

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Agronomie

Option : Management des ressources en sols et en eaux

**Cartographie des risques de l'érosion hydrique des sols
et de leurs dynamiques spatio-temporelles dans les oasis
des montagnes : Cas du périmètre de M'Semrir**

Présenté et soutenu publiquement par

M. ABOU TANKO Moussa

Devant le jury composé de :

Pr. MUSTAPHA Naïmi	Président	IAV Hassan II
Pr. SEIF ENNASR Marieme	Rapporteuse	IAV Hassan II
Pr. Mohamed CHIKHAOUI	Corapporteur	IAV Hassan II
Pr. MAATALAH Nassreddine	Examineur	IAV Hassan II
Pr. BURTE Julien	Examineur	IAV/ENA/CIRAD

Septembre 2023



DEDICACES

A mes parents qui m'ont toujours témoigné de leur soutien à tous les niveaux, que
Dieu les protège

A mon très cher frère

A mes très chères sœurs

A tous les membres de ma famille, qui ont toujours su m'encourager à chaque étape
de mon parcours.

A tous mes proches et amis

A toutes ces formidables personnes que j'ai rencontrées au Maroc

A toutes ces personnes bienveillantes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur
soutien

Je vous dédie ce formidable travail !

ABOU TANKO Moussa

REMERCIEMENTS

Avant tout propos, je remercie **DIEU** le **TOUT PUISSANT** pour le souffle de vie, la santé, le courage, la force, la détermination et tous les biens faits qu'il nous comble et continue de nous combler.

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadrante **Pr. SEIF ENNASR Marieme** pour son encadrement, ses conseils et remarques pendant toute la période de ce projet de fin d'études.

Je remercie mon Co-encadrant **Pr. CHIKHAOUI Mohamed** pour ses directives et remarques qui m'ont aidé à la réalisation de mon projet de fin d'études.

Je remercie également **M. HANNADE HOUMMA Ismaguil** pour ses apports qui m'ont été utiles dans le cadre de mon projet de fin d'études.

Je tiens à remercier les différents membres du jury ; **Pr MUSTAPHA Naïmi** (Président), **Pr MAATALAH Nassreddine** (Examineur) et **Pr BURTE Julien** (Examineur) qui ont accepté examiner et évaluer ce travail.

Mes remerciements à **l'Agence Marocaine de Coopération Internationale (AMCI)** pour la coopération mise en place avec mon pays afin que je puisse continuer mes études supérieures au sein de **l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II**.

Je tiens à remercier **l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II** pour toutes les années pendant lesquelles j'ai bénéficié de la formation donnée.

Pour finir, je remercie toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont apporté leur aide dans mon projet de fin d'études.

Ce travail est financé par le **projet Massire** : "Intégration des institutions locales et des multiples sources d'eau pour l'amélioration de la sécurité alimentaire dans les zones rurales intérieures de l'Afrique du Nord par le renforcement des systèmes d'innovation agricole et rurale". Le projet Massire est financé par le **FIDA**, coordonnée par le **CIRAD** et mis en oeuvre par un groupe d'institutions d'enseignement supérieur et de recherche française et maghrébine dont l'IAV Hassan II.

RESUME

Le présent travail traite la cartographie des risques de l'érosion hydrique des sols à M'Semrir ainsi que leurs dynamiques spatio-temporelles. Il a pour but d'identifier les zones à risque d'érosion hydrique à laquelle sont confrontées les zones oasiennes spécialement celle de M'Semrir et de cartographier les formes de cette érosion et leurs impacts environnementales et géophysiques dans la zone. La méthodologie suivie est celle des directives PAP/CAR modifiée en intégrant le facteur de précipitation. Cette approche s'appuie sur l'utilisation des outils SIG-Téledétection, accompagné par des observations sur le terrain. Il s'agit notamment de la question portant sur la préservation des ressources en eaux et en sols face à la dégradation. Les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion révèlent que 60,67% de la zone d'étude est d'une sensibilité à l'érosion élevée à très élevée. Une proportion de 57,93% de la superficie de la zone est d'une sensibilité élevée à l'érosion et 2,73% d'un risque très élevé à l'érosion. Ces zones concernent principalement les terrains en forte pente, soumis à des précipitations les plus intenses dans la zone (facteur R = 276,48 mm/an), avec un couvert végétal composé de plantes épineuses, d'herbes de petite taille ou dégradé, et des formations superficielles de faible résistance. Les unités moyennement sensibles à l'érosion occupent 18,02% de la superficie de la zone et correspondent aux affleurements à pente modérée à faible et d'une intensité de précipitations moyenne à faible. En revanche, les classes des sols à risque faible et très faible (19,1% de la zone) sont localisées principalement au niveau des zones de cultures, de pentes douces et nulles à basses altitudes où l'intensité des précipitations est faible. L'approche descriptive montre plusieurs formes d'érosion hydrique dans la commune de M'Semrir, la plus dominante étant l'érosion concentrée, qui couvre 94,83% de la surface totale des formes érosives. Les zones instables sont représentées par différents types d'érosion, avec l'érosion en rigole occupant 75,65% de la surface menacée, suivie par l'érosion concentrée en ravinements (19,18%), l'érosion en nappe (5,16%). La carte consolidée de l'érosion, qui intègre toutes les données prédictives et descriptives, met en évidence les zones à risque élevé à très élevé d'érosion, principalement là où l'érosion en rigole est prédominante. L'érosion en ravins est observée dans les zones avec un état érosif variant de moyen à très élevé. L'érosion en nappe se manifeste principalement dans les zones où la pente est nulle à faible. L'analyse de la dynamique spatio-temporelle des risques de l'érosion des sols entre 2000, 2013 et 2022, met en évidence des variations significatives du risque d'érosion au fil du temps, avec des proportions variables des différents états érosifs. On constate une régression des états érosifs de très faibles à moyennes pour les années 2000, 2013 et 2022, ainsi qu'une augmentation des états érosifs élevés à très élevés. Cette variation de la superficie des zones est attribuable à la diminution du couvert végétal protecteur et à l'intensité accrue des précipitations, en particulier au nord de la zone. En 2000,

les états érosifs élevés représentent 44,88 %, comparés à 57,47 % en 2013 et 57,93 % en 2022. Ces variations sont étroitement liées à l'évolution de l'érodibilité en fonction de l'intensité des précipitations et des fluctuations du couvert végétal. Une évolution de la superficie des zones d'habitation est observée entre 2000, 2013 et 2022, représentant respectivement 0,96 %, 1,1 % et 1,42 % de la superficie totale. Cela reflète la présence humaine dans la zone et témoigne de l'influence de l'activité humaine sur les facteurs responsables de l'érosion des sols. En définitive, ce résultat met en évidence la dynamique active du processus d'érosion sur les versants de la zone de M'Semrir.

Mots clés : Erosion hydrique, Dynamique spatio-temporelle, Cartographie, PAP/CAR, Sol, SIG-Téledétection, Oasis de M'Semrir.

ABSTRACT

The present study focuses on the mapping of water erosion risks in M'Semrir soils and their spatiotemporal dynamics. Its aim is to identify areas at risk of water erosion faced by oasis areas, especially that of M'Semrir, and to map the forms of this erosion and its environmental and geophysical impacts within the area. The methodology followed is based on modified PAP/CAR guidelines that incorporate the precipitation factor. This approach relies on the use of GIS-Remote Sensing tools, accompanied by field observations. It particularly addresses the issue of preserving water and soil resources in the face of degradation. The results of the vulnerability assessment to erosion reveal that 60.67% of the study area exhibits a high to very high sensitivity to erosion. Specifically, 57.93% of the total area shows a high sensitivity to erosion, while 2.73% indicates a very high risk of erosion. These zones primarily encompass steep terrains subject to the most intense precipitation in the region (R factor = 276.48 mm/year), with a vegetation cover comprising thorny plants, small-sized grasses, or degraded vegetation, along with superficial formations of low resistance. Moderately erosion-sensitive units occupy 18.02% of the area and correspond to outcrops with moderate to low slopes and a moderate to low intensity of precipitation. On the other hand, soil classes with low and very low risk (19.1% of the area) are primarily located in cultivation areas, gentle and flat slopes, and low-altitude regions where precipitation intensity is low. The descriptive approach reveals several forms of water erosion in the municipality of M'Semrir, with the most dominant being concentrated erosion, covering 94.83% of the total surface area of erosive forms. Unstable areas are characterized by different types of erosion, with gully erosion occupying 75.65% of the threatened area, followed by concentrated erosion in rills (19.18%), and sheet erosion (5.16%). The consolidated erosion map, integrating all predictive and descriptive data, highlights areas with a high to very high risk of erosion, primarily where gully erosion is predominant. Ravine erosion is observed in areas with an erosion state ranging from moderate to very high. Sheet erosion primarily occurs in areas where the slope is flat to low. The analysis of spatiotemporal dynamics of soil erosion risks between 2000, 2013, and 2022 highlights significant variations in erosion risk over time, with varying proportions of different erosion states. A regression from very low to moderate erosion states is observed for the years 2000, 2013, and 2022, accompanied by an increase in high to very high erosion states. This change in the area of erosion zones can be attributed to the decrease in protective vegetation cover and increased precipitation intensity, especially in the northern part of the area. In 2000, high erosion states account for 44.88%, compared to 57.47% in 2013 and 57.93% in 2022. These variations are closely linked to the evolution of erodibility based on precipitation intensity and fluctuations in vegetation cover. An evolution in the area of habitation zones is observed between 2000, 2013, and 2022, representing 0.96%, 1.1%, and 1.42% of the total area, respectively. This reflects human presence in the area and underscores the influence of human activity on the factors responsible for soil erosion. Finally, this result highlights the active dynamics of the erosion process on the slopes of the M'Semrir area.

Keywords : Water erosion, Spatio temporal dynamics, Mapping, PAP/CAR, Soil, GIS-Remote Sensing, M'Semrir Oasis.

SOMMAIRE

DEDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME	III
ABSTRACT	V
SOMMAIRE	VI
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES CARTES	XI
LISTE DES FUGURES	XII
LISTE DES PHOTOS	XIII
LISTE D'ABREVIATIONS	XIV
INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE DU SUJET	1
I. Partie I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1 Généralité sur l'érosion	5
I.2 Facteurs de l'érosion hydrique	7
I.2.1 Facteur climatique	7
I.2.2 Facteur topographie	8
I.2.3 Facteur lithologie (érodibilité des sols)	8
I.2.4 Facteur couvert végétal	9
I.2.5 Facteurs anthropiques.....	10
I.3 Processus de l'érosion hydrique	10
I.3.1 Le détachement.....	10
I.3.2 Le transport	11
I.3.3 Dépôt	12
I.4 Formes de l'érosion hydrique.....	12
I.4.1 Erosion en Nappe	12
I.4.2 Erosion linéaire	13
I.4.2.1 Erosion en rigoles	13
I.4.2.2 Erosion en ravins	14
I.4.3 Erosion en masse.....	14
I.4.4 Erosion en berge.....	14
I.5 Conséquences de l'érosion hydrique	15
I.6 Modélisation de l'érosion hydrique	16
I.6.1 SIG-Téledétection pour la cartographie du risque d'érosion hydrique.....	16
I.6.2 Modèle des Directives PAP/CAR.....	17

I.7	Les oasis des montagnes	19
I.7.1	Les caractéristiques générales des oasis des montagnes.....	19
I.7.2	Les contraintes des oasis des montagnes	21
II.	Partie II : CARACTERISATION DE LA ZONE D'ETUDE (M'SEMRIR).....	23
II.1	Situation Géographique.....	24
II.2	Contexte climatique	25
II.2.1	Températures	25
II.2.2	Précipitations.....	25
II.2.2.1	Etude des données historiques des précipitations : 1981 à 2022	27
II.2.3	Evaporation	28
II.2.4	L'humidité relative.....	28
II.3	Cadre hydrologique	29
II.4	Cadre géologique.....	30
II.5	Ressources en sols.....	33
II.6	Cadre Topographique	34
II.6.1	Répartition spatiale des altitudes.....	34
II.6.2	Répartition spatiale des pentes.....	36
II.7	Couverture végétale	37
II.7.1	Cartographie du couvert végétal.....	38
II.8	Cadre socioéconomique :	41
II.8.1	Population et démographie :.....	41
II.8.2	Structures foncières et statuts juridiques des terres	42
II.8.3	Agriculture	42
II.8.4	L'élevage	43
II.8.5	Organisation du secteur agricole dans la zone.....	44
II.9	Coulés de laves torrentielles à M'Semrir.....	44
III.	PARTIE III : CARTOGRAPHIE DE L'ÉROSION HYDRIQUE	46
III.1	METHODES ET MATERIELS	47
III.1.1	Matériels.....	48
III.1.2	Méthodologie	49
III.1.2.1	Principe de base de l'étude : Modèle modifié des directives PAP/CAR	49
III.1.2.2	Cartographie numérique	49
III.1.2.3	Cartographie de terrain	49
III.1.2.4	Schéma méthodologique général.....	50
III.2	RESULTATS ET DISCUSIONS	52
III.2.1	Evaluation de l'érosion hydrique par l'approche PAP/CAR.....	52

III.2.1.1	L'approche prédictive	52
III.2.1.1.1	Carte des classes de pentes selon les directives PAP/CAR.....	52
III.2.1.1.2	Carte des classes des formations lithologiques selon des directives PAP/CAR	54
III.2.1.1.3	Réalisation de la carte de stabilité du terrain	57
III.2.1.1.4	Réalisation de la carte d'érosivité des précipitations	59
III.2.1.1.5	Réalisation de la carte d'érodibilité du terrain.....	60
III.2.1.1.6	Carte d'occupation du sol selon le modèle PAP/CAR.....	63
III.2.1.1.7	Carte de la densité du couvert végétal.....	65
III.2.1.1.8	Réalisation de la carte de protection des sols.....	67
III.2.1.1.9	Réalisation de la carte des états érosifs potentiels de M'Semrir	69
III.2.1.2	L'approche descriptive	71
III.2.1.2.1	Les différents types d'érosion hydrique dans la zone de M'Semrir	72
III.2.1.2.1.1	Erosion en Nappe	72
III.2.1.2.1.2	Erosion en rigole.....	73
III.2.1.2.1.3	Erosion en ravin.....	74
III.2.1.2.1.4	Sapement des berges	75
III.2.1.2.2	Carte des formes d'érosion hydrique de la zone de M'Semrir	76
III.2.1.3	L'approche d'intégration : Carte consolidée d'érosion	77
III.2.2	Etude de la dynamique du risque de l'érosion des sols de 2000 à 2022.....	79
III.2.2.1	Erosivité des précipitations de 2000 à 2022.....	79
III.2.2.2	Risque d'érodibilité des sols de 2000 à 2022	80
III.2.2.3	Protection de sol de 2000 à 2022	81
III.2.2.4	Dynamique du risque de l'érosion de 2000 à 2022.....	82
IV.	Partie IV : IMPACTS DE L'EROSION ET PRATIQUES D'AMENAGEMENTS	
	ANTIEROSIFS A M'SEMRIR.....	84
IV.1	Les impacts d'érosion hydrique au niveau de M'Semrir :	85
IV.1.1	Dégradation des sols	85
IV.1.2	Destruction du couvert végétal	87
IV.1.3	Génération des risques.....	88
IV.1.4	Envasement de barrage et séguias.....	90
IV.2	Pratiques d'aménagements dans la zone de M'Semrir.....	92
IV.2.1	Quelques aménagements existants visités	92
IV.2.1.1	Seuils en pierres.....	92
IV.2.1.2	Seuils en gabion.....	92
IV.2.1.3	Seuils en maçonnerie.....	93
IV.2.1.4	Aménagements en terrasses agricole	93
IV.2.1.5	Boisement.....	94

IV.2.1.6	Carte des pratiques d'aménagements antiérosifs visités.....	95
IV.2.2	Proposition des pratiques d'aménagements	97
IV.2.2.1	Mesures mécaniques.....	98
IV.2.2.1.1	Seuil en pierres.....	99
IV.2.2.1.2	Seuil en gabion	99
IV.2.2.1.3	Les terrasses de cultures	100
IV.2.2.2	Les mesures biologiques.....	101
IV.2.2.2.1	Végétalisation.....	101
IV.2.2.2.2	Boisement	102
IV.2.2.3	L'efficacité des aménagements	103
CONCLUSION.....		105
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		107
ANNEXES.....		112
Annexes 1	113
Annexes 2 :	116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classes des pentes PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)	53
Tableau 2 : Classes des litho-faciès selon PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)	55
Tableau 3 : Matrice classes pentes vs Degré de friabilité PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)	57
Tableau 4 : Légende des classes de stabilité du terrain par le modèle (PAP/CAR, FAO, 1998)	58
Tableau 5 : Matrice Erosivité x Stabilité du terrain	61
Tableau 6 : Légende d'érodibilité	61
Tableau 7 : Classes d'occupation des sols PAP/CAR.....	63
Tableau 8 : Classes de densité de recouvrement végétal PAP/CAR.....	65
Tableau 9 : Matrice Occupation du sol vs recouvrement végétal PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998).....	67
Tableau 10 : Légende des classes de protection selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)	67
Tableau 11 : Matrice degré de protection vs degré d'érodibilité	69
Tableau 12 : Légende des états érosifs potentiels selon PAP/CAR	69
Tableau 13 : Liste des coordonnées des aménagements visités dans la zone de M'Semrir.....	96

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Localisation de la zone de M'Semrir	24
Carte 2 : Précipitations annuels historiques de la zone de M'Semrir	28
Carte 3 : Réseau hydrographique de M'Semrir	30
Carte 4 : Géologie de M'Semrir	33
Carte 5 : Litho-faciès de M'Semrir	34
Carte 6 : Modèle Numérique de Terrain de la zone d'étude	35
Carte 7 : Hypsométrie de la zone de M'Semrir	35
Carte 8 : Distribution spatiale des classes des pentes dans la zone de M'Semrir	37
Carte 9 : NDVI de la zone de M'Semrir	39
Carte 10 : Composition en fausses couleurs de la zone d'étude, en canal (8.4.3)	40
Carte 11 : Recouvrement végétal de la zone de M'Semrir	41
Carte 12 : Laves torrentielles à M'Semrir	45
Carte 13 : Classes de pentes en pourcentage selon PAP/CAR	53
Carte 14 : Classes de friabilité des matériaux lithologiques	56
Carte 15 : Stabilité des terrains à M'Semrir	58
Carte 16 : Erosivité des précipitations	60
Carte 17 : Erodibilité des terrains à M'Semrir	62
Carte 18 : Occupation des sols PAP/CAR	64
Carte 19 : Densité de recouvrement végétal de M'Semrir PAP/CAR	66
Carte 20 : Degré de protection des sols PAP/CAR	68
Carte 21 : Etats érosifs potentiels de M'Semrir PAP/CAR	70
Carte 22 : Formes de l'érosion dans la zone de M'Semrir	76
Carte 23 : Intégration des données prédictives et descriptives (consolidée) de l'érosion à M'Semrir	78
Carte 24 : Erosivité des précipitations de 2000 à 2022	79
Carte 25 : Variation des risques d'érodibilité de 2000 à 2022	80
Carte 26 : Dynamique de la protection du sol de 2000 à 2022	81
Carte 27 : Dynamique des risques d'érosion hydrique des sols de 2000 à 2022	82
Carte 28 : Les aménagements existants visités à M'Semrir	95
Carte 29 : Formes d'érosion avec protection des sols et aménagements	97
Carte 30 : Scénarios d'aménagements antiérosifs à M'Semrir	104

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Image illustrant le processus de l'érosion hydrique (Mokhtari, 2017)	10
Figure 2 : Images illustrant l'effet splash. (Leguédois, 2003)	11
Figure 3 : Formes d'érosion hydrique (SlidePlayer, 2011).....	15
Figure 4 : Courbe de température de M'Semrir	25
Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles	26
Figure 6 : Diagramme Ombrothermique de M'Semrir.....	27
Figure 7 : Taux d'humidité relative.....	29
Figure 8 : Schéma général de la méthode de travail	47
Figure 9 : Schéma modifié de l'approche PAP/CAR.....	51
Figure 10 : Répartition spatiale des classes des pentes	54
Figure 11 : Répartition spatiale des classes de friabilité des matériaux en pourcentage	57
Figure 12 : Répartition spatiale des classes de stabilité des terrains (%).....	59
Figure 13 Répartition spatiale de l'érodibilité des sols	62
Figure 14 : Répartition spatiale des classes d'occupation des sols (%)	64
Figure 15 : Répartition spatiale de la couverture végétale de M'Semrir	67
Figure 16 : Répartition des classes de protection des sols à M'Semrir	69
Figure 17 : Répartitions spatiale des états érosifs potentiels de la zone de M'Semrir	71
Figure 18 : Répartition spatiale des formes en fonction de la superficie.....	77
Figure 19 : Spatialisation des risques d'érodibilité.....	81
Figure 20 : Spatialisation des risques d'érosion sur trois périodes	83

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Végétation dans l'Oasis de M'Semrir	38
Photo 2 : Agriculture dans la zone de M'Semrir.....	43
Photo 3 : Elevage dans la zone de M'Semrir	44
Photo 4 : manifestation de l'érosion en Nappe dans la zone de M'Semrir.....	72
Photo 5 : Manifestation de l'érosion en rigole dans la zone de M'Semrir	73
Photo 6 : Manifestation de l'érosion en ravinements à M'Semrir	74
Photo 7 : Sapement des berges à M'Semrir	75
Photo 9 : Etat de dégradation des sols par l'érosion à M'Semrir	87
Photo 10 : Effet sur le couvert végétal dans la zone de M'Semrir	87
Photo 11 : Destruction des aménagements et chutes des blocs	88
Photo 12 : Images des inondations de 2011 et en janvier 2012, opérations de désensablement (Commune M'Semrir, 2022).....	90
Photo 13 : Barrage totalement envasé.....	90
Photo 14 : Impacts de l'érosion sur les séguias.....	91
Photo 15 : Seuils en pierres sèches de la zone de M'Semrir	92
Photo 16 : Seuils en gabions de la zone de M'Semrir	93
Photo 17 : Seuils en maçonneries dans la zone de M'Semrir	93
Photo 18 : Les terrasses de la zone de M'Semrir	94
Photo 19 : Plantation d'arbres pour la protection des versants à M'Semrir	95
Photo 20 : Seuils en pierres installés sur la zone de M'Semrir.....	99
Photo 21 : Seuils en gabions installé sur la zone.....	99
Photo 22 : Plantations abandonnées ; manque d'eau	100
Photo 23 : Terrasses agricoles dans la zone de M'Semrir	101
Photo 24 : Végétation sur les zones des parcours	101
Photo 25 : Aménagements en genévrier dans la zone de M'Semrir.....	103

LISTE D'ABREVIATIONS

PAP/CAR :	Programme d'Action Prioritaire du Centre d'Activités Régionales
FAO :	Food and Agriculture Organization
PAM :	Programme d'Alimentation Mondial
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
SIG :	Systèmes d'Informations Géographique
DMS :	Degré-Minutes-Secondes
HCP :	Haut-Commissariat au Plan
NDVI :	Normalized Difference Vegetation Index
PIR :	Proche Infra Rouge
RGB :	Red-Green-Blue
PFE :	Projet de Fin d'Etudes
CMV :	Centre de Mise en Valeur (Agricole)
SAU :	Superficie Agricole Utile
AUEA :	Associations d'Usagers de l'Eau Agricole
ORMVAO :	Office Régional de Mise en Valeur Agricole d'Ourzazate
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
SRTM :	Shuttle Radar Topography Mission
NGA :	National Geospatial-Intelligence Agency
NASA :	National Aeronautics and Space Administration
ESA :	Agence Spatiale Européenne
GPS :	Global Positioning System
ENVI :	Environment for Visualizing Images
DRS :	Défense et Restauration des Sols
GCES :	Gestion Conservatoire des Eaux et du Sol
IRD :	Institut de Recherche et du Développement
RUSLE :	Revised Universal Soil Loss Equation

INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE DU SUJET

Le sol et l'eau sont des ressources précieuses pour l'humanité, mais dans les régions semi-arides, l'érosion hydrique peut causer une perte irréversible de sol.

Au Maroc, ce phénomène de l'érosion hydrique est le principal facteur de dégradation des sols. En effet, les précipitations y sont souvent intenses mais de courte durée, ce qui rend les sols particulièrement vulnérables à l'érosion (Mokhtari, 2017). Au Maroc, selon une étude de la FAO en 1990, la situation continue de s'aggraver : 40% des terres sont menacées par ce phénomène (Hili et al., 2017), ce qui affecte l'agriculture qui représente une part importante de l'économie marocaine, en réduisant le potentiel de production agricole et en détériorant la qualité de l'eau (Ennassiri, 2021). Les sols fragiles, la forte pente et la diminution du couvert végétal protecteur sont autant de facteurs qui aggravent la situation (Brahim, 2018).

L'érosion des sols due à la pluie et au ruissellement est un problème répandu dans les pays méditerranéens (Khemiri & Jebari, 2021).

L'utilisation de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique (SIG) est de plus en plus courante dans l'étude des phénomènes de surface. Ces outils sont devenus indispensables dans les systèmes d'aide à la décision interactifs et opérationnels pour la gestion des risques. Avant de mettre en œuvre des mesures efficaces de conservation des sols, il est primordial de procéder à une évaluation spatiale du risque d'érosion.

La problématique de notre étude concerne la dégradation des sols par le phénomène de l'érosion hydrique à M'Semrir.

Dans le cadre du développement durable, les politiques d'aménagement du territoire devraient pleinement intégrer les enjeux environnementaux, en particulier la dégradation des sols. L'érosion hydrique, l'une des contraintes majeures au développement durable, représente la forme la plus importante de dégradation des sols et menace quasiment l'ensemble du territoire marocain. La commune de M'Semrir, située au cœur des hautes montagnes du Haut Atlas, présente toutes les conditions propices au déclenchement et développement d'un tel processus : un relief montagneux et accentué où les surfaces planes sont très rares, des variations climatiques irrégulières dans le temps et l'espace, une faible densité du couvert végétale, des sols peu résistants à l'écoulement et des crues violentes. L'érosion est surtout importante au cours d'épisodes violents de précipitations. Ce phénomène engendre des risques d'instabilité des versants et menace les infrastructures, notamment les routes, les canaux d'irrigation et le barrage. L'élévation du lit des cours d'eau et l'augmentation du risque d'inondation, ainsi que l'ensablement des infrastructures d'irrigation, sont également des conséquences à prendre en compte. La diminution de la fertilité des sols en raison de la perte de la

couche arable, de l'appauvrissement des éléments nutritifs et de la matière organique, ce qui conduit à la régression de la production agricole.

Face au manque d'études de ce genre dans la zone, au potentiel agricole de la commune, à la vulnérabilité socio-économique de la population locale et à la fragilité des infrastructures, le **projet Massire**, dans le cadre de sa mission visant à améliorer la sécurité alimentaire dans les zones oasiennes grâce à la collaboration de ses partenaires, a proposé de mener une étude portant sur les risques liés à l'érosion hydrique dans la région.

Notre étude présente une méthode pour la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique en combinant des données de terrain, des données des précipitations, des données de télédétection et des données topographiques.

Les objectifs de cette étude sont :

- Identifier les zones vulnérables à l'érosion des sols ;
- Cartographier les différentes formes d'érosion hydrique qui existent dans la zone de M'Semrir.
- Identifier des impacts environnementales et géophysiques de l'érosion à M'Semrir ;
- Etudier la dynamique spatio-temporelle des risques d'érosion dans la zone de M'Semrir ;
- Produire un document méthodologique et informatif pour promouvoir la gestion durable de l'érosion et le développement de la zone.

Cette analyse prendra en compte les facteurs déterminants de l'érosion hydrique. Les résultats de cette étude seront utiles pour orienter les priorités d'intervention et de planification afin de prévenir ou réduire les risques naturels associés à l'érosion des sols.

Ce projet de fin d'étude est structuré en quatre parties :

- La première partie offre une synthèse bibliographique des processus d'érosion hydrique ainsi que de leur modélisation.
- La deuxième partie se concentre sur la description du cadre général de la zone d'étude (M'Semrir).
- La troisième partie détaille la méthodologie utilisée pour cette étude, ainsi que les résultats obtenus et leur analyse à travers la zone de M'Semrir.
- Enfin, la quatrième partie concerne les impacts environnementales et géophysiques de l'érosion à M'Semrir et les pratiques d'aménagements.

I. Partie I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Généralité sur l'érosion

L'érosion hydrique des sols est un phénomène courant et souvent de longue durée, qui est soumis à l'influence de nombreux facteurs complexes.

L'érosion désigne l'ensemble des processus naturels qui modifient la surface ou la composition des sols, souvent en enlevant tout ou partie des matériaux de terrain (Arabi, 2021). L'érosion hydrique des sols se produit lorsque les particules du sol sont détachées et transportées par la pluie et le ruissellement, généralement de manière combinée. Ce phénomène survient lorsque les pluies sont tellement intenses qu'elles ne peuvent pas s'infiltrer dans le sol, entraînant ainsi l'érosion de la surface et le transport des particules de terre (Souilah, 2016). Ces particules transportées correspondent à un déplacement de la matière sous l'action de l'eau. Les flux de matière générés sont transférés sur la surface continentale et conduisent à l'arasement des zones montagneuses et à la formation de riches plaines alluviales. L'érosion des sols lorsqu'elle correspond à un état d'équilibre entre la formation des sols (pédogenèse) et le mouvement des particules meubles, elle est qualifiée de naturelle ou géologique (Mokhtari, 2017).

L'érosion des sols est une forme importante de dégradation des terres qui affecte négativement la qualité et la stabilité des sols ainsi que la fertilité des terres en raison de l'érosion des couches supérieures arables des sols (Baumhardt et al., 2015 ; Mokhtari, 2017 ; Mondal et al., 2017).

La question de l'érosion hydrique revêt une importance particulière dans les régions méditerranéennes et semi-arides (Hajji et al., 2019; Damien, 2021). Dans les zones montagneuses, la forte inclinaison du terrain et la faible couverture du sol amplifient les phénomènes d'érosion hydrique (Tadrist et al., 2016). Les écosystèmes de montagne sont considérés comme fragiles en raison de la faible fertilité de leurs sols et de leur vulnérabilité élevée à l'érosion. Les activités humaines et les facteurs écologiques ont conduit à un niveau avancé de dégradation de ces zones, ce qui est encore accentué par les effets des changements climatiques (Youssef et al., 2021).

Le Maroc est réputé par des événements érosifs remarquables, et pour des raisons écologiques, il est considéré comme un milieu naturel très vulnérable. En effet, les précipitations y sont souvent sous forme d'orages, les sols sont facilement affectés et insuffisamment protégés pendant la saison des pluies, le relief est très accidenté, les roches sont tendres et les pentes, bordées de vallées étroites (Yadari et al., 2019). La gravité joue un rôle essentiel dans l'ampleur de l'érosion, et la pente est un facteur clé qui fournit l'énergie nécessaire à l'eau pour exercer son pouvoir érosif (Dumas, 2010).

Cette vulnérabilité des sols face aux événements érosifs est confirmée par (Toumi et al., 2013) dans le contexte méditerranéen en général. L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène

très répandu au Maroc. En raison de son emplacement géographique, le pays est soumis à des conditions climatiques variées, allant des zones arides et semi-arides du sud aux zones plus humides du nord.

L'érosion hydrique est un problème environnemental significatif dans les régions arides et semi-arides. Dans le Haut Atlas, cette érosion est amplifiée par la présence de sols nus, de terrains fragiles et de pentes exposées aux précipitations violentes. Le Haut Atlas central est particulièrement touché par ce phénomène, ce qui en fait l'une des régions marocaines les plus vulnérables à l'érosion hydrique (Elaloui et al., 2015).

Lorsque la pluie tombe sur des sols nus, elle entraîne une grande quantité d'eau de ruissellement, ce qui peut rapidement transformer les rigoles en ravines (Ouedraogo et al., 2019). Les crues qui en résultent peuvent causer des inondations, des glissements de terrain et un envasement rapide des barrages (qui ont une durée de vie moyenne de 30 à 60 ans), ainsi que la destruction de routes et d'autres infrastructures (Yadari et al., 2019). Les gouttes de pluie dans les régions humides ont une énergie cinétique considérablement élevée. Cela est dû au fait que les pluies tropicales ont un pouvoir érosif de 2 à 6 fois supérieur à celui des zones tempérées (Dumas, 2010).

L'eau et le vent sont les principaux agents qui contribuent à l'érosion, entraînant une perte importante de sol chaque année. Ce processus peut se dérouler lentement et insidieusement, ou bien prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte considérable de sol arable. Toutes les conditions sont réunies pour déclencher et développer un tel processus : les irrégularités climatiques, la faible densité du couvert végétale, la nature des sols qui est peu résistante à l'écoulement et la violence des crues. L'érosion est surtout importante au cours d'épisodes violents de précipitations. Les effets de l'érosion hydrique sont principalement observés dans les régions montagneuses où la dégradation du terrain est accentuée par des précipitations abondantes, la disparition de la végétation naturelle, des pentes abruptes et des pratiques agricoles peu respectueuses de l'environnement (Jihad, 2010). Elle constitue une des contraintes majeures au développement durable (Elaloui, 2017).

En réalité, l'érosion des sols a de graves répercussions sur la sécurité alimentaire, la capacité de production des sols, la rétention d'eau, la qualité de l'eau de surface, l'attrait du paysage et l'équilibre écologique naturel (Karidjo et al., 2018). La mise en œuvre de pratiques de conservation est la solution pour remédier à ce problème (Toumi et al., 2013).

Au Maroc, la dégradation des sols et l'érosion dans les bassins versants ont des conséquences considérables sur l'économie et l'environnement (Naimi et al., 2005). Les sols sont soumis à une érosion qui dépasse largement les normes internationales, avec une moyenne de dégradation

spécifique variant entre 212 et plus de 2 000 t/km²/an. Ces taux sont particulièrement élevés dans les bassins du Nord et du Nord-Ouest, où ils excèdent les 2 000 t/km²/an (Elaloui, 2017). Selon une enquête menée par la FAO en 1990, environ 40% des terres sont touchées avec des taux d'érosion allant de 2 à 59 tonnes par hectare et par an (Zouagui et al., 2018 ; Hili et al., 2020) . Et environ 500 millions d'hectares de terres en Afrique ont été dégradés depuis les années 1950, affectant environ 65% des terres agricoles dans la région (Mokhtari, 2017). Cette dégradation des sols entraîne une réduction de la productivité des terres ainsi que des impacts en aval, tels que l'envasement des barrages et des lacs de colline. Cette situation se traduit par une dégradation des milieux naturels et une diminution de la diversité biologique et de la productivité forestière (Zouagui et al., 2018). Les populations rurales, en particulier celles vivant dans les zones rurales, sont menacées par cette situation (Karidjo et al., 2018). Sur le plan humain, la situation est alarmante pour les populations rurales qui subissent un appauvrissement continu, ce qui les pousse à migrer vers les villes ou vers l'étranger (Najoua & Sara, 2018; Sbai & Mouadili, 2021).

