesse d'érosion à savoir : les précipitations, érodibilité des sols, les pentes, occupation des sols et pratiques de gestion antiérosives (**fellah et al, 2024**). Ces facteurs varient dans le temps et dans l'espace et dépendent d'autres données d'entrée. L'équation universelle de perte en sol (USLE) s'exprime par la formule 1 :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Avec A qui représente les pertes en sol annuelles moyennes possibles (t/ha/an), R est le facteur d'érosivité des précipitations caractérisant l'agressivité climatique (MJ.mm/ha.h.an), K est le facteur d'érodibilité des sols (t.ha.h/ha.MJ.mm), LS est le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente (adimensionnel), C est le facteur de couverture (adimensionnel) et P est le facteur des pratiques antiérosives (adimensionnel).

Dans la présente étude, la distribution spatiale de la perte en sol a été obtenue en combinant l'équation universelle de perte de terre (USLE) et les techniques du SIG, l'organigramme (Fig. 10) illustre la méthodologie adoptée et les différentes données utilisées pour calculer les cinq facteurs d'érosion des sols .

III.3.2.1. Le facteur d'érosivité R

La pluie est un des facteurs principaux de l'érosion des sols, qui se produit en absence ou baisse de l'infiltration des eaux pluviales amplifiant les forces motrices qui arrachent et emportent les particules du sol. Le facteur R (MJ.mm/ ha.h.an) exprime la capacité des pluies à éroder, plus elles sont intenses et d'une longue durée, plus elles érodent le sol.

Wischmeier and Smith (1978) ont proposé l'équation qui nécessite la détermination de l'énergie cinétique (E_c) et l'intensité moyenne des précipitations en 30 mm pour une période donnée et dans un site bien défini.

Cependant cette méthode nécessite des données horaires précises qui sont souvent indisponibles dans les stations météorologiques locales et l'approche (**Rango et Arnoldus, 1987**) est beaucoup utilisée pour pallier au manque de données détaillées, cette méthode permet d'estimer le facteur (R) à partir de données plus accessibles ;

$$\text{LogR} = 1.74 \times \log \sum \left(\frac{P_i^2}{P} \right) + 1.29 \quad (2)$$

Où

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

P_i : Précipitations mensuelles (mm),

P : Précipitations annuelles (mm).

Ensuite, les résultats ponctuels de l'indice d'érosivité des pluies R calculé pour chaque station seront spatialisés par interpolation.

III.3.2.2. Le facteur d'érodibilité des sols K

Le facteur d'érodibilité du sol K (t.ha.h/ha.MJ.mm) exprime la facilité avec laquelle les particules du sol à être érodé par la pluie. Ce facteur dépend de la texture, de la teneur du sol en matière organique et de la perméabilité du sol. Ces propriétés n'étant disponibles pour le site d'étude. L'équation (3) établie par Wischmeier and Smith (1978) n'a pu être utilisée dans cette étude.

$$K = 2.1 \times M^{1.14} \times 10^{-6} (12 - a) + 0.0325 \times (b - 2) + 0.025 \times (c - 3) \quad (3)$$

Où

$M = (\% \text{ sable fin} + \text{limon}) \times (100 - \% \text{ argile})$

a = Matière organique

b = Indice de structure du sol

c = Perméabilité du sol

III.3.2.3. le Facteur topographique LS

Le facteur LS (adimensionnel) représente les effets combinés des paramètres de la topographie sur le mécanisme d'érosion hydrique, à savoir la longueur de la pente (m) et le degré d'inclinaison S (%) (Saoud and Meddi 2022; Roose, 1996). Une augmentation de ces paramètres entraîne un accroissement du facteur LS produisant un écoulement de surface plus élevé et une érosion plus importante (Belasri and Lakhouili, 2016 ; Haan et al., 1994).

Plusieurs équations ont été développées pour estimer le facteur LS par Wischmeier and Smith (1978), Moore et Burch (1986a ; b), Griffin et al. (1988), McCool et al. (1989) et Moore and Wilson (1992). Dans le cadre de notre étude, la formule (4) développée par Mitasova et al. (1996) et appliquée par plusieurs auteurs (Bilaşco et al., 2009; Ashiagbor et al., 2013 ; Saoud and Meddi 2022) a été utilisée :

$$LS = \left(\frac{FA \times A}{22.13} \right)^{0.4} \times \left(\frac{0.1745 \times \sin \theta}{0.0896} \right)^{1.4} \quad (4)$$

Où FA presents the flow accumulation, A the cell size of the DEM et θ est the slope degree.

Le facteur LS est obtenu sous le système SIG à partir d'un Modèle Numérique d'Elévation (DEM).

III.3.2.4. Le facteur de couverture C

Le facteur de couverture C (adimensionnel) repose sur la densité et la hauteur de la couverture végétale de la surface du sol (Wischmeier and Smith, 1978). Il est le second facteur le plus important après le facteur de topographie contrôlant le risque d'érosion des sols (Van Der Knijff et al., 2000). Le facteur C représente la réduction de la perte de sol sous l'effet des pratiques culturales et de la couverture végétale (Wang et al., 2002), ou cette dernière assure l'amortissement des gouttes de pluie, le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. En général, les valeurs du facteur de couverture C varie de 0,001 pour les sols bien couverts jusqu'à 1 comme valeur maximale pour les sols nues. De nombreuses méthodes ont été développées pour estimer le facteur C en utilisant le NDVI (The Normalized Difference Vegetation Index) dérivées des images satellitaires (Durigon et al., 2014 ; Borgohain et al., 2019 ; Ostovari et al., 2021 ; Saoud and Meddi 2022). Le NDVI est déterminé à partir d'une combinaison de bandes du rouge et du proche infrarouge, issues des images satellitaires

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (5)$$

La relation de régression (6) de Van Der Knijff et al., (2000) est généralement appliquée pour le calcul du facteur C :

$$C = e^{-\alpha \left(\frac{NDVI}{\beta - NDVI} \right)} \quad (6)$$

Où α , β sont des paramètres déterminants la forme de la courbe reliant le NDVI au facteur C. Vander-Knijff et al. (2000) ont suggéré les valeurs 2 pour α et 1 pour β conformément aux

nombreux travaux (Tashayo et al., 2020 ; Thomas et al., 2018 ; Alexakis et al., 2013 ; Prasannakumar et al., 2012).

III.3.2.5. le Facteur des pratiques antiérosives P

Le facteur P (adimensionnel) est le rapport sol-perte (Renard, 1997) et tient compte des pratiques humaines conservatrices des sols contre l'érosion hydrique par exemple le labour en courbes de niveau, le reboisement en banquettes, les terrasses agricoles, le buttage et le billonnage (Wischmeier and Smith, 1978). La valeur du facteur P varie généralement de 1 pour les sols nu sur lesquels aucune des pratiques de lutte anti-érosion n'a été utilisée et 0 dans les sols à pente faible, aménagés et bien protégés (Ganasri and Ramesh, 2016).

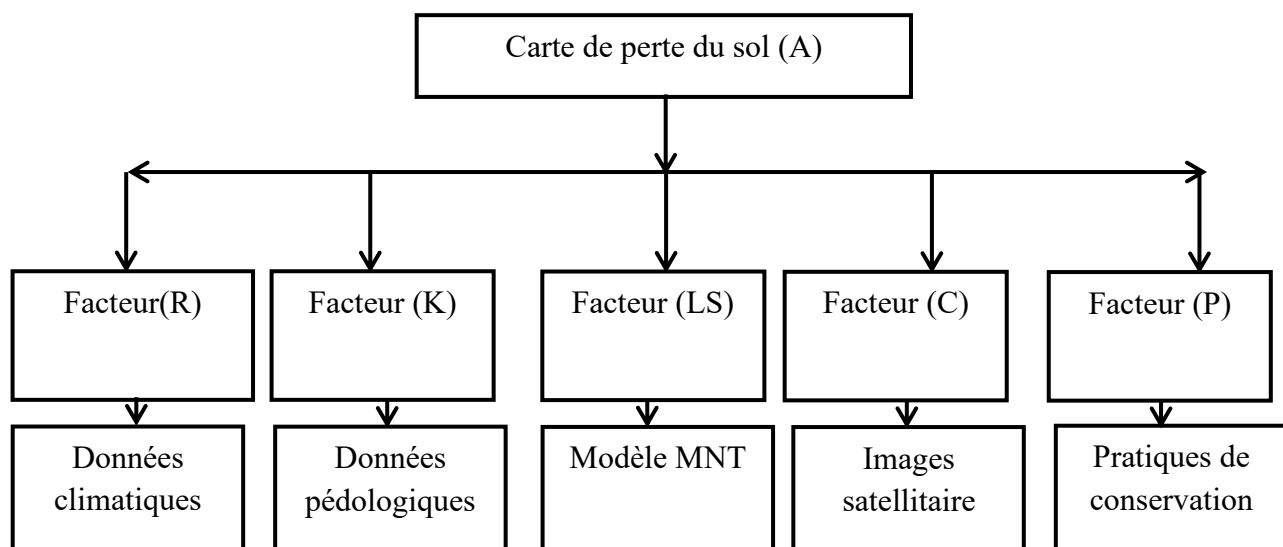


Figure N°10 : les principaux facteurs de modèle USLE et ses besoins

Chapitre IV :

*Présentation de la zone d'étude
et données utilisées*

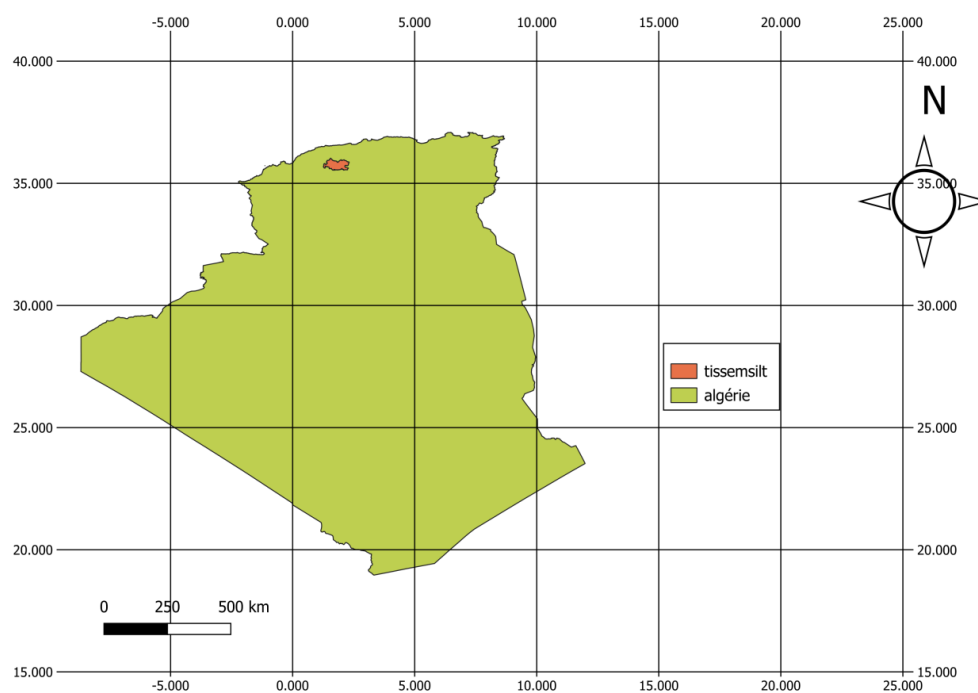
IV : Présentation de la zone d'étude et données utilisées

IV.1 introduction

Le Parc National de Theniet El Had, localisé dans la wilaya de Tissemsilt, représente l'une des principales aires protégées d'Algérie grâce à sa richesse biologique et à son importance écologique. Couvrant une superficie d'environ 3424 ha, ce massif forestier renferme une biodiversité remarquable composée de nombreuses espèces végétales et animales, dont le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), espèce emblématique des écosystèmes montagnards algériens. Le parc est considéré comme l'un des plus anciens espaces protégés du pays ; il bénéficiait d'un statut de parc naturel dès 1929 avant d'être officiellement classé parc national en 1983. Outre son rôle écologique dans la conservation des habitats naturels et de la biodiversité, le parc constitue également un important pôle touristique attirant chaque année de nombreux visiteurs. Cependant, les pressions anthropiques et les changements environnementaux accentuent la nécessité de préserver cet espace naturel afin d'assurer le maintien de son équilibre écologique et la durabilité de ses ressources naturelles (Samira et al., 2020 ; Berrichi et al., 2021 ; Mairif et al., 2023 ; FAO, 2023 ; National Parks Association, 2024).

IV.2 Localisation de la wilaya de Tissemsilt en l'Algérie

La wilaya de Tissemsilt est localisée dans la région des Hauts Plateaux du centre-ouest de l'Algérie. Elle occupe une position géographique stratégique et partage ses limites administratives avec plusieurs wilayas : Chlef et Aïn Defla au nord, Médéa à l'est, Tiaret au sud ainsi que Relizane à l'ouest. Le relief de la wilaya est dominé par des formations montagneuses qui couvrent environ 65 % de sa superficie totale, tandis que le reste du territoire est constitué principalement de Hauts Plateaux et, dans une moindre mesure, de zones steppiques. Sur le plan climatique, la région présente un climat continental marqué par une variabilité spatiale des conditions bioclimatiques : le climat est généralement semi-aride dans les zones sud et centrales, alors qu'il devient subhumide vers les secteurs septentrionaux. Les précipitations annuelles moyennes varient globalement entre 400 et 500 mm/an, influençant fortement les ressources hydriques, la couverture végétale et les dynamiques d'érosion des sols (ONM, 2022 ; Bessaoud & Pellissier, 2021 ; FAO, 2023).



localisation de wilaya de tissemsilt en algérie

Figure n° 11 : localisation de la wilaya de tissemsilt en l'algérie

IV. 3 Présentation de parc national de theniet el-had

Le Parc National de Theniet El Had (PNTH), localisé dans la wilaya de Tissemsilt, se situe à environ 185 km au sud-ouest de Algiers et à près de 150 km du littoral méditerranéen. S'étendant sur une superficie d'environ 3425 hectares, ce parc constitue l'un des principaux écosystèmes forestiers protégés de l'ouest algérien. Son relief montagneux atteint son point culminant au sommet de Ras El Braret, à une altitude de 1787 m. Le parc est particulièrement reconnu pour sa cédraie remarquable, considérée comme unique dans l'ouest de l'Algérie. La biodiversité végétale y est très riche, avec près de 450 espèces recensées, dont plusieurs espèces endémiques. Les principales formations forestières sont dominées par le cèdre de l'Atlas couvrant environ 1000 ha, le chêne vert avec près de 1000 ha, le chêne zeen occupant 504 ha ainsi que le chêne-liège réparti sur environ 460 ha. Ce dernier présente une particularité écologique notable puisqu'il est observé au-delà de 1600 m d'altitude, phénomène relativement rare dans les écosystèmes méditerranéens (PNTH, 2013 ; Berrichi et al., 2021 ; Mairif et al., 2023). Les coordonnées géographiques du parc s'étendent approximativement entre 35°52' et 35°58' de latitude Nord et entre 1°53' et 2°02' de longitude Est.