I.2 Facteurs de l'érosion hydrique

Deux grands types de facteurs d'érosion peuvent être distingués : les facteurs naturels répartis en quatre grandes catégories : topographie, climat, lithologie et couvert végétal, et les facteurs anthropiques liés aux activités humaines.

I.2.1 Facteur climatique

Le climat joue un rôle essentiel dans le mécanisme de l'érosion, directement influencé par des éléments tels que le vent, la température et surtout la pluie, qui est considérée comme le facteur climatique le plus important en ce qui concerne l'érosion hydrique.

L'impact de la pluie sur les sols est le principal facteur de l'érosion, car elle détache les particules de surface (Moussadek et al., 2011). Une fois que les particules ont été détachées, la quantité de pluie qui ruisselle détermine la direction du mouvement des sédiments, des interfluves vers le réseau de drainage. L'érosion hydrique des sols commence par l'impact de la première goutte de pluie sur le sol, qui a la capacité de détacher les particules de surface. C'est le premier stade du processus érosif (Salles & Poesen, 2000). L'érosivité de la pluie est définie comme la capacité potentielle de celle-ci à provoquer l'érosion (Zouagui et al., 2018). L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface du détachement des fragments de sol et de leur transfert par ruissellement (Nord, 2006).

L'érosivité de la pluie est influencée par plusieurs facteurs, notamment la taille et la vitesse des gouttes, ainsi que l'intensité de la pluie et l'état de surface du sol (Leguédois, 2003).

Ces caractéristiques de la pluie peuvent être altérées par des facteurs tels que la vitesse du vent, la couverture végétale et les conditions hydriques du sol, qui peuvent augmenter la vitesse d'impact des gouttes de pluie.

L'infiltration de l'eau dans le sol est également influencée par la pente, de sorte que les sols à faible pente sont généralement considérés comme plus favorables à l'infiltration (Gabriel & Diabé, 2021). L'érosion se développe bien dans les conditions où l'eau de pluie ne pouvant plus s'infiltrer et favorise le ruissellement (Mokhtari, 2017).

D'autres facteurs climatiques jouent un rôle important dans l'érosion des sols, notamment la température, les variations saisonnières des orages, leur localisation, leur fréquence et le régime de vents. Cependant, l'impact précis du climat sur l'érosion est difficile à évaluer en raison des nombreuses variations des paramètres climatiques (Ouedraogo et al., 2019).

I.2.2 Facteur topographie

Le paramètre de la pente est utilisé pour évaluer la capacité d'un écoulement à emporter et transporter les particules de sol : si la pente est plus élevée, l'écoulement érodera davantage le sol. De plus, plus le versant est long, plus la perte de sols est importante car l'accumulation des écoulements accroît le potentiel érosif. (Zouagui et al., 2018)

Plus la pente est longue, plus les eaux ont tendance à se concentrer graduellement dans les fissures ou rainures, ce qui entraîne un apport considérable en eau et en sédiments. Et plus le degré de l'inclinaison des versants est important, plus l'énergie cinétique de l'écoulement et la détachabilité des particules du sol sont importantes. De nombreux chercheurs ont étudié l'impact de la topographie sur l'érosion et ont conclu que celle-ci affecte le ruissellement (Sadiki et al., 2012; Mokhtari, 2017; Zouagui et al., 2018; Boukhari et al., 2019; Ouedraogo et al., 2019; Gabriel & Diabé, 2021; Ennassiri, 2021; Akkari, 2022).

I.2.3 Facteur lithologie (érodibilité des sols)

L'érodibilité d'un sol désigne, d'une manière générale, sa vulnérabilité face aux processus d'érosion. Elle est déterminée par la composition et la structure du sol. Bien que la texture soit le principal facteur qui influe sur l'érodibilité, la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol y contribuent également (Ennassiri, 2021). La cohésion qui existe entre les particules du sol a également une incidence sur l'érodibilité de ce dernier. En effet, une faible cohésion entre les particules du sol entraîne une érodibilité accrue, ce qui rend le sol plus vulnérable à l'érosion (Payet et al., 2012).

La réponse des sols à la pluie et à l'érosion causée par le ruissellement dépendra de leur texture, de leur structure, de leur porosité et de leur teneur en matières organiques, ce qui signifie que chaque type de sol réagira de manière unique (Dumas, 2010).

Il convient de souligner que la teneur en matière organique du sol est inversement proportionnelle à son érodibilité, car cette dernière diminue à mesure que la teneur en matière organique augmente. En effet, la matière organique réduit la mouillabilité des agrégats du sol, ce qui réduit les risques d'éclatement lors de l'humectation (Radjah, 2017).

Il existe trois propriétés essentielles des sols pour déterminer leur érodibilité et pour évaluer leur résistance à l'érosion selon (Radjah, 2017) :

- La teneur en limon et surtout en argile ;
- La matière organique qui assure la cohésion du sol ;
- Les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion.

I.2.4 Facteur couvert végétal

Le sol est protégé par la végétation de deux façons : premièrement, en améliorant l'infiltration et les propriétés physiques et chimiques du sol, ainsi qu'en maintenant la cohésion des matériaux. Deuxièmement, en réduisant l'impact des gouttes de pluie grâce à l'absorption de leur énergie cinétique et à l'interception d'une partie des précipitations (Mokhtari, 2017; Ouedraogo et al., 2019; Akkari, 2022).

Pour réduire le risque d'érosion des sols, la couverture végétale est un facteur essentiel, en particulier la végétation naturelle qui joue un rôle important dans la prévention de l'érosion (Sadiki et al., 2012; Ennassiri, 2021). En effet, les gouttes de pluie peuvent détacher les particules du sol sur les surfaces qui ne sont pas protégées par une couverture végétale, entraînant leur transport vers les grands cours d'eau (Zouagui et al., 2018; El-Bouhali et al., 2020 ; Gabriel & Diabé, 2021). Les systèmes racinaires des plantes contribuent à la préservation des sols en améliorant leur cohésion et en renforçant leurs propriétés mécaniques. Cela permet de réduire l'érosion hydrique de surface grâce à la végétation qui maintient le sol en place.

La litière joue un rôle important dans l'absorption d'une grande quantité d'énergie du ruissellement, car elle entretient la mésofaune. La rugosité du sol est directement affectée par l'état de la couverture végétale. Par exemple, un couvert végétal composé d'herbes à tiges nombreuses protégera plus efficacement le sol contre le ruissellement que des arbres (Dumas, 2010).

Les forêts agissent comme un bouclier protecteur pour le sol en atténuant l'impact des précipitations, ce qui contribue à limiter l'érosion des couches superficielles du sol (Hassan et al., 2013).

I.2.5 Facteurs anthropiques

Le facteur humain est considéré comme l'un des principaux facteurs responsables de la dégradation des ressources naturelles, entraînant ainsi le déclenchement et l'aggravation du phénomène d'érosion.

Les activités humaines telles que le surpâturage, la déforestation, l'intensification de l'agriculture, la croissance démographique et l'urbanisation ont accéléré le rythme naturel de l'érosion hydrique (Elaloui, 2017). Le surpâturage et la déforestation entraînent un tassement des sols, une diminution de leur perméabilité et une augmentation du ruissellement de l'eau, tandis que l'intensification de l'agriculture ainsi que la croissance démographique et l'urbanisation contribuent également à cette accélération du processus de l'érosion hydrique des sols (Chaaouan et al., 2013 ; Hassan et al., 2013; Radjah, 2017; el Hage Hassan et al., 2018). La disparition de la végétation a des conséquences négatives sur l'environnement et augmente le risque d'érosion, ajoute (el Hage Hassan et al., 2018).

I.3 Processus de l'érosion hydrique

Trois processus principaux sont à l'origine de l'érosion hydrique : le « détachement » de particules de sols puis leur « transport », par différents agents (vent, eau, glace, gravite), de leur emplacement d'origine à un endroit de « dépôt » en aval, qui l'ultime étape de l'érosion.

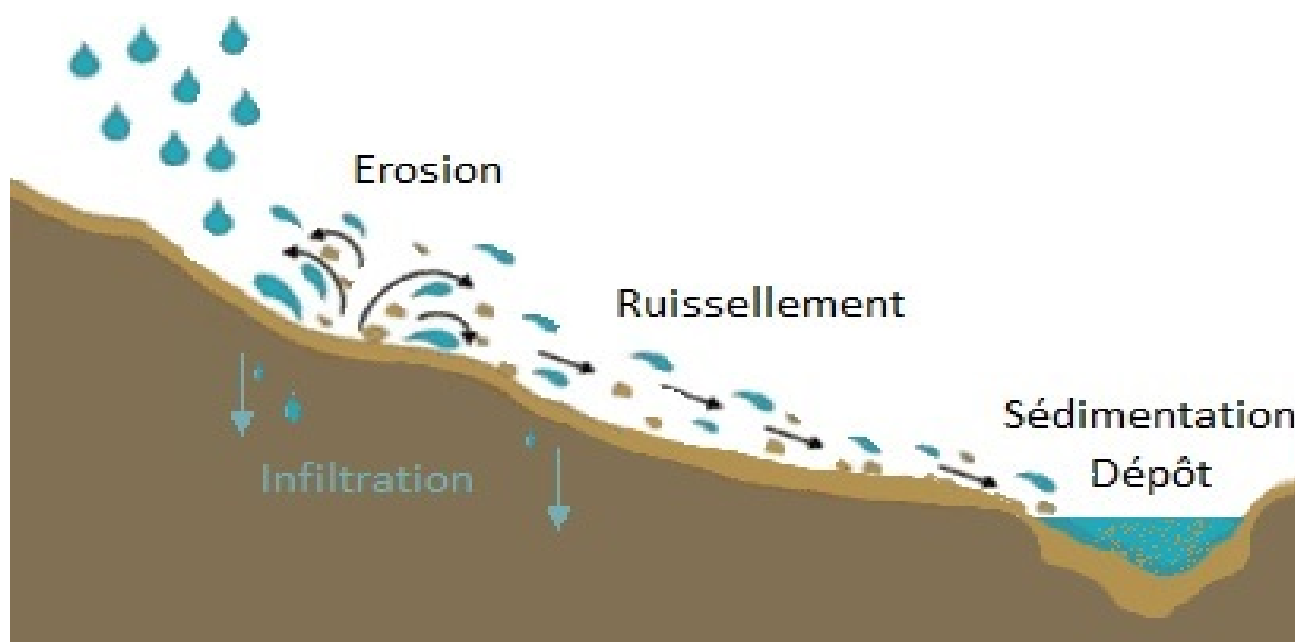


Figure 1 : Image illustrant le processus de l'érosion hydrique (Mokhtari, 2017)

I.3.1 Le détachement

Lorsque la pluie tombe sur un sol nu, elle provoque un phénomène appelé "**splash**", où chaque goutte agit comme une petite bombe érosive, brisant les agrégats et dispersant les particules du sol, phénomène appelé éclaboussement. La force érosive dépend du diamètre des gouttes de pluie, car plus celui-ci est important, plus leur impact est destructeur (Leguédois, 2003). Ainsi, une pluie fine et

continue pendant une longue période aura moins d'effet qu'une forte pluie de courte durée (Elaloui, 2017). L'importance du phénomène de splash est directement influencée par les caractéristiques du sol, telles que sa texture, son taux de matière organique, ainsi que son état de surface et d'humidité avant l'arrivée de la pluie. (Mokhtari, 2017).

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



Figure 2 : Images illustrant l'effet splash. (Leguédois, 2003)

I.3.2 Le transport

Le transport sédimentaire se réfère au mouvement des sédiments vers l'aval, que ce soit sur une pente ou dans un cours d'eau. Il est principalement causé par l'effet des gouttes de pluie (par effet "splash") et le ruissellement des eaux.

Toutefois, il est important de souligner que l'effet "splash" est généralement négligeable, sauf sur une pente très forte. Ce sont surtout les eaux de ruissellement qui sont responsables du transport des particules de sol détachées. Le débit de l'eau trie les sédiments selon leur taille en fonction de sa vitesse d'écoulement : plus la vitesse est élevée, plus elle peut transporter des sédiments grossiers. Dès que la vitesse commence à diminuer, les premiers sédiments à se déposer sont les plus grossiers. Progressivement, les sédiments de tailles de plus en plus fines sont déposés au fur et à mesure que la vitesse d'écoulement diminue. Ainsi, le cours d'eau agit comme une zone de tri sélectif, avec des zones de sédiments grossiers là où la vitesse d'écoulement est rapide et des zones de sédiments fins là où la vitesse d'écoulement est lente (Elaloui, 2017). Le transport de sédiments par l'eau de pluie et le ruissellement est un phénomène naturel, mais il est fortement amplifié par les activités humaines telles que le surpâturage et l'agriculture sans restitution (Tadrast et al., 2016).

I.3.3 Dépôt

La sédimentation, également appelée déposition, se produit lorsque la force du courant ne suffit plus à maintenir les particules en suspension, entraînant un ralentissement de la vitesse d'écoulement (Mokhtari, 2017).

Ce phénomène est principalement causé par l'eau de ruissellement qui transporte les particules arrachées du sol jusqu'à leur dépôt en fonction de leur dimension, leur densité et de la capacité de transport du courant ou du cours d'eau. Comme mentionné précédemment, les particules se déposent en fonction de leur taille, avec les argiles et l'humus colloïdal qui sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où ils se déposent après évaporation de l'eau ou floculation. (Elaloui, 2017)

I.4 Formes de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un type d'érosion initié par la pluie, qui entraîne la séparation des particules du sol en éléments individuels.

La circulation de l'eau à la surface du sol est influencée par la gravité, qui peut entraîner le ruissellement diffus ou concentré. Quant à la circulation de l'eau à travers le sol, elle se fait par infiltration, percolation et écoulement sub-surfacique. Les mouvements des particules du sol sont étroitement liés à ces différents chemins empruntés par l'eau, conduisant à l'érosion par lessivage, ravinement, mouvements de masse ou encore en nappe (Elaloui, 2017).

I.4.1 Erosion en Nappe

Ce type d'érosion se caractérise par l'absence de rigoles ou de sillons sur la surface du sol, où l'eau de ruissellement circule librement. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie, connu sous le nom d'effet splash, les particules du sol sont détachées et emportées. Ce phénomène se produit généralement sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer.

Les gouttes de pluie en tombant vont projeter des éclaboussures dans toutes les directions, mais sous l'effet de la gravité, la majorité des éclaboussures se dirigeront vers l'aval plutôt que vers l'amont. En moyennant la vitesse de toutes les éclaboussures, on constate que la vitesse de l'eau est dirigée de l'amont vers l'aval, ce qui peut entraîner la formation de flaques et le débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, provoquant ainsi un ruissellement en nappe (Elaloui, 2017; Mokhtari, 2017).

L'érosion en nappe dépend de :

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

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

Les conséquences de l'érosion en nappe sont :

- Le nivèlement de la surface du sol.
- La squelettisation des horizons superficiels.
- Le décapage entraînant l'apparition de taches claires.

I.4.2 Erosion linéaire

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement.

L'érosion linéaire se manifeste par la formation de creusements linéaires de différentes formes et tailles, tels que des griffes, des rigoles ou des ravines, qui pénètrent la surface du sol. Lorsque des flaques d'eau se forment à la surface du sol et débordent, elles se connectent les unes aux autres, formant ainsi des lignes d'écoulement qui suivent la direction de la pente la plus abrupte. L'érosion linéaire est en fait le résultat de l'organisation progressive du ruissellement en nappe, qui creuse des formes de plus en plus profondes dans le sol. Elle est étroitement liée à la vitesse de l'eau et à l'épaisseur de son écoulement. Elle survient principalement sur des pentes plus abruptes et se concentre souvent dans des zones spécifiques telles que des fossés, des talwegs, des traces de roues ou d'outils, des chemins ou des rigoles. Cette forme d'érosion peut se manifester sous deux formes principales : en rigole ou en ravine (Elaloui, 2017; Mokhtari, 2017).

I.4.2.1 Erosion en rigoles

L'érosion en rigoles est la première forme d'incision linéaire qui affecte les sols. Cette forme d'érosion est généralement associée aux terrains de culture. Lorsque l'intensité du ruissellement augmente avec la longueur de la pente, l'action érosive de l'eau commence à se concentrer, creusant ainsi la surface du sol et formant des rigoles de quelques centimètres de profondeur. Les incisions peuvent se présenter sous forme de rigoles parallèles ou imbriquées et ramifiées (Elaloui, 2017; Mokhtari, 2017). Le déclenchement linéaire commence généralement par la formation de rigoles, qui sont de petites incisions creusées dans la surface du sol. Ce processus est déclenché plus rapidement lorsque la pente est forte, la pluie est intense et la surface du sol est irrégulière, en raison des pratiques culturales. Lorsque les forces de cisaillement exercées par l'écoulement dépassent le seuil de résistance de la surface du sol, le seuil est atteint et l'incision commence. Bien que les rigoles soient souvent effacées après le labour, elles jouent un rôle important dans le transport des particules (Elaloui, 2017).

I.4.2.2 Erosion en ravins

L'érosion en ravines est une forme d'érosion concentrée, qui peut être qualifiée d'érosion volumique. Elle se produit sur des pentes suffisamment fortes où les ravines suivent les chemins naturels de drainage du paysage (Elaloui, 2017; Mokhtari, 2017). Contrairement à l'érosion en rigoles, l'érosion en ravines peut atteindre les horizons profonds de la couverture pédologique, car la ravine est une rigole qui a été approfondie. Les ravines peuvent avoir une largeur et une profondeur variables (Touahir et al., 2018). Cette érosion par ruissellement concentré ou érosion de talweg peut se produire même dans des zones à faible pente, avec des inclinaisons allant jusqu'à 1% dans les talwegs et 2% sur les versants qui les alimentent, ainsi que lors d'épisodes pluvieux de faible intensité (Dahmani, 2012)

I.4.3 Erosion en masse

Il s'agit d'un ensemble de mouvements de sol ou de sous-sol qui peuvent être causés par des facteurs naturels ou humains. Ces mouvements peuvent être lents ou rapides et comprennent plusieurs phénomènes d'instabilité du sol. L'expression "érosion en masse" englobe différents types de mécanismes à l'origine de ces mouvements (Dahmani, 2012; Elaloui, 2017)

Ce phénomène peut prendre différentes formes, telles que les mouvements de terrain, les coulées de boue et les glissements de terrain. En général, l'érosion en masse se produit sur des terrains présentant une pente importante.

I.4.4 Erosion en berge

L'érosion des berges est un phénomène naturel qui peut être accéléré par les activités humaines. Selon (Mamun et al., 2022), l'érosion des berges est principalement causée par l'action des vagues et des courants, ainsi que par la fluctuation du niveau de l'eau. Les auteurs soulignent également l'impact des activités humaines, telles que la construction de barrages et de digues, sur l'érosion des berges. L'érosion des berges est l'aléa naturel le plus susceptible de contribuer à la perte de terres, une dégradation de la qualité de l'eau et de moyens de subsistance, entraînant une vulnérabilité accrue à l'insécurité alimentaire, à la malnutrition et à la pauvreté.

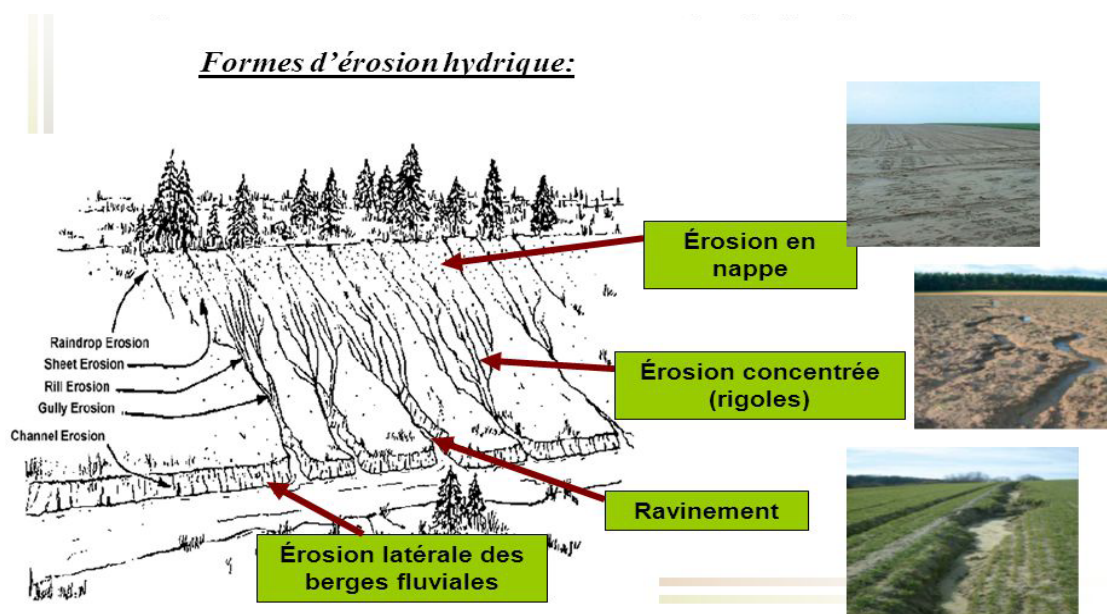


Figure 3 : Formes d'érosion hydrique (SlidePlayer, 2011)

I.5 Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique représente un obstacle majeur au développement durable, avec des conséquences multiples sur les sols à la fois dans les zones érodées et les zones de dépôts.

Elle entraîne la perte de sol, en particulier sa couche arable, et la réduction de la fertilité du sol en raison de la perte de terres, de nutriments et de matière organique, ce qui entraîne une diminution de la production agricole, une perte de valeur des terres et une réduction de la biodiversité végétale dans les forêts et les pâturages (Semghoune & Fendil, 2022). De plus, l'érosion hydrique entraîne l'envasement des barrages et des lacs à flanc de colline et compromet la qualité de l'eau potable par la turbidité et l'eutrophisation. L'érosion hydrique constitue également une menace pour les infrastructures routières en raison de l'instabilité des pentes, augmente le risque d'inondation en modifiant le cours des rivières et provoque l'ensablement des infrastructures portuaires. Cela peut également entraîner une baisse des rendements des cultures (PAP/CAR, FAO, 1998), des coûts de production alimentaire plus élevés et réduire la capacité du sol à retenir et rendre l'eau disponible pour les plantes (Elaloui, 2017). On assiste à l'appauvrissement des populations rural, ce qui entraîne leur migration vers les villes ou à l'étranger (Habiba et al., 2017). L'érosion hydrique peut entraîner une réduction du drainage profond et de la recharge des réserves d'eau souterraine. De plus, elle peut causer le transfert et dispersion des polluants tels que les pesticides, les métaux lourds et les nutriments en excès dans l'environnement, ce qui entraîne des coûts plus élevés de traitement de l'eau potable (Mokhtari, 2017).

I.6 Modélisation de l'érosion hydrique

Depuis longtemps, l'Homme a cherché à anticiper son avenir en observant les phénomènes naturels et en créant des modèles simplifiés pour mieux les comprendre. Au fil du temps, il a développé un langage scientifique basé sur des équations qui reproduisent le comportement de systèmes complexes. Les modèles sont formulés pour être utilisés par des ordinateurs personnels, ce qui accélère la répétition des calculs et la vitesse des simulations. La modélisation est largement utilisée dans de nombreux domaines de la connaissance (Duchemin et al., 2001).

La modélisation est un processus qui permet de représenter les phénomènes physiques sur le terrain à l'aide d'un outil informatisé, afin de créer un modèle réduit de la réalité qui peut être utilisé à diverses fins. Elle peut être utile dans la prise de décisions en matière de conservation des ressources en sols, en établissant des schémas d'aménagement et en évaluant les risques d'érosion (Habiba et al., 2017).

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système complexe, généralement sous forme physique ou mathématique (Duchemin et al., 2001).

La modélisation est utilisée pour évaluer les risques d'érosion hydrique, mais le choix d'un modèle approprié dépend de divers facteurs tels que les objectifs visés, la disponibilité des données et les contraintes temporelles. Lorsqu'il s'agit d'évaluer les risques de l'érosion à l'échelle régionale, la disponibilité des données est un critère important pour sélectionner un modèle. Cependant, la plupart des modèles nécessitent une grande quantité de données en entrée, ce qui peut compliquer leur application à grande échelle (Mokhtari, 2017).

I.6.1 SIG-Téledétection pour la cartographie du risque d'érosion hydrique

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils hautement performants, flexibles et efficaces, qui peuvent intégrer de nombreux facteurs et les présenter de manière facilement compréhensible (Boukrim et al., 2016; Elaloui, 2017). En combinant les techniques de télédétection avec les SIG, il est possible d'évaluer rapidement d'érosion ainsi que sa répartition spatiale sur de vastes étendues à des coûts inférieurs (Chaaouan et al., 2013; Hajji et al., 2019). Pour évaluer l'érosion, des modèles utilisent des données spatiales telles que la topographie, l'érodibilité et l'érosivité. Chaque paramètre est traité individuellement sous forme de couches d'informations, puis intégré dans un SIG pour produire une carte de distribution du risque d'érosion (Dumas, 2010). Les SIG résolvent le problème d'intégration des cartes analogiques en permettant la superposition de différentes couches d'informations décrivant des phénomènes dépendants ou indépendants (Elaloui, 2017). Cela conduit à la réalisation et la superposition des cartes thématiques, à la rapidité d'exécution des travaux

cartographiques, et au traitement des bases de données (Hili et al., 2017), qui sont des outils très utiles pour la prise de décision (Ouedraogo et al., 2019).

Au fil des années, les systèmes d'information géographique (SIG) ont connu une croissance rapide et sont maintenant largement utilisés pour gérer les données spatiales. Initialement conçus comme des outils de cartographie automatisée et de gestion de données, les SIG ont évolué pour devenir des environnements capables de traiter des données spatiales et sont désormais impliqués dans la science de l'information géographique (Toumi et al., 2013).

Les SIG sont particulièrement utiles dans la gestion des ressources naturelles et sont de plus en plus utilisés dans la modélisation hydrologique, car ils offrent une grande flexibilité pour décrire localement le territoire et sont capables de traiter et de mettre à jour des données en temps réel. Les SIG utilisent des modèles pour convertir la variation géographique en un objet discret, ce qui est crucial pour la modélisation hydrologique et hydraulique. (Denis, 2012)

1.6.2 Modèle des Directives PAP/CAR

Le Programme d'Actions Prioritaires du Centre d'Activités Régionales « PAP/CAR », agissant dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée « PAM » du programme des nations unies pour le développement « PNUD » et du programme des nations unies pour l'environnement « PNUE », a entrepris depuis 1984 une action prioritaire intitulée "Promotion de la protection des sols en tant que composante essentielle de la protection de l'environnement dans les zones côtières méditerranéennes" (Hili et al., 2016)

Les directives PAP/CAR sont une approche qualitative pour étudier l'érosion hydrique et les mouvements de terrain en hiérarchisant la surface d'une zone en unités distinctes selon leur vulnérabilité à ces phénomènes. Cette méthode permet d'identifier les zones les plus fragiles et susceptibles de produire des sédiments (Hili et al., 2016).

Les directives PAP/CAR consistent en une cartographie descriptive et prédictive qui permet d'identifier, d'évaluer et d'intégrer les facteurs physiques fondamentaux tels que la pente, la lithologie et la couverture végétale. Cette méthode a pour objectif d'établir des hypothèses sur le risque d'érosion hydrique et le mouvement de terrain (Hili et al., 2016).

Les directives PAP/CAR ont deux objectifs distincts : d'une part, fournir un outil méthodologique et une source d'information immédiate pour la mise en œuvre de projets et programmes de gestion du contrôle de l'érosion hydrique, des mouvements de terrain et de la désertification ; d'autre part, contribuer à long terme à la diminution et à l'arrêt des processus de risque tels que l'érosion et les

mouvements de terrain, ainsi qu'à l'amélioration des conditions de vie et de la sécurité alimentaire des population (Hili et al., 2016).

Cette Approche méthodologique se caractérise par trois phases :

- L'approche prédictive qui aboutit à la cartographie des unités homogènes des états érosifs dans le bassin versant, fournissant le canevas pour la cartographie du potentiel et des tendances générales d'érosion ;
- L'approche descriptive qui consiste à identifier et évaluer les processus actuels d'érosion sur le site, ainsi que les différents degrés d'exposition à l'érosion ;
- L'approche d'intégration dont le résultat principal est la carte consolidée. Cette phase est obtenue par la superposition de la carte des états érosifs obtenue de la phase prédictive et la carte des formes d'érosion réelle (la phase descriptive) obtenue par la cartographie directe des formes d'érosion sur le terrain ou par l'investigation des images satellites (PAP/CAR, FAO, 1998).

Au Maroc, plusieurs chercheurs ont utilisé l'approche PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire / Centre d'Activités Régionales) et ont démontré son utilité considérable pour la cartographie et la modélisation du risque de l'érosion hydrique. (Mehdaoui et al., 2023) ont utilisé la méthode PAP/CAR pour l'étude environnementale dans le bassin crétacé d'Errachidia-Boudenib. (S. Driss et al., 2023) ont également utilisé la méthode PAP/CAR avec SIG pour la cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique dans Haut du barrage Aït Moulay Hmad, Nord-Est du Massif Central. La méthode PAP/CAR modifiée a été appliquée aussi pour la cartographie de l'érosion hydrique et des facteurs de risque causal dans le bassin versant d'Asfalou par (Tahouri et al., 2022). (Dallahi et al., 2021) ont utilisé la méthode PAP /CAR pour l'évaluation de l'impact de la dynamique du couvert végétal sur l'érosion hydrique dans le bassin versant de Kharouba, Plateau Central. Les SIG et la méthode PAP/CAR ont été utilisées aussi avec un grand succès pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Boumlal Rif Central (El-Bouhali et al., 2020). La méthode PAP/CAR a été appliquée au PRERIF aussi pour la cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique et aux mouvements de terrain dans le bassin versant de l'Oued Walgaz et pour l'estimation qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'OUED AMLIL (Hili et al., 2016, 2017). (Sadiki et al., 2012 ; Ali & Abderahim, 2014 ; Mesrar et al., 2015 ; Abdelghani & Mohamed, 2016 ; Boukrim et al., 2016 ; Habiba et al., 2017) ont également utilisé l'approche PAP/CAR avec SIG pour la modélisation de l'érosion hydrique au Maroc.

Le système d'information géographique (SIG) joue un rôle crucial dans les différentes étapes de l'approche visant à analyser, superposer et modéliser les processus d'érosion, ainsi que dans la spatialisation des zones affectées par les différentes formes d'érosion.(Habiba et al., 2017)

I.7 Les oasis des montagnes

I.7.1 Les caractéristiques générales des oasis des montagnes

Les oasis sont des zones de terres fertiles qui se trouvent souvent dans les régions désertiques et semi-désertiques.

Les massifs montagneux ont une importance significative dans les régions méditerranéenne et atlantique du Maghreb, étant donné leur rôle crucial dans la génération d'eau (Lazarev, 2005).

Depuis l'Antiquité, l'homme a adapté de nombreux environnements difficiles pour y pratiquer l'agriculture. Les cultures en terrasses est l'une des caractéristiques des oasis de montagne. En raison de la topographie accidentée des montagnes, les agriculteurs ont créé des terrasses pour cultiver leurs terres. La technique des terrasses permet de maximiser l'utilisation de l'eau disponible et de minimiser l'érosion des sols. Ces adaptations humaines ont permis de modifier ces milieux difficiles pour en tirer profit de manière productive (Santoro et al., 2020), en exploitant la disponibilité limitée en eau (Aït Hamza et al., 2010). Depuis des temps immémoriaux, la population oasisienne a développé des formes d'adaptation à son environnement, en particulier pour gérer la rareté et la fragilité des ressources agricoles et pastorales (Santoro et al., 2020). Les oasis sont des entités uniques qui abritent une vie foisonnante à petite échelle au sein de vastes déserts biologiques, grâce aux éléments essentiels des écosystèmes. C'est pourquoi toute erreur d'aménagement peut être fatale pour ces écosystèmes fragiles (Fassi, 2017).

La proximité des communautés locales est également une caractéristique importante des oasis de montagne. Les oasis sont fréquemment établies à proximité de communautés locales qui s'occupent de l'entretien et de l'exploitation des terres agricoles. Ces communautés sont souvent très attachées à leur terre et à leur culture, et jouent un rôle important dans la gestion des ressources naturelles (Berkes et al., 2008).

L'emplacement des oasis a toujours été d'une grande importance pour les axes de commerce et de transport dans les zones désertiques.(Santoro et al., 2020). Les oasis constituent des agroécosystèmes uniques qui sont intensivement cultivés dans les zones désertiques. Elles sont créées dans les deltas des fleuves, les plaines alluviales et diluviennes, ainsi que sur les rives des cours d'eau où l'eau d'irrigation est fournie par les rivières.(Hong et al., 2003).

La diversité des cultures est une caractéristique commune aux oasis de montagne, à la différence des oasis, où le palmier dattier domine, tolérant les climats arides et continentaux extrêmes (Toutain et al., 1989). Les agriculteurs y cultivent une grande variété de cultures, allant des céréales (blé, orge et luzerne) aux fruits (pommier et olivier) et légumes, en passant par les plantes médicinales (Buerkert et al., 2005) à cause de l'inadaptation des palmiers dattiers avec les conditions montagnardes (Albab et al., 2013). Les cultures sont souvent adaptées aux conditions environnementales locales, ce qui permet de répondre aux besoins spécifiques de la communauté locale comme dans le cas de M'Semrir où la culture du pommier est adoptée aux conditions locales.

Selon (Montanari, 2013), les systèmes montagneux représentent 20 % de la surface terrestre mondiale et abritent 570 millions de personnes. Ces montagnes sont des territoires où des communautés se sont établies et ont pratiqué l'agriculture et l'élevage depuis de nombreux siècles (Auclair et al., 2011).

Les montagnes de l'Atlas, qui se composent de trois blocs - le Haut, le Moyen et l'Anti-Atlas, abritent la plus grande zone montagneuse d'Afrique du Nord située au Maroc. Tout comme d'autres systèmes montagneux, les montagnes de l'Atlas ont une importance économique et écologique en soutenant une grande population et en fournissant des ressources et des services écosystémiques. Les communautés du Haut Atlas ont mis en place un système combinant l'agriculture de subsistance, la mise en culture de terres en terrasses dans la basse vallée irriguées par l'eau des rivières, et le pastoralisme pratiqué sur les vastes pâturages du bassin versant (Montanari, 2013). On observe dans les zones basses et plates des vallées la pratique de cultures irriguées, comprenant principalement des céréales (orge et blé) ainsi que l'horticulture, accompagnées de l'élevage de bovins croisés. En revanche, les parties hautes des vallées sont plutôt des espaces de parcours extensifs, caractérisés par une végétation xérophytique épineuse ainsi que des prairies sèches et rudes (Auclair et al., 2011). L'élevage des ovins représente une source de revenus pour les agriculteurs, qui peut être utilisée pour financer certaines opérations agricoles. Dans les oasis, la principale culture fourragère est la luzerne, qui domine la ration alimentaire du bétail (Dickhoefer et al., 2010; Kadri, 2012)

Il existe deux types d'oasis : traditionnelles et modernes. Les oasis traditionnelles se distinguent par une dispersion importante des terres agricoles, une culture mixte, l'absence de planification régulière, une agriculture manuelle, une gestion collective importante des ressources et une rareté de l'eau. En revanche, les oasis modernes se caractérisent par une plantation régulière en rangées, une prédominance de cultures productives, une monoculture, une rareté des cultures intercalaires et des exploitations plus grandes (Santoro et al., 2020).

En oasis, les systèmes de production reposent sur une association étroite entre la culture et l'élevage, créant des interactions synergiques bénéfiques pour les agriculteurs. Cette stratégie permet de mieux

gérer les risques et de réduire les impacts des aléas climatiques, tout en diversifiant les sources de revenus et en intensifiant la production agricole grâce à la fertilisation des sols avec le fumier. Cependant, l'insuffisance des disponibilités alimentaires limite le développement de l'élevage, dont les cultures fourragères principales sont la luzerne, souvent située à proximité des sources d'eau (Kadri, 2012).

I.7.2 Les contraintes des oasis de montagnes

Les conditions climatiques peuvent constituer une contrainte majeure pour les oasis de montagne. Les oasis de montagne au Maroc ont un climat rude avec des hivers froids et des étés secs. Les vents secs produisent des paysages avec peu de végétation, principalement des herbes et quelques petits arbustes. Le climat varie selon l'altitude, passant d'un climat sec et chaud dans les zones les plus basses, à un climat sec et froid dans les zones intermédiaires, puis à un climat de haute montagne dans les zones les plus élevées. Les pluies sont rares et se produisent généralement sous forme d'averses violentes. L'évaporation et l'écart thermique journaliers et saisonniers sont très élevés (Khebiza, 2010). L'eau disparaît rapidement par évaporation ou infiltration dans le sol, qui ne peut la stocker en raison du manque de végétation (Santoro et al., 2020). La disponibilité de l'eau est une autre contrainte pour les oasis de montagne. Dans de nombreuses régions montagneuses, l'eau est rare ou de mauvaise qualité, ce qui limite la capacité des agriculteurs à irriguer leurs cultures (Aït Hamza et al., 2010; Kadri, 2012). Les zones oasiennes font face à des défis majeurs qui menacent leur viabilité économique. Les populations locales doivent trouver des moyens de subvenir à leurs besoins malgré une pression accrue sur les ressources naturelles rares, aggravée par les effets du changement climatique. La rentabilité économique de ces zones est donc mise en danger (Fassi, 2017). Pour faire face au manque ou à la forte variabilité des facteurs de production, la migration et la diversification des activités et des ressources sont devenues les bases de la résilience des communautés. (Rignall, 2015).

Dans les régions arides, l'approvisionnement en eau est crucial pour la survie des oasis, bien que la salinisation des sols soit fréquente en raison de l'évapotranspiration élevée et de la forte teneur en sels des eaux d'irrigation. Dans le sud du Maroc, la salinisation des sols est souvent le résultat du déclin des oasis plutôt que la cause principale de ce déclin. (Jouve, 2012)

L'exploitation excessive des terres autour des oasis pour nourrir le bétail aggrave la dégradation et la désertification de ces zones. Les pratiques intensives de surpâturage ont rapidement dégradé la végétation, amplifiant les effets négatifs de la sécheresse et de l'érosion qui dénudent les sols et entraînent leur salinisation et leur évaporation accrue. La protection des ressources naturelles est devenue urgente face à la crise des systèmes de production oasiens, aggravée par les changements

climatiques (Aït Hamza et al., 2010; Kadri, 2012). La croissance de la population et les activités humaines dans les écosystèmes oasis modifient la fourniture des services écosystémiques, car la production de la terre ne peut plus répondre aux besoins humains croissants. Ces changements sont en train d'affecter de manière irréversible l'écosystème oasien (Khebiza, 2010).

La topographie est également une contrainte pour les oasis de montagne. Les pentes raides et les terrains escarpés rendent l'accès aux oasis difficile, en particulier pour les cultures en terrasses, qui nécessitent des efforts considérables pour l'irrigation et la récolte. Les agriculteurs doivent souvent utiliser des outils et des techniques spéciales pour travailler les terrains en pente.

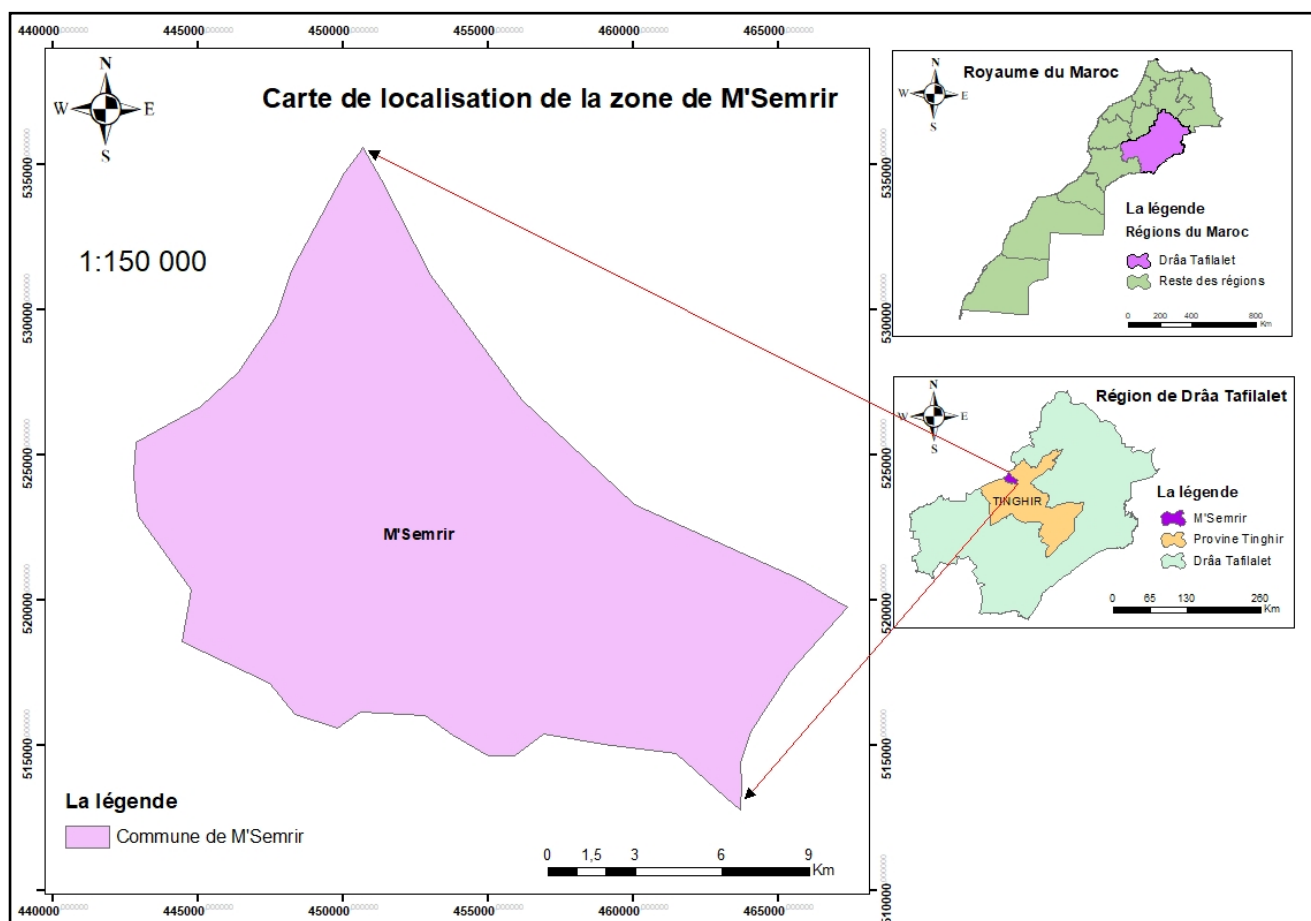
II. Partie II : CARACTERISATION DE LA ZONE D'ETUDE (M'SEMRIR)

II.1 Situation Géographique

La commune de M'Semrir se trouve sur les versants sud-est des montagnes du Haut Atlas occidental, couvrant une superficie de 254,74 km² à une altitude de 1842 mètres. Elle se situe dans la province de Tinghir, dans la région de Drâa Tafilalet, dans la vallée de l'Oued Imdghas, l'un des principaux affluents de l'Oued Dadès. M'Semrir est à mi-chemin de la route reliant Boumalne Dadès et Imilchil, relevant de la province de Midelt, à une distance de 61 km. Elle englobe la circonscription territoriale de la commune rurale de M'Semrir et est limitée au Nord par la province de Midelt, à l'Est par la commune rurale d'Aït Hani, à l'Ouest par la province d'Azilal et au Sud par la commune rurale d'Aït Sedrate Jbel Oulya.

Coordonnées géographiques en DMS (Degré-minutes-secondes) de la commune de M'Semrir :

- Latitude : 31° 41' 46" Nord
- Longitude : 5° 49' 7" Ouest
- Altitude : 1842 à 3298 mètres



Carte 1 : Localisation de la zone de M'Semrir

II.2 Contexte climatique

La commune de M'Semrir présente un climat aride et semi-aride avec une tendance continentale et des hivers frais, caractérisé par des fluctuations importantes à la fois sur une base annuelle et interannuelle.

II.2.1 Températures

La station météorologique de M'Semrir enregistre une moyenne mensuelle de température maximale de 21,9°C en juillet et une moyenne mensuelle minimale de 1,1°C en janvier, donnant une amplitude thermique annuelle de 20,8°C qui témoigne du caractère continental du climat. Les gelées printanières sont fréquentes et peuvent affecter la production de pommes, comme en 2009. Les variations saisonnières sont marquées, avec des températures minimales pouvant descendre jusqu'à -5°C en hiver (janvier) et des températures maximales pouvant atteindre +40°C en été sont enregistrées, accompagnées de forts courants venteux. Ajoutées à la faiblesse de la pluviométrie, cette situation engendre un déficit hydrique permanent (HCP, 2019). Le record de chaleur est de 46°C enregistré le mardi 17 juillet 2012 et le record de froid de -5°C enregistré le dimanche 30 janvier 2005.

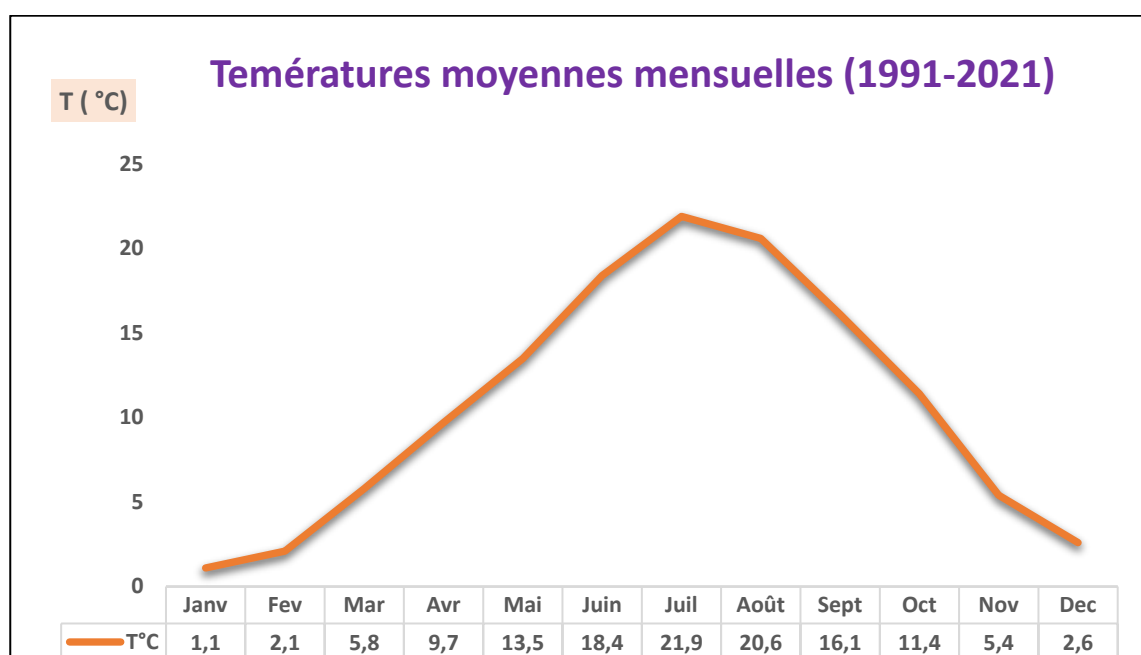


Figure 4 : Courbe de température de M'Semrir

Source : Climate-Data.Org (de 1991 à 2021) (sur : <https://fr.climate-data.org/afrique/maroc/m-semrir/>)

Nous observons qu'en moyenne le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température de 1,1 °C et le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une température de 21,9 °C.

II.2.2 Précipitations

En général, le climat de la zone est caractérisé par une pluviométrie moyenne pouvant atteindre 200 mm par année et des chutes de neige localisées dans les hautes montagnes à partir de 1900 m, sont d'une importance capitale (HCP, 2019). La pluviométrie annuelle est marquée par deux saisons relativement humides, le printemps et l'automne. La zone étant dépourvue de couverture végétale, les crues sont particulièrement violentes, causant des dommages importants à la fois aux cultures et aux infrastructures hydrauliques. En plus des précipitations, des chutes de neige sont observées dans les hautes montagnes, atteignant une valeur de 3 cm lors de la campagne agricole 2019/2020. La raison pour laquelle l'agriculture sans irrigation est absente peut-être expliquée par cette situation, car les précipitations sont rares et se produisent généralement sur une période très courte, avec une moyenne annuelle de 150 mm (HCP, 2019).

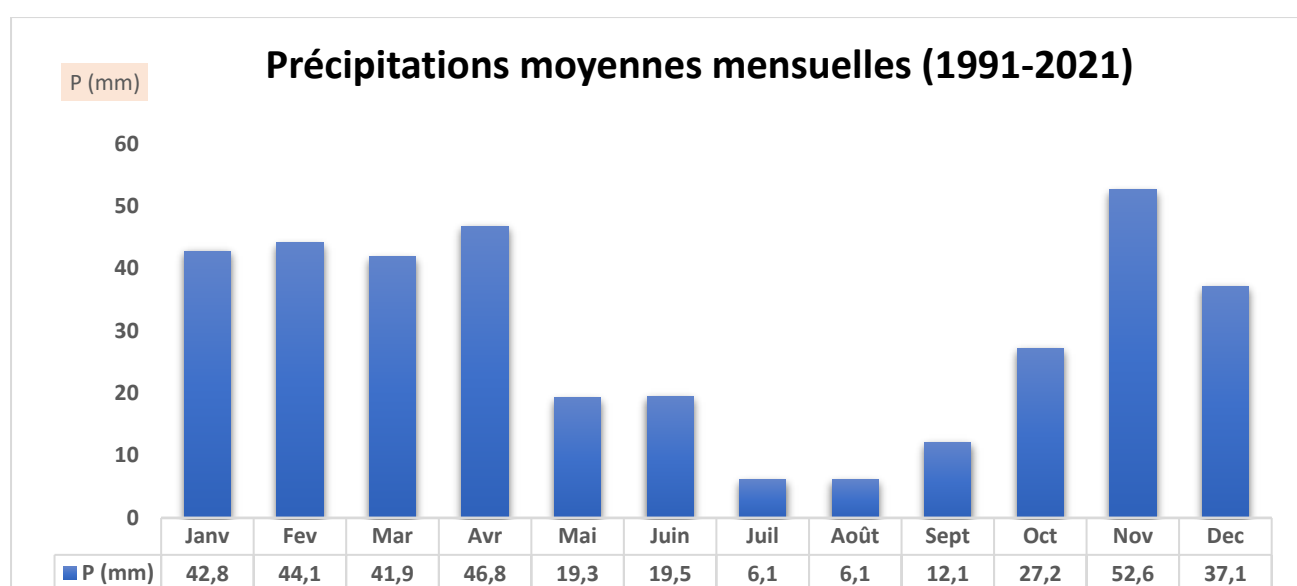


Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles

Source : Planificateur. A-Contresens (sur : https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/draa_tafilalet/m_semrir/6545955.html)

Si le total des précipitations mensuelles est égal ou inférieur au double de la température moyenne mensuelle en degrés Celsius, alors le mois est considéré comme "sec". Cette condition ($P \leq 2T$) peut être utilisée pour créer des diagrammes ombrothermiques qui indiquent la durée de la saison sèche en fonction des intersections de deux courbes.

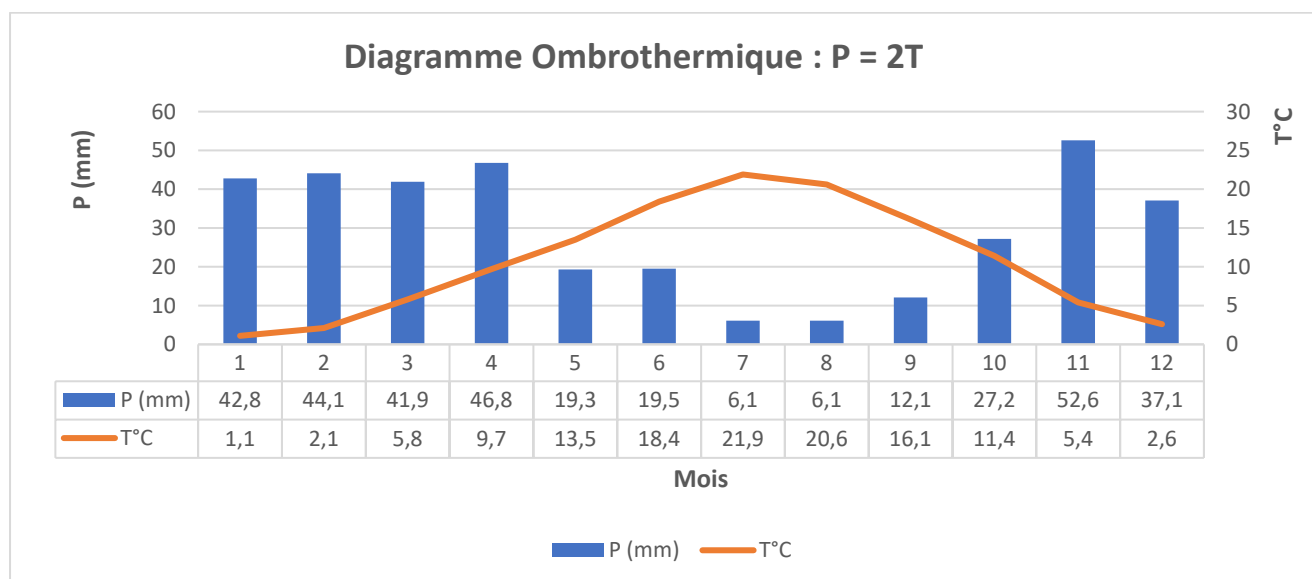


Figure 6 : Diagramme Ombrothermique de M'Semrir.

L'examen du diagramme Ombrothermique établi pour la zone de M'Semrir, montre que les précipitations moyennes les plus faibles sont enregistrées en Juillet avec 6,1 mm seulement à 21,9°C de température mensuelle moyenne. Avec une moyenne de 52,6 mm, c'est le mois de Novembre qui enregistre le plus haut taux de précipitations.

II.2.2.1 Etude des données historiques des précipitations : 1981 à 2022

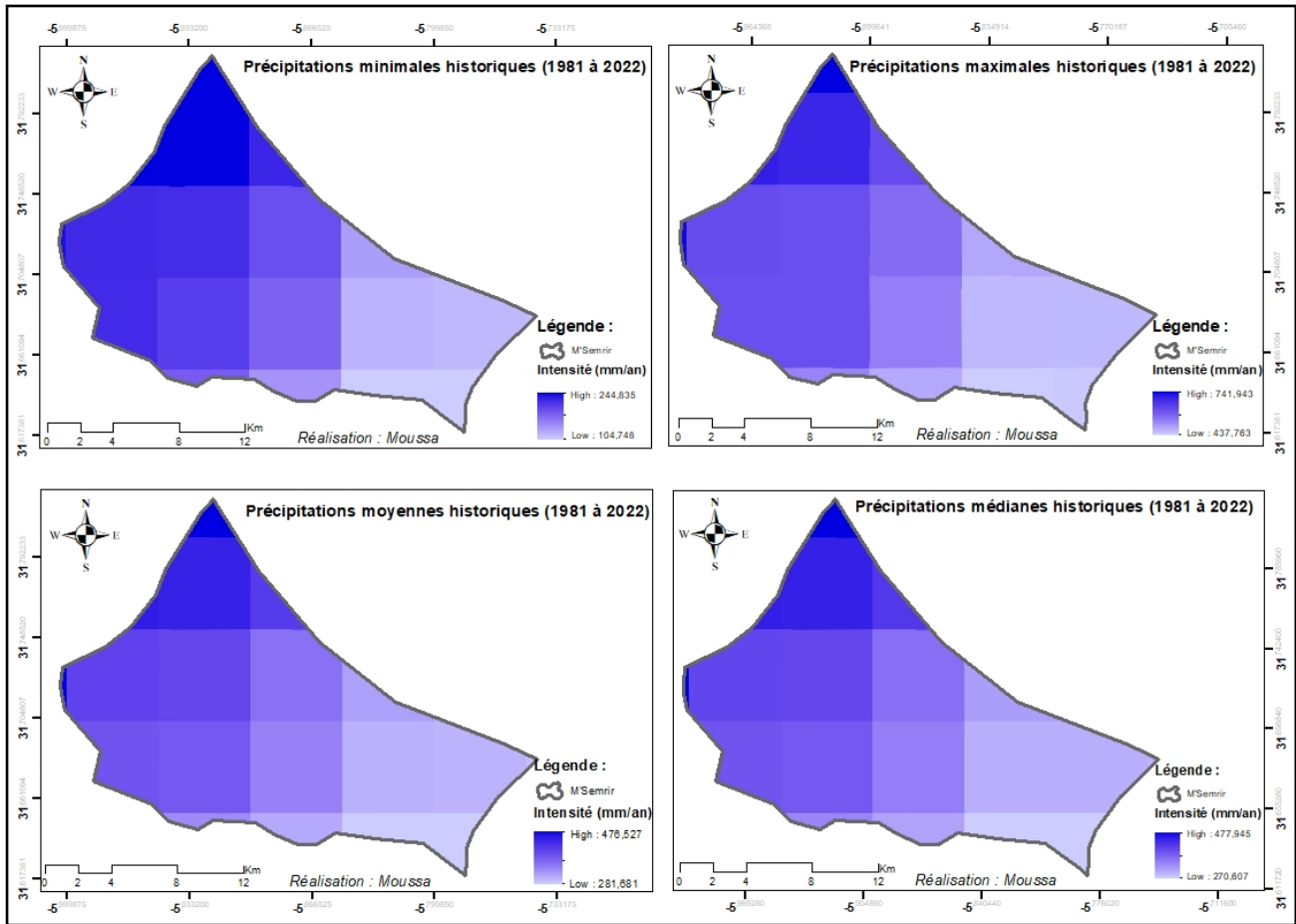
L'analyse des données historiques des précipitations est une étape cruciale pour comprendre les variations climatiques d'une zone donnée. Dans le cas de la zone de M'Semrir, une étude de ces données entre 1981 et 2022 a été réalisée à partir des données disponibles sur le site (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>).

Les résultats obtenus ont permis de dresser des cartes précises des précipitations minimales, maximales, moyennes et médianes de la zone étudiée. Ces cartes ont montré différentes classes spatiales des précipitations, offrant ainsi une vue d'ensemble de la variation des précipitations dans la zone d'étude.

La carte des précipitations minimales a mis en évidence les zones les plus arides de la zone d'étude, avec des précipitations annuelles inférieures à 150 mm. La carte des précipitations maximales a quant à elle permis de repérer les zones où les précipitations annuelles dépassent 700 mm, sur des hautes altitudes.

La carte des précipitations moyennes a montré une distribution spatiale relativement homogène des précipitations, avec une moyenne annuelle comprise entre 281 et 476 mm pour la plupart des zones étudiées. Enfin, la carte des précipitations médianes a donné une indication de la variabilité des précipitations annuelles, avec des valeurs médianes comprises entre 270 et 477 mm pour la plupart des zones.

Ces cartes des précipitations permettent de mieux comprendre les conditions climatiques de la zone de M'Semrir sur une période de plus de 40 ans.



Carte 2 : Précipitations annuelles historiques de la zone de M'Semrir

II.2.3 Evaporation

L'évaporation a une grande influence sur les eaux de surface ainsi que les eaux souterraines, elle contribue à l'augmentation de ces eaux en certains ions dissous.

Elle est très intense dans la province de Tinghir en générale, dépassant les 2500 mm par an, mais elle est atténuée dans les vallées grâce au microclimat créé par les écosystèmes oasiens comme le cas de M'Semrir (HCP, 2019).

II.2.4 L'humidité relative

L'humidité relative mesure le taux d'humidité de l'air par rapport à sa capacité maximale à retenir de l'humidité à une température donnée. Elle est exprimée en pourcentage et dépend de facteurs tels que la température, la pression atmosphérique et la présence de vapeur d'eau. Elle reflète l'état de l'air en termes de proximité avec le point de condensation et explique la sensation de sécheresse ou d'humidité ressentie.

Dans la commune de M'Semrir, l'humidité relative est très importante dans les mois de Décembre-Janvier de 69% et une humidité faible de l'ordre de 37% dans le mois de Juillet.

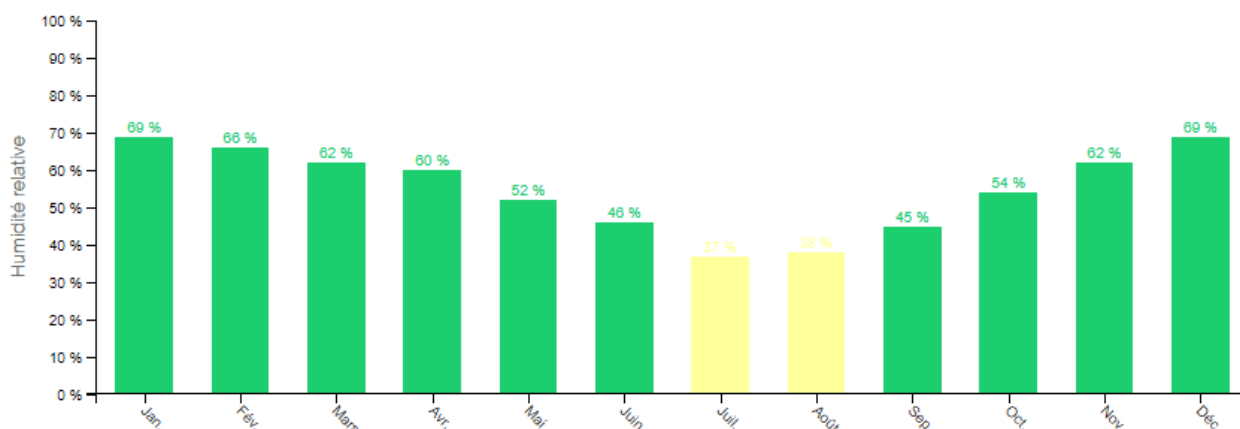


Figure 7 : Taux d'humidité relative

Source : Planificateur. A-Contresens (sur : https://planificateur.a-contresens.net/afrique/maroc/draa_tafilalet/m_semrir/6545955.html)

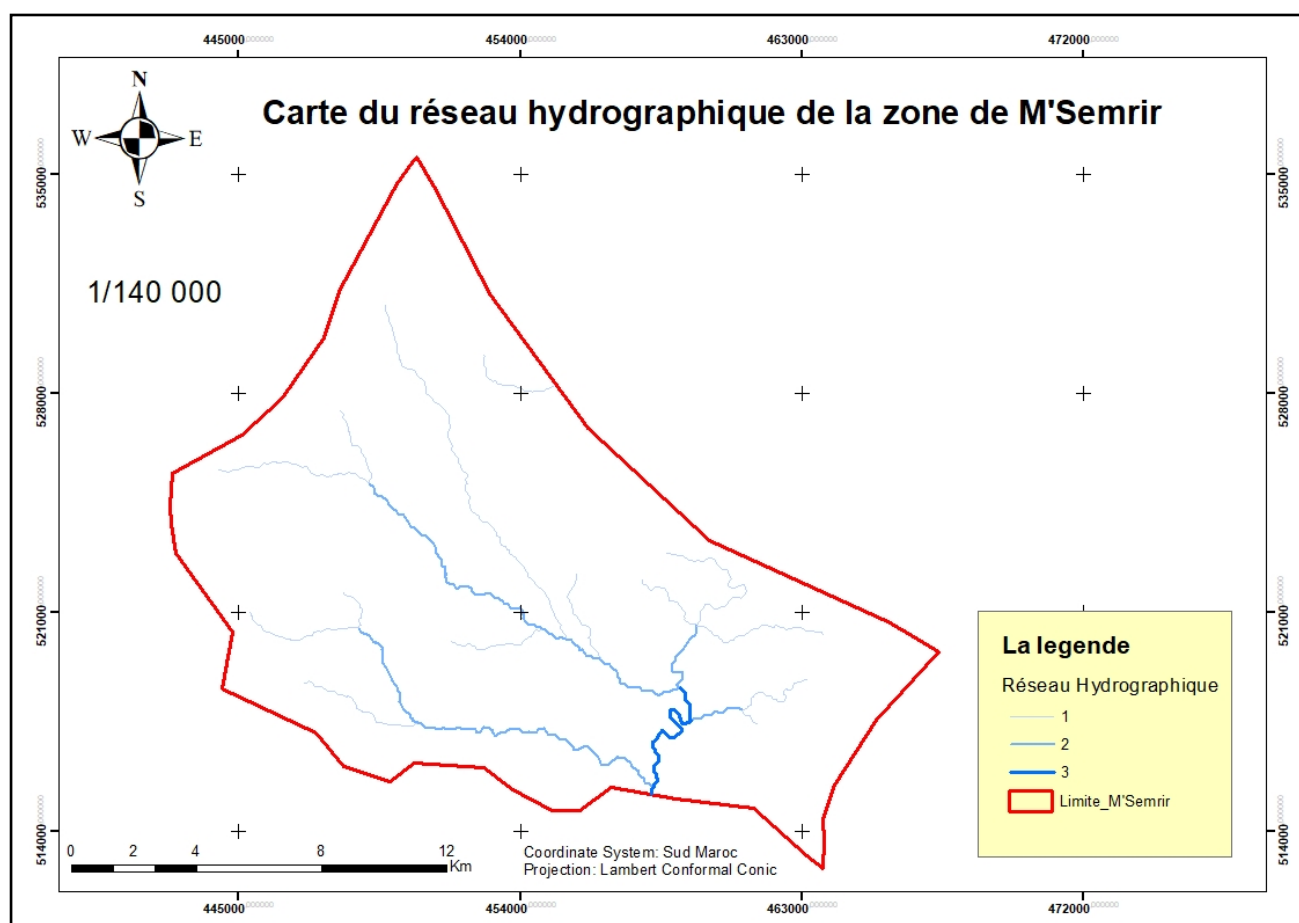
On observe une Humidité relative très importante dans les mois de Décembre-Janvier de 69% et une humidité faible de l'ordre de 37% dans le mois de Juillet dans la commune de M'Semrir.

II.3 Cadre hydrologique

En raison de sa rareté liée au contexte naturel, l'eau joue un rôle crucial dans les activités de l'oasis montagnarde du Dadès. Toutes les activités socioéconomiques de la commune de M'Semrir reposent sur l'eau en tant que fondement essentiel (Caïdat M'Semrir, 2009). Les eaux pérennes qui composent le régime hydrologique de la région subissent des fluctuations importantes, avec des pics en automne et au printemps, qui peuvent entraîner des inondations. Ces dernières, causées par les crues de l'oued, ont un impact sur la dégradation des sols. Pour faire face à ces crues violentes, les habitants ont recours à l'aménagement de terrasses (MARTIN, 2014). M. AAFIR a mentionné en 2006 à travers (MARTIN, 2014) que : « La rivière est à régime régulier, soutenue à la fois par la rétention nivale et par les écoulements souterrains ; les apports maxima se situent en mars-avril (7 m³/s en moyenne pour ses mois). Les étiages survenant en juillet-août (1,3 m³/s en moyenne pour ces mois). Le Dadès est pérenne dans sa partie amont ». L'irrigation est généralement assurée par le système de séguias à M'semrir, ainsi que du khattara et le barrage de déviation.

M'Semrir est une commune traversée par un réseau hydrographique composé d'oueds, dont le cours d'eau principal est l'oued Dadès (Carte.3). Celui-ci prend sa source sur les flancs des montagnes Jbel Assameur Irhil et Jbel Aghenbou-n-Ouerz, à une altitude supérieure à 3000 m, et s'étend sur une superficie de 6796 km², entre les latitudes Nord 32°00' et 30°54' et les longitudes Ouest 5°23' et 6°44', au Nord-Est de la ville de Ouarzazat. La zone est également alimentée par des affluents tels que les oueds Oussikis et Imdghas de M'Semrir-Tilmi, M'Goun de Kelaa M'Gouna, et des oueds de

montagne de Skoura et Sidi-Flah, qui descendent des massifs du Haut Atlas central et ont un régime torrentiel. La morphologie de ces vallées est fortement influencée par la géologie de la zone parcourue.