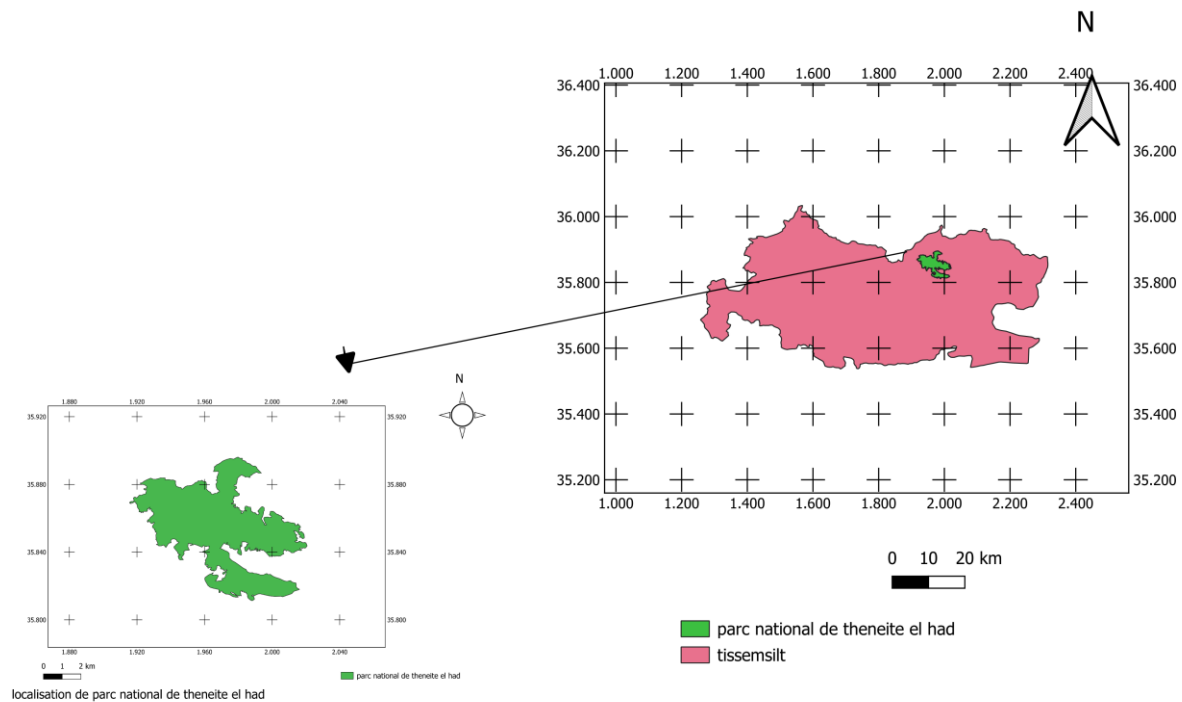


Figure n°12 : situation géographique du parc national de théniet el had

IV.4 Classification du parc par des zonages

Selon les données du Parc National de Theniet El Had (PNTH, 2014), le parc est subdivisé en quatre zones de gestion distinctes, définies en fonction des caractéristiques écologiques et des objectifs de conservation. La classe 01, correspondant à la réserve intégrale, couvre une superficie d'environ 407 ha localisée principalement dans les zones d'altitude du versant nord. Cette zone renferme des peuplements forestiers denses dominés par le cèdre de l'Atlas, sous forme de cédraies pures ou associées à différentes espèces de chênes. La classe 02, désignée comme zone primitive à faible croissance, s'étend sur environ 558 ha et se caractérise par une dynamique végétale modérée où le cèdre coexiste avec le chêne zeen et le chêne-liège. La classe 03 représente la zone tampon et constitue la partie la plus étendue du parc avec une superficie d'environ 2368 ha ; elle englobe la majeure partie du territoire du parc à l'exception des principales clairières. Enfin, la classe 04, qualifiée de zone à forte croissance, occupe près de 92 ha et correspond essentiellement aux grandes clairières présentes dans le domaine forestier. Cette organisation spatiale contribue à une gestion différenciée des ressources naturelles et à la préservation de la biodiversité du parc (PNTH, 2014 ; Naggar, 2021 ; Berrichi et al., 2021).

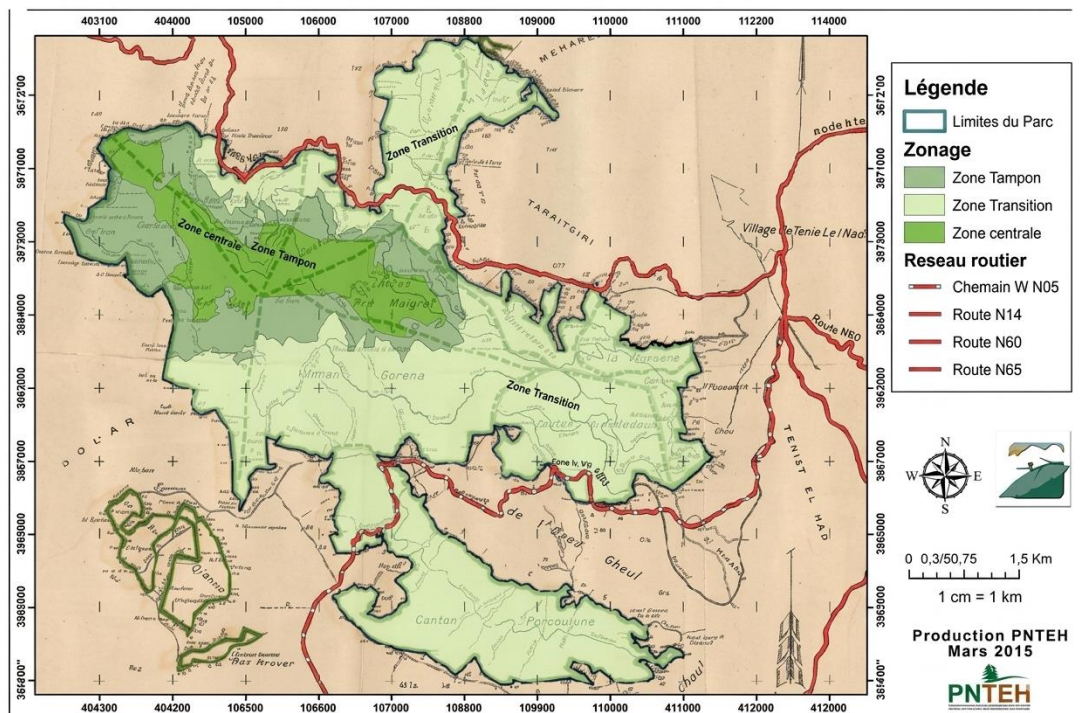


Figure n° 13 : les zonages de le PNTH (PNTH, 2018)

IV.5 Caractéristiques physique de PNTH :

IV.5.1 Géologie

Selon les travaux géologiques de Maurice Mattauer (1954), le cœur du Parc National de Theniet El Had repose principalement sur des formations sédimentaires datant de l'Oligocène. Ces formations sont caractérisées par un faciès numidien constitué d'épaisses couches de grès reposant sur un flysch argilo-marneux. Dans la partie occidentale du parc, les formations géologiques appartiennent davantage à l'Éocène moyen et sont dominées par des faciès marneux. Par ailleurs, le parc présente une importante couverture de dépôts quaternaires composés essentiellement de formations colluviales et alluviales résultant de processus d'érosion intense tels que les éboulements et les glissements de terrain. Ces dépôts entourent principalement le massif gréseux et témoignent de la dynamique morphologique active qui caractérise cette région montagneuse (Mattauer, 1954 ; Bensaid et al., 2020 ; Berrichi et al., 2021).

IV.5.2 Pente

L'analyse topographique du Parc National de Theniet El Had met en évidence une dissymétrie marquée entre les versants nord et sud du massif. Le versant nord se caractérise par les pentes les plus accentuées, avec une inclinaison moyenne avoisinant 40°, traduisant un relief montagneux fortement accidenté. Toutefois, le canton de la Pépinière constitue une exception notable, où les

pententes demeurent relativement faibles et dépassent rarement 15°. En revanche, le versant sud présente une morphologie plus modérée avec des déclivités moins importantes, dont l'inclinaison maximale atteint environ 25°. Cette variabilité topographique influence directement les processus hydrologiques, la dynamique de l'érosion des sols ainsi que la répartition de la couverture végétale au sein du parc (PNTEH, 2010 ; Bensaid et al., 2020 ; Berrichi et al., 2021).

IV.5.3 altitude

Le relief du Parc National de Theniet El Had présente une importante variation altitudinale liée à l'exposition des versants. Sur le versant sud, l'altitude s'échelonne entre 968 m, correspondant à la partie aval de l'Oued El Ghouh dans le canton de Versiouane, et 1787 m au niveau des sommets les plus élevés du massif. Quant au versant nord, le relief atteint également son point culminant à 1787 m au sommet de Ras El Berart, avant de décroître progressivement jusqu'à une altitude minimale d'environ 853 m au niveau de l'Oued Mouilha, situé dans le canton de Djouarb. Cette diversité altitudinale contribue à la variation des conditions climatiques, hydrologiques et écologiques au sein du parc, influençant notamment la répartition des formations végétales et les processus d'érosion des sols (PNTEH, 2006 ; Bensaid et al., 2020 ; Berrichi et al., 2021).

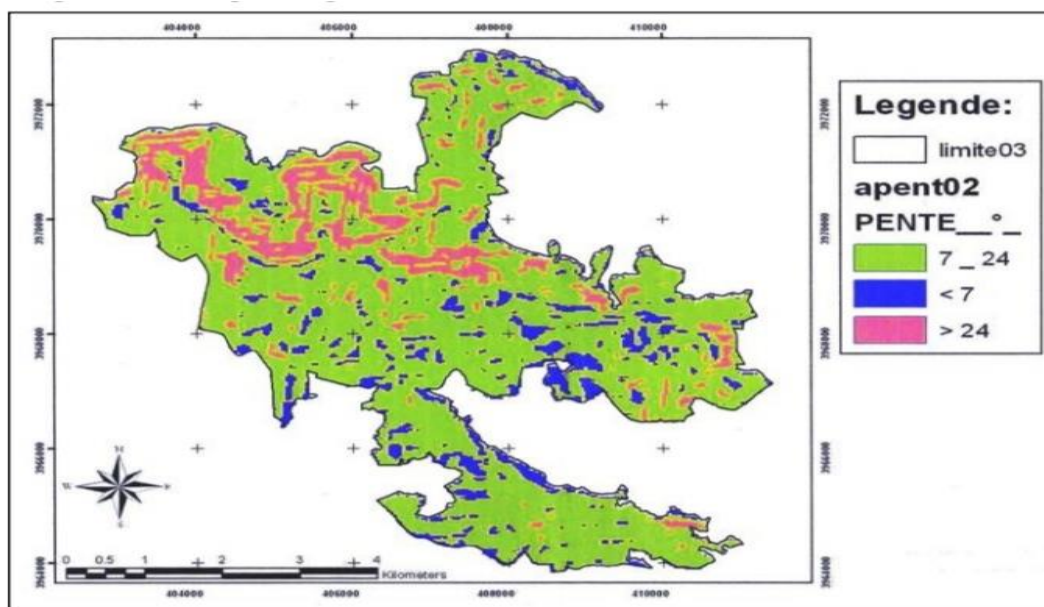


figure n°14 : carte des pentes du parc national de theniète el-had (Zaiz et Dib, 2011)

IV.5.4 pédologie

Au sein de la cédraie du Parc National de Theniet El Had, trois principaux types de sols peuvent être distingués en fonction de leurs caractéristiques pédologiques et géomorphologiques. Les sols

peu évolués d'apport colluvial sont constitués d'un mélange argilo-sableux renfermant de nombreux fragments rocheux, principalement gréseux, dont la taille varie généralement entre 1 et 2 cm. Ces sols résultent essentiellement des phénomènes de transport et d'accumulation liés à l'érosion des versants. Les lithosols représentent également une composante importante du couvert pédologique du parc ; ils se caractérisent par une texture grossière, une faible évolution pédogénétique ainsi qu'une dominance minérale généralement neutre. Malgré leur faible richesse en matières organiques et en éléments nutritifs, associée à la présence d'une mince couche de cendres, ces sols demeurent favorables aux opérations de reboisement grâce à leur bonne stabilité structurale. Enfin, les sols bruns lessivés se localisent principalement au niveau des grandes clairières et des zones à faibles pentes, où les conditions topographiques favorisent le développement d'un horizon pédologique plus évolué. La diversité de ces formations pédologiques joue un rôle déterminant dans la répartition de la végétation, l'infiltration des eaux et les processus d'érosion hydrique au sein du parc (Duchaufour, 2001 ; Baize & Girard, 2020 ; PNTEH, 2006).

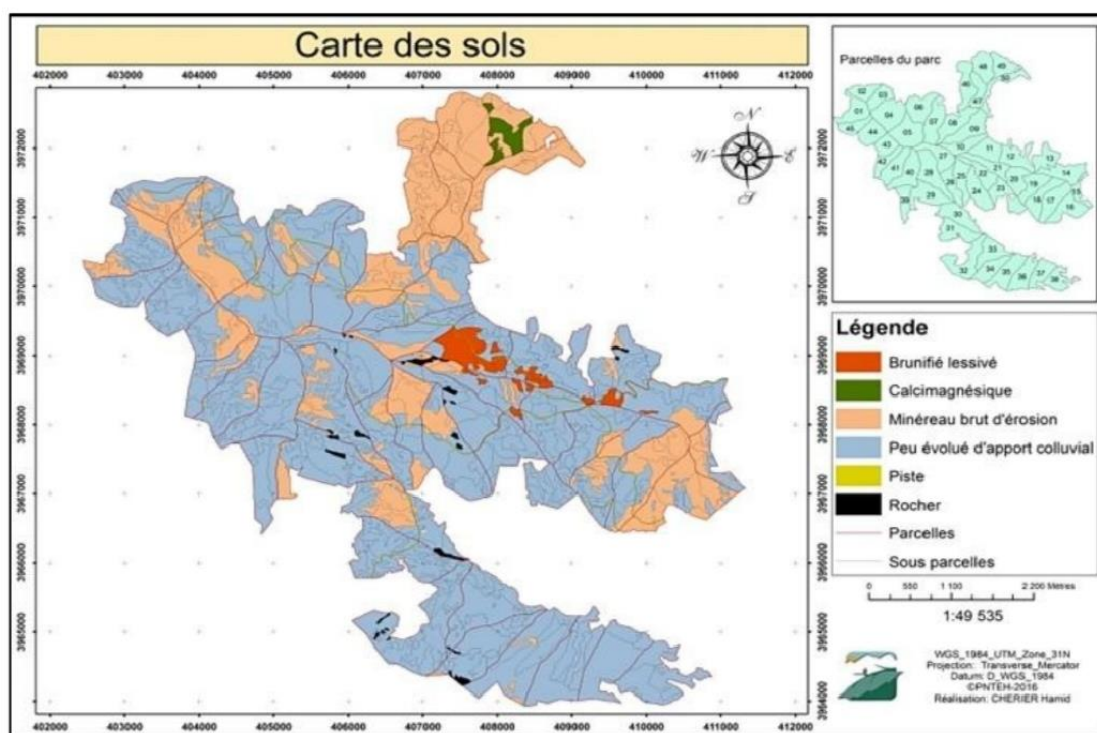


Figure n° 15 : carte du sol du parc (source ; PNTH, 1010)

IV.6 caractéristiques climatiques du PNTH

IV.6.1 précipitation

Les précipitations constituent un facteur fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes naturels, en influençant directement la dynamique hydrologique, la couverture végétale ainsi que les processus d'érosion des sols. Le climat du Parc National de Theniet El Had est de type méditerranéen tempéré, caractérisé par une répartition saisonnière irrégulière des précipitations et par des épisodes pluviométriques souvent concentrés durant la saison froide. Le parc reçoit en moyenne entre 800 et 900 mm de pluie par an, ce qui favorise le développement d'importants peuplements forestiers, notamment les cédraies et les chênaies. La période hivernale y est généralement longue et rigoureuse, avec des températures relativement basses en altitude, tandis que l'été demeure modérément tempéré sous l'influence des conditions montagnardes du massif de l'Ouarsenis (Meziane, 2017 ; ONM, 2022 ; FAO, 2023).