Carte 3 : Réseau hydrographique de M'Semrir

II.4 Cadre géologique

La commune de M'Semrir se trouve dans le Haut Atlas, une chaîne de montagnes marocaine composée de différents types de roches. Cette région a connu des activités tectoniques importantes, créant ainsi des formations rocheuses complexes. M'Semrir est située plus précisément dans le Haut Atlas central et est constituée de terrains secondaires et quaternaires, allant du Trias supérieur au Crétacé supérieur.

Le Trias supérieur :

Il est caractérisé par la formation de différents types de roches, notamment des basaltes et des argiles roses et violacées.

Le Jurassique :

C'est une période caractérisée par des conditions climatiques chaudes et humides. Dans la zone de M'Semrir, le Jurassique est représenté par plusieurs formations géologiques, notamment les formations du Dogger, le Lias inférieur et moyen avec des dépôts carbonatés de plate-forme, le Lias supérieur (Toarcien).

Le Dogger : C'est une unité stratigraphique du Jurassique moyen, subdivisée en sous-unités stratigraphiques, dont l'Aalénien, le Bajocien, le Bathonien et le Callovien.

L'Aalénien : Caractérisée par des schistes marneux et des marnes brunes, qui se sont formés dans un environnement marin peu profond. Ces roches contiennent souvent des fossiles de céphalopodes tels que les ammonites, ainsi que des restes de poissons et de reptiles marins.

Le Bajocien : Caractérisé par des grès rouges, des conglomérats et des marnes vertes qui ont été déposés dans un environnement aride et désertique. Les grès rouges sont des roches sédimentaires détritiques qui se sont formées dans des environnements arides et désertiques, souvent associées à des dépôts éoliens. Les conglomérats sont des roches sédimentaires composées de fragments anguleux de roches, de sable et de gravier, souvent déposés dans des rivières ou des lits de cours d'eau (Youssef et al., 2021).

Le Bathonien : Il est marqué par des calcaires et des dolomites, souvent avec des fossiles de coraux et de bivalves. Les calcaires et les dolomites sont des roches sédimentaires riches en carbonate de calcium et de magnésium, qui se forment à partir de coquillages et de squelettes d'animaux marins. Ainsi que des silts continentales qui sont déposés dans les plaines alluviales et les vallées environnantes. Ces dépôts sont principalement formés par les Oueds et rivières qui traversent la zone et qui apportent des sédiments en provenance des montagnes environnantes. Constitués de sables et d'argiles, les silts sont généralement de couleur grise ou brune et ont une texture fine et homogène.

Les silts continentales à M'Semrir ont une importance pratique pour l'agriculture et l'irrigation, car ils peuvent retenir l'eau et fournir des nutriments importants pour la croissance des plantes. Cependant, ils peuvent également être sujets à l'érosion en raison de leur texture fine et de leur proximité avec les rivières et les plaines inondables, ce qui peut causer des problèmes d'inondation et de sédimentation.

Le Callovien : Il est caractérisé par des marnes rouges, des marnes vertes et des conglomérats. Les marnes rouges et les marnes vertes se sont formées à partir de dépôts marins, et contiennent souvent des fossiles de créatures marines telles que les ammonites.

Crétacé :

Il est constitué de dépôts marins de marnes, gypse, calcaire dolomitique, niveaux silteux et silto-gréseux, marnes à gypse et lentilles conglomératiques, dolomies litées bitumineuses, et niveaux calcaréo-dolomitiques. La série se termine par une alternance de silts et de marnes rouges avec des barres carbonatées dolomitiques.

L'ère Quaternaire :

C'est la période géologique actuelle, qui a débuté il y a environ 2,6 millions d'années et se poursuit jusqu'à nos jours. Elle est représentée dans la géologie de M'Semrir et n'occupe que quelques synclinaux par quelques formations, notamment le Rharbien, le Soltanien, le Tensiftien et le Villafranchien. Ces formations sont principalement des dépôts alluviaux, éoliens et volcaniques.

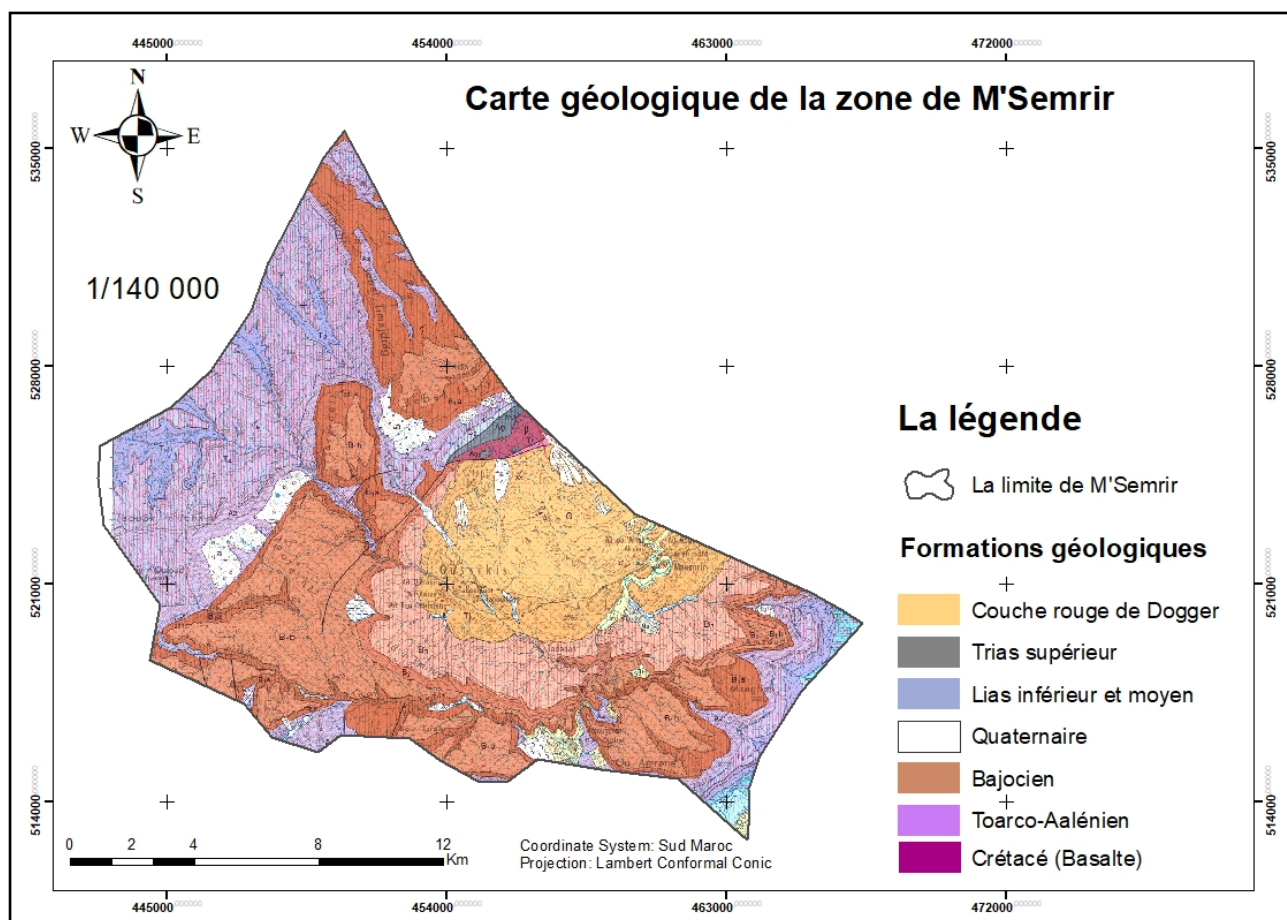
Le Rharbien : la formation la plus récente du quaternaire dans la région de M'Semrir. Elle se compose principalement de dépôts alluviaux et éoliens, avec des sables, des argiles et des graviers. Cette formation est souvent associée à une période de climat plus humide et plus frais que le présent.

Le Soltanien : Une formation principalement constituée de dépôts alluviaux et éoliens, avec des sables et des argiles. Elle est également associée à une période de climat plus frais et plus humide que le présent.

Le Tensiftien : est du quaternaire moyen, cette formation se compose principalement de dépôts volcaniques, avec des basaltes et des tufs. Elle est associée à une période d'activité volcanique dans la région.

Le Villafranchien : est une formation composée principalement de dépôts alluviaux, avec des sables, des argiles et des graviers. Elle est associée à une période de climat variable et instable, avec des fluctuations entre des périodes plus sèches et plus humides.

Les montagnes de M'Semrir sont principalement constituées de formations géologiques datant du Trias et du Jurassique, comprenant des basaltes, des grès, des marnes et du calcaire. Les couches marno-calcaires du Jurassique sont les plus compétentes et sont présentes dans la quasi-totalité de la superficie des montagnes. La région abrite également une série sédimentaire de calcaires marins datant du Liassique au Bajocien, ainsi que des lits rouges. Les formations géologiques de M'Semrir sont caractérisées par des roches compactes, dures et encroûtées.

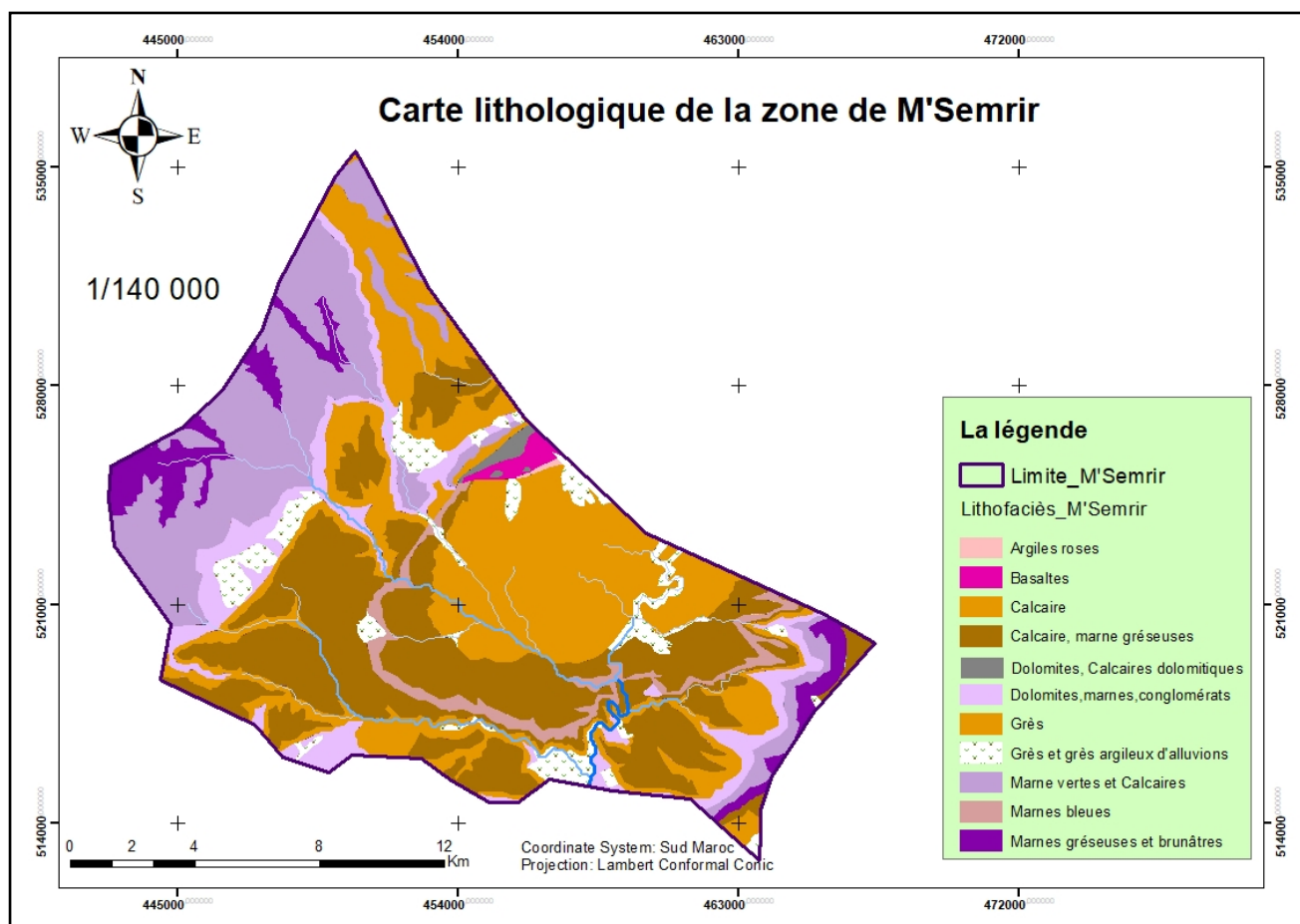


Carte 4 : Géologie de M'Semrir

II.5 Ressources en sols

La commune de M'Semrir est située dans une région aride et semi-aride, caractérisée par des sols bruns, grisâtre et lessivés avec une texture sablonneuse ou limoneuse. Les sols ont une faible teneur en matières organiques et une capacité de rétention d'eau limitée, ce qui rend la pratique agricole difficile. Les sols sont également caractérisés par une forte teneur en calcaire, ce qui peut affecter leur fertilité. Le sol fertile n'occupe qu'une petite surface sous forme de sédimentation alluviale sur les rives de la vallée (Caïdat M'Semrir, 2009). Les sols sont en majorité grisâtres avec une texture limoneuse et une faible teneur en matière organique.

La carte lithologique de la zone de M'Semrir laisse apparaître une grande diversité des formations superficielles avec prédominance des couches marno-calcaires du jurassique.



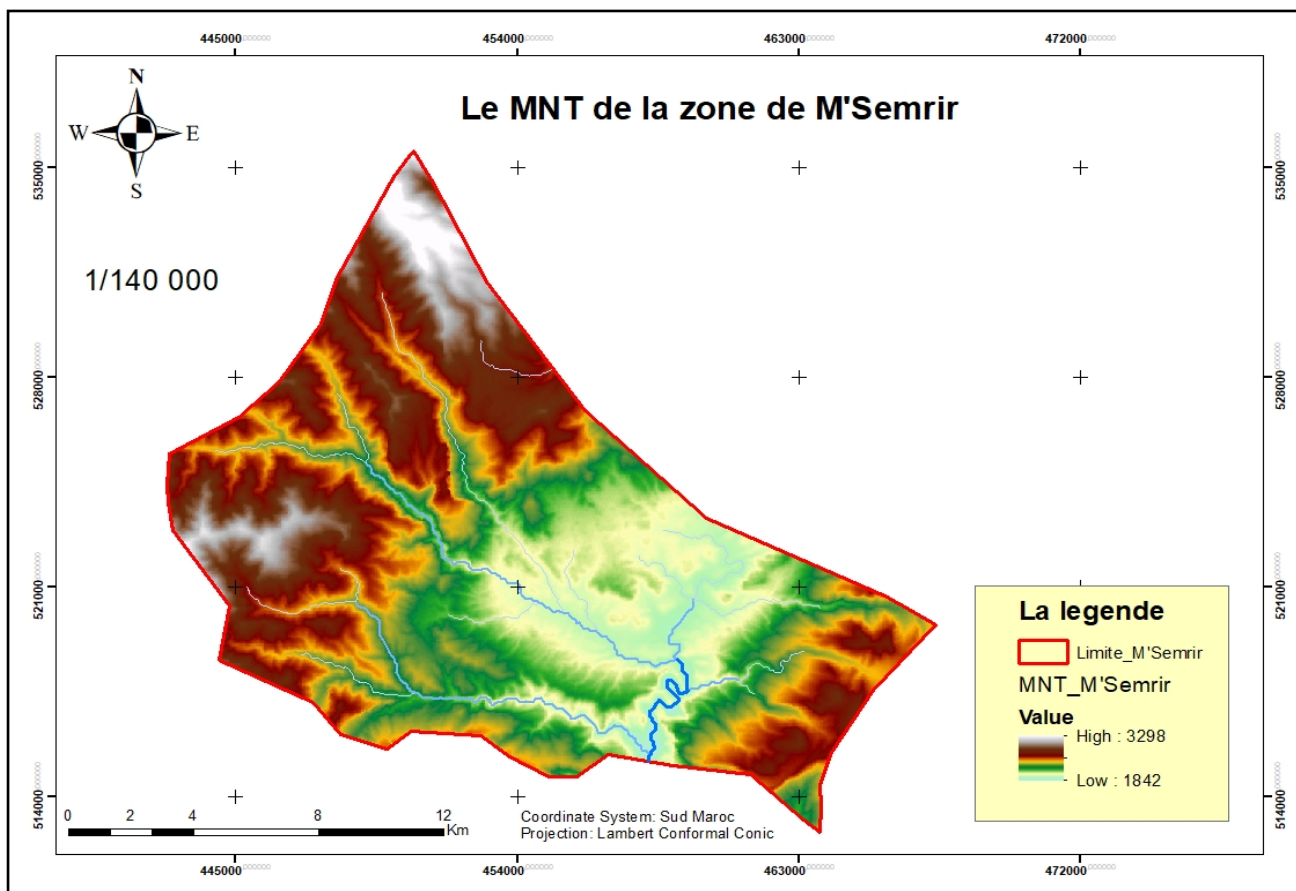
Carte 5 : Litho-faciès de M'Semrir

II.6 Cadre Topographique

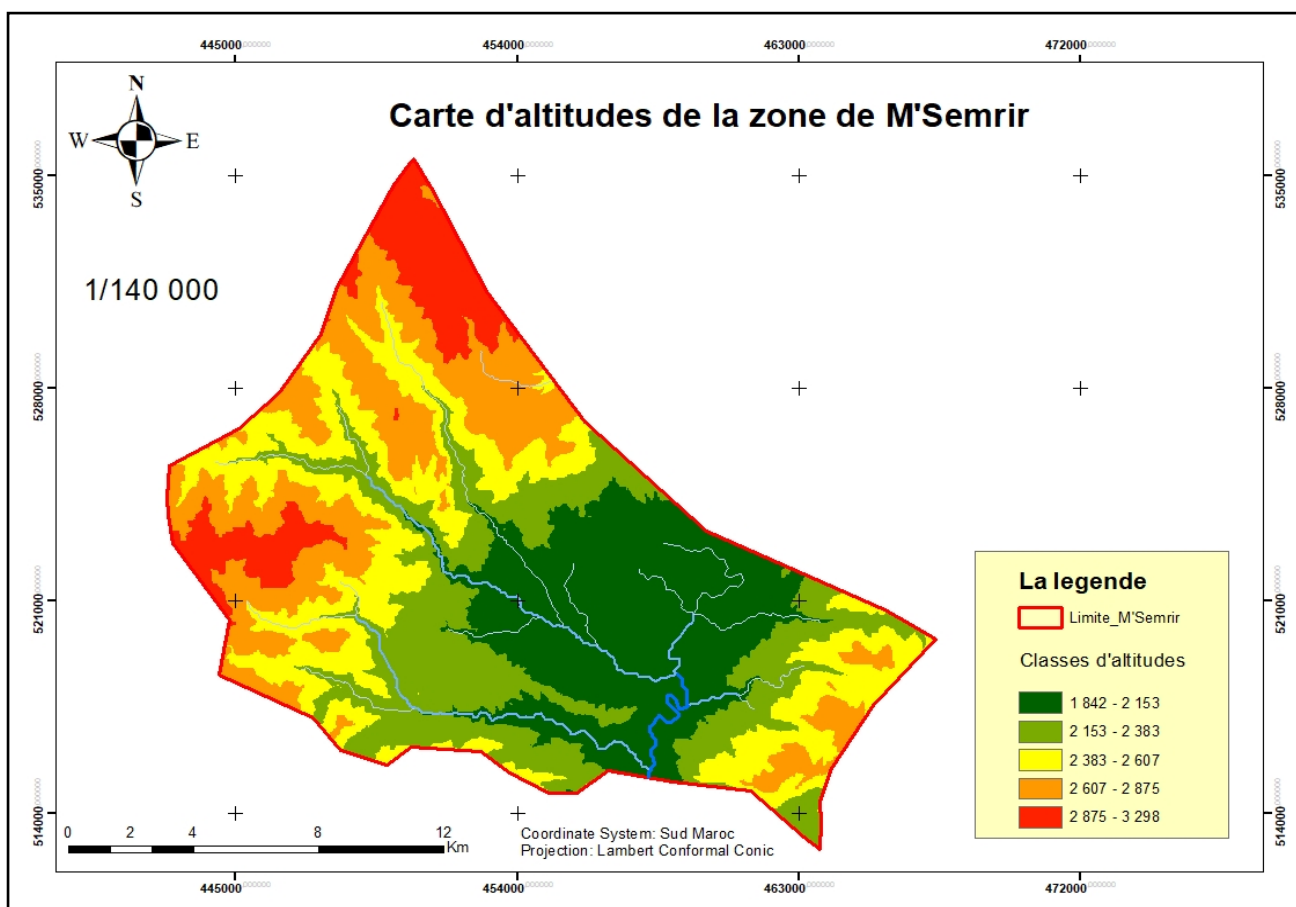
La connaissance du relief apporte des renseignements très importants sur les problèmes de l'érosion dans un territoire. Il est facile de comprendre comment le relief influe sur l'écoulement car plusieurs paramètres hydrométéorologiques tels que les précipitations et les températures varient en fonction de l'altitude. De plus, la pente a une influence aussi sur la vitesse de l'écoulement. Le relief peut également être évalué en utilisant des indices ou des courbes caractéristiques telles que la courbe hypsométrique.

II.6.1 Répartition spatiale des altitudes

La répartition spatiale des altitudes (Carte N°7) de la zone en question, est définie à partir des données altimétriques du modèle numérique de terrain qui nous a permis de dresser la carte hypsométrique pour l'ensemble de la commune. L'altimétrie joue un rôle essentiel puisque la force motrice des écoulements de surface est gravitaire. L'altitude de la zone de M'Semrir joue un rôle sur le contrôle des précipitations de par sa relation avec les conditions climatiques du milieu. Cette carte hypsométrique permet de visualiser la variation des altitudes dans la zone, allant de 1842 mètres, l'altitude minimale considérant le point le plus bas à 3298 mètres d'altitude, représentant le point le plus élevé (altitude maximale) de la zone.



Carte 6 : Modèle Numérique de Terrain de la zone d'étude

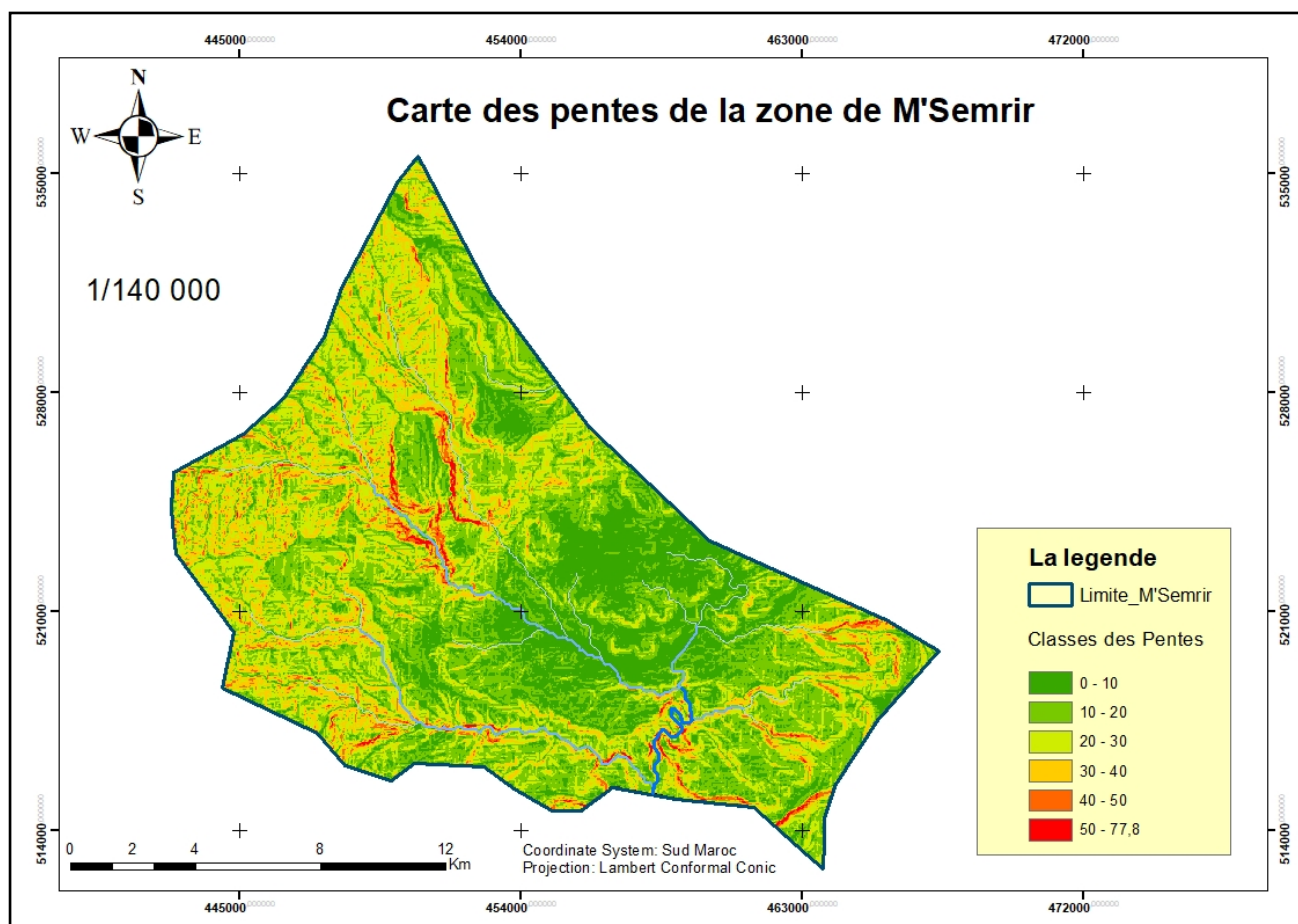


Carte 7 : Hypsométrique de la zone de M'Semrir

II.6.2 Répartition spatiale des pentes

La pente est une caractéristique cruciale des bassins versants lorsqu'il s'agit de résoudre les problèmes d'érosion. Elle fournit l'énergie nécessaire aux écoulements pour arracher et transporter les particules solides. Plus la pente est raide, plus l'énergie érosive des écoulements est élevée (Elaloui, 2017). La carte des pentes (Carte N°8), constitue un des éléments de base pour l'analyse des caractéristiques physiques qui déterminent l'aptitude des diverses zones. En effet, la potentialité et les limites d'utilisation du territoire dépendent dans leur majeure partie de la pente puisque celle-ci contribue à la détermination des possibilités d'érosion en relation avec d'autres facteurs. Cette érosion peut se manifester sous différents aspects : l'érosion en nappe si les pentes sont faibles, l'érosion en rigoles et par ravinement si les pentes sont moyennes à fortes et sous forme d'arrachement et d'éboulement si les pentes sont très fortes. La carte est établie sur la base du modèle numérique de terrain de la zone de M'Semrir, elle présente les différentes classes de pente qui caractérise le territoire d'étude :

- Classe 1 : (0-10), Cette classe correspond aux zones de terrain généralement plats, comme les fonds de vallées, les plaines et les plateaux. Les pentes dans cette classe sont légères.
- Classe 2 : (10-20), Cette classe caractérise les reliefs vallonnés, tels que les plateaux ou les collines. Les pentes dans cette classe sont plus accentuées.
- Classe 3 : (20-30), Cette catégorie peut être trouvée sur des pentes de montagne moyenne et des terrains vallonnés.
- Classe 4 : (30-40), Cette catégorie peut être trouvée sur des montagnes raides ou des pentes abruptes.
- Classe 5 : (40-50), Cette catégorie peut être trouvée sur des pentes très raides de montagnes.
- Classe 6 : (>50), Cette classe décrit les hauts piémonts et les zones montagneuses avec des pentes extrêmement raides. Les terrains dans cette classe sont les plus difficiles à gravir et nécessitent des compétences particulières pour y accéder.



Carte 8 : Distribution spatiale des classes des pentes dans la zone de M'Semrir

II.7 Couverture végétale

Le facteur le plus crucial pour ralentir l'érosion des sols sur les versants est le couvert végétal. Un couvert végétal dense est particulièrement efficace pour réduire l'érosion car il absorbe l'énergie des gouttes de pluie, ralentit l'écoulement des eaux à la surface du sol, et préserve une porosité superficielle optimale en empêchant l'encroûtement du sol (Ouallali et al., 2016).

La densité du couvert végétal est influencée par la croissance et le développement de la végétation qui dépendent des conditions climatiques. Ce facteur joue un rôle essentiel dans la conservation de la résistance des sols, car un couvert végétal complet permet une meilleure préservation des sols et des ressources en eau, indépendamment de la nature du sol, de la pente et du climat.

La végétation présente dans cette zone présente des caractéristiques communes à celles que l'on retrouve en haute montagne, notamment avec des plantes épineuses, herbacées et de taille réduite. On y trouve des espèces telles que l'Armoise, l'Alfa, le Genévrier, le Génépi, la Fétuque rouge, la Stipa nitans, la Dactylis et la Glomérata (Caïdat M'Semrir, 2009).

La photo suivante de M'Semrir montre des zones à haute densité végétale correspondant aux zones de polyculture situées aux bords de l'oued et les zones à densité faible correspondant aux zones de montagnes (parcours) où la végétation est très dégradée.



Photo 1 : Végétation dans l'Oasis de M'Semrir

II.7.1 Cartographie du couvert végétal

La carte du couvert végétal de la zone de M'Semrir (Carte N°11) a été réalisée en utilisant la photo interprétation sur les images google earth ainsi qu'une combinaison des bandes composites de l'image Sentinel-2A.

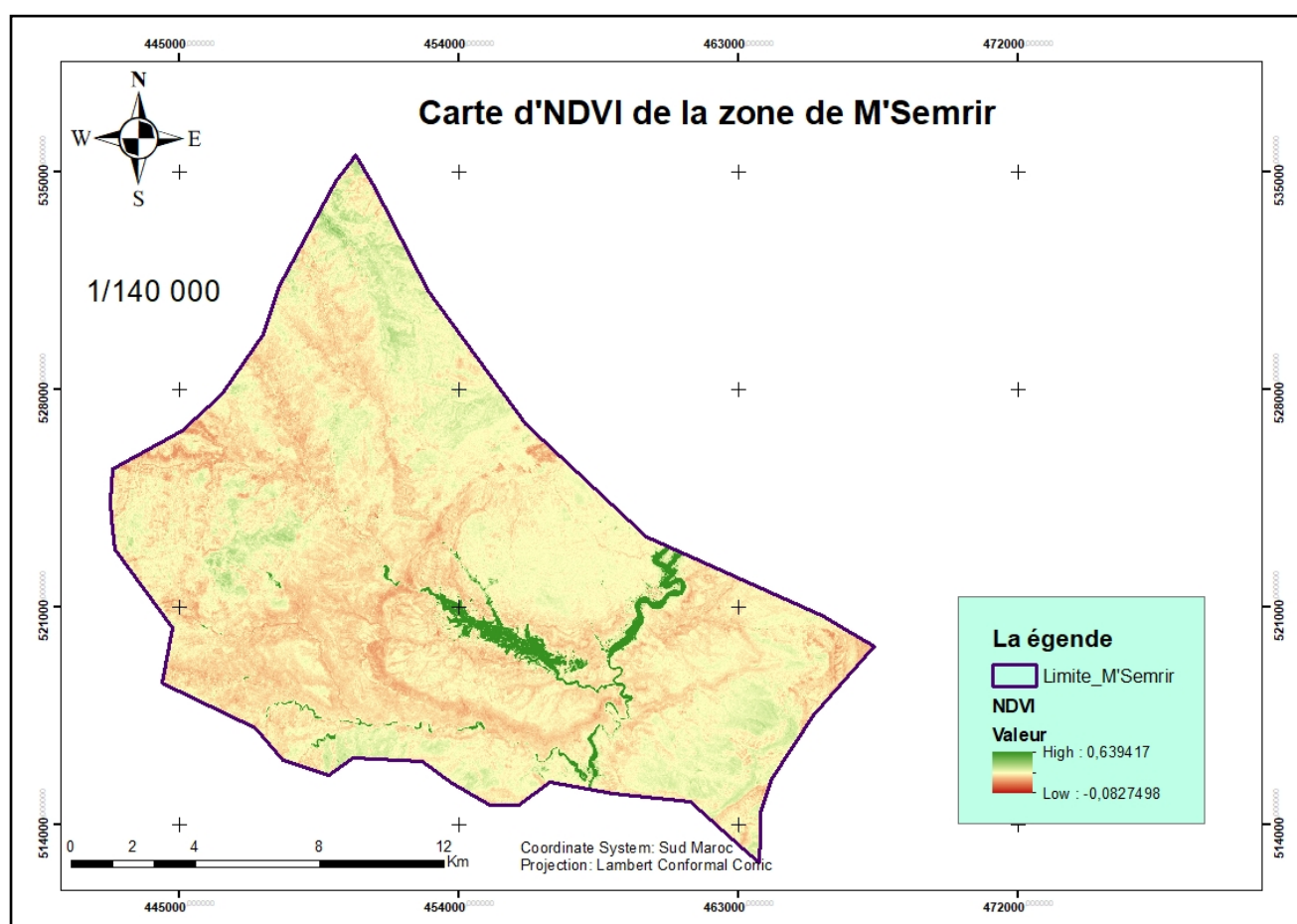
Nous avons procédé par réaliser une carte de l'indice de végétation par différence normalisée, l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), en utilisant le canal rouge (R) et proche infrarouge (PIR). L'indice de végétation normalisée est calculé en mettant en évidence la différence entre la bande rouge visible et celle du proche infrarouge, conformément à l'équation suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R}) / \text{PIR}+\text{R})$$

L'indice de végétation NDVI, qui réagit à la santé et à la densité de la végétation, est mesuré sur une échelle allant de -1 à +1. Les valeurs négatives de l'indice indiquent des zones autres que les couverts végétaux, telles que la neige, l'eau ou les nuages, où la réflectance dans la bande rouge est supérieure

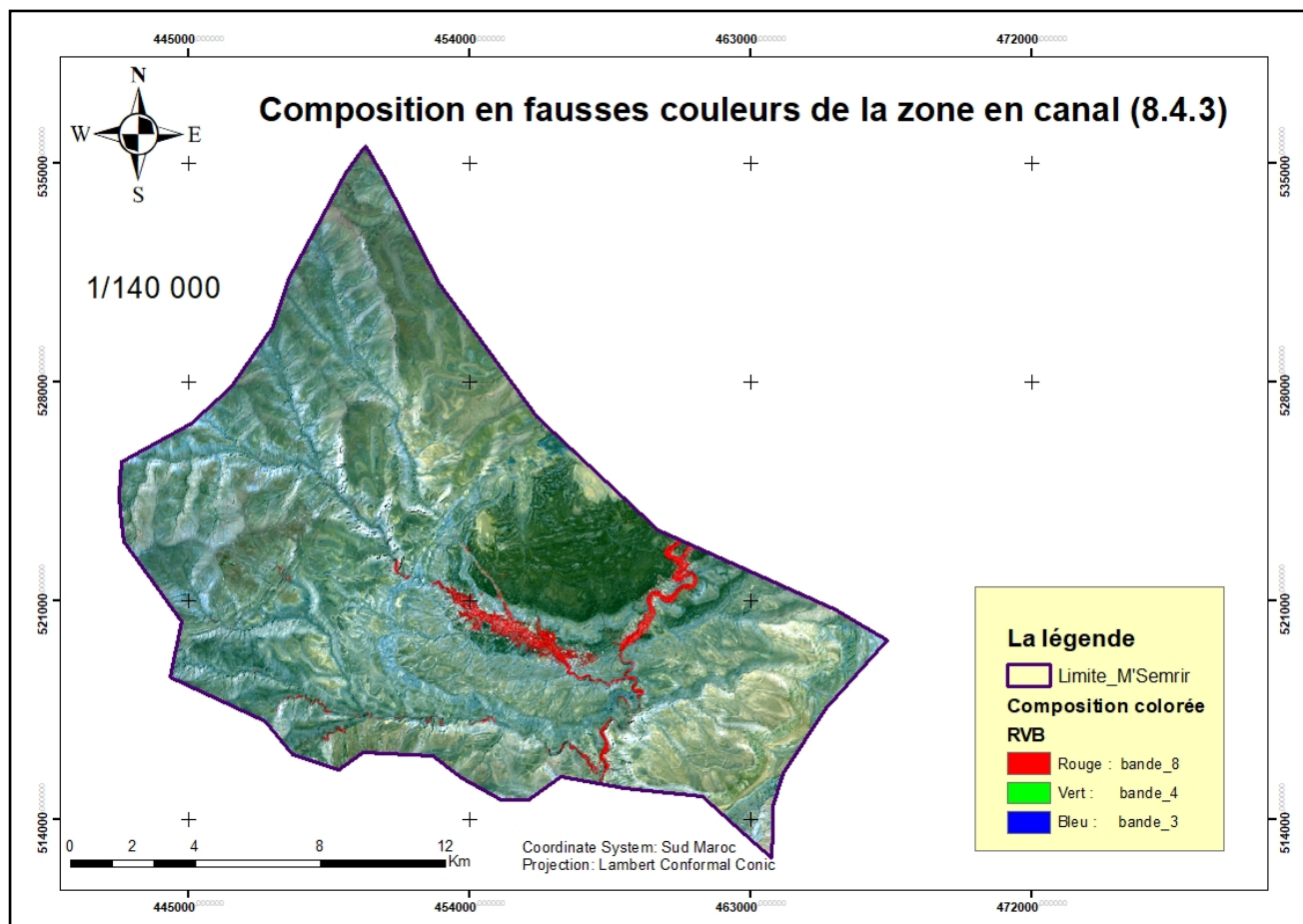
à celle dans le proche infrarouge. Pour les sols nus, où les réflectances sont à peu près les mêmes dans les deux bandes, le NDVI est proche de 0. Les zones couvertes de végétation ont généralement des valeurs positives de NDVI, allant de 0,1 à 0,7, les couverts les plus denses présentant les valeurs les plus élevées.