IV.6.1.1 précipitations mensuelles

L'analyse des précipitations mensuelles enregistrées durant la période 2018–2026 met en évidence une variabilité saisonnière caractéristique du climat méditerranéen de la région de Theniet El Had. Les données révèlent d'abord une relative stabilité des précipitations entre les mois de janvier et de juin, avec des valeurs moyennes oscillant entre 28 et 29 mm. Par la suite, une diminution progressive et marquée des précipitations est observée entre le mois de juin et la mi-août, atteignant des valeurs minimales avoisinant 5 mm durant la période estivale. À partir de la seconde moitié du mois d'août, les précipitations augmentent progressivement jusqu'au mois de décembre, où elles atteignent environ 33 mm. Cette évolution met en évidence un régime pluviométrique dominé par une saison humide en automne et en hiver, tandis que l'été se caractérise par une forte sécheresse. Les résultats montrent ainsi que le mois de décembre représente la période la plus arrosée, alors que le mois d'août constitue le mois le plus sec au cours de la période étudiée (ONM, 2022 ; Meziane, 2017 ; FAO, 2023).

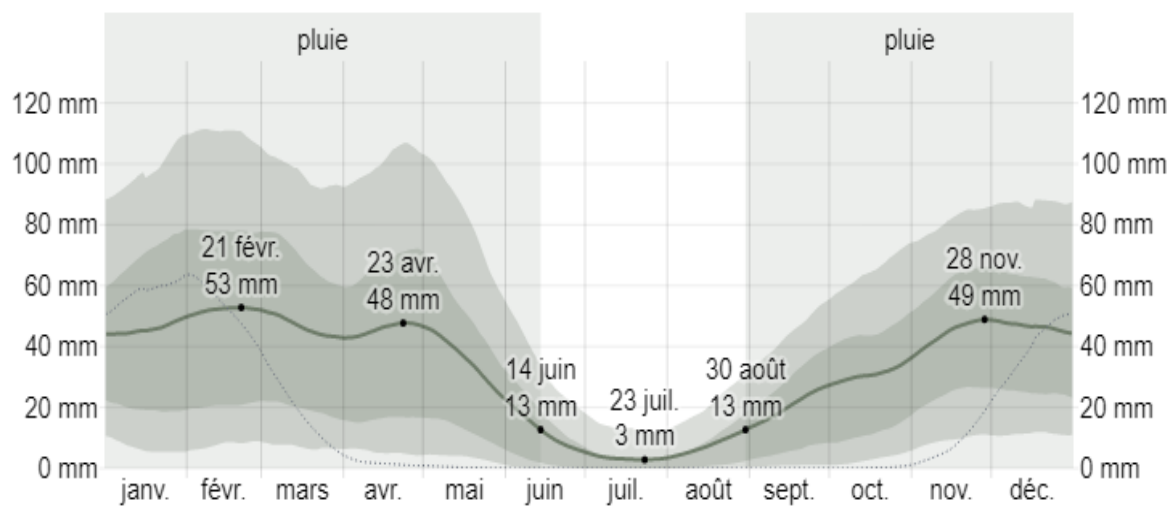


Figure n°16 : les précipitation mensuelles à la région étude pour la période 2018-2026 (**Weather sprak, 2026**).

IV.6.2 Températures moyennes minimales et maximales à theniet et-had

L'analyse de la distribution des températures minimales et maximales mensuelles dans la région de Theniet El Had durant la période 2018–2026 met en évidence une variation thermique saisonnière caractéristique du climat méditerranéen montagnard. La saison chaude s'étend généralement de juin à septembre, avec des températures relativement élevées durant les mois estivaux. Le mois d'août enregistre les valeurs thermiques les plus importantes, avec une température maximale atteignant environ 33 °C et une température minimale avoisinant 17 °C. En revanche, la saison froide s'étale d'octobre à mai et se caractérise par une baisse notable des températures, particulièrement durant l'hiver. Le mois de janvier représente la période la plus froide avec une température maximale d'environ 9 °C et une minimale proche de -1 °C. Au printemps et en automne, les températures demeurent modérées ; le mois de mars présente des températures variantes entre 2 °C et 14 °C, tandis qu'en novembre les valeurs oscillent entre 3 °C et 14 °C. Cette variabilité thermique influence fortement les conditions écologiques, la dynamique végétale ainsi que les processus hydrologiques au sein du Parc National de Theniet El Had (Meziane, 2017 ; ONM, 2022 ; Climate-Data, 2024).

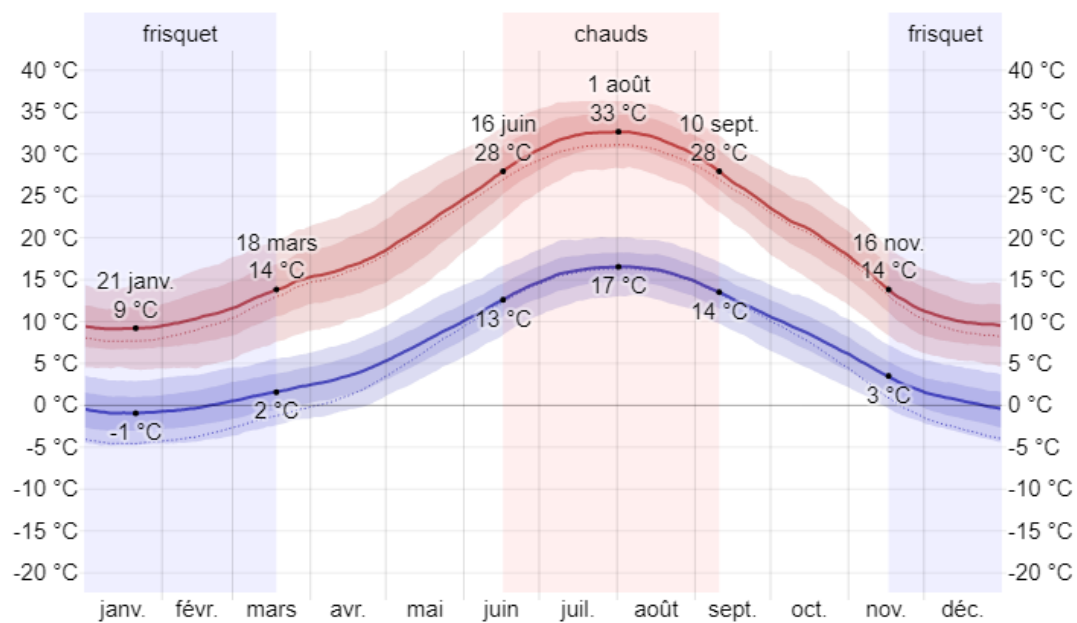


Figure n°17 : température mensuelles maximales et minimales de région d'étude pour la période 2018-2026 (**Weather sprak, 2026**).

IV.7 Caractéristiques de la biodiversité de zone étude

Le Parc National de Theniet El Had se distingue par une biodiversité remarquable, regroupant une grande variété d'espèces végétales et animales réparties sur une superficie estimée à environ 3424 ha. Cet espace naturel protégé constitue l'un des principaux réservoirs écologiques du nord-ouest algérien grâce à la richesse de ses écosystèmes forestiers et montagnards. La flore du parc est dominée par plusieurs essences forestières, notamment le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), espèce emblématique du massif et élément essentiel du patrimoine forestier algérien. Le parc abrite également une faune diversifiée comprenant plusieurs espèces animales d'intérêt écologique, parmi lesquelles le lynx d'Algérie ou caracal (*Caracal caracal*), reconnu pour son importance dans l'équilibre des chaînes trophiques au sein des écosystèmes forestiers. Cette richesse biologique confère au parc un rôle majeur dans la conservation de la biodiversité et la préservation des habitats naturels en Algérie (PNTH, 2014 ; Mairif et al., 2023 ; Wilaya de Tissemsilt).

IV.7.1 Flore

Les études floristiques réalisées dans le Parc National de Theniet El Had mettent en évidence une importante diversité végétale caractéristique des écosystèmes méditerranéens montagnards. Selon les travaux de Sarmoum et al. (2013), la flore du parc comprend environ 157 espèces végétales appartenant principalement aux familles des Asteraceae, Poaceae et Fabaceae. Le spectre biologique est largement dominé par les thérophytes, représentant près de 50 % des

espèces recensées, suivis des hémicryptophytes avec environ 25 %, traduisant une adaptation des formations végétales aux conditions climatiques méditerranéennes et aux perturbations environnementales.

D'un point de vue biogéographique, la flore du parc est majoritairement d'affinité méditerranéenne avec une proportion estimée à 71,79 %, tandis que le taux d'endémisme atteint environ 5,73 %, ce qui confère au parc une valeur écologique et patrimoniale importante. Toutefois, l'état de conservation de la végétation demeure fragile sous l'effet des pressions anthropiques, notamment le surpâturage, qui favorise la dégradation des habitats naturels et la régression progressive de la strate herbacée. La densité et la richesse floristique varient également selon les cantons forestiers ; les formations herbacées apparaissent plus denses dans le canton de Sidi Abdoun comparativement à celui d'Ourten. Par ailleurs, les facteurs édaphiques et la disponibilité de la lumière influencent fortement la répartition des espèces végétales, particulièrement dans les milieux ouverts où les espèces neutrophiles dominent largement (60 %) par rapport aux espèces acidophiles (15 %) (Sarmoum et al., 2013 ; Naggar, 2021 ; Berrichi et al., 2021).

IV.7.2 Faune

Le Parc National de Theniet El Had abrite une faune relativement diversifiée grâce à la variété de ses habitats forestiers et montagnards. Cependant, plusieurs études signalent une régression progressive de la faune sauvage au cours des dernières décennies. La raréfaction du gibier est particulièrement préoccupante et s'explique principalement par les effets combinés du stress hydrique, de la dégradation du couvert végétal et des activités anthropiques. Certaines espèces emblématiques, telles que le lynx d'Algérie (*Caracal caracal*) et le chat sauvage, auraient même disparu localement en raison notamment du braconnage et de la perturbation des habitats naturels (Belkaid, 1988).

La mammalofaune du parc comprend environ 17 espèces de mammifères, dont 10 bénéficient d'un statut de protection légale. L'avifaune est également remarquable avec près de 95 espèces d'oiseaux recensées, parmi lesquelles 25 espèces protégées. Parmi les oiseaux les plus représentatifs figurent l'aigle royal (*Aquila chrysaetos*), le rollet d'Europe (*Coracias garrulus*) ainsi que le pic de Levaillant (*Picus vaillantii*), espèces témoignant de la richesse écologique des milieux forestiers du parc. Les reptiles occupent également une place importante dans la biodiversité locale, avec la présence confirmée de la couleuvre fer-à-cheval (*Hemorrhois hippocrepsis*), de la tarantule commune (*Tarentola mauritanica*) et de la tortue grecque (*Testudo*

graeca), en plus de plusieurs espèces de lézards adaptées aux conditions bioclimatiques méditerranéennes. Cette diversité faunistique souligne l'importance écologique du parc et la nécessité de renforcer les mesures de conservation afin de préserver durablement les espèces et leurs habitats naturels (Belkaid, 1988 ; Naggar, 2021 ; Mairif et al., 2023 ; FAO, 2023).

IV.8 localisations de zone étude Canton rond-point

Le canton du Rond-Point, localisé dans la partie nord-ouest du Parc National de Theniet El Had, se distingue par la présence d'une futaie dense dominée par le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*). Cette formation forestière renferme plusieurs spécimens pluricentenaires, témoignant de l'ancienneté et de la valeur écologique exceptionnelle de la cédraie du parc. Situé à une altitude moyenne d'environ 1461 m, ce canton occupe une position montagnarde favorable au développement des peuplements de cèdres grâce aux conditions climatiques relativement humides et fraîches caractéristiques du massif de l'Ouarsenis. La densité du couvert forestier joue un rôle essentiel dans la protection des sols contre l'érosion, la régulation hydrologique ainsi que la conservation de la biodiversité locale (PNTH, 2014 ; Naggar, 2021 ; Berrichi et al., 2021).

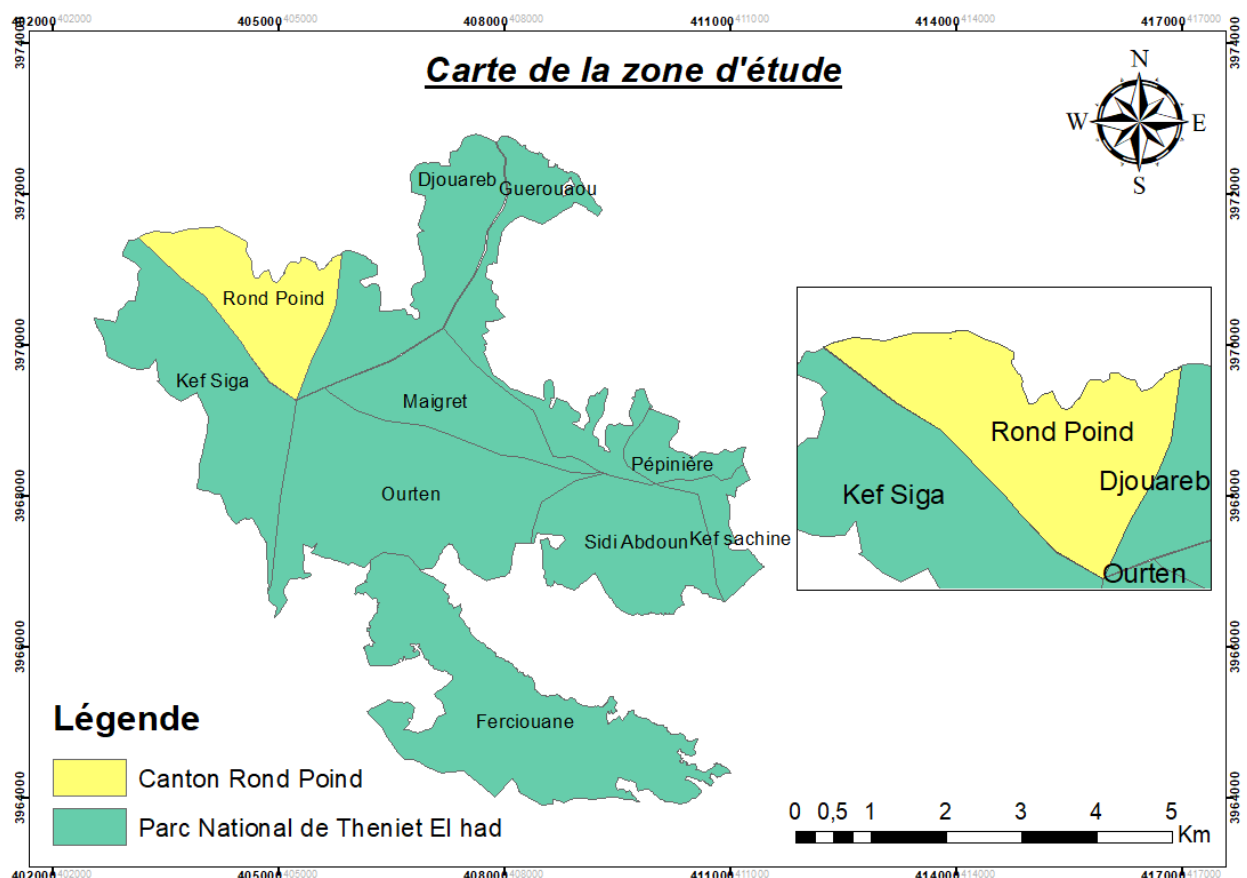


Figure N° 18 : localisation de zone étude

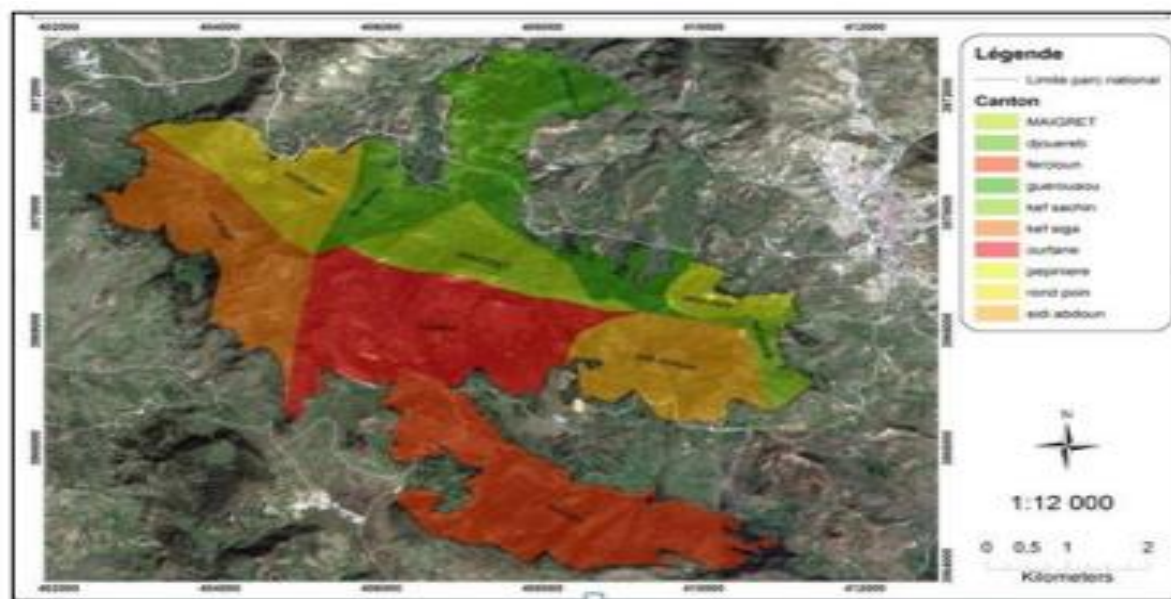


Figure n° 19 : les cantons de parc national de theniet el-had

IV.9. Données utilisées

Dans le cadre de cette étude, l'approche méthodologique adoptée a consisté, dans un premier temps, à identifier et spatialiser les principaux facteurs responsables du déclenchement de l'érosion hydrique à l'aide des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG). Parmi les données utilisées figure le Modèle Numérique de Terrain (MNT) ASTER GDEM, d'une résolution spatiale de 30 m, qui représente une source essentielle pour l'analyse morphométrique du relief. Ce modèle numérique joue un rôle similaire à celui des courbes de niveau dans la cartographie classique, tout en offrant des capacités analytiques avancées permettant une représentation précise des caractéristiques topographiques du terrain.

Le MNT utilisé dans cette étude a été téléchargé gratuitement depuis la plateforme USGS EarthExplorer, qui constitue l'une des principales bases de données mondiales en matière d'imagerie satellitaire et de données géospatiales. Ce modèle a servi comme donnée d'entrée principale pour le calcul des paramètres topographiques intervenant dans les processus érosifs, notamment les degrés de pente ainsi que la longueur des versants, utilisés dans l'estimation du facteur topographique LS de l'équation universelle des pertes en sol (USLE/RUSLE). L'exploitation du DEM permet ainsi une meilleure compréhension de l'influence du relief sur l'intensité de l'érosion et sur la dynamique du ruissellement superficiel (Wischmeier & Smith, 1978 ; Moore & Burch, 1986 ; Jemai et al., 2021).

Dans cette étude, plusieurs données spatiales ont été mobilisées afin de permettre la modélisation des facteurs de l'érosion hydrique et leur spatialisation à l'échelle du Parc National de Theniet El

Had. Une carte pédologique au format vectoriel, fournie par les services du parc, a été utilisée comme donnée de base pour l'estimation du facteur d'érodibilité des sols (facteur K). Cette carte permet d'identifier les principaux types de sols présents dans la zone d'étude et de les associer à leurs propriétés physiques et structurelles influençant leur sensibilité à l'érosion.

Par ailleurs, une image satellitaire Landsat 8 OLI a été téléchargée gratuitement depuis la plateforme [USGS EarthExplorer](https://earthexplorer.usgs.gov/). Cette image a été exploitée pour le calcul de l'indice de végétation normalisé (NDVI), permettant d'évaluer la densité et la vigueur du couvert végétal. Elle a également servi à la détermination du facteur de couverture et de gestion des terres (facteur C), qui reflète l'effet de la végétation et des pratiques culturales sur la protection des sols contre l'érosion. L'intégration de ces données satellitaires et cartographiques permet une analyse fine des dynamiques spatiales de l'érosion et une meilleure compréhension des interactions entre sol, végétation et relief (Jemai et al., 2021 ; Borrelli et al., 2017).

Tableau 03: l'image satellitaire de la région utilisé

Orbite /rang	Date d'acquisition	Heures d'acquisition	Capteur
196/35	17-05-2021	10 h 25'	OLI

En l'absence de station météorologique au sein même de la zone d'étude, l'analyse climatique a reposé sur l'exploitation des données issues des stations météorologiques les plus proches, sélectionnées en tenant compte des similitudes topographiques et altitudinales afin d'assurer une meilleure représentativité spatiale. Ainsi, les données pluviométriques utilisées proviennent de sept stations situées à l'extérieur du périmètre étudié. Leurs coordonnées géographiques ainsi que leurs périodes d'observation sont présentées dans le Tableau 04.

Les principales variables mobilisées concernent les précipitations moyennes mensuelles et annuelles couvrant la période 2000–2020. Ces séries climatiques ont été utilisées comme données d'entrée essentielles pour le calcul de l'indice d'érosivité des pluies, correspondant au facteur R dans l'équation universelle des pertes en sol (USLE/RUSLE). Ce facteur permet de quantifier l'impact énergétique des précipitations sur les processus de détachement et de transport des particules de sol, jouant ainsi un rôle central dans l'évaluation du risque érosif à l'échelle spatiale (Wischmeier & Smith, 1978 ; Panagos et al., 2015 ; Jemai et al., 2021).

Tableau n°04 : les pluies moyennes dans 7 stations

Station	Nom	Cod	X (longitude) en dd	Y (latitude) en dd	Z (altitude) en m	Périodes d'observation
1	echelef	604250	1,33	36,21	143	20ans
2	djelfa	605350	3,25	34,33	1144	20ans
3	Ksrchellala	605140	2,31	35,16	801	20ans
4	médéa	604370	2,75	36,28	1036	20ans
5	meliana	604300	2,23	36,3	721	20ans
6	relizane	604920	0,55	35,73	75	20ans
7	tiarte	605110	1,43	35,35	1127	20ans

IV.10. Traitement des données pluviométriques

Le traitement des données pluviométriques a été réalisé à l'aide du logiciel Microsoft Excel sous environnement Windows. Ce logiciel de tableur a été utilisé pour l'organisation, le classement et le traitement des séries de données climatiques issues des différentes stations météorologiques. Excel a permis d'effectuer l'ensemble des opérations mathématiques et statistiques nécessaires, notamment le calcul des moyennes mensuelles et annuelles, ainsi que la vérification et la structuration des données avant leur intégration dans les analyses spatiales et climatiques. Grâce à sa simplicité d'utilisation et à ses fonctionnalités analytiques, ce logiciel constitue un outil efficace pour le prétraitement des données hydrométéorologiques dans les études environnementales (Jemai et al., 2021 ; FAO, 2023).

IV.11 Les logiciels utilisés dans les SIG

Pour le traitement des données de télédétection et les SIG on a utilisé les logiciel suivant :

IV.11.1 ArcGIS

ArcGIS est un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) largement utilisé pour la gestion, l'analyse et la représentation des données spatiales. Il s'agit d'un logiciel propriétaire

développé par l'Environmental Systems Research Institute (ESRI), dont le siège est situé à Redlands, en Californie (États-Unis). L'entreprise a été fondée en 1969 par Jack et Laura Dangermond et s'est initialement spécialisée dans l'analyse des données géographiques appliquées à l'aménagement du territoire et à la gestion des ressources environnementales.

Au fil du temps, ArcGIS est devenu une plateforme SIG complète, intégrant plusieurs solutions adaptées aux besoins des utilisateurs, notamment ArcGIS Desktop, ArcGIS Online et ArcGIS Server. Le logiciel fonctionne principalement sous environnement Windows et offre une large gamme d'outils d'analyse spatiale, bien qu'il ne soit pas nativement compatible avec les systèmes MacOS et Linux. ArcGIS est également disponible en plusieurs langues, facilitant son utilisation à l'échelle internationale, tandis que la plateforme de ressources ESRI propose une documentation multilingue destinée aux utilisateurs et aux développeurs. Grâce à ses capacités avancées de traitement et de visualisation des données géographiques, ArcGIS est aujourd'hui un outil de référence dans les domaines de la géomatique et de la gestion environnementale (Khan & Mohiuddin, 2018 ; ESRI, 2024).

IV.11.2 QGIS

QGIS (Quantum GIS) est un logiciel de Système d'Information Géographique libre et open-source, permettant la visualisation, l'édition, l'analyse et la cartographie des données géospatiales sur différentes plateformes, notamment Windows, MacOS et Linux. Développé en langage C++ avec le framework Qt, le projet a été initié en mai 2002 par Gary Sherman dans le but de disposer d'un outil SIG performant sous environnement Linux.

Depuis sa création, QGIS a connu un développement continu grâce à une communauté internationale active. Depuis 2014, le logiciel adopte un cycle de mises à jour régulières, généralement tous les quatre mois, ce qui permet une amélioration constante de ses fonctionnalités et de sa stabilité. L'un des principaux atouts de QGIS réside dans son architecture modulaire, qui permet l'ajout de nombreuses extensions (plugins) adaptées à divers besoins d'analyse spatiale, de télédétection et de modélisation environnementale. Cette flexibilité, combinée à son caractère gratuit et open-source, en fait un outil largement utilisé dans la recherche scientifique et les études environnementales (Khan & Mohiuddin, 2018 ; QGIS Development Team, 2024).

IV.11.3. ENVI 5.1 (Environment for Visualizing Images)

ENVI (Environment for Visualizing Images) est un logiciel spécialisé dans le traitement et l'analyse des images de télédétection et des données géospatiales. Il est largement utilisé par les scientifiques, chercheurs et spécialistes en systèmes d'information géographique (SIG) pour l'exploitation des images satellitaires. Ce logiciel intègre des outils avancés de traitement d'images dans une interface conviviale, permettant d'extraire efficacement des informations pertinentes à partir de données multispectrales et hyperspectrales.

Dans le cadre de cette étude, la version ENVI 5.1 a été utilisée pour le traitement des images satellitaires. Elle offre un ensemble complet de fonctionnalités couvrant la visualisation, le géoréférencement, les prétraitements, la classification ainsi que l'analyse des images de télédétection. ENVI permet également la réalisation de corrections géométriques et radiométriques indispensables pour améliorer la qualité des données et assurer leur fiabilité lors des analyses spatiales.

Par ailleurs, le logiciel facilite l'analyse de la végétation à travers le calcul d'indices tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), utilisé pour évaluer la densité et la vigueur du couvert végétal. Il prend également en charge divers formats raster et vectoriels, ce qui renforce son interopérabilité avec d'autres outils SIG. Grâce à ces fonctionnalités, ENVI 5.1 constitue un outil essentiel pour l'exploitation des images satellitaires dans les études environnementales et la modélisation spatiale (Thomas et al., 2005 ;jensen, 2015).

Chapitre V

*Méthodologie, interprétation
des résultats et discussion*

V. méthodologie, interprétation des résultats et discussion

introduction

L'érosion hydrique constitue l'un des principaux processus de dégradation des sols à travers le monde, particulièrement dans les régions caractérisées par des précipitations importantes et des reliefs accidentés. Ce phénomène résulte essentiellement de l'action des eaux de pluie et du ruissellement de surface, qui provoquent le détachement, le transport et le dépôt des particules du sol. Les conséquences de cette dégradation se traduisent par une diminution de la fertilité des terres, une réduction de la couverture végétale, une perturbation des écosystèmes naturels ainsi qu'une accélération de la dégradation environnementale.

Dans la zone d'étude, les précipitations représentent le principal facteur déclencheur de l'érosion hydrique. Sous l'effet des pluies, les sols subissent des transformations morphologiques importantes se manifestant par des pertes progressives en terre et une modification des caractéristiques physiques du milieu naturel. Ce phénomène affecte également la végétation et les ressources biologiques, en réduisant la capacité de protection naturelle du sol contre les agents érosifs.

Afin d'évaluer l'intensité de l'érosion et de quantifier les pertes en sol, plusieurs modèles empiriques et mathématiques ont été développés. Parmi ces modèles, l'USLE (Universal Soil Loss Equation) demeure l'un des plus utilisés à l'échelle mondiale en raison de sa simplicité, de son efficacité et de son adaptabilité aux différentes conditions environnementales. Ce modèle permet d'estimer les pertes annuelles moyennes en sol à partir de l'intégration de cinq facteurs fondamentaux intervenant dans le processus érosif.