En utilisant le logiciel ArcGIS, nous avons généré une carte de la NDVI de la zone d'étude (**Carte.9**), à partir d'images satellitaires multispectrales Sentinel-2A d'une résolution de 10 mètres. La valeur minimale de la NDVI dans cette zone est de -0,0827, ce qui peut correspondre à des zones enneigées ou des terrains rocheux. D'autre part, la valeur maximale de cet indice est de 0,639, indiquant des zones de végétation très dense et de terres cultivées en polycultures.



Carte 9 : NDVI de la zone de M'Semrir

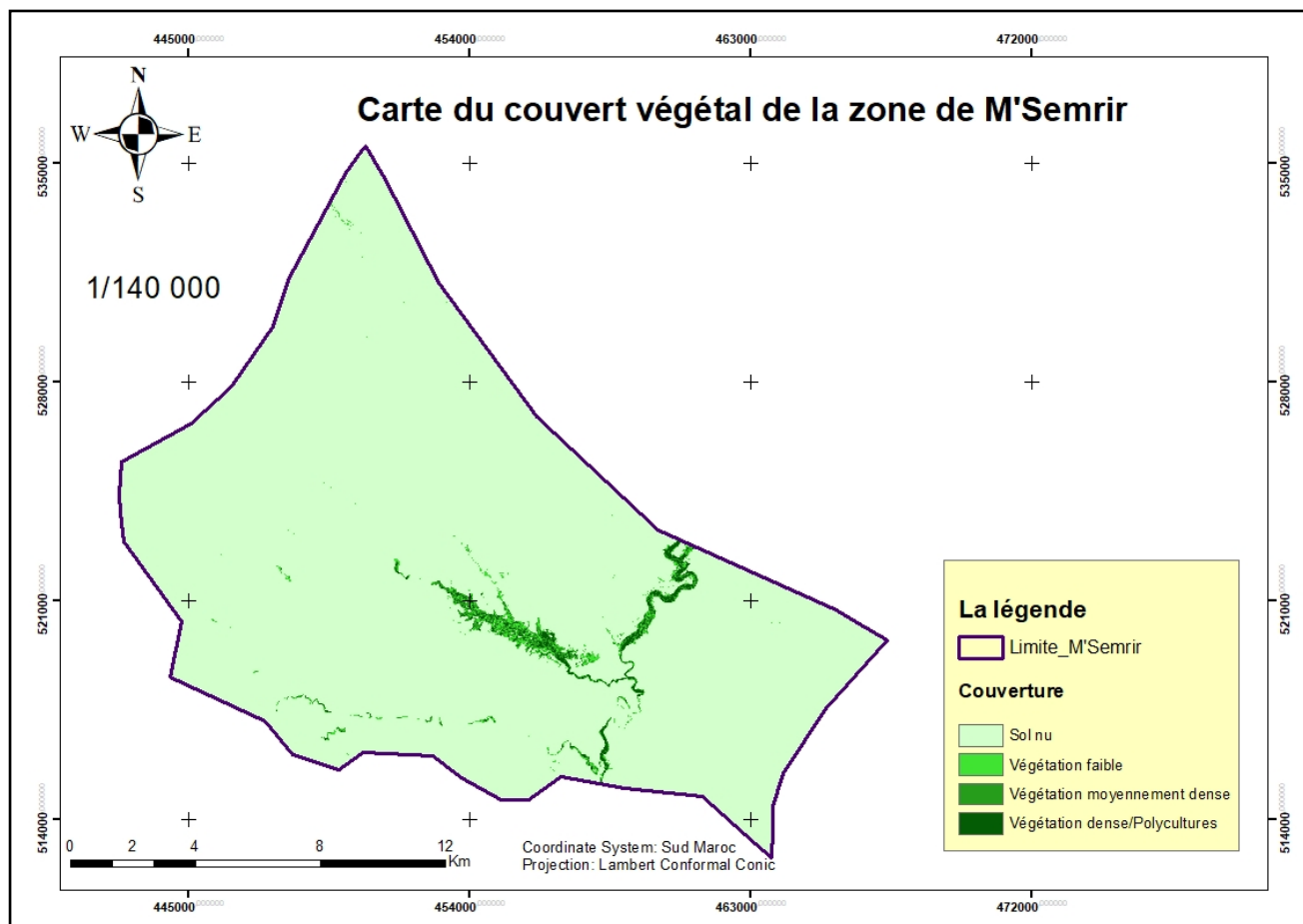
Après avoir reclassé les valeurs de la NDVI, des traitements statistiques ont pu être effectués. Cette reclassification supervisée s'est basée sur notre connaissance du territoire, visualisation des images google earth et sur la comparaison avec la composition RGB des bandes (8.4.3) de l'image Sentinel-2A qui fait apparaître la végétation en fausse teinte rouge (Carte N°10). Ainsi, plusieurs zones ont pu être distinguées en fonction de la NDVI et de la densité du couvert végétal.



Carte 10 : Composition en fausses couleurs de la zone d'étude, en canal (8.4.3)

La carte générée suite à cette reclassification, présentée dans la (Carte N°11), indique quatre niveaux de couverture végétale :

- Les sols nus : correspondant à des terrains pratiquement rocailleux où la végétation est négligeable.
- Les zones présentant une couverture végétale faible : où la végétation est probablement dégradée.
- Les zones présentant une végétation moyennement dense : zone du développement végétal
- Les zones couvertes par une végétation dense : zone de polycultures



Carte 11 : Recouvrement végétal de la zone de M'Semrir

II.8 Cadre socioéconomique :

II.8.1 Population et démographie :

Le territoire de M'semrir est peuplé par trois groupes berbérophones distincts : les Aït Hadidou en amont, les Aït Merghad au milieu et les Aït Atta en aval.

Selon le dernier recensement du Maroc en 2019 données de l'ORMVAO, 2019 apportés par (CHAKROUN, 2022) dans le cadre son PFE, la population totale de la zone est de 20 238 habitants, répartis dans 3 084 ménages et 37 douars. Les ménages ont une taille moyenne de 6,9 personnes et les femmes représentent près de 51 % de la population totale. La densité de la population est élevée dans les zones où l'eau est disponible, avec 13 habitants par hectare, ce qui souligne une forte pression sur les ressources naturelles. Au fil des années, cette population majoritairement nomade s'est sédentarisée le long des cours d'eau, comptant désormais 2 200 agriculteurs. L'économie de la région repose principalement sur l'agriculture et l'élevage, avec des revenus supplémentaires provenant du

commerce, de l'émigration et dans une moindre mesure, du tourisme de montagne (randonneurs), qui commence à se développer récemment.

II.8.2 Structures foncières et statuts juridiques des terres

Dans la commune de M'Semrir, il existe trois types de statuts fonciers pour les terres selon le Centre de Mise ne Valeur (CMV) agricole de M'Semrir rapporté par (EL HAFID, 2022) dans le cadre de son PFE en 2022. Les terres collectives ou tribales représentent la moitié de la superficie totale de la commune et 75 % des terres. Les terres Melk (privées ou familiales), qui occupent 1400 hectares de la superficie totale de la commune, sont le deuxième type de statut foncier. Enfin, les terres de Habous, qui ne représentent qu'1% de la totalité des terres communales, constituent le dernier type de statut foncier. Les terres collectives à M'Semrir appartiennent à la confédération d'Aît Atta, plus précisément aux tribus d'Aît Wahlim et d'Aît Isfoul à hauteur de cinq cinquièmes. Le morcellement des terres tribales entre les héritiers a entraîné l'apparition du statut foncier Melk. Quant au statut Habous, il est en voie de disparition au profit du statut Melk en raison des processus de Melkisation ambiguë de ces terres.

II.8.3 Agriculture

Dans la vallée du Dadès, l'agriculture (Photo N°2) est caractérisée par une polyculture étagée et des techniques de production traditionnelles qui s'adaptent bien aux conditions de l'écosystème. Les habitants, à la fois éleveurs et cultivateurs, pratiquent ces deux formes d'économie rurale de manière différente selon les secteurs de la vallée, avec une intensité croissante de l'amont vers l'aval. L'objectif principal de cette agriculture est l'autoconsommation avant que les agriculteurs d'intéresse à la culture du pommier et à l'intensification (MARTIN, 2014).

À M'semrir, les systèmes de production végétale se caractérisent actuellement par une agriculture en étage dominée par la céréaliculture, suivie de près par l'arboriculture fruitière et les cultures fourragères, principalement la luzerne. Les cultures fourragères occupent 55 % de la surface agricole utile (SAU) totale, avec une prédominance de la jachère (46 %) et de la luzerne (9 %), en raison de l'importance de l'élevage dans la région. Les cultures maraîchères représentent 25 % de la SAU, tandis que la céréaliculture représente 20 % (CMV M'Semrir) rapporté par (AMARTINI, 2022) pour son PFE. Les arbres fruitiers sont présents en abondance dans les zones où l'irrigation est disponible, avec une extension marquée de l'arboriculture fruitière, favorisée par la place particulière accordée à cette filière par le Plan Maroc Vert. Cette production intensive est principalement destinée au marché (90 %), avec une prédominance de la culture de pommes. Les pommiers cultivés à M'semrir sont de trois principales variétés : Golden Delicious et ses pollinisatrices Starking Delicious et Star Crimson, ainsi que la Royal Gala et Jérôme. Une unité frigorifique d'une capacité de stockage de 1 500 tonnes a été installée localement en 2018 par l'ORMVAO pour permettre aux producteurs de profiter des

opportunités du marché. Les marchés hebdomadaires sont présents dans presque toutes les communes rurales et sont de véritables lieux d'échange où les produits locaux peuvent être découverts. En plus de leur atmosphère colorée, ces marchés offrent un endroit intéressant pour les touristes et les citoyens qui sont curieux de découvrir de nouveaux produits locaux. (Sabiri, 2018)



Photo 2 : Agriculture dans la zone de M'Semrir

II.8.4 L'élevage

Dans le périmètre de M'semrir, l'élevage (Photo N°3) est crucial et les petits ruminants dominent largement avec 94,3% des animaux d'élevage. Parmi ceux-ci, 79,3% sont potentiellement mobiles et se trouvent dans les enclos et les parcours, tandis que les autres 20,7% sont sédentaires. Le bétail bovin représente seulement 5,2% du total et se compose d'animaux de race locale et croisés. Les systèmes de production agricole sont traditionnellement caractérisés par une agriculture circulaire, où l'élevage et les cultures se complètent. Les parcelles plantées en pommiers sont également utilisées pour des cultures fourragères, comme la luzerne, et les écarts de triage et le bois de taille sont valorisés par le troupeau. Le fumier est soigneusement stocké et épandu pour garantir la fertilisation des sols et le recyclage des nutriments. Les équidés représentent 0,37% des animaux d'élevage et sont utilisés

comme moyen de transport dans les montagnes, tandis que les camelins ne constituent que 0,21% des animaux d'élevage et se trouvent dans les espaces pastoraux (AMARTINI, 2022).



Photo 3 : Elevage dans la zone de M'Semrir

II.8.5 Organisation du secteur agricole dans la zone

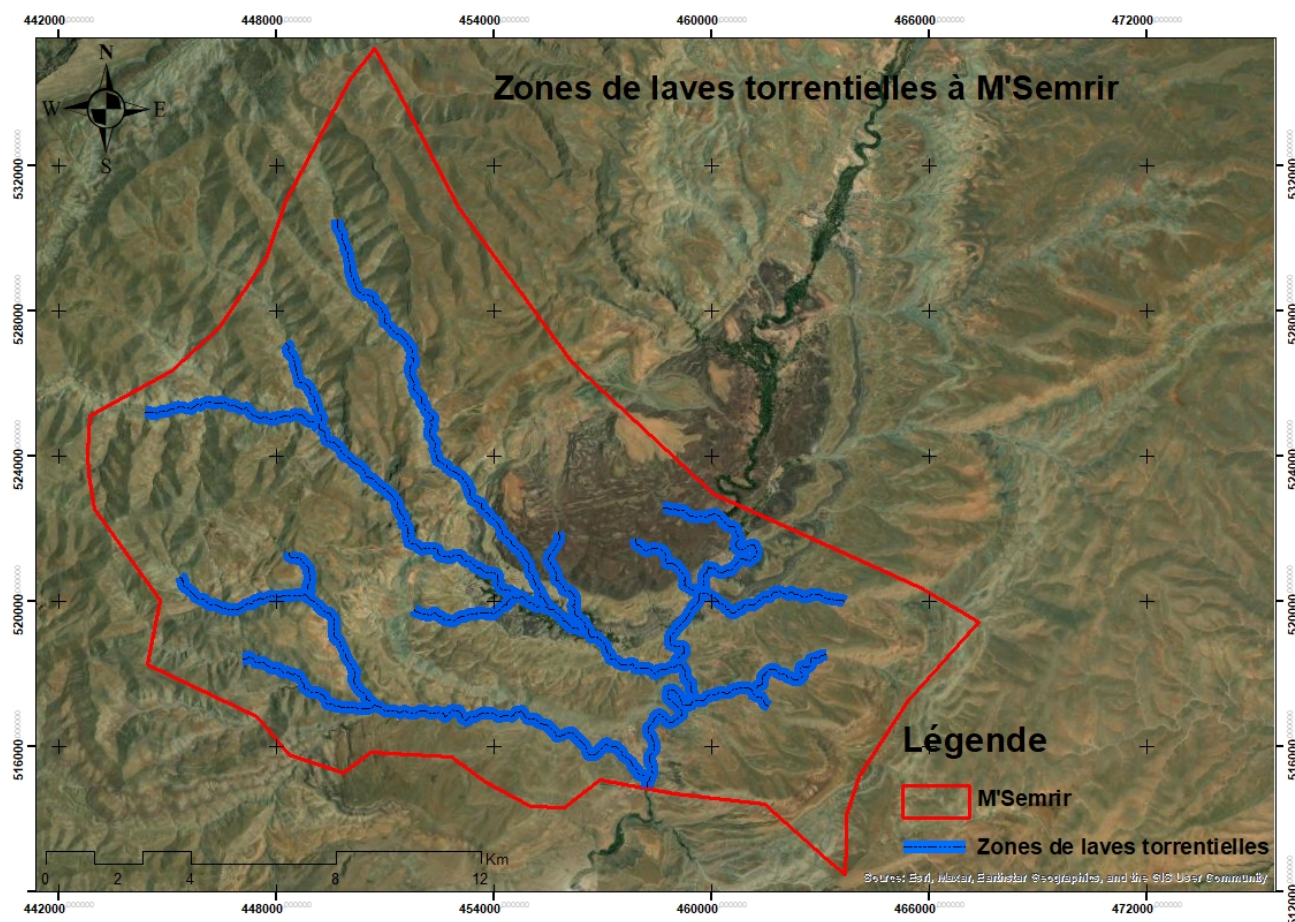
L'activité agricole de la zone de M'Semrir est marquée par l'implication de mouvements associatifs dans plusieurs domaines, notamment la gestion des ressources hydriques, l'espace pastoral et la production de pommes. Il y a 12 AUEA (Associations d'Usagers de l'Eau Agricole), 6 associations de producteurs de pommes, 4 associations d'éleveurs transhumants et une coopérative de producteurs de pommes. En 2018, une unité frigorifique a été créée et est administrée par 4 coopératives pour gérer le stockage et l'écoulement de la récolte de pommes. De plus, des associations de développement local ont vu le jour au cours des dix dernières années pour encadrer et mobiliser la population et représenter leurs intérêts. ORMVAO, 2020 rapporté par (AMARTINI, 2022).

II.9 Coulés de laves torrentielles à M'Semrir

Les laves torrentielles de la pluie dans le territoire de M'Semrir sont des phénomènes météorologiques particulièrement fascinants. Lorsque de fortes pluies s'abattent sur les montagnes entourant la zone, elles peuvent provoquer des inondations soudaines et des coulées de boue dévastatrices.

Ces précipitations torrentielles entraînent une montée rapide du niveau de l'eau dans l'Oued et sur les versants, transportant avec elles d'énormes quantités de boue, de débris et de rochers. Ces flots boueux dévalent les flancs des montagnes avec une forte puissance, emportant tout sur leur passage.

Pour élaborer cette carte nous avons procédé à l'analyse hydrologique de la zone à travers le modèle numérique du terrain (MNT) pour spécifier le chemin de coulés de laves torrentielles.



Carte 12 : Laves torrentielles à M'Semrir

III. PARTIE III : CARTOGRAPHIE DE L'ÉROSION HYDRIQUE

III.1 METHODES ET MATERIELS

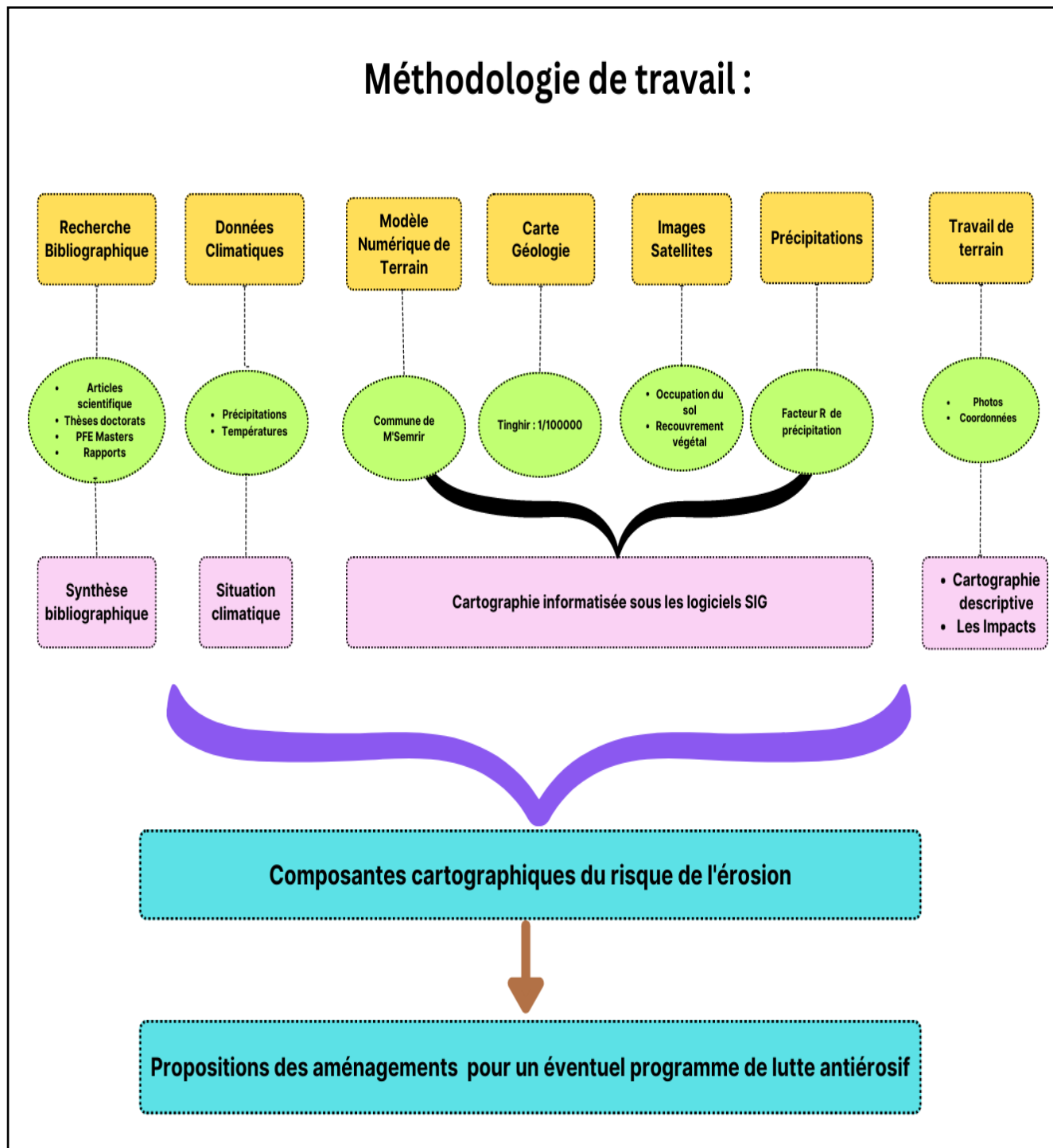


Figure 8 : Schéma général de la méthode de travail

III.1.1 Matériels

Les données multi sources utilisées dans cette étude comprennent :

- **La carte géologique de la province de Tinghir au 1/100000.** Téléchargée du site : <https://www.geojamal.com> , carte numérisée et géo-positionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert Sud Maroc dans le logiciel ArcGIS. Cette carte permettra de déduire les unités lithologiques rencontrées dans le secteur étudié. Les litho-faciès ont été ensuite classées selon leurs degrés de friabilité.
- **Un model numérique terrestre (MNT) de résolution 30 m.** Modèle téléchargé du site : <http://www.usgs.com>. Les données SRTM sont des images satellites de topographie obtenues par le système de radar « Shuttle Radar Topography Mission », à bord du satellite « Space Shuttle Endeavour », lancé en Février 2000. Ce projet international SRTM, dirigé par la « National Geospatial-Intelligence Agency » (NGA) et la « National Aeronautics and Space Administration » (NASA), a pour objectif de constituer une banque de données numériques complète de topographie de haute résolution couvrant toute la surface terrestre.
- **Les images satellitaires multi spectral,** Landsat ETM, Août 2000 et Août 2013 ; du Sentinel-2A, Août 2022, la mission Sentinel-2 collecte des images multispectrales à haute résolution utiles pour un large éventail d'applications, y compris la surveillance de la végétation, de la couverture du sol et de l'eau, le changement de la couverture terrestre, ainsi que les risques humanitaires et de catastrophe. Le programme Copernicus est une initiative ambitieuse dirigée par la Commission européenne en partenariat avec l'agence spatiale européenne (ESA). Elles ont servi pour déterminer les classes végétales en se basant sur l'indice de végétation par différence normalisée "NDVI" et l'occupation des sols.
- **Série des données de précipitations annuelles entre 1981 et 2022,** obtenues du site <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>. Les résultats obtenus ont permis de dresser des cartes précises des précipitations minimales, maximales, moyennes et médianes de la zone d'étude.
- **Données de précipitations moyennes annuelles des années (2000 ; 2013 et 2022).**
- **Un fichier vecteur (Shapefile),** le découpage administratif du Maroc téléchargé du site : <https://hub.arcgis.com>. Ce fichier nous a servi à extraire la limite de la zone d'étude et au découpage des images satellitaires et le MNT et de limiter ainsi le traitement des données spatialement.

Des données auxiliaires comprennent les observations sur le terrain (prélèvement des coordonnées GPS des points de contrôles pour la validation, prise des photos...).

Logiciels et application utilisés :

Le traitement des données au cours de cette étude a été effectué avec les logiciels suivants :

- **ArcGis 10.6**, pour le traitement, le géo-positionnement, l'extraction et la mise en forme cartographique.
- **ENVI 5.1**, pour le traitement informatique des images satellitaires Landsat et Sentinel-2A.
- **Google Earth**, pour la photo-interprétation et des observations sur la zone d'étude.
- **Excel**, pour le traitement statistique des données et génération des graphiques.
- **GPS Arrow Pro**, pour la prise des coordonnées sur le terrain.

III.1.2 Méthodologie

III.1.2.1 Principe de base de l'étude : Modèle modifié des directives PAP/CAR

L'approche méthodologique des directives PAP/CAR sont une méthode qualitative pour étudier l'érosion hydrique. Elle hiérarchise la surface d'un territoire en unités distinctes selon leur vulnérabilité au phénomène d'érosion, afin d'identifier les zones les plus fragiles et susceptibles de produire des sédiments. Nous avons modifié ce modèle en intégrant le facteur de l'érosivité des précipitations. Cette approche repose sur une cartographie descriptive et prédictive qui intègre des facteurs biophysiques tels que la pente, la lithologie, les précipitations et le couvert végétal pour déterminer le risque d'érosion hydrique.

III.1.2.2 Cartographie numérique

La cartographie numérique des facteurs qui peuvent influencer les phénomènes d'érosion dans la zone de M'Semrir consiste à réaliser une carte, pour chaque facteur, en utilisant les logiciels cités au-dessus. Le traitement des bases de données de ces cartes nous permettra d'extraire les valeurs représentatives des facteurs cartographiés. Ces valeurs seront, ensuite, classées et à chaque classe on attribuera un indice selon son importance vis à vis de l'érosion.

La combinaison de ces cartes thématiques (croisement des divers paramètres), sur la base des indices attribués, permet d'avoir une carte de sensibilité à l'érosion dont les unités spéciales sont réparties en plusieurs classes, du plus faible au plus fort dans un environnement SIG (ArcGIS). Cette carte peut être un outil d'aide au responsable à la décision en localisant les zones prioritaires et la proposition des scénarios d'intervention.

III.1.2.3 Cartographie de terrain

L'étape de cartographie de terrain durant ce travail est essentiellement à pour but de compléter la cartographie numérique surtout en ce qui concerne la spécification des formes d'érosion, la géologie et l'occupation du sol.

III.1.2.4 Schéma méthodologique général

La démarche méthodologique fondamentale consiste en 3 phases clairement définies :

- La phase prédictive qui aboutit à la cartographie des unités homogènes des états érosifs dans la zone d'étude, fournissant le canevas pour la cartographie du potentiel et des tendances générales d'érosion ;
- La phase descriptive consistant à identifier et évaluer les processus actuels d'érosion sur le site, ainsi que les différents degrés d'exposition à l'érosion et les tendances évolutives ;
- La phase d'intégration dont le résultat principal est la carte finale d'érosion hydrique de la zone. Cette phase est obtenue par la superposition et l'intégration des informations qualitatives issues des phases prédictive et descriptive.(PAP/CAR, FAO, 1998)

La phase prédictive consiste principalement en un traitement de données selon une séquence de 9 opérations différentes :

- Opérations 1 et 2 : Elaboration des cartes des classes de pentes et de litho-faciès ;
- Opération 3 : Elaboration de la carte de stabilité des terrains, par superposition des cartes des pentes et des litho-faciès ;
- Opérations 4 : Elaboration de la carte d'érosivité des précipitations ;
- Opérations 5 : Elaboration de la carte d'érodibilité des sols, par croisement des cartes de stabilité du terrain et d'érosivité des pluies ;
- Opérations 6 et 7 : Elaboration des cartes d'occupation du sol et de couvert végétal ;
- Opération 8 : Elaboration de la carte de protection des sols, par superposition des cartes d'occupation du sol et de couvert végétal ;
- Opération 9 : Elaboration de la carte des états érosifs potentiels, par superposition des cartes d'érodibilité et de protection des sols ;

La phase descriptive est réalisée par le travail de terrain (reconnaissance et suivi des formes) et par le traitement des images satellitales, et de la photo-interprétation des images google earth. La carte a été réalisé par digitalisation des formes depuis les images satellites.

Le produit de la phase d'intégration est la carte finale consolidée d'érosion, obtenue grâce à la consolidation de toutes les données prédictive et descriptives. La troisième phase, la carte finale, fourni une carte qualitative, combinant les données descriptives et prédictives. Cette carte consolidée, contient des informations complètes sur les différents aspects des phénomènes d'érosion dans la zone montrant les coïncidences des formes avec les zones à risques.

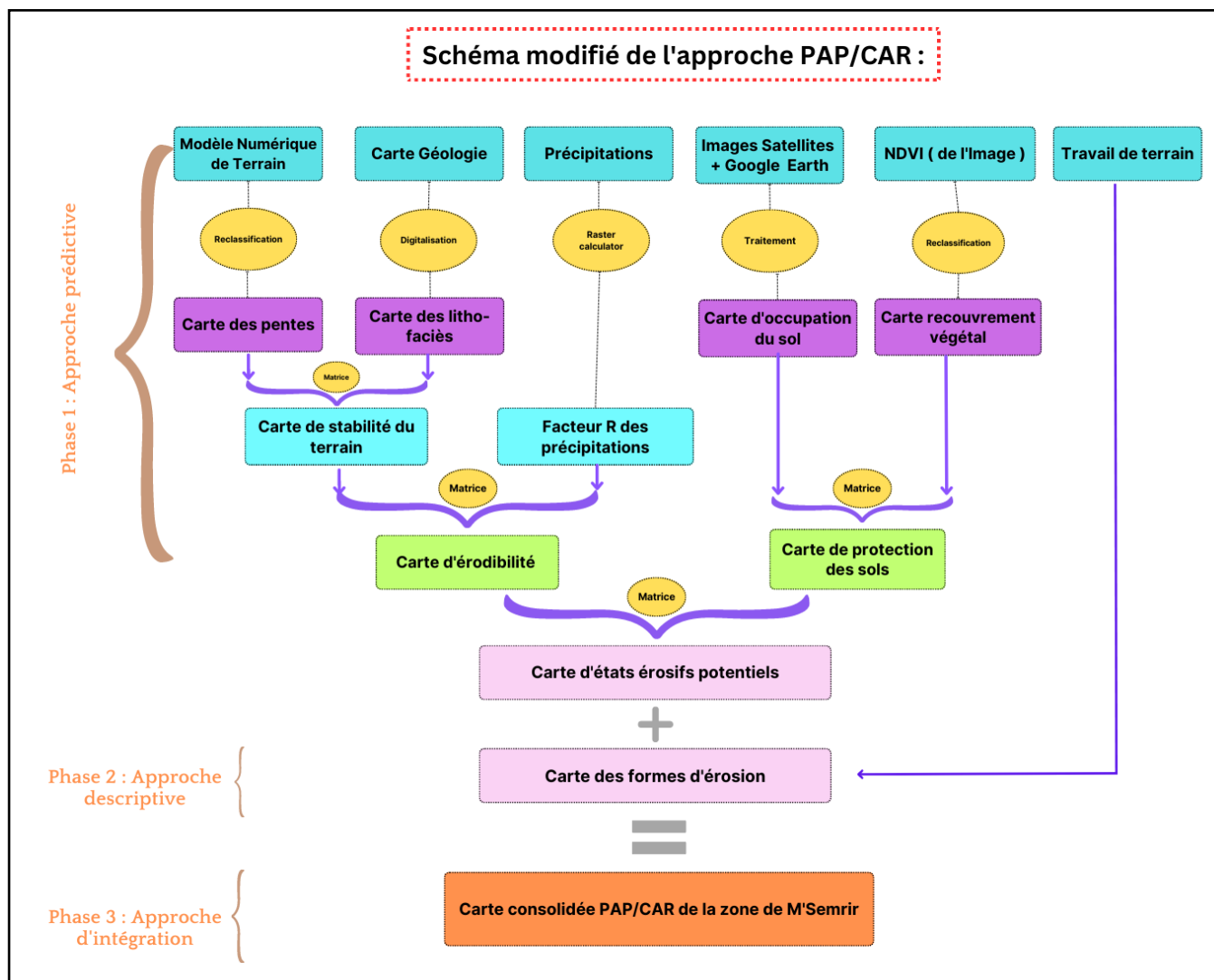


Figure 9 : Schéma modifié de l'approche PAP/CAR

III.2 RESULTATS ET DISCUSIONS

III.2.1 Evaluation de l'érosion hydrique par l'approche PAP/CAR

III.2.1.1 L'approche prédictive

Cette phase consiste à identifier, évaluer et intégrer tous les paramètres biophysiques pertinents tels que la pente, la lithologie, les précipitations et le couvert végétal afin de formuler des hypothèses préliminaires sur le risque d'érosion hydrique des sols. En raison de la complexité et de l'interdépendance des facteurs qui influencent l'érosion hydrique, une analyse croisée deux à deux est utilisée pour mieux comprendre et évaluer la sensibilité des différentes zones à l'érosion hydrique. Cette combinaison permet de produire des cartes d'érodibilité et d'états érosifs potentiels (résultat escompté de cette phase prédictive) (PAP/CAR, FAO, 1998).