L'intérêt de cette méthode réside également dans sa facilité d'intégration dans les systèmes d'information géographique (SIG) et les outils de télédétection, ce qui permet de réaliser des analyses spatiales précises et des cartes de vulnérabilité à l'érosion hydrique. Ainsi, le modèle USLE constitue un outil scientifique important pour l'évaluation des risques d'érosion et l'aide à la gestion durable des ressources naturelles.

V.2. Application de la méthode USLE

Dans le cadre de cette étude, la méthode USLE a été appliquée afin de modéliser et d'analyser les pertes en sol au niveau de la zone d'étude. Cette méthode empirique repose sur l'interaction de cinq facteurs principaux responsables du déclenchement et du développement du phénomène érosif. Les différents paramètres utilisés dans le modèle ont été présentés dans le chapitre III.

L'approche adoptée consiste à estimer séparément chacun des facteurs de l'équation USLE avant leur intégration dans un environnement SIG afin d'obtenir une cartographie quantitative des pertes en sol. Chaque facteur a été analysé et interprété individuellement dans le but de mieux comprendre son influence sur l'intensité de l'érosion hydrique dans la région étudiée.

Bien qu'aucun ordre spécifique ne soit imposé dans l'évaluation des facteurs, nous avons choisi d'estimer successivement le facteur K, le facteur LS, le facteur C, le facteur P et enfin le facteur R. Cette organisation méthodologique facilite l'analyse progressive des paramètres influençant l'érosion hydrique.

L'équation générale de l'USLE est exprimée comme suit :

$$A = K \times LS \times C \times P \times R$$

Où :

A : représente les pertes annuelles moyennes en sol ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$) ;

K : correspond au facteur d'érodibilité des sols à l'érosion hydrique ;

LS : désigne le facteur topographique lié à la pente et à sa longueur ;

C : représente le facteur de couverture végétale et d'occupation du sol ;

P : correspond au facteur des pratiques de conservation et d'aménagement ;

R : représente le facteur d'agressivité des précipitations.

L'intégration de ces différents facteurs permet de quantifier les pertes en sol et d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique au sein de la zone d'étude.

V.3. Les facteurs de la méthode USLE

V.3.1. Le facteur K : indice d'érodibilité des sols

Le facteur K représente la sensibilité des sols à l'érosion hydrique en fonction de leurs caractéristiques physiques et texturales. Il traduit la capacité du sol à résister au détachement et au transport des particules sous l'effet des précipitations et du ruissellement.

Dans cette étude, la carte pédologique élaborée par le Parc National de Theniet El Had a été utilisée afin d'établir une carte des textures des sols de la zone d'étude. Ces données ont permis

de déterminer les valeurs du facteur K à partir des classes texturales et des codes de perméabilité des sols.

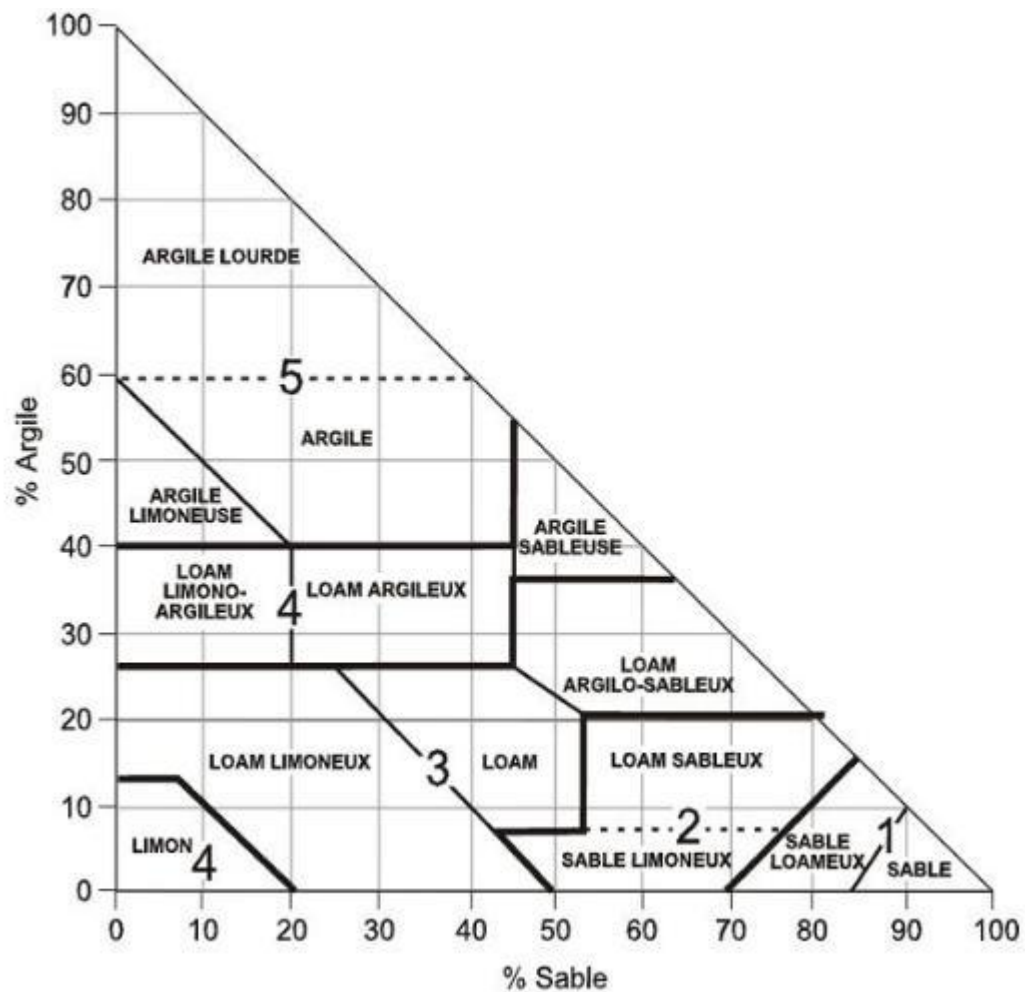
L'estimation du facteur K a été réalisée en se basant sur la classification proposée par Stone et Hilborn (2000), qui établit une correspondance entre les textures des sols et leur degré d'érodibilité. Cette méthode permet de déduire les valeurs du facteur K selon les propriétés physiques et granulométriques des sols.

Les valeurs obtenues sont initialement exprimées en tonne/acre selon le système américain (US System). Afin d'assurer leur compatibilité avec le système international, une conversion a été effectuée par l'application d'un coefficient correctif de 0,1317. Cette étape est essentielle pour harmoniser les unités utilisées dans l'ensemble des calculs du modèle USLE.

Tableau 05: Variation de l'érodibilité du sol (K) en fonction du type de sol (Stone et Hilborn, 2000).

Classe texturale	Facteur (tonne/acres)	K	Facteur (t.ha.h/ha.MJ.mm)	K
Argile	0.22		0.02897	
Loam argileux	0.3		0.03951	
Loam sableux gossier	0.07		0.00922	
Sable fin	0.08		0.01054	
Loam sableux fin	0.18		0.02371	
Argile lourde	0.17		0.02239	
Loam	0.3		0.03951	
Sable fin loameux	0.11		0.01449	
Sable loameux	0.04		0.00527	
Sable très fin loameux	0.39		0.05136	
Sable	0.02		0.00263	
Terre franche argileuse	0.2		0.02634	
Loam sableux	0.13		0.01712	

Loam limoneux	0.38	0.05005
Argile limoneuses	0.26	0.03424
Loam limono-argileux	0.32	0.04214
Sable très fin	0.43	0.05663
Loam sableux très fin	0.35	0.04610



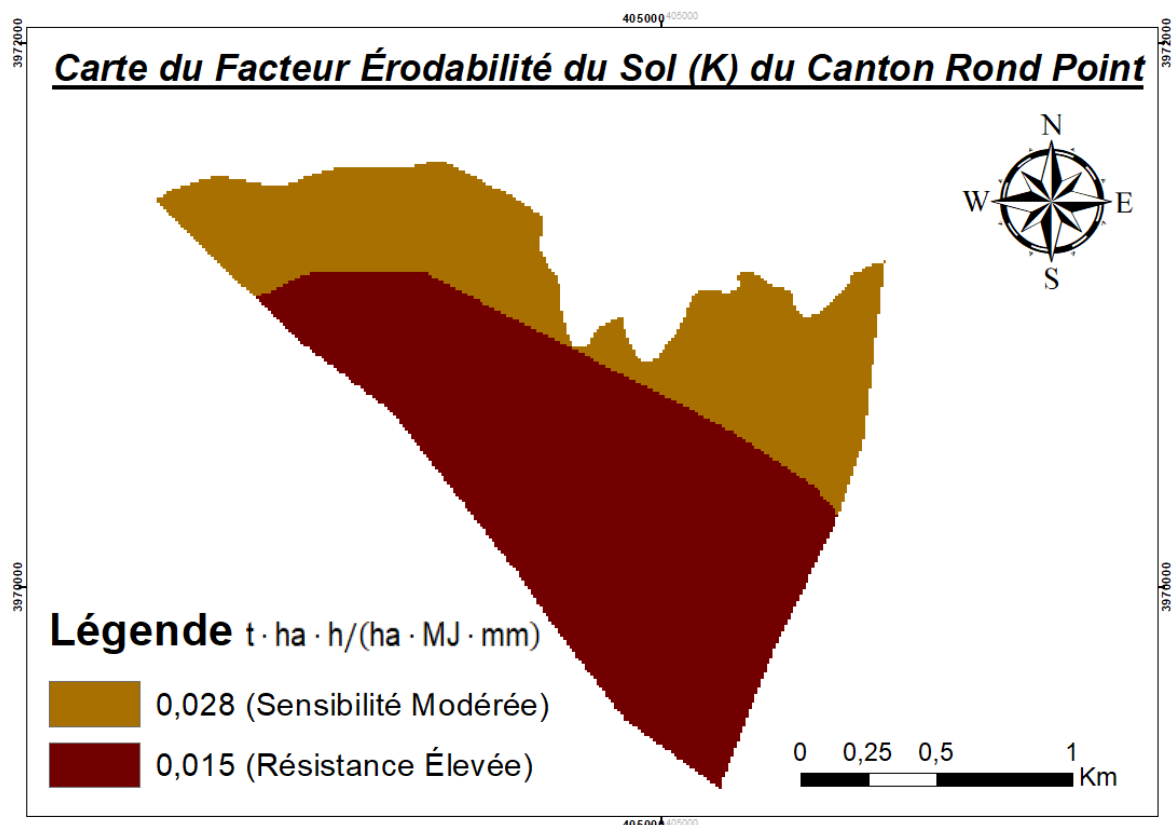


Figure N°20 : Carte du facteur d'érodabilité K

Cette carte illustre la répartition spatiale des valeurs du facteur K dans la zone d'étude. Les résultats montrent que la majeure partie de la surface étudiée présente des valeurs moyennes du facteur K, avoisinant 0,028. Les faibles valeurs, proches de 0,015, sont principalement localisées dans la partie nord de la zone d'étude, traduisant une faible sensibilité des sols à l'érosion hydrique. En revanche, les valeurs les plus élevées du facteur K, atteignant 0,028, dominent la partie sud, indiquant une érodibilité plus importante des sols dans cette région.

V.3.2. Facteur topographique (LS) : longueur et inclinaison de la pente

Le relief constitue un élément déterminant dans le processus d'érosion hydrique, en particulier lorsque les pentes sont fortes et favorisent un écoulement rapide des eaux de ruissellement. Dans ces conditions, l'énergie cinétique de l'eau augmente, ce qui intensifie le détachement et le transport des particules du sol. L'importance de ce phénomène varie néanmoins en fonction de plusieurs paramètres, notamment la nature géologique du terrain, les caractéristiques physico-chimiques des sols et le degré de protection offert par la couverture végétale.

Le facteur topographique LS représente l'effet combiné de la longueur de la pente et de son inclinaison sur le processus érosif. Il constitue ainsi un indicateur essentiel dans l'évaluation de la sensibilité des versants à l'érosion. Dans le cadre de cette étude, la carte des pentes (Figure IV-03) a été élaborée à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude, permettant ainsi une analyse spatiale fine des variations topographiques.

Pour le calcul du facteur LS, nous avons adopté l'équation proposée par Moore et Burch (1986), reconnue pour sa simplicité et son adaptation aux traitements SIG. Cette formulation permet une intégration efficace des données de terrain dans les analyses spatiales.

L'expression mathématique du facteur LS est donnée comme suit :

$$LS = (L / 22.13)^{0.4} \times (\sin(S) / 0.0896)^{1.3}$$

où :

L désigne la longueur de la pente (en mètres), dérivée à partir des directions d'écoulement et de l'algorithme des flux (Gruber et Peckham, 2008), implémenté dans le logiciel QGIS ;

S représente l'inclinaison de la pente.

Ainsi, le facteur LS permet de quantifier l'influence de la morphologie du terrain sur l'intensité de l'érosion hydrique, en mettant en évidence les zones les plus exposées en fonction de leur configuration topographique.

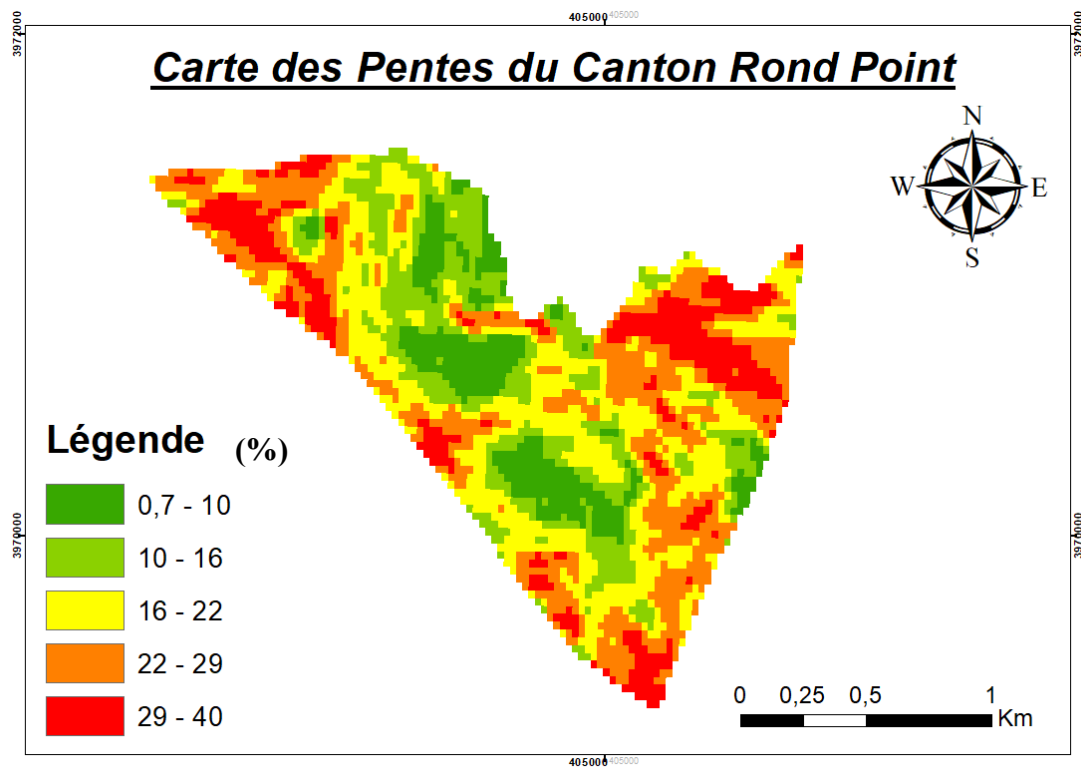


Figure N°21 : Carte des pentes

Cette carte représente des valeurs de pentes deux classes entre 0.7 à 16 dominantes, qui représente des faibles pentes.

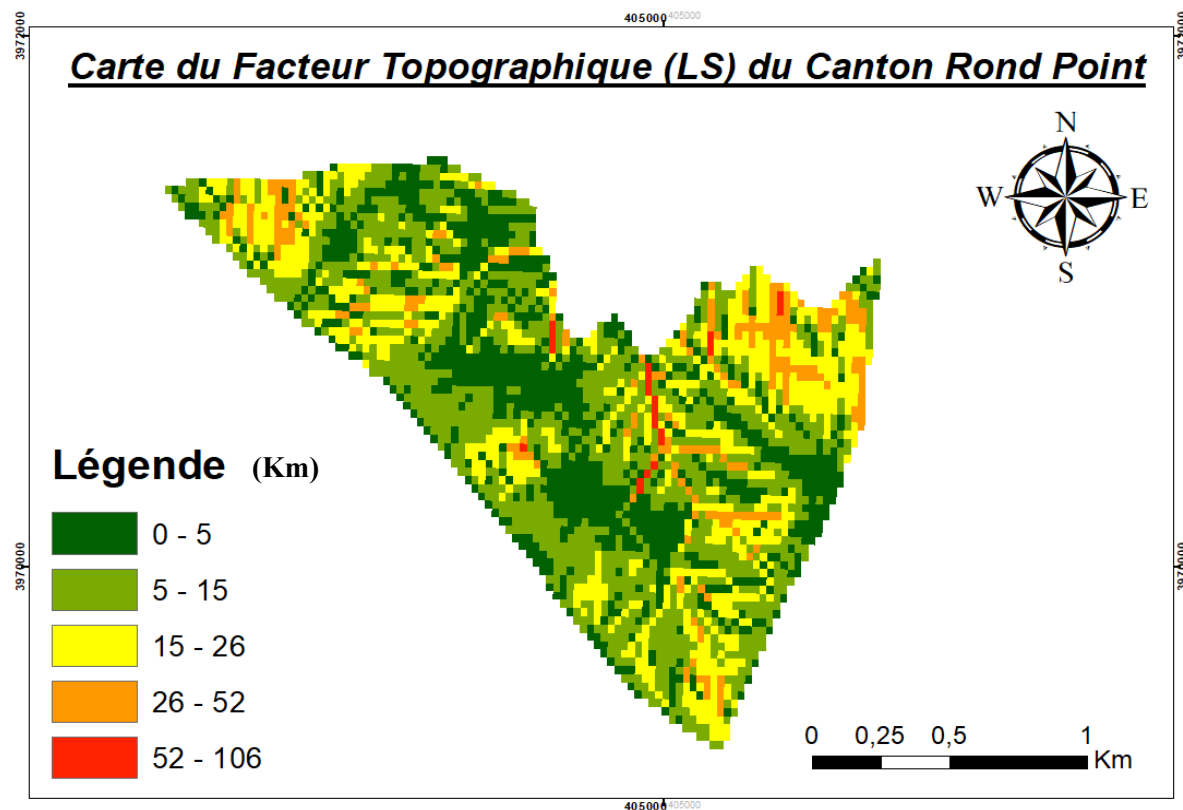


Figure N°22 : Carte du facteur LS

La carte représente la répartition du facteur LS dans la zone d'étude, on remarque que les classes entre 0 à 15 sont les dominantes dans la carte et qui porte les valeurs très faibles.

V.3.3. Facteur C : facteur d'occupation et de protection du couvert végétal

Le facteur C représente l'effet protecteur de la couverture végétale et des différents types d'occupation du sol sur le processus d'érosion hydrique. Il traduit le niveau de réduction de l'impact des précipitations et du ruissellement en fonction de la densité, de la structure et de la continuité du couvert végétal. Ainsi, une couverture végétale dense et bien développée limite fortement l'érosion en diminuant l'énergie cinétique des gouttes de pluie et en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol, tandis qu'un sol nu ou faiblement couvert est beaucoup plus exposé aux processus érosifs.

Dans la littérature, plusieurs approches empiriques ont été proposées pour estimer ce facteur en fonction des caractéristiques de la végétation et de l'occupation du sol (Katerji et al., 1983). Toutefois, avec le développement des techniques de télédétection, l'utilisation des indices de végétation est devenue une méthode plus efficace et spatialement continue pour la quantification du facteur C.

Dans le cadre de cette étude, le facteur C a été estimé à partir de l'indice de végétation normalisé (NDVI), calculé à partir des données satellitaires. Nous avons adopté la relation proposée par Zhou et al. (2008) et Kouli et al. (2009), qui permet de relier directement le NDVI à la protection du sol contre l'érosion hydrique. Cette méthode présente l'avantage d'intégrer la variabilité spatiale de la couverture végétale et de produire des résultats adaptés à une analyse SIG.

L'expression du facteur C est la suivante :

$$C = \exp \left[-2 \times \text{NDVI} / (1 - \text{NDVI}) \right]$$

L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est un indicateur spectral largement utilisé pour caractériser l'état de la végétation. Il est calculé à partir des réflectances des bandes rouge (r3) et proche infrarouge (r4), selon la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (r4 - r3) / (r4 + r3)$$

Le NDVI varie généralement entre -1 et +1. Les valeurs proches de +1 indiquent une végétation dense et en bonne santé, tandis que les valeurs proches de 0 ou négatives correspondent à des surfaces peu ou pas végétalisées (sol nu, zones urbaines ou surfaces rocheuses). Ainsi, dans cette étude, le NDVI a permis de caractériser spatialement la densité de la couverture végétale et de traduire son effet protecteur à travers le facteur C.

Par conséquent, les zones présentant un NDVI élevé correspondent à des valeurs faibles du facteur C, traduisant une meilleure protection contre l'érosion, tandis que les zones à faible NDVI présentent des valeurs élevées du facteur C, indiquant une forte vulnérabilité à l'érosion hydrique.

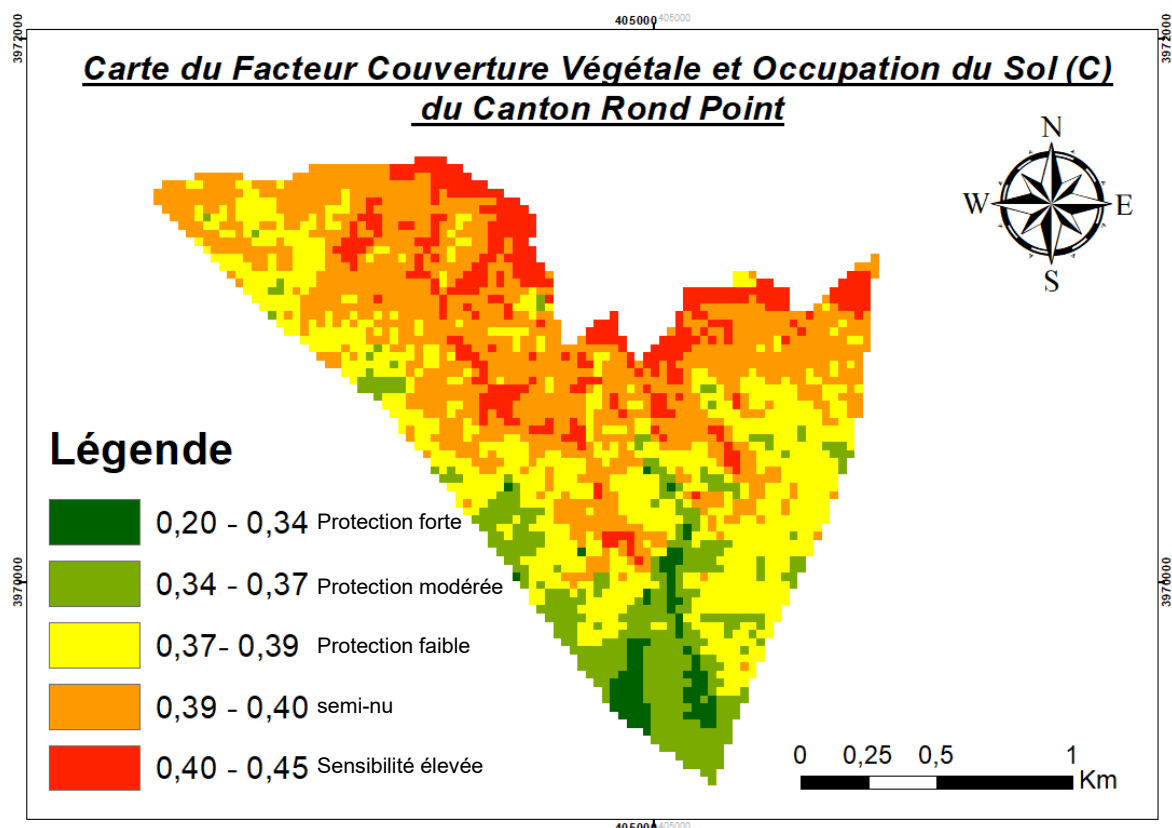


Figure N°23 : Carte du facteur d'couverture végétale C

La carte représente le facteur C qui varie entre les deux valeurs 0.20 à 0.39. On note, que les valeurs grandes (0.45) situées au nord, tandis que les valeurs très faibles sont localisées au sud.

V.3.4. Facteur P : facteur de conservation et d'aménagement

Le facteur P représente l'influence des pratiques de conservation et des techniques d'aménagement du sol sur la réduction de l'érosion hydrique. Il permet d'évaluer l'efficacité des mesures anthropiques mises en place pour limiter le ruissellement et diminuer la perte de sol. En

d'autres termes, ce facteur traduit le degré de protection offert par les aménagements agricoles face à l'action des eaux de pluie.

Ainsi, le facteur P exprime la relation entre les pratiques culturales adoptées et le taux moyen annuel de perte en sol. Selon Sheikh et al. (2011), il permet d'estimer dans quelle mesure les différentes techniques agricoles influencent la dynamique de l'érosion sur les terres cultivées.

Les valeurs du facteur P dépendent principalement des types de pratiques de conservation mises en œuvre, telles que les cultures en courbes de niveau (culture en contour), les cultures en bandes, ainsi que les aménagements en terrasses. Ces techniques contribuent à ralentir le ruissellement de surface, à augmenter l'infiltration de l'eau et à réduire l'énergie érosive de l'écoulement.

Par ailleurs, la valeur du facteur P varie également en fonction de la pente du terrain et des conditions d'utilisation des sols. En effet, plus les pratiques de conservation sont efficaces, plus la valeur de P est faible, ce qui indique une meilleure protection contre l'érosion.

Selon Shin (1999), les valeurs du facteur P sont déterminées en fonction des méthodes de culture et des classes de pente, comme indiqué dans le tableau N°13. Ainsi, ce facteur est généralement compris entre 0 et 1 : une valeur proche de 0 indique une forte efficacité des pratiques de conservation, tandis qu'une valeur proche de 1 correspond à l'absence ou à la faible efficacité de ces pratiques, impliquant une forte sensibilité du sol à l'érosion hydrique.

V.3.5. Facteur R : érosivité potentielle des précipitations

Le facteur R, appelé également facteur d'érosivité des précipitations, constitue l'un des paramètres climatiques fondamentaux dans le modèle USLE. Il exprime la capacité des pluies à générer des processus d'érosion hydrique à travers l'impact des gouttes de pluie et l'énergie du ruissellement qu'elles engendrent. En effet, les précipitations jouent un rôle direct dans le détachement des particules du sol et leur transport vers les zones de dépôt, ce qui en fait un élément déterminant dans la dynamique érosive.

De nombreuses études ont mis en évidence la relation étroite entre l'intensité des pluies et les pertes en sol, en montrant que l'énergie cinétique des précipitations, combinée à leur intensité, constitue le principal moteur de l'érosion hydrique (Renard et al., 1997 ; Loureiro et Coutinho, 2001 ; Zhang et Fu, 2003). Dans la formulation originale de Wischmeier et Smith (1978), le facteur R est calculé à partir de l'énergie cinétique des averses et de l'intensité maximale des

précipitations sur 30 minutes (I30), ce qui nécessite des données pluviographiques détaillées et continues.

Cependant, dans de nombreuses régions, y compris la zone d'étude, ces données fines ne sont pas disponibles en raison de l'absence d'enregistrements pluviographiques à haute résolution dans les stations météorologiques. Cette contrainte limite l'application directe de la méthode classique de Wischmeier et Smith (1978) et impose le recours à des méthodes alternatives basées sur des données pluviométriques plus accessibles.

Dans ce contexte, plusieurs formules empiriques ont été développées afin d'estimer le facteur R à partir des précipitations mensuelles ou annuelles, ou encore à partir de l'indice de Fournier (Kalman, 1970 ; Roose, 1977 ; Arnoldus, 1980 ; Renard et Freimund, 1994). Ces approches simplifiées ont été largement adoptées dans des études de modélisation de l'érosion utilisant l'USLE et ont démontré leur efficacité dans divers contextes climatiques et géographiques (Morschel et Fox, 2004 ; Sadiki et al., 2004 ; El Gouarani et al., 2008).

Dans la présente étude, les données disponibles se limitent aux précipitations mensuelles et annuelles issues de sept stations pluviométriques réparties dans la zone d'étude. Afin de pallier l'absence de données pluviographiques détaillées, nous avons retenu la méthode de Rango et Arnoldus (1987), reconnue pour sa robustesse et sa large utilisation dans les études d'érosion hydrique. Cette méthode a été choisie en raison de la qualité des résultats obtenus par plusieurs auteurs et de son adaptabilité à différents contextes climatiques (Sadiki et al., 2004 ; Toumi et al., 2013).

L'expression utilisée pour le calcul du facteur R est la suivante :

$$\log R = 1.74 \times \log(\sum(P_i^2 / P)) + 1.29$$

où :

P_i désigne les précipitations mensuelles (mm) ;

P représente les précipitations annuelles totales (mm).

Les données de P_i et P ont été calculées à partir des séries pluviométriques des sept stations disponibles dans la zone d'étude. Les résultats obtenus ont ensuite été interpolés spatialement à l'aide d'outils SIG afin de produire une carte continue du facteur R. Cette cartographie permet de mettre en évidence la variabilité spatiale de l'érosivité des précipitations et d'identifier les secteurs les plus exposés au risque d'érosion hydrique au sein du canton de Rond point.