Les directives commencent par la réalisation de la carte d'érodibilité, qui est obtenue en superposant la carte des pentes, des précipitations et celle des litho-faciès. Ensuite, la carte de protection des sols est réalisée en superposant la carte d'occupation des sols et celle de densité de recouvrement. Enfin, la carte d'états érosifs potentiels est obtenue en superposant la carte d'érodibilité et la carte de protection des sols.

Dans ce qui suit, nous allons détailler le but et la méthode d'élaboration de chaque carte de facteur, notamment la carte des pentes, la carte lithologique, la carte d'occupation des sols et la carte de densité de recouvrement, ainsi que des cartes résultant de la superposition de ces cartes, telles que la carte d'érodibilité et la carte des états érosifs potentiels.

Chaque carte est créée en prenant en compte différents facteurs biophysiques pertinents, tels que la pente, la lithologie, précipitations, l'occupation des sols et la densité de recouvrement. La carte d'érodibilité, qui tient compte du type de litho-faciès, intensité des précipitations et du degré de pente, est créée en combinant la carte des pentes, d'intensité des précipitations et celle des litho-faciès. Un algorithme est utilisé pour combiner les valeurs des deux cartes et produire une évaluation de l'érodibilité conforme aux directives PAP/CAR.

III.2.1.1.1 Carte des classes de pentes selon les directives PAP/CAR

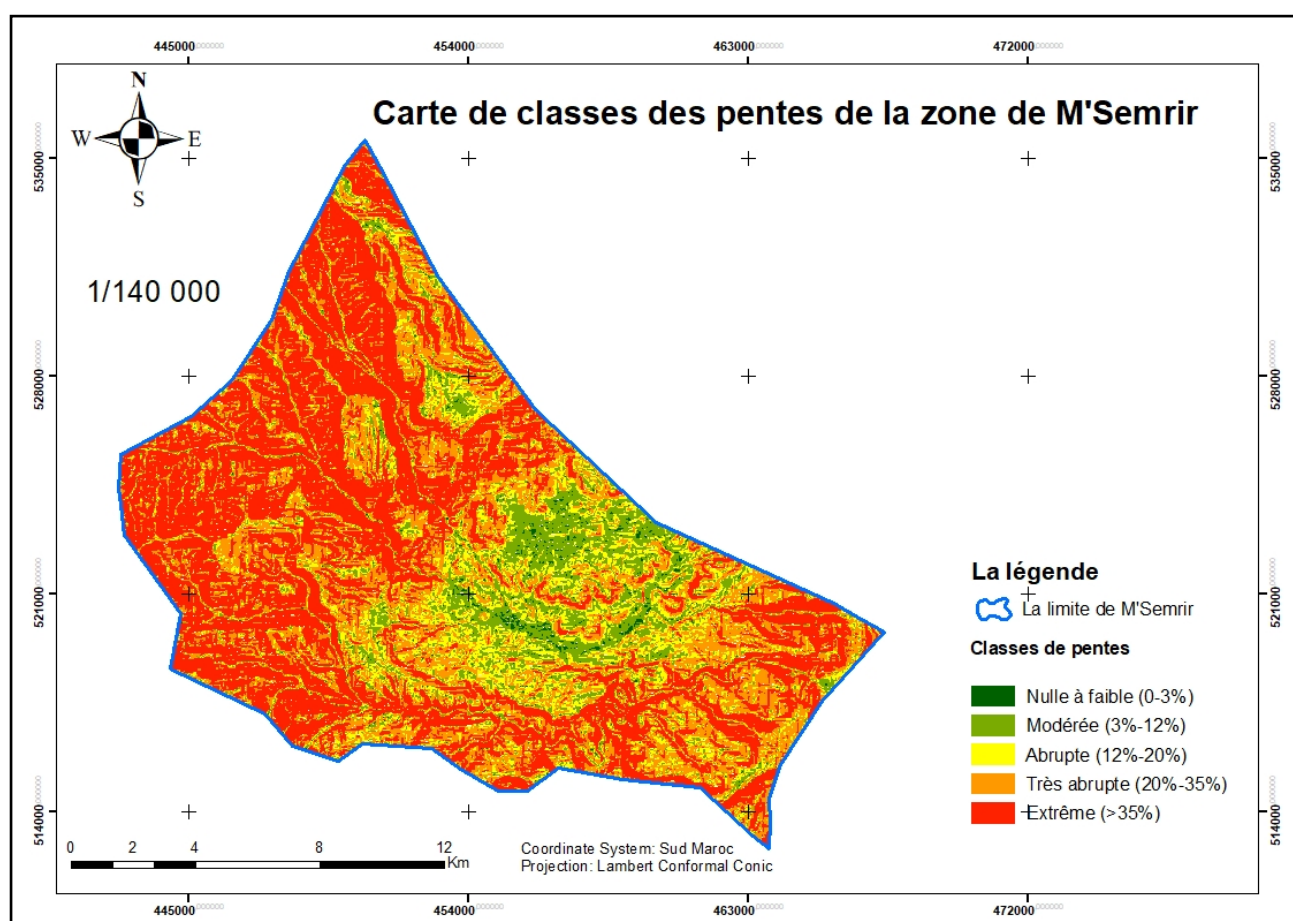
La pente joue un rôle crucial dans le processus de l'érosion hydrique, car elle favorise son intensification. En effet, l'impact de l'érosion est amplifié par la pente, car plus elle est importante, plus l'eau de ruissellement s'accumule et acquiert de l'énergie, ce qui accélère l'érosion.

La carte des pentes en pourcentage est élaborée en utilisant le MNT de la zone de M'Semrir (Carte N°12), puis classifiée selon les critères spécifiés par les directives PAP/CAR basées sur le tableau 1 :

Tableau 1 : Classes des pentes PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)

Classes PAP/CAR	Type de pentes
1.	Nulle à faible (0-3%)
2.	Modérée (3%-12%)
3.	Abrupte (12%-20%)
4.	Très abrupte (20%-35%)
5.	Extrême (>35%)

La carte des classes de pente de la zone de M'Semrir (Carte N°12), montre la dominance des pentes abruptes à extrêmes. La zone est caractérisée par un relief accidenté et non protégé. Les pentes nulles à faibles sont rares et se localisent généralement à proximité des zones cultivées.



Carte 13 : Classes de pentes en pourcentage selon PAP/CAR

La répartition des différentes classes de pentes dans la zone de M'Semrir indique que les pentes extrêmes occupent quasiment la moitié (46,77 %) de la surface d'étude, suivies des pentes très abruptes qui représentent 27,24 % (voir Fig.10). En revanche, les classes de pentes abruptes et modérées ne couvrent que 13,69 % et 11,43 % de la surface, respectivement, tandis que la classe de pentes nulles

à faibles est peu fréquente couvrant 0,87% de la surface considérée et se limite dans certaines zones cultivées.

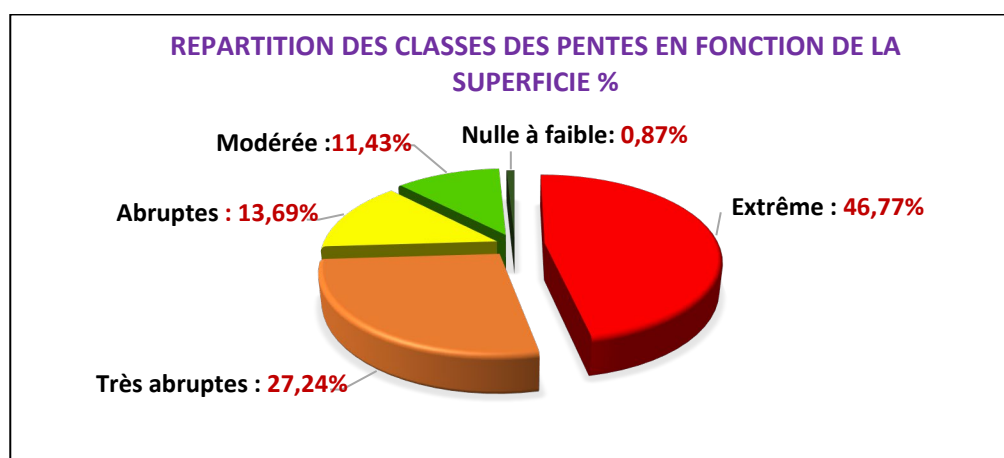


Figure 10 : Répartition spatiale des classes des pentes

Cette étude topographique de la zone de M'Semrir montre un relief irrégulier et extrêmement accidenté, qui a un impact significatif sur la concentration et l'accélération des eaux de surface, contribuant ainsi à favoriser l'érosion hydrique.

III.2.1.1.2 Carte des classes des formations lithologiques selon des directives PAP/CAR

La carte des Litho-faciès décrit la répartition des affleurements en fonction de leurs degrés de friabilité et leur vulnérabilité au risque érosif. Elle a été réalisée à partir des données géologiques et lithologiques (carte géologique de Tinghir - 1/100 000). La démarche est basée sur le géoréférencement de la carte géologique de la province de Tinghir suivie par la digitalisation des différents types de litho-faciès qui couvrent la zone d'étude.

Les substrats sont répartis en 5 classes et affectés par un code qui désigne leurs degrés de friabilité selon les directives PAP/CAR :

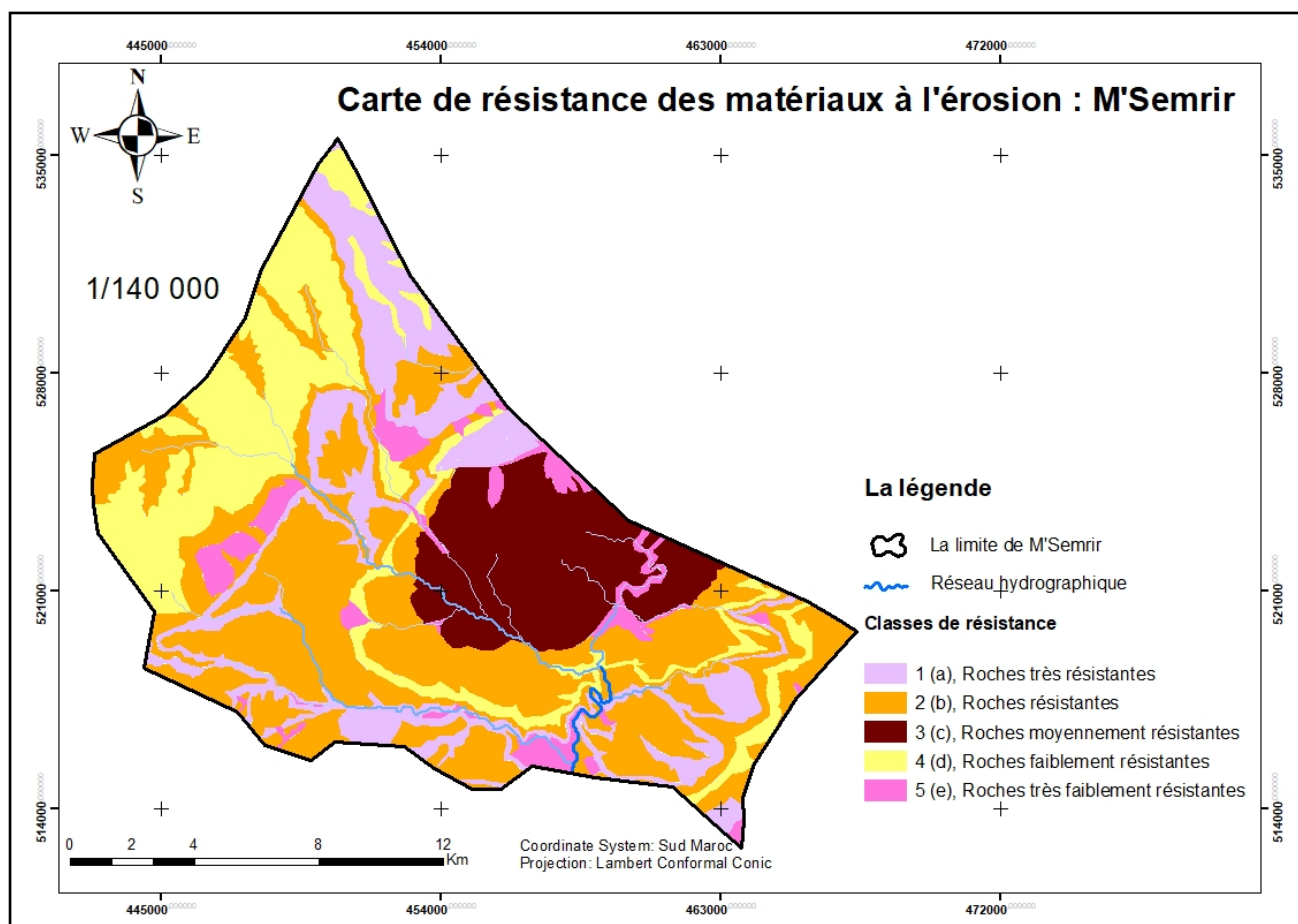
Tableau 2 : Classes des litho-faciès selon PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)

Classes de Litho-faciès	Type de matériel
1 (a)	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, croutes, affleurement de grès ferrugineux (Calcaires massifs, sols fortement rocheux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroutés).
2 (b)	Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés.
3 (c)	Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schistes, marne, etc.).
4 (d)	Roches et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés (marnes, gypse, ardoise argileuse, etc.)
5 (e)	Sédiments ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique.

La carte établie (Carte N°13) montre les différents types de roches/sédiments de surface, et renseigne sur le degré d'érodibilité des formations géologiques de la zone de M'Semrir classées selon leur degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion du sol :

- Les roches très résistantes sont représentées par un faciès lithologique composé de calcaires, de dolomites et du basalte.
- Les roches résistantes sont constituées de marno-calcaires, marnes gréseuses et brunâtres.
- Les roches moyennement résistantes sont constituées d'un faciès composé de grès rougeâtre.
- Les roches faiblement résistantes sont constituées essentiellement de marnes (vertes, bleues et conglomératiques).
- Les roches très faiblement résistantes sont représentées par un faciès lithologique composé d'argile rose et des argiles d'alluvions d'apports fluviales.

La carte 13, montre la répartition des terrains, codée en fonction de leur degré de friabilité et de leur résistance mécanique répartis en 5 classes selon le modèle PAP/CAR.



Carte 14 : Classes de friabilité des matériaux lithologiques

L'analyse de la carte des litho-faciès (Carte N°13 & Fig.11), montre que la majeure partie de la zone de M'Semrir est caractérisée par des matériaux résistants (marno-calcaire et marnes gréseuses et brunâtres) **2 (b)** couvrant une superficie de 102,81 km² et un pourcentage de 40,36 %, et par la classe faiblement résistante (essentiellement des marnes (vertes, bleues)) **4 (d)** avec 52,17 km² et 20,48 % de la surface de la zone. Les calcaires massifs, dolomites et basaltes constituant la classe des roches très résistantes, compactes **1 (a)** représentent 18,6 %. Le reste des affleurements comporte des formations moyennement résistantes représentant 14,63 % (Grès rougeâtre) **3 (c)**, et 5,93 % des argiles roses et dépôts alluviaux très faiblement résistants **5 (e)**.

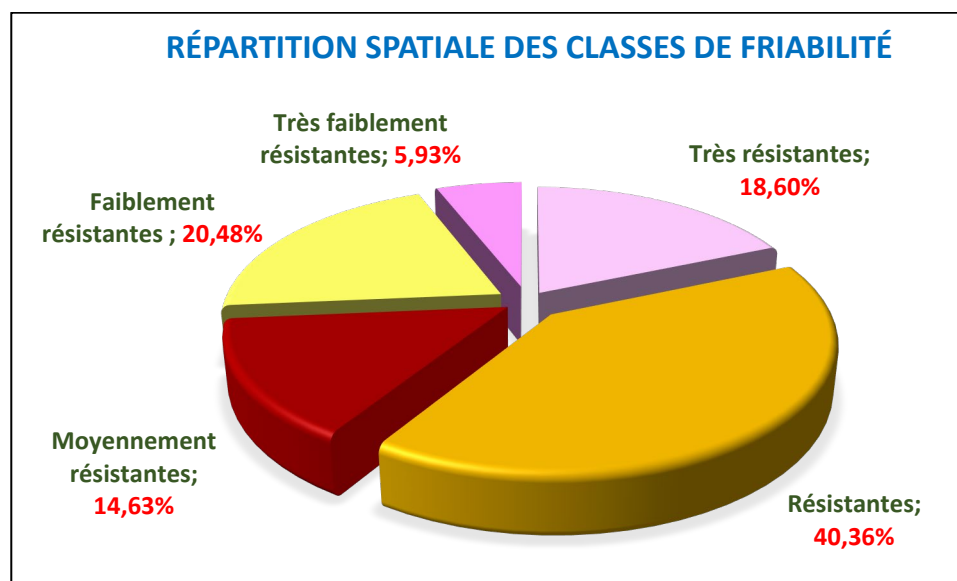


Figure 11 : Répartition spatiale des classes de friabilité des matériaux en pourcentage

La zone d'étude est marquée par la prédominance des formations constituées de marno-calcaires, de marnes gréseuses et essentiellement marneuses, qui présentent une résistance moyenne à faible. Pendant les périodes pluvieuses, ces formations deviennent vulnérables et contribuent à accélérer les processus d'érosion hydrique sur les versants.

III.2.1.1.3 Réalisation de la carte de stabilité du terrain

La carte de stabilité du terrain de M'Semrir est le résultat de la superposition de deux cartes précédentes (la carte des pentes et la carte lithologique), qui ont été combinées à l'aide de l'outil SIG comme illustré dans la (Carte N°14). Dans cette opération, l'accent est mis sur les classes des pentes ainsi que sur la résistance mécanique et le degré de cohésion des différents litho-faciès.

Les polygones issus de cette superposition ont été classés selon la matrice suivante (Tableau 3), qui a pour but de hiérarchiser le terrain en fonction de son degré de stabilité.

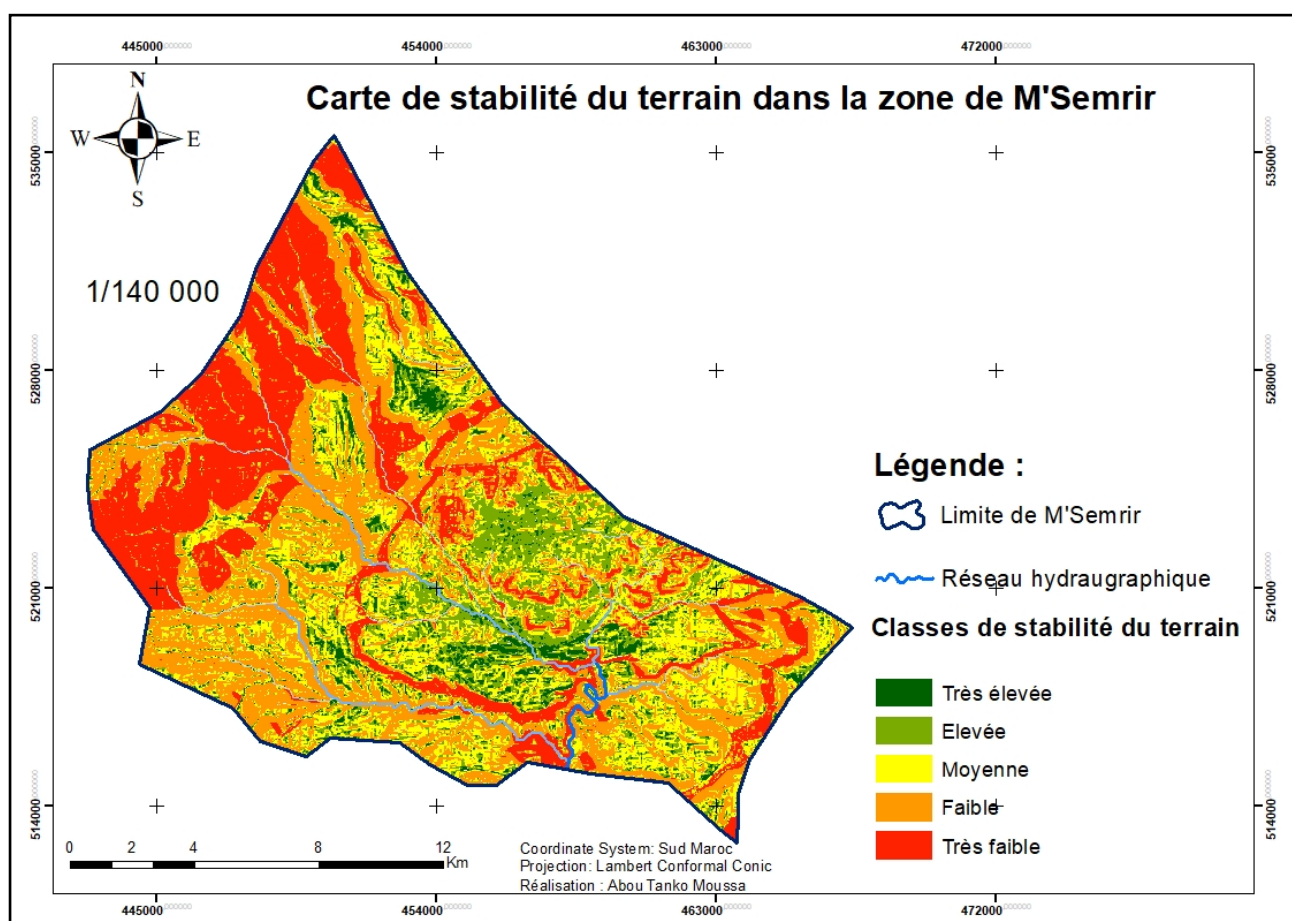
Tableau 3 : Matrice classes pentes vs Degré de friabilité PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)

Classe des pentes	Classes de litho-faciès				
	1 (a)	2 (b)	3 (c)	4 (d)	5 (e)
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	3	3
3	2	2	3	4	4
4	3	3	4	5	5
5	4	4	5	5	5

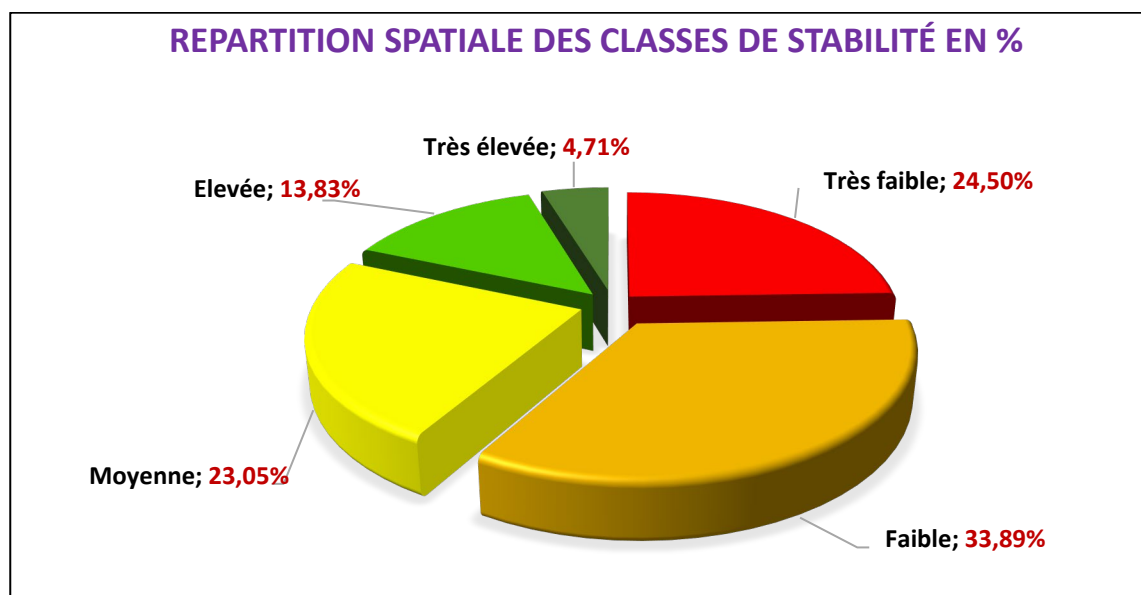
Les classes de stabilité des terrains obtenues par l'application de cette matrice sont classées selon le tableau 4 :

Tableau 4 : Légende des classes de stabilité du terrain par le modèle (PAP/CAR, FAO, 1998)

Classes	Degrés de stabilité
1	Très élevée
2	Elevée
3	Moyenne
4	Faible
5	Très faible



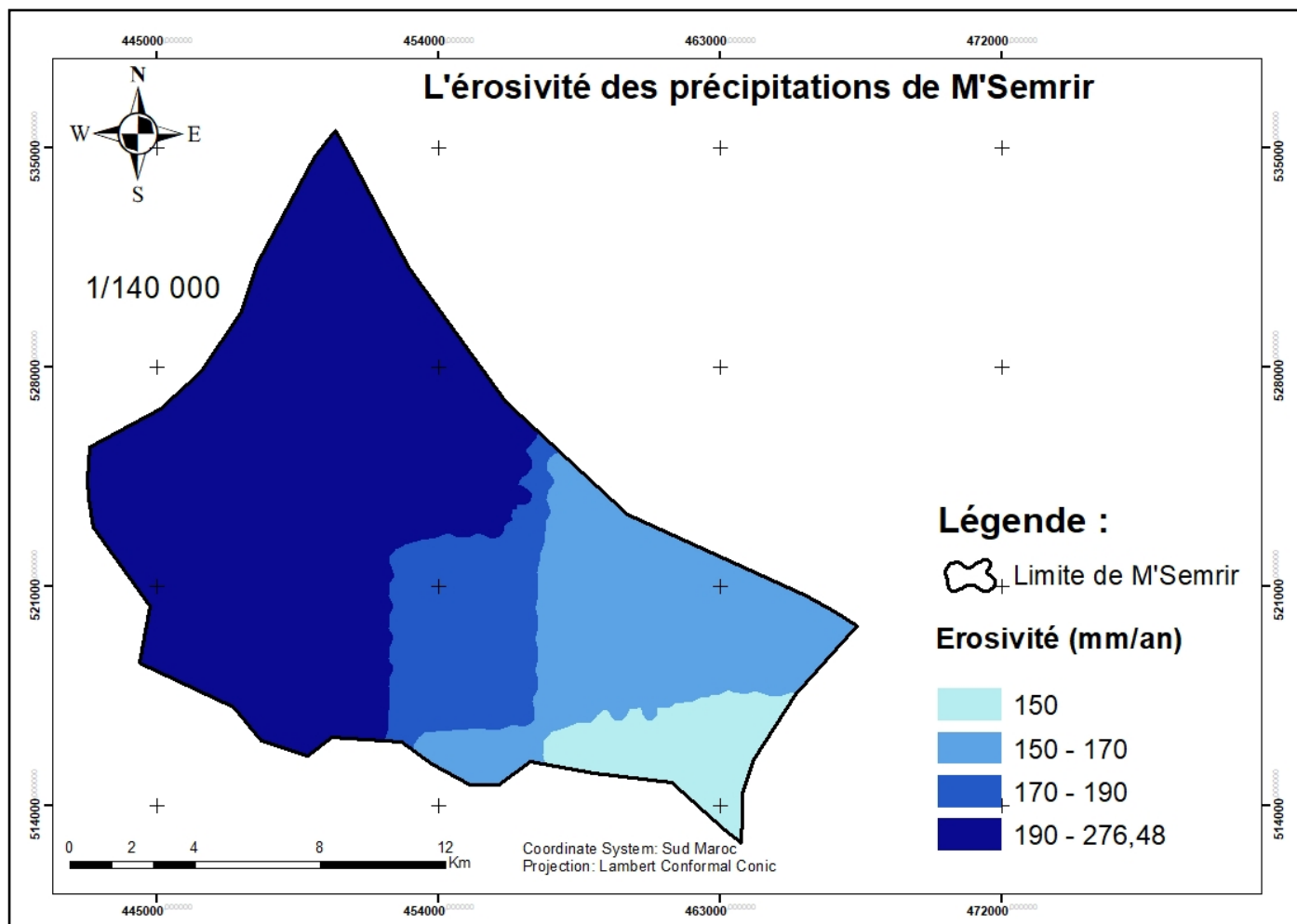
Carte 15 : Stabilité des terrains à M'Semrir



En traitant la base de données de la carte de stabilité des terrains (Carte N°14 & Fig.12), plusieurs informations ont été obtenues concernant les superficies relatives à chaque classe. Selon la répartition spatiale des classes et la carte de stabilité, on constate que la zone de M'Semrir se compose de 24,5 % de superficies caractérisées par une stabilité très faible des terrains relatifs aux zones des pentes extrêmes où les matériaux sont faibles à très faiblement résistants. Ensuite, les sols à stabilité faible, couvrent une superficie de 86,35 km², soit 33,89 % de la superficie totale de la zone. La classe de stabilité moyenne occupe 58,74 km², soit 23,05 % de la superficie totale du bassin versant. Les classes de stabilité élevée et très élevée s'étendent sur une superficie de 47,23 km² et affectent 18,54 % de la superficie totale, cela peut s'expliquer par la présence de roches de résistance élevée situées dans des zones à pente modérée et faible.

III.2.1.1.4 Réalisation de la carte d'érosivité des précipitations

L'érosivité des précipitations à M'Semrir (carte N°15) a été déterminée grâce au calcul du facteur R des précipitations à partir de l'équation $R = 8,12 - (0,562 * P)$, où P représente l'intensité moyenne des précipitations selon les travaux du chercheur (Hurni, 1985). Cette analyse a été menée dans un environnement SIG.



Carte 16 : Erosivité des précipitations

L'intensité des précipitations exerce un impact marqué sur l'érosion des sols, induisant un ruissellement accéléré, le détachement de particules, et la création de ravines, amplifiant les risques de dégradation du sol et de perturbations environnementales.

La répartition des niveaux d'érosivité dans la région de M'Semrir reflète une augmentation de l'intensité des précipitations du sud au nord, avec des facteurs R variant de 150 à 276 mm/an. Les zones favorables aux cultures affichent une faible valeur du facteur R (150 à 170 mm/an) par rapport aux régions de haute montagne où l'érosivité est élevée, atteignant un facteur R de 276,48 mm/an, correspondant aux zones à haut risque.

III.2.1.1.5 Réalisation de la carte d'érodibilité du terrain

La carte d'érodibilité des terrains de M'Semrir est le résultat de la superposition de deux cartes précédentes (la carte de stabilité et la carte d'érosivité), qui ont été combinées à l'aide de l'outil SIG comme illustré dans la (Carte N°16). Dans cette opération, l'accent est mis sur les classes du niveau de stabilité des versants ainsi que l'agressivité des précipitations.

Les polygones issus de cette superposition ont été classés selon la matrice (tableau 5), qui a pour but de hiérarchiser le terrain en fonction de son degré d'érodibilité.