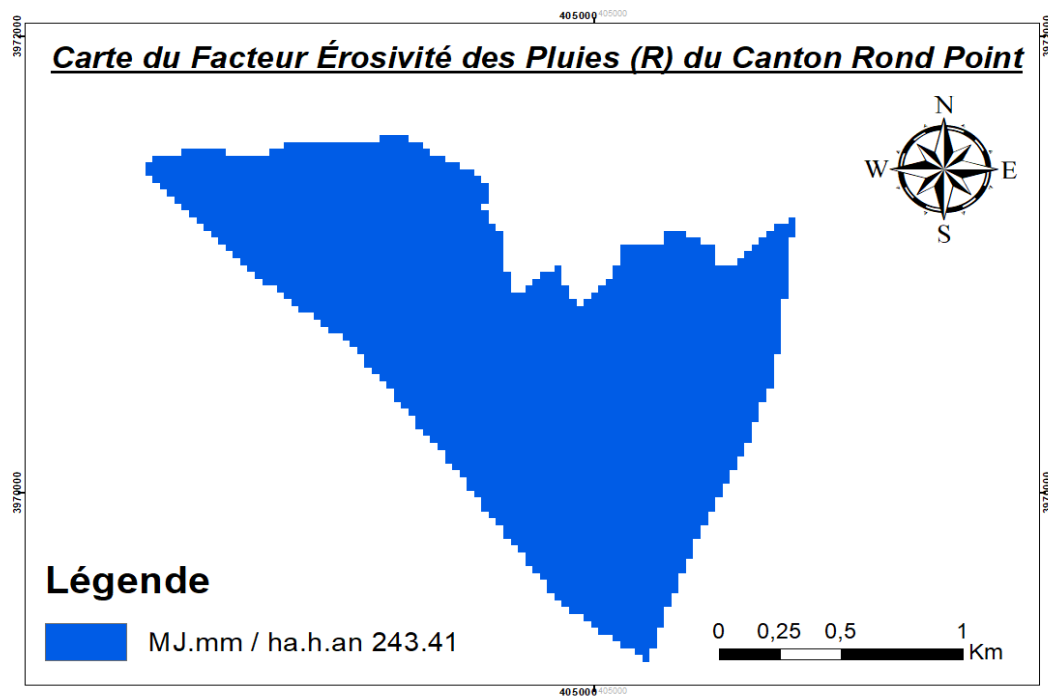


Figure N°24 : Carte du facteur d'érosivité R

Vu que le site de notre étude représente une superficie peu étendue donc la distribution de facteur R prend une valeur de 80,

V.3.6 Perte en sol A

La combinaison des cartes résultantes des différents facteurs (R, K, C et LS) qui composent l'équation USLE de [Wischmeier and Smith \(1978\)](#) a permis d'obtenir la carte du facteur A exprimant la valeur des pertes en sol annuelles moyennes en t/ha/an. La répartition spatiale des pertes en sol montre que le site présente une variabilité en termes d'érosion des sols selon l'influence des différents facteurs contrôlant le phénomène qui sont l'agressivité climatique, la lithologie, la pente, la couverture en végétation et l'action anthropique.

Pour une meilleure visualisation spatiale, nous avons classé la carte des pertes de sol en cinq classes en fonction de leur agressivité.

L'analyse des résultats indique des pertes en sol variant entre 0.00 t/ha/an et 191 t/ha/an.

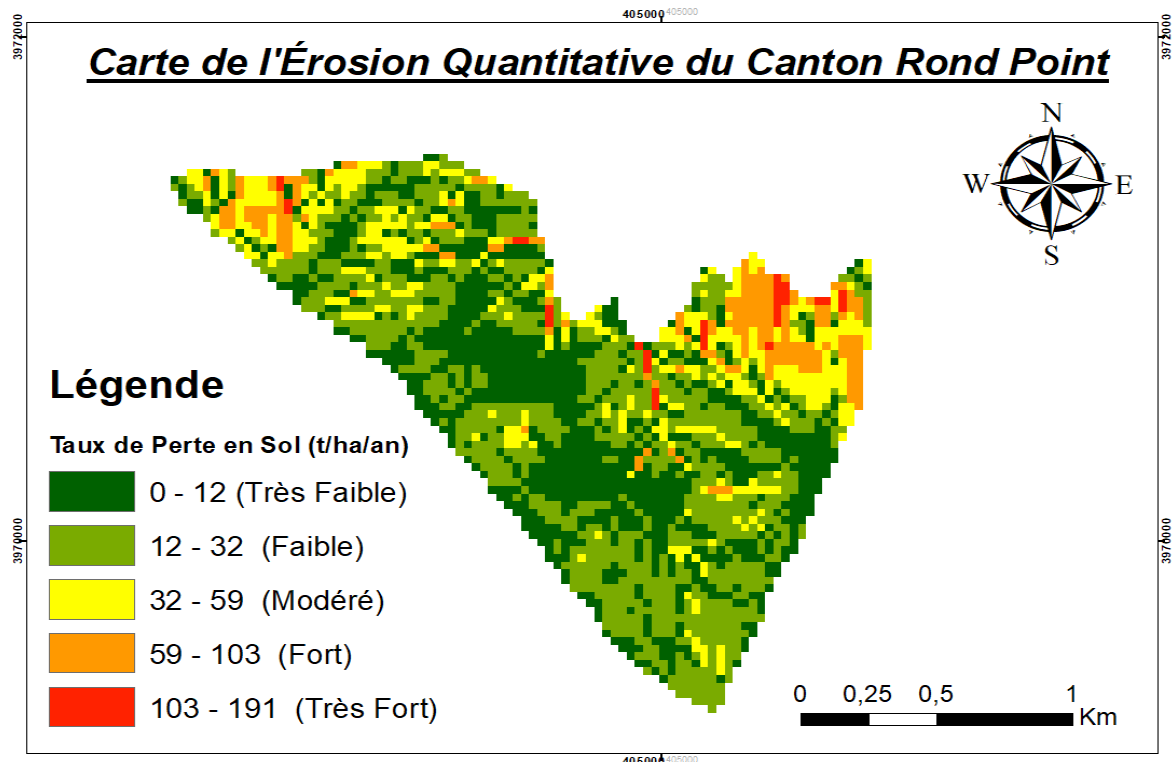


Figure N°25 : Carte des Pertes en sol A

La carte des pertes sol A représente les zones à un risque sévère et très sévère couvrant les classes 3, 4 et 5 qui représentent des superficies faibles du canton Rond Point, tandis que les zones de sensibilité à très faible et faible (les classes 1 et 2) couvrent presque la totalité de la surface du canton.

V.4 Discussion

La combinaison et l'analyse de l'ensemble des données intégrées dans le SIG ont permis d'établir une carte des pertes en sol, exprimées en tonnes par hectare et par an ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$). Les résultats ont été classés en cinq catégories d'intensité érosive : très faible (< 5), faible (5–12), modérée (12–50), sévère (50–100) et extrêmement sévère (> 100). L'analyse spatiale révèle que les classes sévère et extrêmement sévère n'occupent qu'une faible proportion de la superficie totale du bassin versant, tandis que la classe faible présente une extension limitée. En revanche, la classe très faible domine largement l'ensemble de la zone d'étude.

Ces résultats mettent en évidence une forte variabilité spatiale de l'intensité de l'érosion hydrique et des quantités de sédiments produites, en fonction des caractéristiques de l'occupation du sol, de la nature des formations superficielles ainsi que des conditions topographiques, notamment la pente. L'application du modèle USLE a ainsi permis de quantifier et de spatialiser les pertes en sol à l'échelle locale, tout en identifiant les secteurs les plus vulnérables qui nécessitent la mise en œuvre prioritaire de mesures de conservation et de lutte contre l'érosion.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'érosion hydrique constitue l'un des principaux facteurs de dégradation des sols et représente une menace importante pour les ressources naturelles, les écosystèmes forestiers et les activités agricoles, particulièrement dans les régions montagneuses et méditerranéennes de l'Algérie. Malgré les nombreuses études réalisées sur cette problématique depuis plusieurs décennies, plusieurs aspects liés à la dynamique spatio-temporelle de l'érosion demeurent encore insuffisamment maîtrisés, notamment dans les zones forestières sensibles telles que le Parc National de Theniet El Had.

Dans ce contexte, la présente étude a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation combinée des systèmes d'information géographique (SIG), de la télédétection et du modèle universel de perte en sol USLE pour l'évaluation et la cartographie du risque d'érosion hydrique. Cette approche intégrée a facilité l'estimation du facteur d'agressivité des pluies (R), ainsi que l'analyse spatiale des différentes variables intervenant dans le processus érosif.

L'étude bibliographique effectuée a permis de mieux comprendre l'évolution des travaux scientifiques consacrés à l'érosion hydrique, tout en identifiant les principales méthodes et techniques utilisées dans l'évaluation des pertes en sol. Elle a également mis en évidence l'importance croissante des technologies géospatiales dans le suivi environnemental et la gestion durable des ressources naturelles.

L'exploitation des données de télédétection et des outils SIG a permis de traiter, analyser et représenter spatialement les informations géographiques avec une grande efficacité. Ces technologies offrent des possibilités importantes pour la réalisation de cartes thématiques, l'identification des zones les plus vulnérables et l'aide à la prise de décision dans le domaine de la conservation des sols et de la protection des écosystèmes forestiers.

Les résultats obtenus montrent que le modèle USLE demeure l'un des modèles empiriques les plus utilisés au monde pour l'estimation des pertes annuelles en sol. Son intégration dans un environnement SIG améliore considérablement la précision des analyses spatiales et facilite l'évaluation quantitative des risques d'érosion. En raison de sa simplicité d'application, de sa flexibilité et de la fiabilité relative de ses résultats, ce modèle constitue un outil pertinent pour l'étude de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales.

L'analyse des résultats a également permis de mettre en évidence la variabilité spatiale de l'érosion au sein de la zone d'étude, où certaines zones présentent des niveaux élevés de vulnérabilité en raison de la combinaison de plusieurs facteurs, notamment la pente, l'intensité

des précipitations, la nature des sols, la couverture végétale et les pratiques d'occupation du sol. Ces résultats confirment l'importance d'adopter des stratégies de gestion durable afin de limiter les pertes en sol et préserver les ressources naturelles.

Enfin, cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour des recherches futures basées sur l'intégration de modèles plus avancés, de données satellitaires à haute résolution et de techniques d'intelligence artificielle afin d'améliorer davantage la précision des estimations et le suivi des phénomènes d'érosion hydrique. Elle constitue également une contribution scientifique utile pour les gestionnaires, les décideurs et les organismes chargés de la protection de l'environnement et de l'aménagement durable des territoires forestiers.

Références

Références :

- Abdessemed, K. (1984).** *Étude de l'érosion hydrique en zones montagneuses*. Université d'Alger.
- Alexakis, D. D., Hadjimitsis, D. G., & Agapiou, A. (2013).** Integrated use of remote sensing and GIS for soil erosion assessment. *Environmental Earth Sciences*.
- Arar, A., & Chenchouni, H. (2014).** Soil erosion risk assessment using USLE and GIS in semi-arid regions of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998).** Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnoldus, H. M. J. (1980).** *An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation*. In M. De Boodt & D. Gabriels (Eds.), **Assessment of erosion** (pp. 127–132). Wiley.
- Asner, G. P., Clark, J. K., Mascaro, J., Vaudry, R., Chadwick, K. D., & Vieilledent, G. (2012).** Human and environmental controls over aboveground carbon storage in Madagascar. *Carbon Balance and Management*, 7(1), 2.
- Ayalew, G., Teshome, A., & Adgo, E. (2020).** GIS-based soil erosion susceptibility mapping using multi-criteria decision analysis in Ethiopia. *Heliyon*, 6(11), e05449.
- Baize, D., & Girard, M. C. (2020).** *Référentiel pédologique 2020*. Quae.
- Beasley, D. B., & Huggins, L. F. (1982).** ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 25(4), 938–944.
- Belasri, A., & Lakhouili, A. (2016).** Application of RUSLE model for soil erosion estimation. *Journal of African Earth Sciences*.
- Belkaid, M. (1988).** *Étude faunistique du Parc National de Theniet El Had*. Institut National Agronomique.
- Benchettouh, A., Bouanani, A., & Boussaha, M. (2017).** GIS-based assessment of soil erosion risk using RUSLE model in Algeria. *Journal of Environmental Management*.
- Bensaid, A. (2006).** SIG et télédétection pour l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Mina (Algérie). *Télédétection*, 6(2), 157–167.
- Bensaid, A., Houha, B., & Benhamouche, M. (2020).** Étude géomorphologique et dynamique des versants dans les zones montagneuses du nord-ouest algérien. *Revue Algérienne des Sciences de la Terre*, 14(2), 45–58.

- Bensekhria, H., & Bouhata, R. (2022).** Spatial modeling of soil erosion using USLE and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*.
- Berrichi, F., Zaidi, H., Chamakhi, D., & Hadj Sahraoui, O. (2021).** Analyse spatio-temporaire des dégradations et évolution des forêts par télédétection : Cas du parc national de Theniet El Had - Algérie. *Bulletin des Sciences Géographiques de l'INCT*, 25(1), 19–29.
- Bessaoud, O., & Pellissier, J. P. (2021).** *Les transformations de l'agriculture algérienne : Contraintes climatiques et enjeux territoriaux*. CIHEAM Montpellier.
- Bonn, F. (1998).** Remote sensing for erosion assessment in tropical environments. *Geomorphology*, 24(1), 23–40. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00069-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00069-3)
- Borrelli, P., Panagos, P., Ballabio, C., Lugato, E., Weynants, M., & Montanarella, L. (2020).** Towards a pan-European assessment of land susceptibility to wind and water erosion. *Land Use Policy*, 96, 104695. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104695>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017).** An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio, C. (2020).** Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Bouhadeb, C. E., Menani, M. R., Bouguerra, H., & Derdous, O. (2018).** Assessing soil loss using GIS based RUSLE methodology: Case of the Bou Namoussa watershed, North-East of Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 36(1), 27–35. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0003>
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998).** *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011).** *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Guilford Press.
- Casenave, A. and Valentin, C. (1989)** Les états de surface de la zone sahelienne. Influence sur l'infiltration. Coll. Didactiques ORSTOM, Paris, France.
- Chebbani, R., Djilli, K., & Roose, E. (1999).** Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bulletin ORSTOM, Réseau Erosion*, 19, 85-95.

- Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Valle, H. D., Anaya, J., Bella, C. D., ... & Libonati, R. (2008). Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications*, 18(1), 64-79.
- Climate-Data. (2024). *Climate data for Theniet El Had, Algeria*. <https://fr.climate-data.org>
- Demmak, A. (1982). *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale* (Thèse de doctorat). Université Pierre et Marie Curie.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P. D., Freer, J. E., & Beven, K. J. (2010). Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(3), 364-376. .
- Dip, m et zaiz, a. (2011). Apport du sig dans l'étude de la productivité des espèces forestières : cas du cèdre de l'atlas dans le parc national de theniet el had.
- Duchaufour, P. (2001). *Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement* (6e éd.). Dunod.
- El Gouarani, M., et al. (2008). Soil erosion modelling using USLE in Mediterranean environments. *Environmental Geology*.
- ESRI. (2024). *What is ArcGIS?* <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>
- Fellah, S., Benzater, B., Guemou, L., Hachemaoui, A., Benzohra, M. N., Elouissi, A., & Hamimed, A. (2024). Using USLE, GIS and remote sensing for the soil loss assessment in the National Park of Theniet El Had, Algeria. *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 5(2), 178–193. <https://doi.org/10.11594/jaab.05.02.04>
- Feyisa, Dons, K., Meilby, H., et al. (2014). Automated Water Extraction Index (AWEI): A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Food and Agriculture Organization. (2023a). *The State of the World's Forests 2023: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc3650en>
- Food and Agriculture Organization. (2023b). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9910en>
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953–961.

Gérard, J. O. L. Y. (1987). *Traitement informatique de l'image satellitaire. Ingénieur CNRS, Laboratoire de Géographie, CNRS UA, 910.*

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.

Gruber, S., & Peckham, S. (2008). *Land-surface parameters and hydrological modelling using digital elevation models.* Hydrological Processes.

Hansen, Potapov, P. V., Moore, R., et al. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Herold, M., Goldstein, N. C., & Clarke, K. C. (2003). The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote sensing of Environment*, 86(3), 286-302.

Heywood, Cornelius, S., & Carver, S. (2011). *An Introduction to Geographical Information Systems* (4th ed.). Pearson Education.

Howell, B. A., Fryar, A. E., Benaabidate, L., Bouchaou, L., & Farhaoui, M. (2019). Variable responses of karst springs to recharge in the Middle Atlas region of Morocco. *Hydrogeology Journal*, 27(5), 1693-1710.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213.

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis.* Cambridge University Press.

Jackson, Sloan, W., Hutya, L., et al. (2004). Mapping urban vegetation using high-resolution imagery and object-based classification. (*à vérifier selon la référence citée dans votre texte*).

Jemai, S., Khanchoul, K., Bouanani, A., & Nekkache, G. (2021). Application of GIS-based RUSLE model for mapping soil erosion risk in semi-arid regions of Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 80(14), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09784-2>

Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.

Kalman, R. (1970). Rainfall erosivity estimation using climatic indices. *Hydrological Sciences Journal*.

Katerji, N., et al. (1983). Soil cover and erosion relationships. *Agricultural Water Management*.

Kergomard, C. (1990). *La télédétection aérospatiale: une introduction. Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris.*

- Khan, S., & Mohiuddin, K. (2018).** Evaluating the parameters of ArcGIS and QGIS for GIS Applications. *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng*, 7, 582-594.
- Kouli, M., et al. (2009).** GIS-based erosion risk assessment using NDVI and USLE. *Environmental Geology*.
- Kouri, L., & Bensaid, A. (2015).** *Cartographie et dynamique de l'érosion éolienne et de la désertification dans les hautes plaines steppiques algériennes*. Mémoire de Magister, Université de Tiaret / Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), Biskra.
- Koussa, M., & Bouziane, M. T. (2019).** Estimation des paramètres de l'érosion hydrique par Approche SIG/USLE: cas du bassin versant de l'Oued Arab (région de Khenchela, Nord-Est de l'Algérie). *Agriculture and Forestry Journal*, 3(1), 36-45. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3239252>
- Kuhn, C. E. S., Reis, F. A. G. V., Lazaretti, A. F., Zarfl, C., Cabral, V. C., & Grathwohl, P. (2023).** The record and trends of natural disasters caused by gullies in Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 82(22), 524.
- Lal, R. (2003).** Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4), 437–450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Lal, R. (2015)** Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, 7, 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015).** *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015).** *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley.
- Loureiro, N. D., & Coutinho, M. A. (2001).** A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index based on monthly rainfall data. *Journal of Hydrology*, 250(1–4), 12–18.
- Mabit, L., Laverdière, M. R., & Bernard, C. (2002).** L'érosion hydrique: méthodes et études de cas dans le Nord de la France. *Cahiers agricultures*, 11(3), 195-206.
- Maguire, D. J. (1991).** *An overview and definition of GIS. Geographical information systems: Principles and applications*, 1(1), 9-20.
- Mairif, M., Bendifallah, L., & Doumandji, S. (2023).** Diversity of Odonates (Odonata, Anisoptera&Zygoptera) in the Theniet ElHadNationalPark-NorthWest of Algeria. *Journal of Insect Biodiversity and Systematics*, 9(1), 155-182. <https://doi.org/10.52547/jibs.9.1.155>

- Martin, P., Le Bissonnais, Y., Benkhadra, H., Ligneau, L., & Ouvry, J. F. (1997).** Mesures du ruissellement et de l'érosion diffuse engendrés par les pratiques culturales en Pays de Caux (Normandie)/Measurement of runoff and interrill erosion generated by cultivation practices in the Pays de Caux (Normandie). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 3(2), 143-154.
- Mazour, M., & Roose, E. (2002).** Gestion de la biomasse et lutte antiérosive. *Cahiers Agricultures*.
- McCool, D. K., Foster, G. R., & Mutchler, C. K. (1989).** Revised slope length and steepness factors for erosion models. *Transactions of the ASAE*.
- Meddi, M., & Boucefiane, A. (2012).** Apport de la télédétection et des SIG à la cartographie des risques hydro-météorologiques dans les bassins versants de l'Algérie Nord-Occidentale. *Journal algérien des régions arides (JARA)*, 11(2), 45-58.
- Meddi, M., & Hubert, P. (2003).** Impact of climate variability on water resources in Algeria: Example of the Macta watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 477-489.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., & Jakeman, A. J. (2003).** A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18(8-9), 761-799.
[https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1)
- Meziane boualem. (2017).** Les coléoptères saproxyliques des monts d'ouarsenis (nord-ouest algérien) : cas du parc national de theniet el had ; thèse de (magister) en ecologie et dynamique des arthropodes université abou-bakr belkaid tlemcen
- Middleton, N., & Kang, U. (2017).** Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, 9(6), 1053.
- Montanarella, Pennock, D. J., McKenzie, N., et al. (2016).** World's soils are under threat. *SOIL*, 2(1), 79-82. <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986).** Modelling erosion and deposition: Topographic effects. *Journal of Hydrology*, 89(1-2), 1-21.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986).** Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294-1298.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- Morgan, R. P. C. (2005).** *Soil erosion and conservation* (3rd ed.). Blackwell Publishing.
- Morschel, M. M., & Fox, D. M. (2004).** Modeling soil erosion in agricultural landscapes using USLE. *Catena*.

- Nearing, M. A., Xie, Y., Liu, B., & Ye, Y. (2017). Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.04.001>
- Neteler, M., & Mitasova, H. (2008). Open source software and GIS. In *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach* (pp. 1-6). Boston, MA: Springer US.
- OTHMANE, Y. 2019 Application mobile pour système d'informations géographiques
- Ouedraogo, I., et al. (2019). Land use dynamics and soil degradation assessment using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Environmental Management*, 232, 1–12.
- OUMELDJILALI, N. (2021). Thèse de doctorat foresterie, Etude des potentialités subéricoles de la région Nord-Ouest Algérien: Cas de la forêt du Parc National de Theniet-El-Had (W. Tissemsilt).
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Petropoulos, G. P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 83, 36-56.
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8(1), 119–137. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>
- PNTEH , 2014 plan de gestion 2010/2014
- PNTEH , 2018 plan de gestion 2015/2019
- PNTH. (2006). Atlas des parcs nationaux. Direction générale de forêts, parc national de theniet el had, ed diwan
- QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>
- Rango, A., & Arnoldus, H. M. J. (1987). Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*, 36, 1-11.
- Raper, J. F., & Maguire, D. J. (1992). Design models and functionality in GIS. *Computers & Geosciences*, 18(4), 387-394.
- Remini, B. (2017). Siltation of dams in Algeria: Problems and solutions. *Larhyss Journal*.
- Remmas, h. (2014). Contribution à l'étude et à la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique du sous bassin versant d'oued saida (mémoire de master), 66 p.

- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994).** Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE. *Journal of Hydrology*, 157(1–4), 287–306.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997).** *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the RUSLE*. USDA Agriculture Handbook No. 703.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997).** *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Agriculture Handbook No. 703). USDA.
- Richards, J. A. (2013).** *Remote sensing digital image analysis: An introduction* (5th ed.). Springer.
- Roose, E. (1994).** *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*. FAO.
- Roose, E. J. (1977).** *Application of the Universal Soil Loss Equation in West Africa*. ORSTOM.
- Roose, E., Arabi, M., & Brahim, N. (2012).** Érosion hydrique en Afrique du Nord : état des connaissances et perspectives. *Sécheresse*, 23(1), 45–54.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974).** *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA.
- Sabins, F. F. (1999).** Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews*, 14(3–4), 157–183.
- Sadiki, A., et al. (2004).** Application of USLE model for soil erosion assessment in Mediterranean basins. *Land Degradation & Development*.
- Saoud, M., & Meddi, M. (2022).** Mapping of erosion using USLE, GIS and remote sensing in Wadi El Hachem Watershed (Northern Algeria): Case study. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50(3), 569–581.
- Semmoud, A et Zennaki, O. (2010).** Extraction des réseaux routiers à partir des images satellitaires à haute résolution (IKONOS) en utilisant l'approche multi-résolution.
- Sheikh, A. D., et al. (2011).** Soil conservation practices and erosion control. *Environmental Earth Sciences*.
- Shin, Y. (1999).** Soil conservation practices and USLE support practice factor estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Smiri, A. (1987).** *Érosion des sols en milieu méditerranéen*.

- Smith, H. Williams, and M. B. Huggins. "Successful treatment of experimental Escherichia coli infections in mice using phage: its general superiority over antibiotics." *Microbiology* 128.2 (1982): 307-318.
- Stone, J., & Hilborn, D. (2000). *Universal Soil Loss Equation (USLE) and erosion factor estimation*. Agriculture Canada.
- Tashayo, B., Honarbakhsh, A., Akbari, M., & Eftekhari, M. (2020). Land suitability assessment for maize farming using a GIS-AHP method for a semi-arid region, Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(5), 332-338.
- Thomas, R. W., et al. (2005). *ENVI User's Guide: Image Processing and Analysis Software*. ITT Visual Information Solutions.
- Touaibia, B. (2010). Envasement des barrages en Algérie. *Revue des sciences de l'eau*.
- Toumi, S., et al. (2013). Estimation of rainfall erosivity using Rango and Arnoldus method in North Africa. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), 370-384.
- Vrieling, A. (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, 65(1), 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005>
- Walling, D. E., & Fang, D. (2003). Recent trends in suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 111–126.
- Wang, G., Wente, S., Gertner, G. Z., & Anderson, A. (2002). Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images. *International Journal of RemoteSensing*, 23(18), 3649-3667. <https://doi.org/10.1080/01431160110114538>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook No. 537.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agriculture Handbook No. 537). United States Department of Agriculture.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17.
- Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., & Anderson, W. P. (1987). AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 42(3), 167–172.

Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., et al. (2019). Global glacier mass changes and sea-level rise. *Nature*, 568, 382–386.

Zhang, X. C., & Fu, S. (2003). Rainfall erosivity and soil loss relationships. *Soil & Tillage Research*.

Zhou, X., et al. (2008). NDVI-based soil erosion modelling. *International Journal of Remote Sensing*.

SITE wibe :

<https://weatherspark.com/y/47082/Average-Weather-in-Theniet-el-Had-Algeria-Year-Round>

<https://cultivons-les-couverts.agro>

<https://www.fao.org>

Résumé

Parmi les risques qui affectent le sol figure l'érosion hydrique, où les facteurs qui causent l'érosion hydrique ces cinq facteurs : l'intensité des précipitations, la pente et longueur de pente, propriétés du sol, couverture végétale et les activités humaines c'est de cela que dépend l'équation universelle de perte du sol (USLE), dans ce travail, nous avons combiné cinq cartes qui représentent les facteurs qui influencent et causent l'érosion hydrique, ce sont le facteur R d'érosivité, le facteur K d'érodibilité des sols, le facteur topographique LS, le facteur de couverture C et le facteur des pratiques antiérosives P pour obtenir la carte de perte de sol c'est la carte de facteur A exprimées en tonnes par hectare et par an ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$).

Les résultats ont été classés en cinq catégories d'intensité érosive : très faible (< 5), faible (5–12), modérée (12–50), sévère (50–100) et extrêmement sévère (> 100), les résultats ont montré que les classes faible (5–12) et très faible (< 5) sont la dominance d'autre part les classes modérée (12–50), sévère (50–100) et extrêmement sévère (> 100) sont faibles dans la zone étude.

Les mots clés : système d'information géographique, l'érosion hydrique, la cartographie, les facteurs

ملخص :

من بين المخاطر التي تؤثر على التربة التعرية المائية، و تتمثل العوامل المسببة لها في خمسة عوامل رئيسية : شدة الامطار و انحدار المنحدر و طولها ، خصائص التربة، غطاء النباتي و الانشطة البشرية و تعتمد معادلة الفقدان العالمية (USLE) على هذه العوامل، في هذه الدراسة دمجنا خمسة خرائط تمثل العوامل المؤثرة في التعرية المائية و المسببة لها عامل التآكل (R) ، عامل قابلية التربة للتعرية (K) و العامل الطبوغرافي (LS)، عامل الغطاء النباتي (C)، و عامل ممارسات مكافحة التعرية (P) و ذلك للحصول على خريطة فقدان التربة ، و هي خريطة العامل (A)، معبر عنها بوحدة (طن/ هكتار/سنة)

صنفت النتائج الى خمس فئات حسب شدة التآكل : منخفضة جدا (< 5) و منخفضة (5–12) و متوسطة (12–50) و شديدة (50–100) و شديدة للغاية (> 100) و اظهرت النتائج ان الفئتين المنخفضة (5–12) و المنخفضة جدا (< 5) هما الاكثر شيوعا، بينما تعتبر الفئات المتوسطة (50–12) ، شديدة (50–100) و شديدة للغاية (> 100) هم الاقل شيوعا في منطقة الدراسة.

الكلمات المفتاحية : نظم المعلومات الجغرافية ، التعرية المائية ، رسم الخرائط ، العوامل

Abstract :

Among the risks that affect the soil is water erosion, where the factors that cause water erosion are these five factors : rainfall intensity, slope and slope length, soil properties, vegetation cover and human activities, this is what the universal soil loss equation (USLE) depends on, in this work, we combined five maps that represent the factors that influence and cause water erosion : the R factor of erosivity, the K factor of soil erodibility, the topographic factor LS, the cover factor C and the anti-erosion practices factor P to obtain the soil loss map, which is the factor A map, expressed in tonnes per hectare per year ($t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$).

The results were classified into five categories of erosive intensity : very low (< 5), low (5–12) , moderate (12–50), severe (50 – 100), and extremely severe (> 100), the results showed that the low (5–12) and very low (< 5) classes are dominant, while the , moderate (12–50), severe (50 – 100), and extremely severe (> 100) classes are low in the study area.

Keywords : geographic information systems, water erosion, cartography, factors