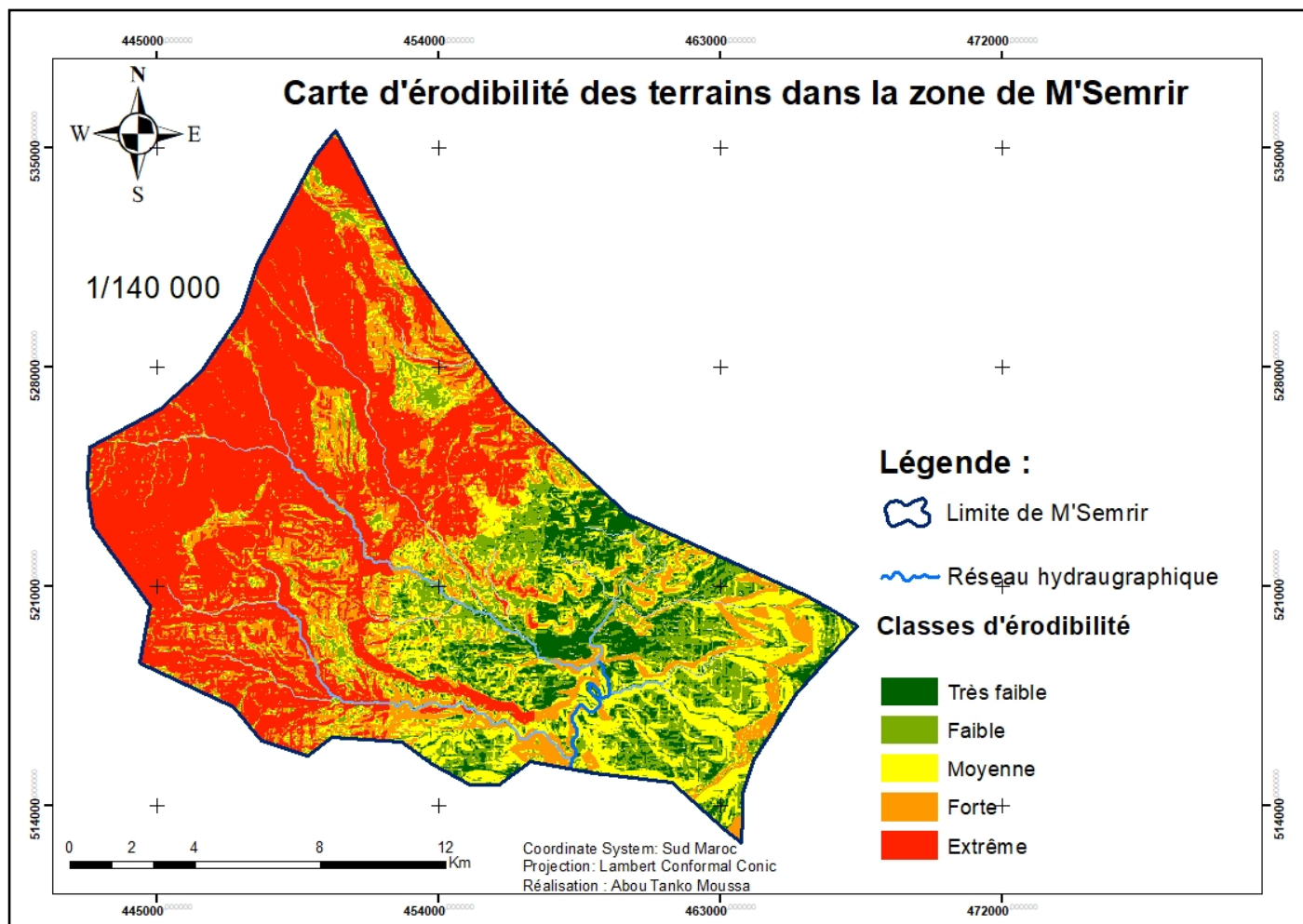
Tableau 5 : Matrice Erosivité x Stabilité du terrain

Stabilité du terrain	Erosivité (facteur R)			
	1	2	3	4
1	1	1	1	2
2	1	1	2	3
3	2	2	3	4
4	3	3	4	5
5	4	4	5	5

Les classes de stabilité des terrains obtenues par l'application de cette matrice sont classées selon le tableau 6 :

Tableau 6 : Légende d'érodibilité

Classes	Degrés d'érodibilité
1	Très faible
2	Faible
3	Moyenne
4	Forte
5	Extrême



Carte 17 : Erodibilité des terrains à M'Semrir

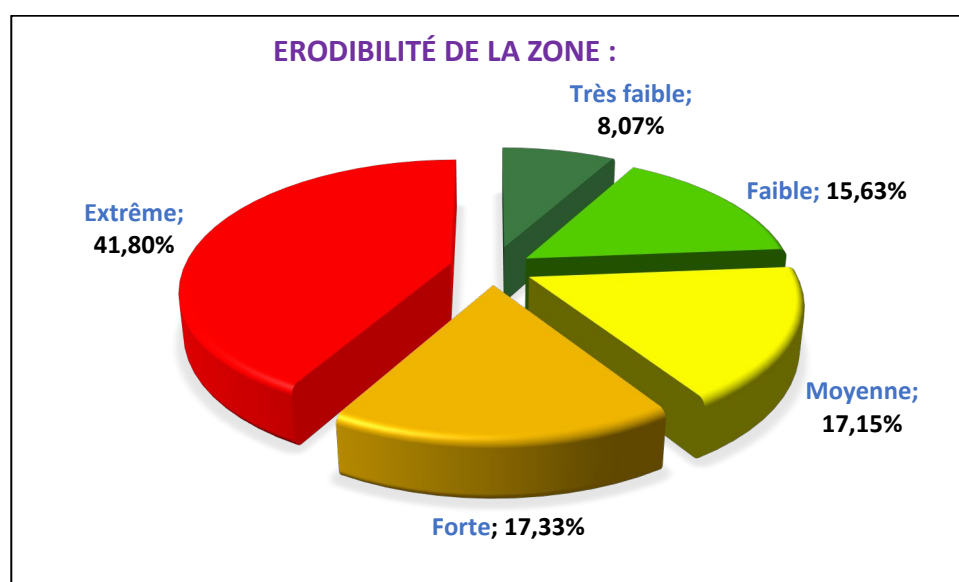


Figure 13 Répartition spatiale de l'érodibilité des sols

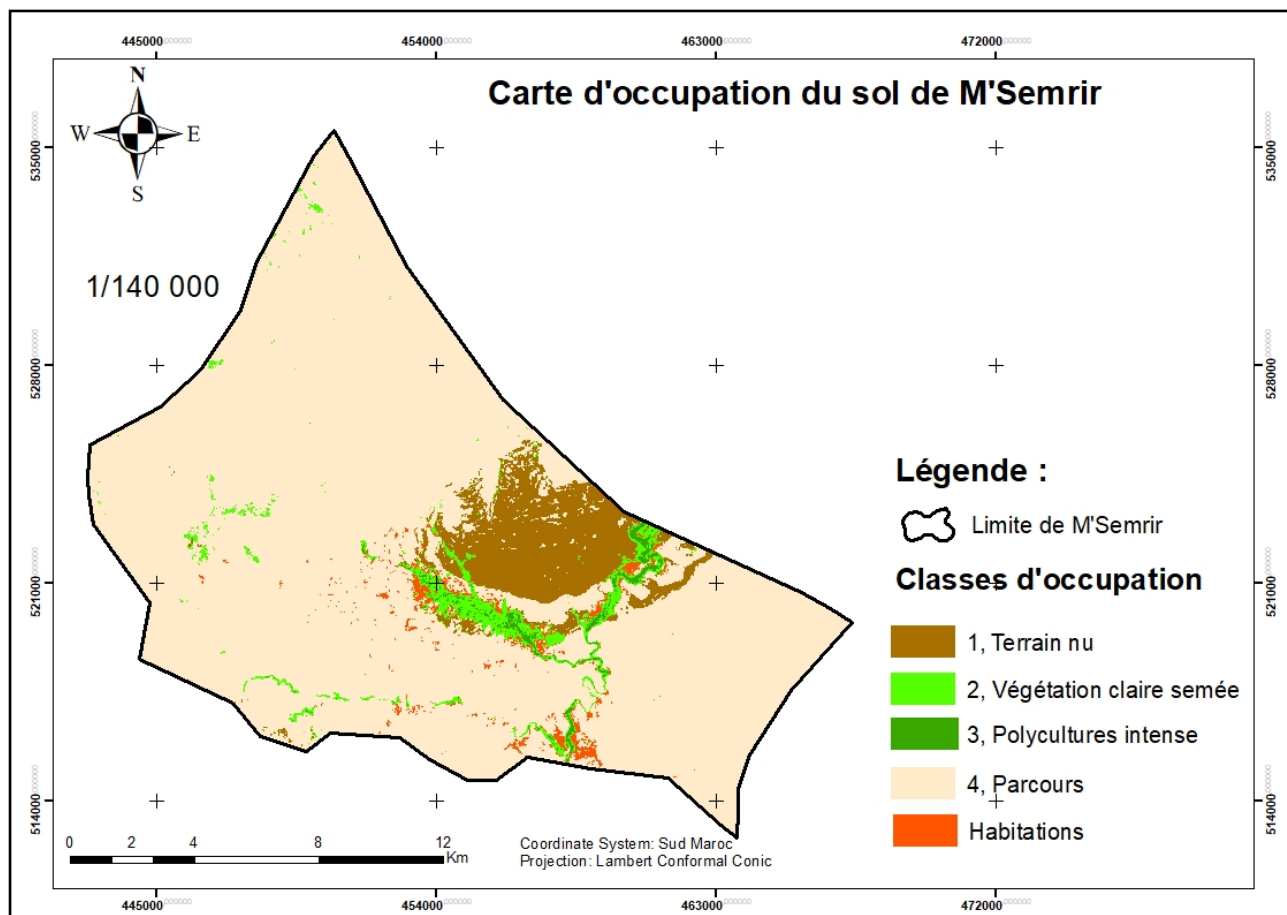
En analysant les données de la carte d'érodibilité du terrain (Fig.13), des informations substantielles ont été extraites concernant les proportions relatives des différentes classes. L'examen de la distribution spatiale et de la carte d'érodibilité révèle que la zone de M'Semrir se compose majoritairement de zones à érodibilité extrême, représentant 41,8 % de la superficie totale. Ces zones se caractérisent par une agressivité des précipitations élevée et une forte instabilité du terrain avec des matériaux de faible résistance. Les sols à érodibilité élevée couvrent ensuite 44,43 km², équivalent à 17,33 % de la superficie totale. La classe d'érodibilité moyenne occupe 43,96 km², soit 17,15 % de la zone. Les classes d'érodibilité faible et très faible s'étendent sur 60,76 km², affectant 23,7 % de la superficie totale. Cette distribution s'explique en partie par de faibles intensités des précipitations et la présence de roches résistantes dans des zones à pentes modérées à faibles.

III.2.1.1.6 Carte d'occupation du sol selon le modèle PAP/CAR

L'occupation des sols est une représentation de la couverture physique de la surface terrestre. Dans le cas de la zone de M'Semrir, la carte d'occupation du sol a été établie en utilisant une classification supervisée de l'image Sentinel-2 d'août 2022. En combinant les informations acquises lors de la mission de terrain en mai 2023 avec l'interprétation visuelle de l'image satellitaire et les images de Google Earth disponibles datant du 05 Mars 2023, une carte d'occupation du sol (Carte N°17), a été réalisée en utilisant les directives du modèle PAP/CAR. En raison de l'absence de forêt et de la forte dominance des montagnes dans la zone d'étude, les classes d'occupation des sols ont été limitées à cinq catégories, tel que présenté dans le tableau 7 suivant.

Tableau 7 : Classes d'occupation des sols PAP/CAR

Classes	Occupation du sol
1.	Terrain nu
2.	Végétation claire semée
3.	Polycultures intenses
4.	Parcours
5.	Habitations



Carte 18 : Occupation des sols PAP/CAR

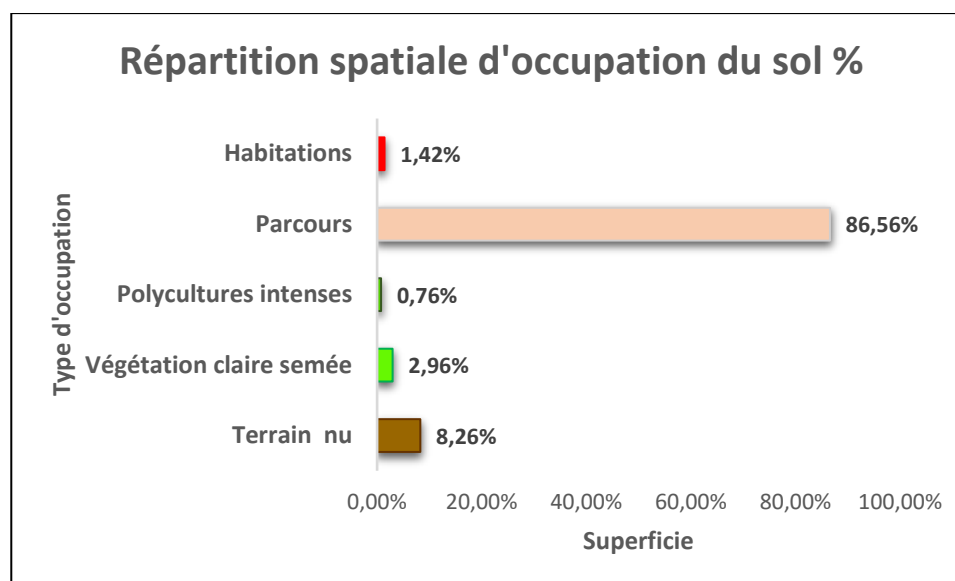


Figure 14 : Répartition spatiale des classes d'occupation des sols (%)

D'après la cartographie des unités d'occupation du sol et l'analyse des données, les zones protégées qui ont une couverture végétale dense et permanente sont principalement constituées de parcelles en polycultures intensives combinant l'arboriculture et la céréaliculture. Elles couvrent une superficie de

1,935 km², ce qui représente 0,76 % de la zone d'étude, et sont situées le long des cours d'eau où les pentes sont faibles.

La majeure partie de la zone d'étude est recouverte par un massif montagneux (parcours), qui s'étend sur une superficie de 220,51 km², soit 86,56 % de la superficie totale de la zone d'étude, et où les pentes sont élevées. Cette classe d'occupation du sol regroupe des terres avec des formations végétales de type steppiques herbacées pour les parcours de montagne, qui sont moyennement protectrices contre l'érosion du sol.

Les zones de végétation claire semée, couvrent une superficie de 7,56 km², soit 2,96 % de la zone d'étude. Elles sont réparties sur des pentes faibles à modérées et sont faiblement protectrices contre l'érosion du sol.

Enfin, les zones des terrains nus, situés au centre-est de la zone d'étude et où la végétation est très faible voire inexistante, sont les moins protégés contre l'érosion du sol.

Les habitations et autres constructions tel que les ouvrages occupent une superficie de 3,635 km², soit 1,42% de la surface.

III.2.1.1.7 Carte de la densité du couvert végétal

Afin de classer le degré de couverture végétale, la zone a été divisé en quatre classes distinctes comme proposé par le modèle PAP/CAR. Pour chaque catégorie, une valeur comprise entre 1 et 4 est assignée en fonction du tableau suivant :

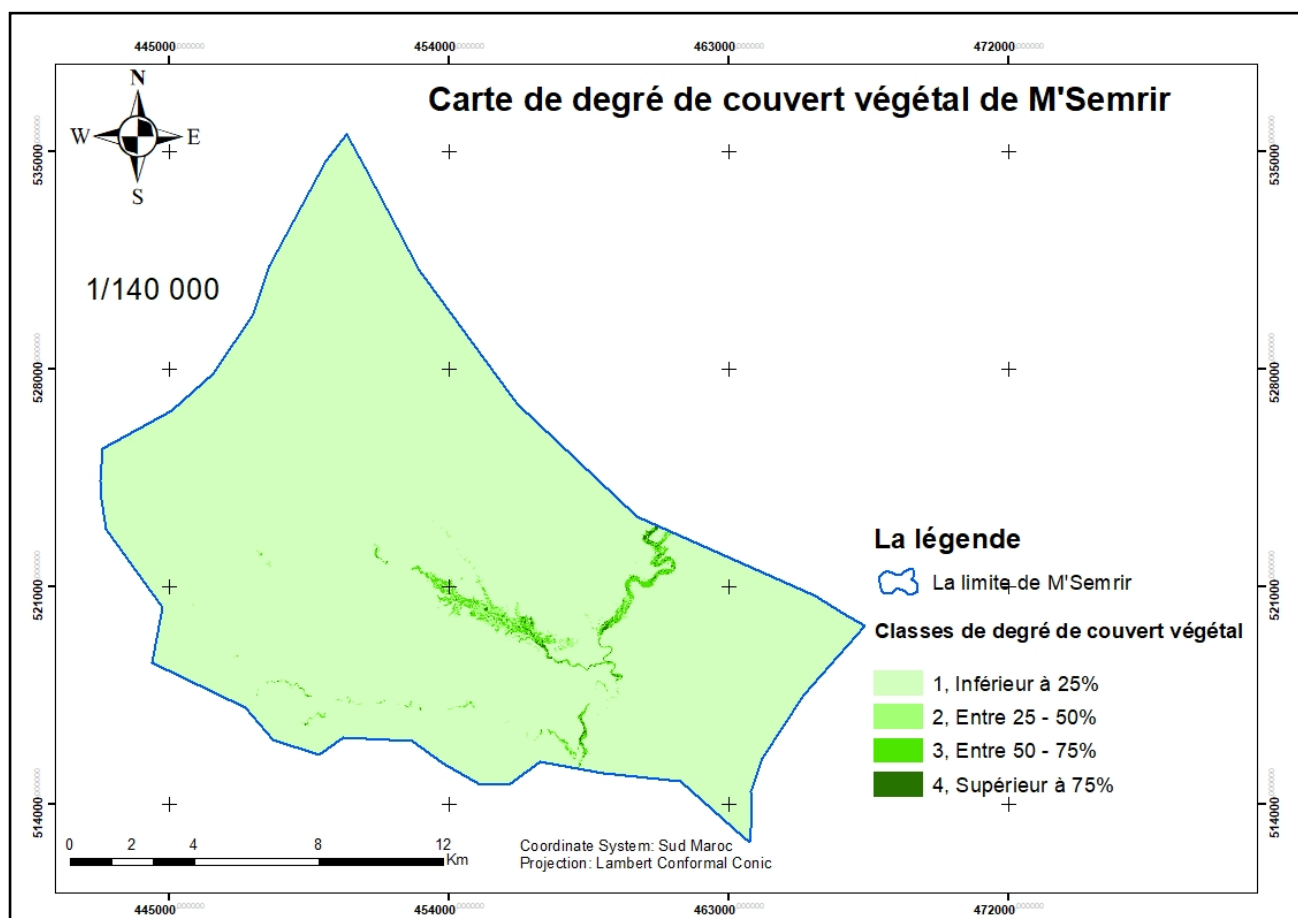
Tableau 8 : Classes de densité de recouvrement végétal PAP/CAR

Classes	Valeurs	Degré de couvert végétal	Calcul du taux de recouvrement
1.	-0,082 à 0,1598	Inférieur à 25%	0,6394*25%
2.	0,1599 à 0,3137	Entre 25 – 50%	0,6394*50%
3.	0,3138 à 0,4795	Entre 50 – 75%	0,6394*75%
4.	0,4796 à 0,6394	Supérieur à 75%	0,6394

La présence d'une couverture végétale est essentielle pour préserver la stabilité des sols face à l'érosion, et elle favorise également la conservation de l'eau et du sol. Plus la densité du couvert végétal est élevée, plus la protection du sol est forte et l'érosion faible. La carte de densité de recouvrement végétal de la zone de M'Semrir (Carte N°18), a été élaborée à partir de l'image satellitaire sentinel-2 d'août 2022, avec une résolution de 10 mètres et complété par le travail du terrain. L'indice utilisé pour calculer la densité de couverture végétale est l'indice de végétation NDVI, qui se base sur la différence

entre la réflectance du rouge (R) et du proche infrarouge (PIR), selon la formule : $NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$. Les bandes de l'image sentinel-2 utilisées pour le calcul de l'indice NDVI sont le rouge (B4) et le proche infrarouge (B8).

La carte de l'indice de végétation (NDVI) de la zone de M'Semrir, présentée dans la figure suivante, révèle une pauvreté importante du couvert végétal dans cette zone avec des valeurs entre -0,082 à 0,1598 représentant 97,93% des terrains ont une densité de couverture végétale inférieure à 25%, correspondant principalement aux zones de massifs montagneux (marno-calcaires) et aux terrains rouges nus.



Carte 19 : Densité de recouvrement végétal de M'Semrir PAP/CAR

La répartition des résultats (Fig.15) montre que la zone de M'Semrir est principalement caractérisée par une faible densité de couverture végétale, représentant 97,93 % de la superficie totale, tandis que la classe de densité moyenne (25 % - 50 %) ne représente que 0,97 %. La classe de densité (50 % - 75 %) couvre une superficie encore plus réduite de 0,94 %. La classe de couverture végétale la plus dense (> 75 %) ne couvre qu'une superficie limitée de 0,15 % (0,392 Km²) de la zone d'étude, principalement composée de zones de polycultures intensives.

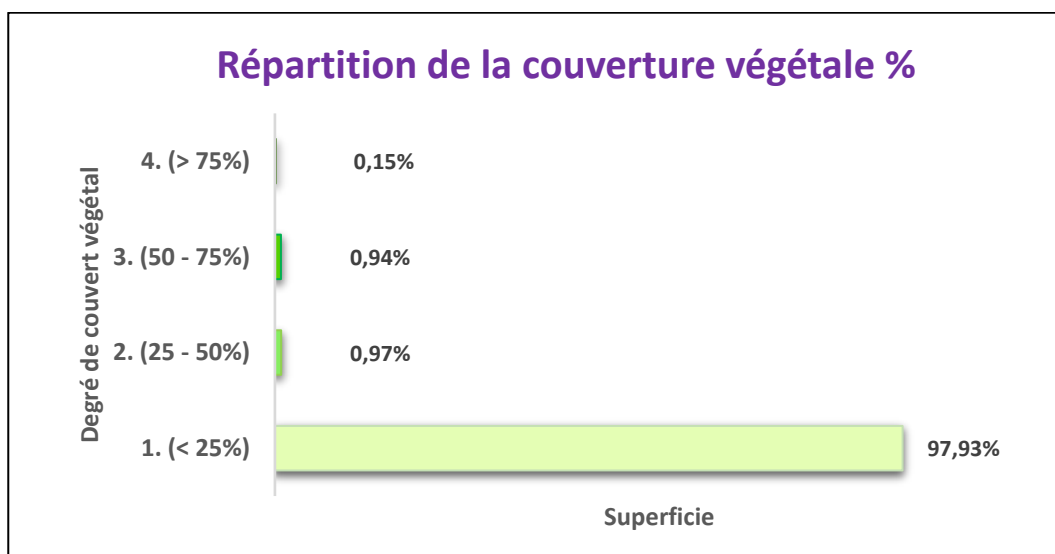


Figure 15 : Répartition spatiale de la couverture végétale de M'Semrir

III.2.1.1.8 Réalisation de la carte de protection des sols

La présence de végétation permet de préserver les sols en limitant l'impact des agents érosifs tels que la pluie et le ruissèlement. Toutefois, l'efficacité de cette protection varie en fonction du type de végétation présente. Le niveau de protection des sols dépend donc de la densité de la couverture végétale et du type d'occupation du sol. L'élaboration de la carte de protection des sols (Carte N°19), consiste à croiser la carte de l'occupation du sol avec celle de la densité de couverture végétale dans le SIG, en utilisant la matrice de protection des sols proposée par le modèle PAP/CAR, tableau 9.

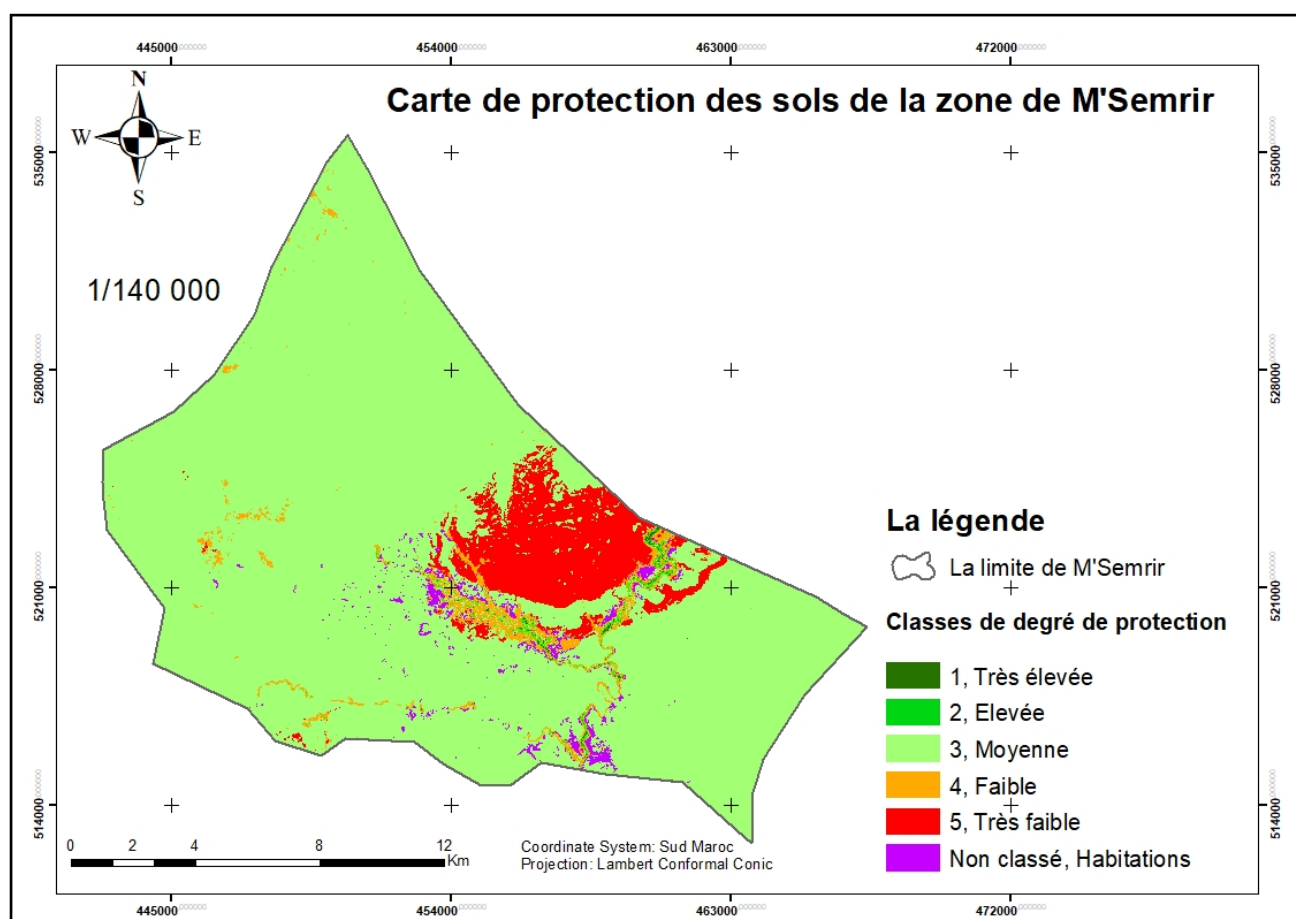
Tableau 9 : Matrice Occupation du sol vs recouvrement végétal PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)

Occupation du sol	Couvert végétale			
	1	2	3	4
1	5	5	4	4
2	5	5	4	3
3	3	2	1	1
4	4	3	2	1

Tableau 10 : Légende des classes de protection selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, FAO, 1998)

Classes	Degré de protection
1	Très élevé
2	Elevé
3	Moyenne
4	Faible
5	Très faible

Le but de cette carte est d'hierarchiser le territoire de M'Semrir en polygones selon leur degré de protection des sols.



Carte 20 : Degré de protection des sols PAP/CAR

L'analyse de la base des données (Fig.16), montre que la plus grande partie du bassin versant, soit 87,22 % de la superficie totale, est couverte par des zones de protection des sols moyenne qui sont occupées par une steppe herbacée sur le massif montagneux. La classe de protection très faible est située dans la partie centre-est de la zone d'étude et s'étend sur une superficie de 21,17 km² (8,31 %). Les zones à protection faible occupent une superficie de 6,67 km², soit 2,19 % de la superficie totale, et correspondent à de jeunes parcelles. Les classes de protection élevée à très élevée occupent respectivement 1,43 km² (0,56 %) et 0,387 km² (0,15 %) de la superficie totale de la zone. Cette répartition s'explique par la présence d'une couverture végétale dense, représentée par la polyculture et les arbres le long des cours d'eau.

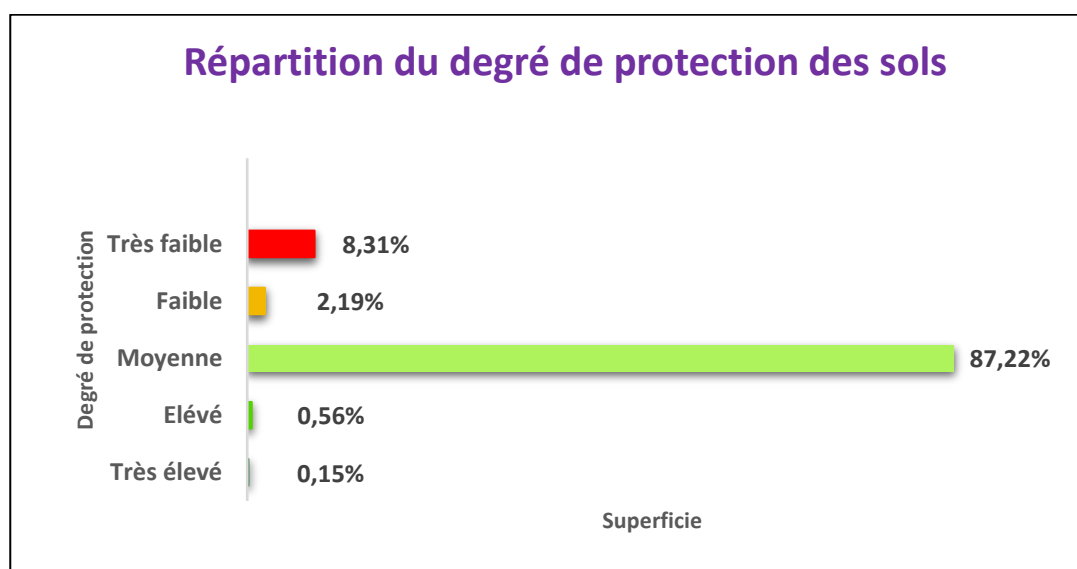


Figure 16 : Répartition des classes de protection des sols à M'Semrir

III.2.1.1.9 Réalisation de la carte des états érosifs potentiels de M'Semrir

La carte de synthèse des états érosifs dans la zone de M'Semrir (Carte N°20) est produite à partir de la combinaison des données de deux cartes, à savoir la carte d'érodibilité et celle des niveaux de protection du sol, et elle représente le produit final de la phase prédictive. Les polygones obtenus sont ensuite classés en fonction de la matrice présentée dans le tableau 11, et la légende proposée par les directives PAP/CAR est fournie dans le tableau 12.

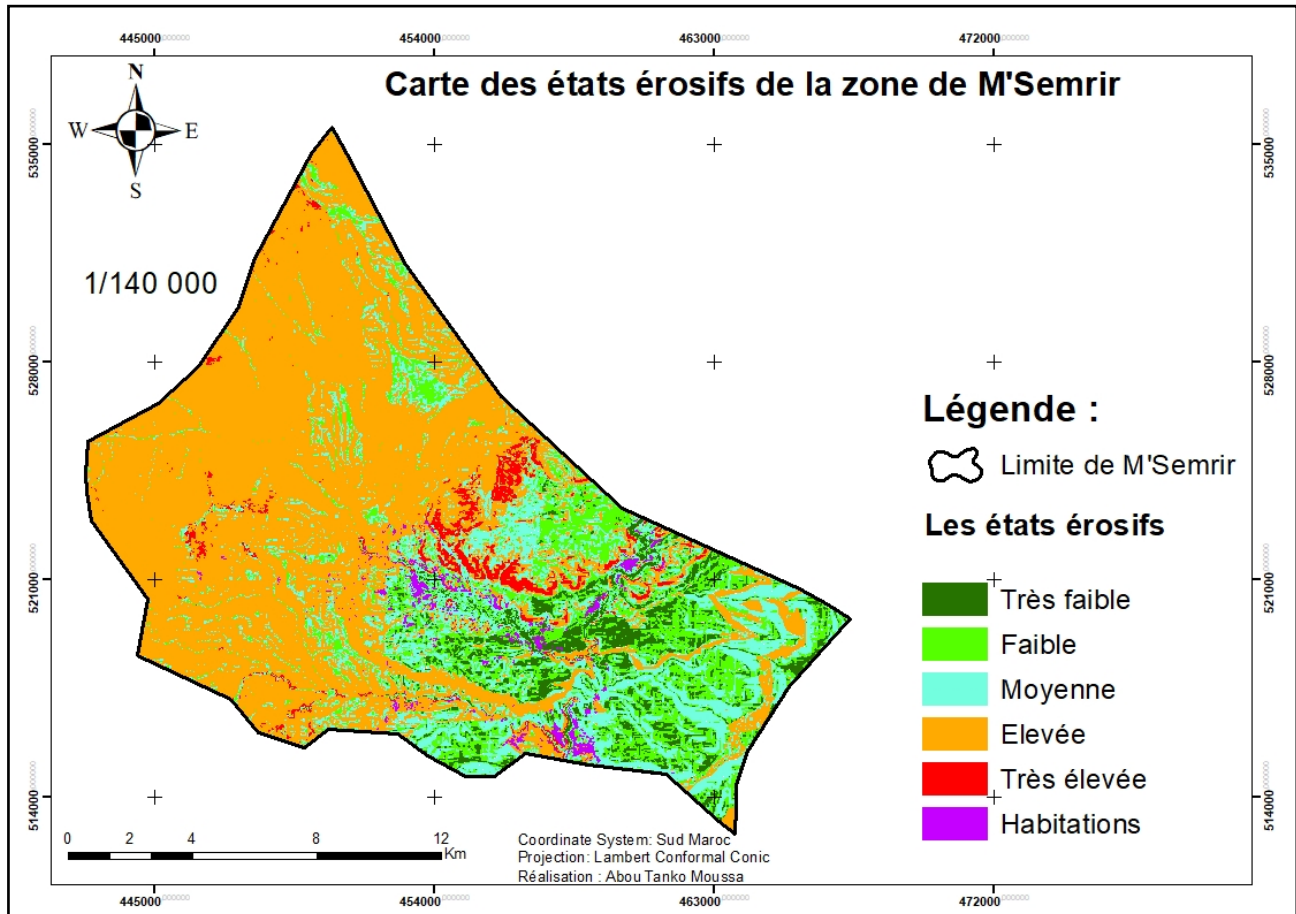
Tableau 11 : Matrice degré de protection vs degré d'érodibilité

Degré de protection des sols	Degré d'érodibilité				
	1 (EN)	2 (EB)	3 (EM)	4 (EA)	5 (EX)
1 MA	1	1	1	2	2
2 (A)	1	1	2	3	4
3 (M)	1	2	3	4	4
4 (B)	2	3	3	5	5
5 (MB)	2	3	4	5	5

Tableau 12 : Légende des états érosifs potentiels selon PAP/CAR

Classes	Degré des états érosifs
1	Très faible
2	Faible
3	Moyenne
4	Elevée
5	Très élevée

La carte des états érosifs, met en évidence cinq classes qui reflètent les degrés d'érosion dans la zone de M'Semrir. La prédominance de la classe élevée est visible, indiquant des versants où l'érosion hydrique est très avancée en raison de la forte érodibilité du terrain et de la faible protection du couvert végétal. Cette classe représente 57,93 % de la surface totale de la zone d'étude témoignant d'un état avancé de dégradation dans la zone.



Carte 21 : Etats érosifs potentiels de M'Semrir PAP/CAR

L'analyse de la base de données des états érosifs dans la zone de M'Semrir (Carte N°20 & Fig.17) permet de distinguer trois grandes classes d'états érosifs potentiels.

Les classes d'érosion élevée et très élevée (en rouge et en orange) représentent un stade très avancé de l'érosion hydrique, caractérisé par une perturbation totale de la surface des sols, la formation de ravinelements et de rigoles, une lithologie favorable (roches tendres marneuses et gréseuses) et des pentes fortes à extrêmes. Ces classes couvrent plus de la moitié de la zone d'étude, soit 155,1 km², représentant 60,67 % de la zone.

La classe d'érosion moyenne (en jaune champagne) couvre 46,07 km², soit 18,02 % de la zone d'étude, et correspond à un stade peu avancé de l'érosion hydrique.

Les classes d'érosion faible à très faible (en vert clair et foncé) couvrent une surface de 48,82 km², soit 19,1 % de la zone d'étude, et contiennent des zones où l'érosion hydrique est moins avancée en raison d'une légère protection par les pommiers et les cultures céréalières, d'une topographie douce des terrains, et une faible intensité des précipitations. Dans ces classes au niveau des zones à basses altitudes, l'érosion se manifeste par un décapage des sols superficiels résultant d'une érosion en nappe ou d'un ruissellement diffus, tandis que dans les zones un peu élevées, on observe des rigoles et ravinements moins évolués.

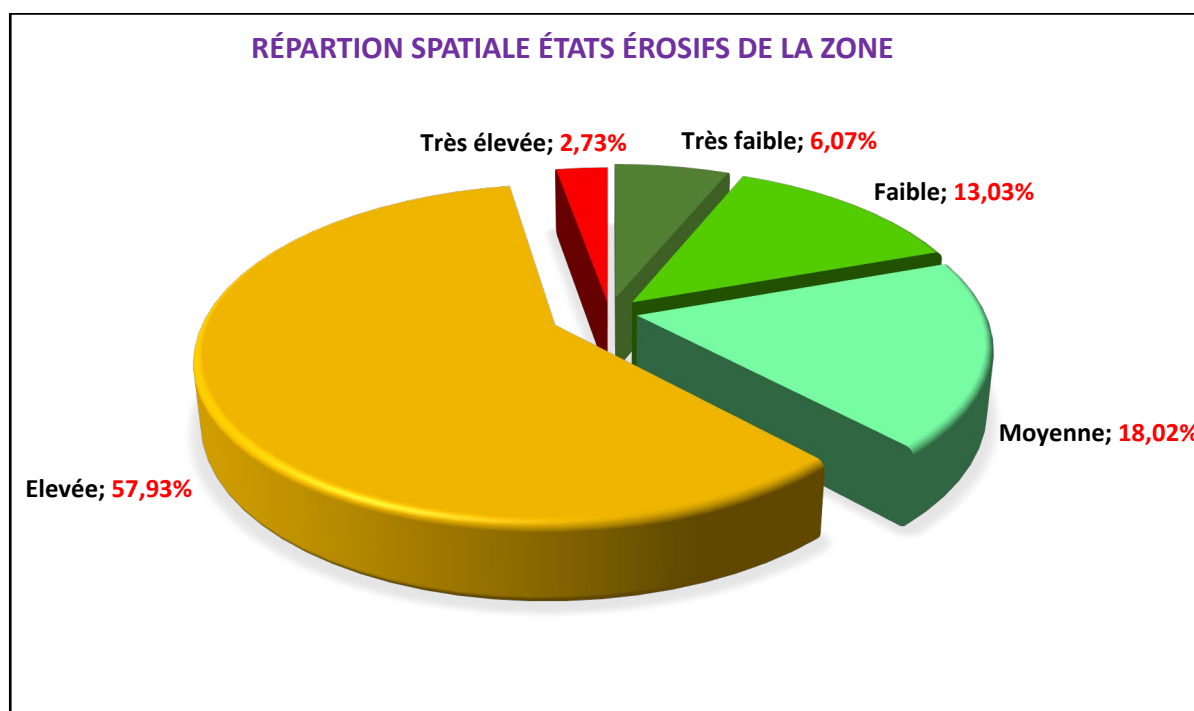


Figure 17 : Répartitions spatiale des états érosifs potentiels de la zone de M'Semrir

En somme, d'après l'analyse des facteurs précédemment étudiés, il apparaît que la zone de M'Semrir est soumise à un état érosif allant de moyen à très élevé, avec une forte vulnérabilité de ses versants à l'érosion hydrique. En effet, la répartition de la surface de la carte des états érosifs potentiels indique que plus de la moitié de la zone d'étude (soit 60,67 %) est occupée par les deux classes d'états érosifs élevée et très élevée, et que la classe moyenne occupe 18,02 %. L'ensemble de ces trois classes couvrent la majeure surface de la zone d'étude et occupe une superficie de 201,17 km², soit 78,7%.

III.2.1.2 L'approche descriptive

La deuxième phase constitue une étape complémentaire à la première phase prédictive, où l'accent est mis sur la description directe des processus d'érosion actuels, tout en tenant compte des facteurs qui influencent l'état actuel de la dégradation des sols. Elle implique également la description et l'évaluation qualitative des processus actifs en cours.

Cette phase descriptive a été réalisée, moyennant des observations directes et des contrôles sur le terrain, en utilisant la carte prédictive des états érosifs potentiels comme modèle de référence en termes de cartographie et de thématique. L'objectif principal est de mettre en évidence les contraintes spécifiques et représentatives liées à l'érosion hydrique sur le site.

III.2.1.2.1 Les différents types d'érosion hydrique dans la zone de M'Semrir

III.2.1.2.1.1 Erosion en Nappe

Ce type d'érosion, également appelé décapage superficiel, se produit lorsque l'eau ruisselle sur une surface plane ou légèrement inclinée, entraînant l'enlèvement des particules de sol et des nutriments essentiels, laissant apparaître des plages de couleur claire. Cela peut être causé par des précipitations intenses, des averses prolongées ou des sols peu perméables.

L'érosion en nappe entraîne une diminution de la couche arable du sol, une perte de nutriments essentielles pour la croissance et développement végétal, et une détérioration de la structure et de la capacité de rétention d'eau du sol (Mesrar et al., 2015).



Photo 4 : manifestation de l'érosion en Nappe dans la zone de M'Semrir

Dans la zone d'étude, l'érosion en nappe entraîne une élimination sélective et une perte de matières organiques et de particules fines, provoquant ainsi un décapage et un lessivage. Cette action laisse une couche de sol moins fertile, plus claire que l'horizon humifère situé en dessous. La surface du sol est nivelée grâce à la détérioration des mottes, au remplissage des creux et à la formation de croûtes en surface. Dans certains endroits, cette érosion se manifeste également par une remontée de sel à la surface, ce que l'on appelle la salinisation.

III.2.1.2.1.2 Erosion en rigole

L'érosion en rigole se caractérise par la formation de sillons peu profonds dans les sols, causés par des précipitations abondantes ou une protection inadéquate du sol. Les rigoles permettent à l'eau de s'écouler le long de leur tracé, entraînant avec elle les particules de sol. Cette érosion a des effets néfastes sur la fertilité, la structure et la capacité de rétention d'eau du sol (Mokhtari, 2017). Ce type d'érosion est courant dans les zones dépourvues de végétation (Naimi et al., 2005).

Les observations réalisées sur le terrain révèlent une présence significative d'érosion en rigole sur les versants de la zone de M'Semrir, caractérisés par des pentes fortes.



Photo 5 : Manifestation de l'érosion en rigole dans la zone de M'Semrir

III.2.1.2.1.3 Erosion en ravin

L'érosion en ravin se caractérise par la création de profonds ravins résultant de l'écoulement concentré des eaux de pluie ou des cours d'eau. Ce phénomène peut se produire rapidement dans des zones sensibles comme les pentes abruptes ou les sols peu cohésifs. Cette érosion entraîne une perte de sol importante, dégrade la qualité des terres (Ben Slimane, 2013).

Grâce aux observations réalisées sur le terrain, nous avons pu identifier plusieurs sites d'érosion par ravinement dans la zone d'étude. Ces sites se caractérisent par la présence de ravins moyens et profonds qui se forment à la suite de l'écoulement concentré des eaux de pluie ou des cours d'eau. Les observations nous permettent d'appréhender pleinement l'ampleur de l'impact de ces phénomènes sur le paysage environnant et nous permettent ainsi de mieux comprendre les processus en jeu.

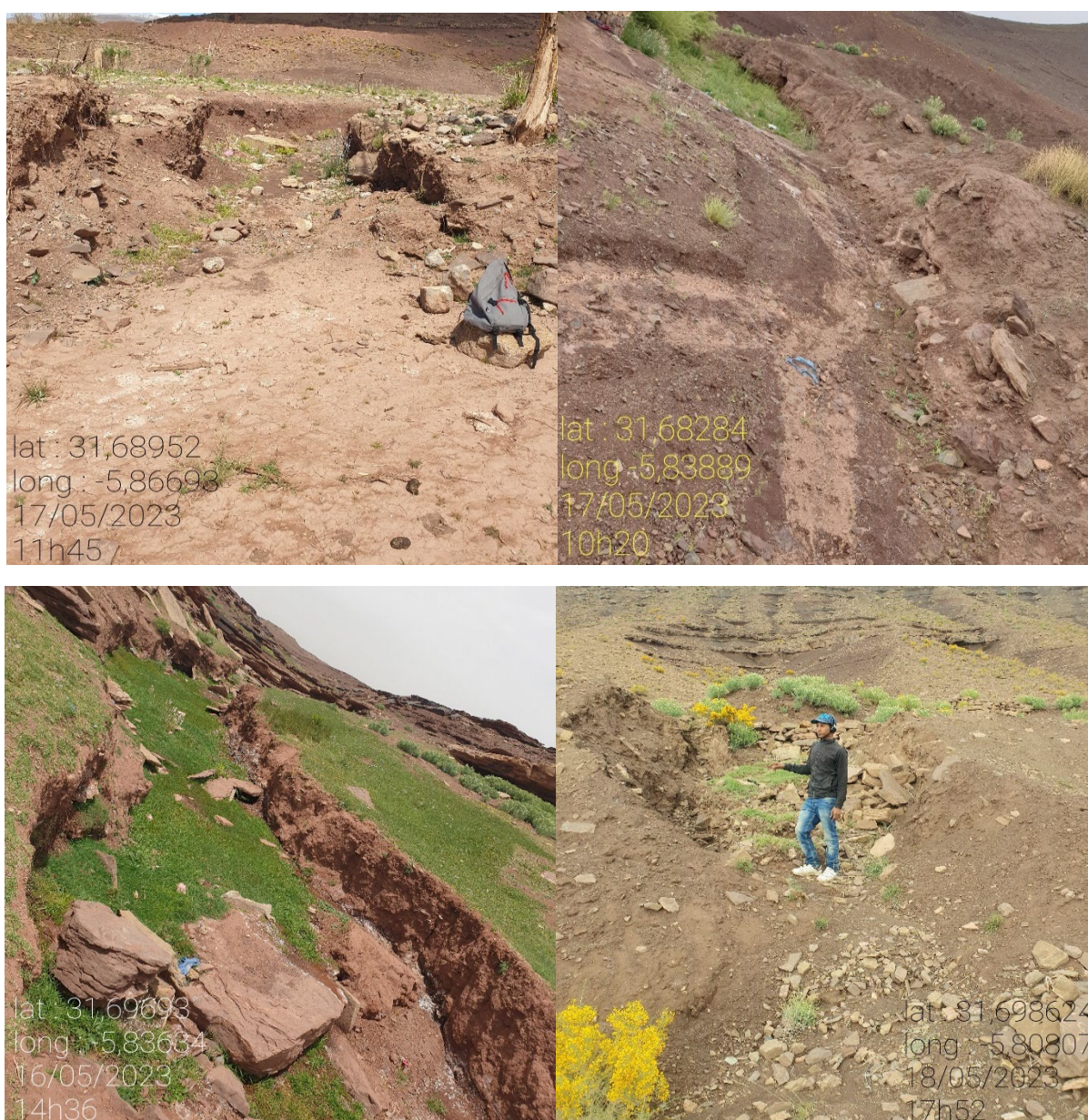


Photo 6 : Manifestation de l'érosion en ravinements à M'Semrir

III.2.1.2.1.4 Sapement des berges

Le sapement des berges est un processus d'érosion qui se produit le long des cours d'eau. A M'Semrir, il se caractérise par l'excavation ou le détachement du sol formant les rives, sous l'effet de la pression exercée par le courant des eaux des rivières. Ce phénomène est influencé par plusieurs facteurs, tels que la force du courant, les fluctuations du niveau de l'eau et les inondations récurrentes. De plus, l'absence ou la faiblesse de la végétation de protection contribue à fragiliser les berges. Le sapement des berges accroît les risques d'inondations et de perte de terres agricoles.

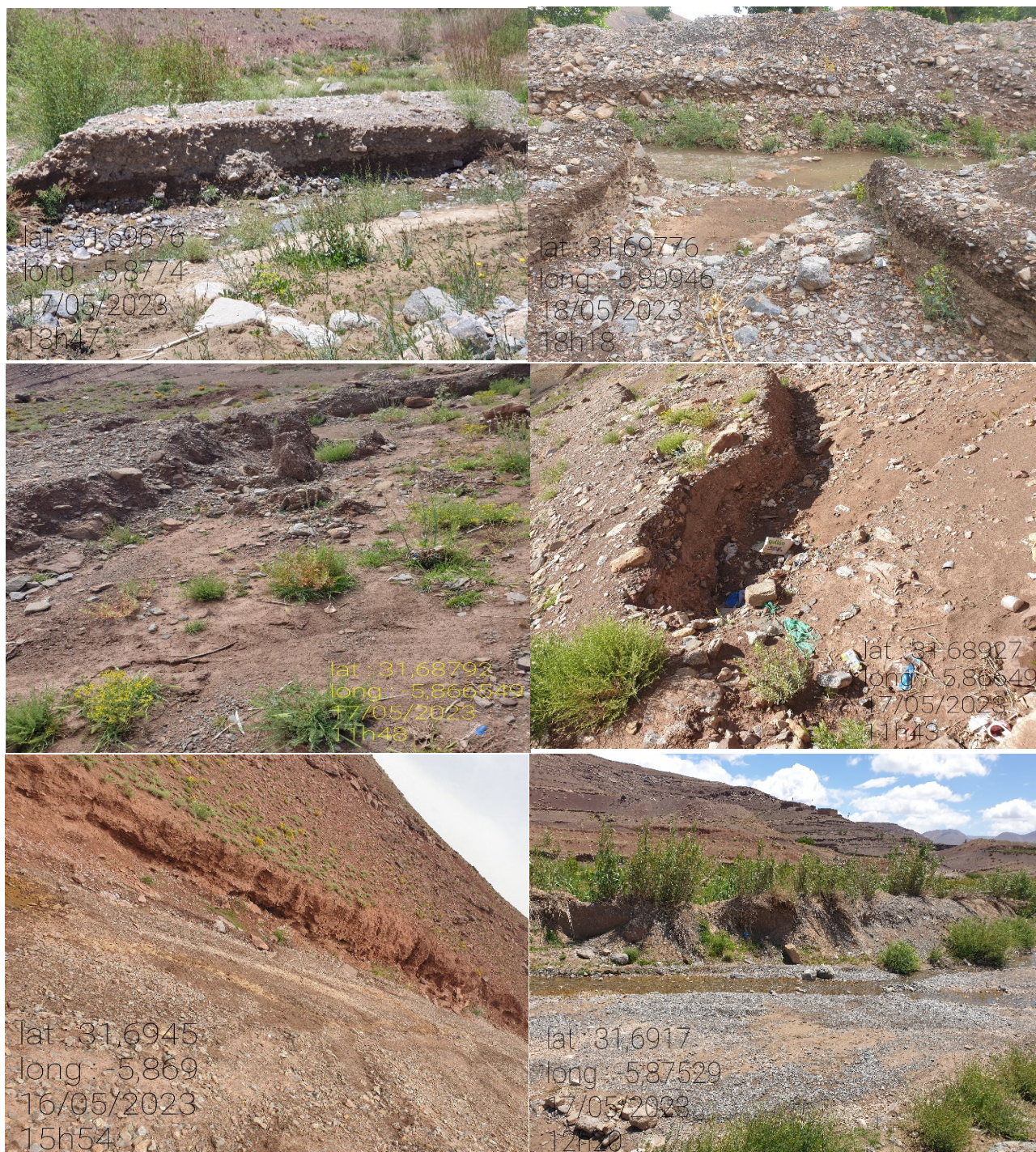
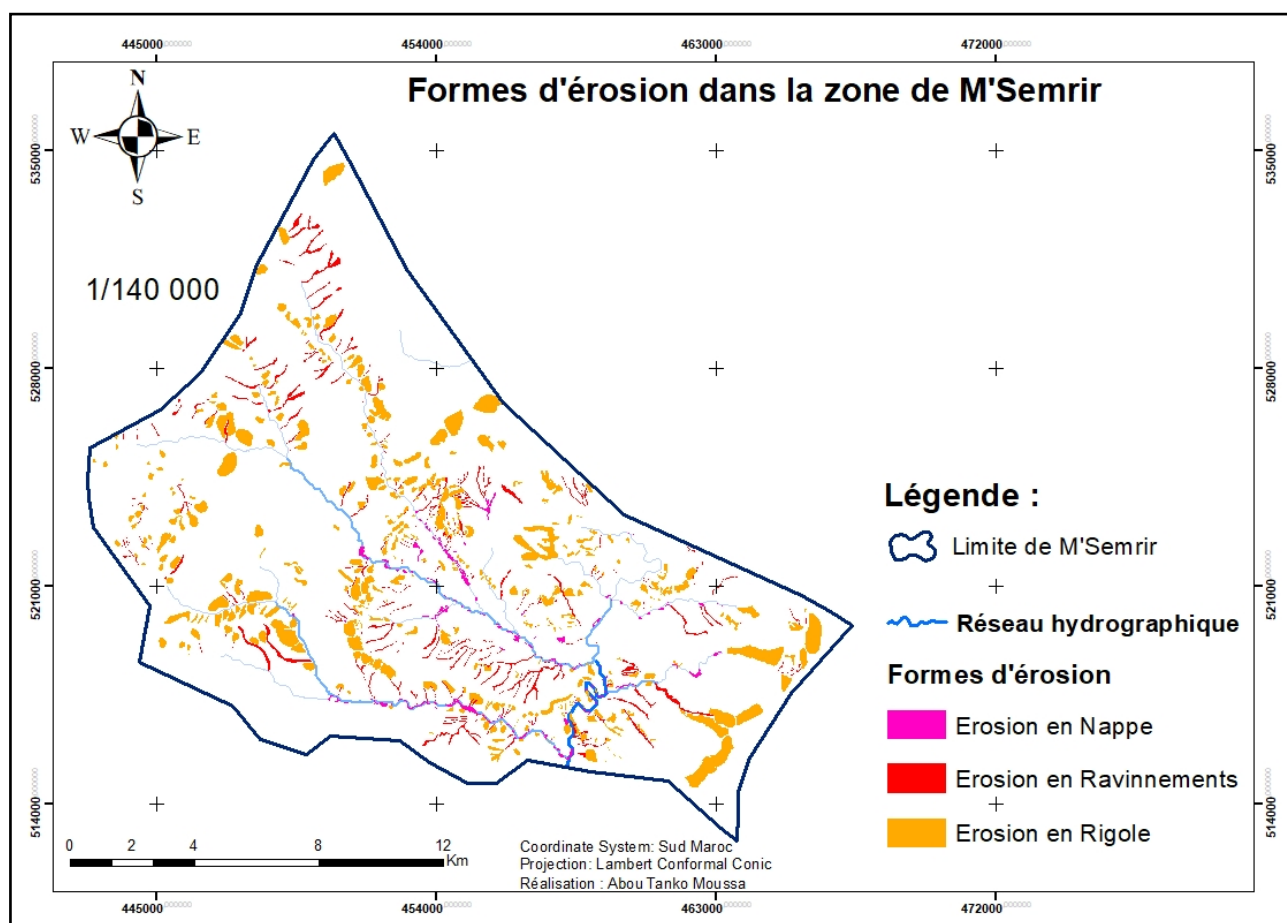


Photo 7 : Sapement des berges à M'Semrir

En résumé, les observations effectuées sur le terrain nous ont permis de constater une diversité de formes d'érosion, tant en termes de taille que de mécanismes d'évolution. Ces formes d'érosion jouent un rôle crucial dans l'évolution des versants. La mission sur le terrain a été essentielle pour acquérir une meilleure connaissance des différents types d'érosion et de leur répartition spatiale dans la zone d'étude.

III.2.1.2.2 Carte des formes d'érosion hydrique de la zone de M'Semrir

La carte représente les zones particulièrement touchées par les formes d'érosion hydrique dans la zone de M'Semrir (Carte N°21). Elle est réalisée à partir de l'observation de terrain et des images Google Earth (mission 03/2023). Son but est de décrire les formes d'érosion observées sur le terrain et de faire une délimitation cartographique des formes d'érosion qui caractérisent la zone de M'Semrir. Elle permet d'observer la répartition des différentes formes d'érosion rencontrées et leurs superficies relatives.



Carte 22 : Formes de l'érosion dans la zone de M'Semrir

Dans le but d'observer plus précisément la répartition des formes d'érosion dans la zone d'étude, les pourcentages de superficies sont calculés en référence au total des formes d'érosion, et non par rapport à la superficie totale de la zone.

L'analyse des formes d'érosion dans la zone de M'Semrir (Fig.18), montre l'abondance de l'érosion en rigoles, qui affecte la plupart des versants, touchant environ 75,62% des terrains menacés. Les ravinements de niveau moyen et profond représentent quant à eux 19,18% de la zone étudiée. En revanche, l'érosion en nappe ne couvre que 5,16% de la superficie et se trouve principalement dans des zones planes à faible pente.

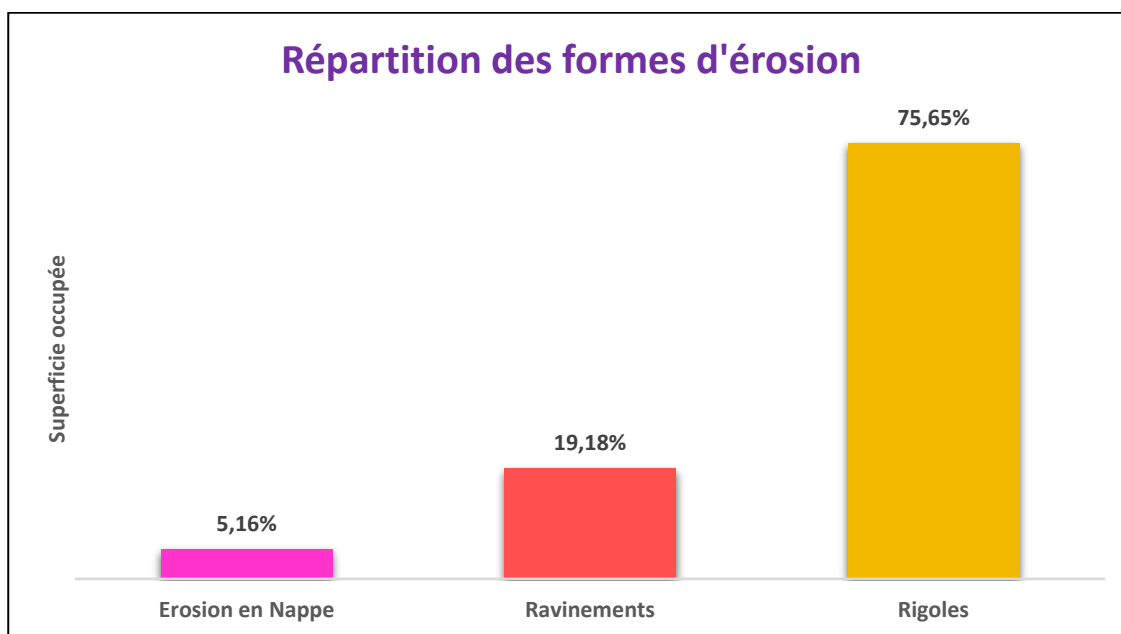
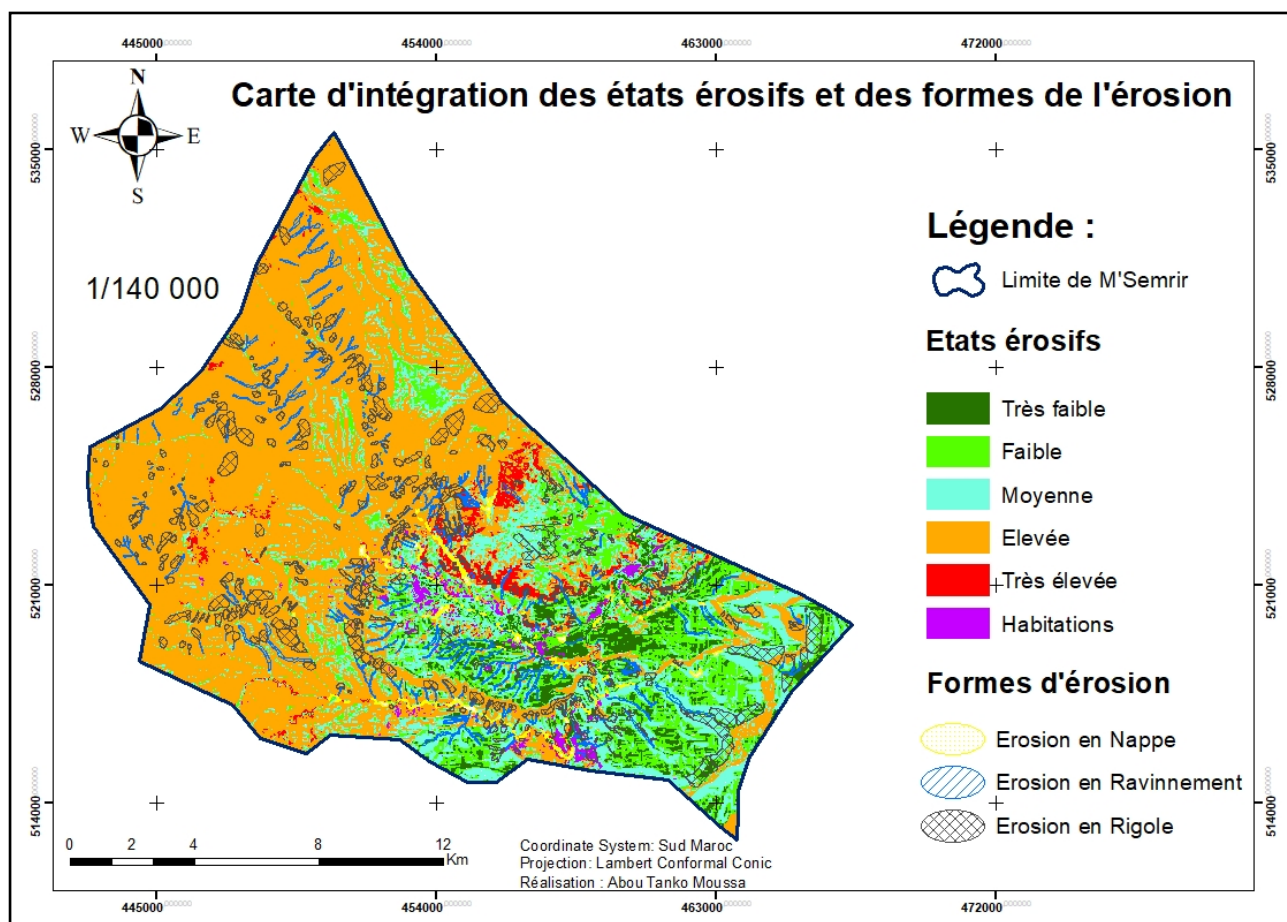


Figure 18 : Répartition spatiale des formes en fonction de la superficie

Cette situation découle de divers facteurs, notamment des précipitations intenses, des pentes abruptes à extrêmes qui représentent 87,7% de la superficie de la zone, la présence de terrains imperméables et l'absence de couverture végétale qui protège et stabilise les sols. Toutes ces conditions favorisent le déclenchement, l'arrachement et le déplacement facile des matériaux sur les versants.

III.2.1.3 L'approche d'intégration : Carte consolidée d'érosion

La troisième phase des directives PAP/CAR consiste à combiner les résultats des phases prédictive et descriptive de l'étude de l'érosion afin de produire une carte consolidée de l'érosion hydrique, qui offre une représentation précise de l'état de dégradation du sol. Cette carte est obtenue en superposant la carte des états érosifs potentiels (Carte N°20) obtenue par la cartographie thématique, et la carte des formes d'érosion (Carte N°21), obtenue par cartographie directe des formes d'érosion sur le terrain et par les images satellites, ce qui permet d'obtenir une vue d'ensemble complète de l'érosion hydrique dans la zone d'étude à travers une grille d'unités homogènes. Le résultat final est un produit cartographique détaillé et informatif qui met en évidence l'état de dégradation du sol par l'érosion avec précision.



Carte 23 : Intégration des données prédictives et descriptives (consolidée) de l'érosion à M'Semrir

L'analyse de la carte consolidée (Carte N°22), montre une corrélation entre l'érosion en rigoles et les zones présentant un degré élevé à très élevé d'états érosifs, en particulier dans les zones à forte pente et à intensité des précipitations élevée. Ces zones d'érosion en rigoles s'étendent sur une surface de 20,35 km², ce qui représente 8 % de la zone d'étude. La présence de ces formes d'érosion peut être liée à la forte pente, à l'intensité des précipitations et à une faible couverture végétale. Par ailleurs, l'érosion en ravinement est observée dans les zones où le degré d'état érosif varie de moyen à très élevé. La plupart de ces ravinelements sont en réalité une concentration de rigoles. En revanche, l'érosion en nappe se manifeste principalement dans les zones où la pente est nulle à faible au niveau des parcelles.

Les zones instables dans la région de M'Semrir sont caractérisées par des terrains présentant des manifestations visibles de processus érosifs. Les terres situées le long des oueds sont principalement utilisées pour l'agriculture, notamment l'arboriculture et la céréaliculture. Ces terres comprennent des sols touchés par l'érosion en nappe, en rigole et par le ravinement.

On observe la présence de toutes ces formes d'érosion (érosion en nappe, en rigoles et ravins) dispersées dans l'ensemble de la zone d'étude. Les principales causes des différents processus érosifs

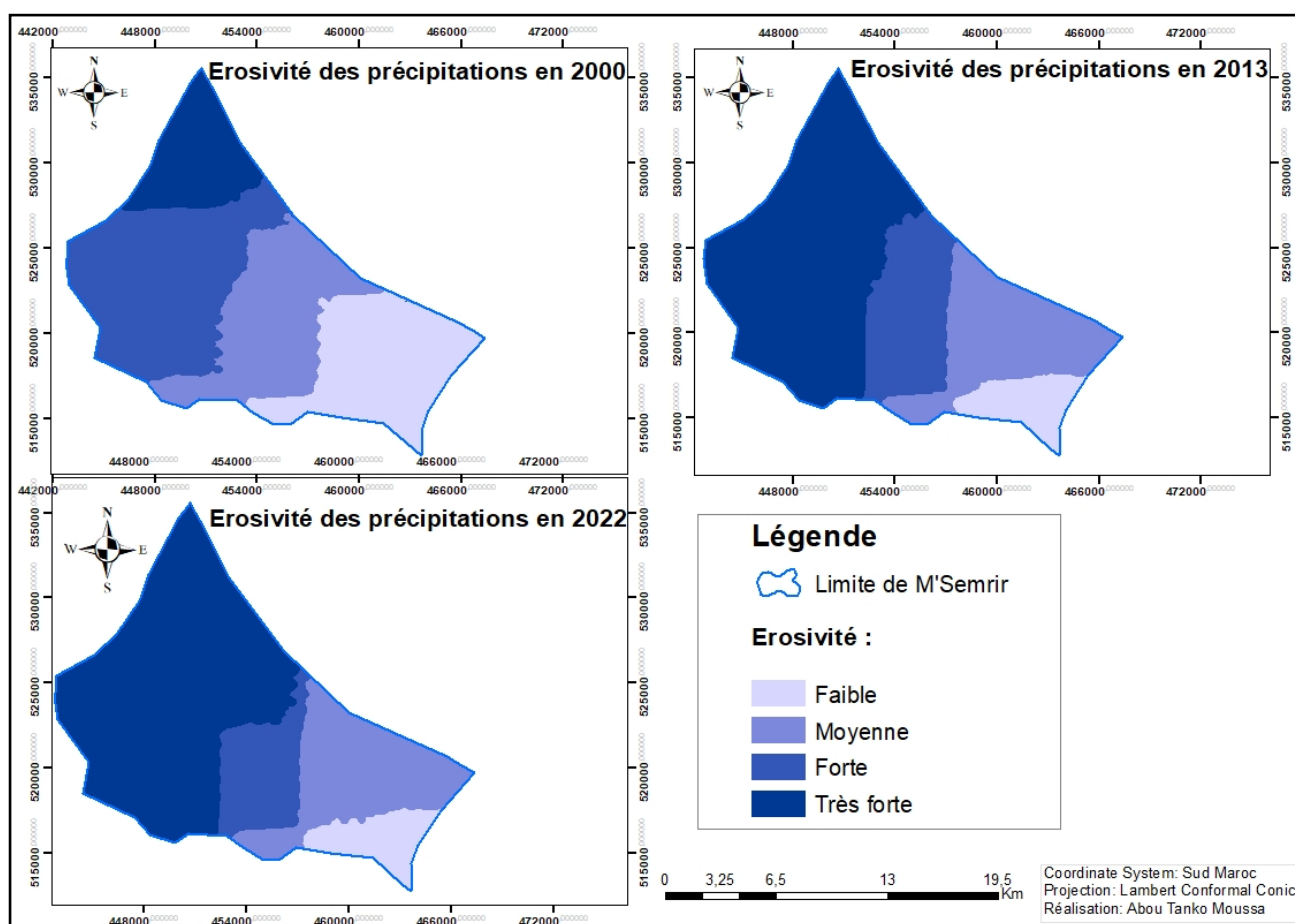
sont la pente, la nature géologique du substrat, l'agressivité des précipitations et l'influence humaine, notamment les pratiques agricoles telles que le labour et le surpâturage.

III.2.2 Etude de la dynamique du risque de l'érosion des sols de 2000 à 2022

L'analyse de la dynamique du risque d'érosion entre 2000 ; 2013 et 2022 est essentielle pour comprendre l'évolution de la dégradation des sols à M'Semrir. En examinant les facteurs influençant l'érosion sur cette période, nous pouvons mieux appréhender les tendances et les défis environnementaux associés.

III.2.2.1 Erosivité des précipitations de 2000 à 2022

L'évolution de l'intensité moyenne des précipitations de 2000 à 2022 revêt une importance cruciale pour évaluer l'impact de l'intensité des précipitations dans la zone. Pour cela le facteur R de précipitations a été calculé pour les trois années de référence, permettant ainsi de mesurer leur agressivité sur la zone.



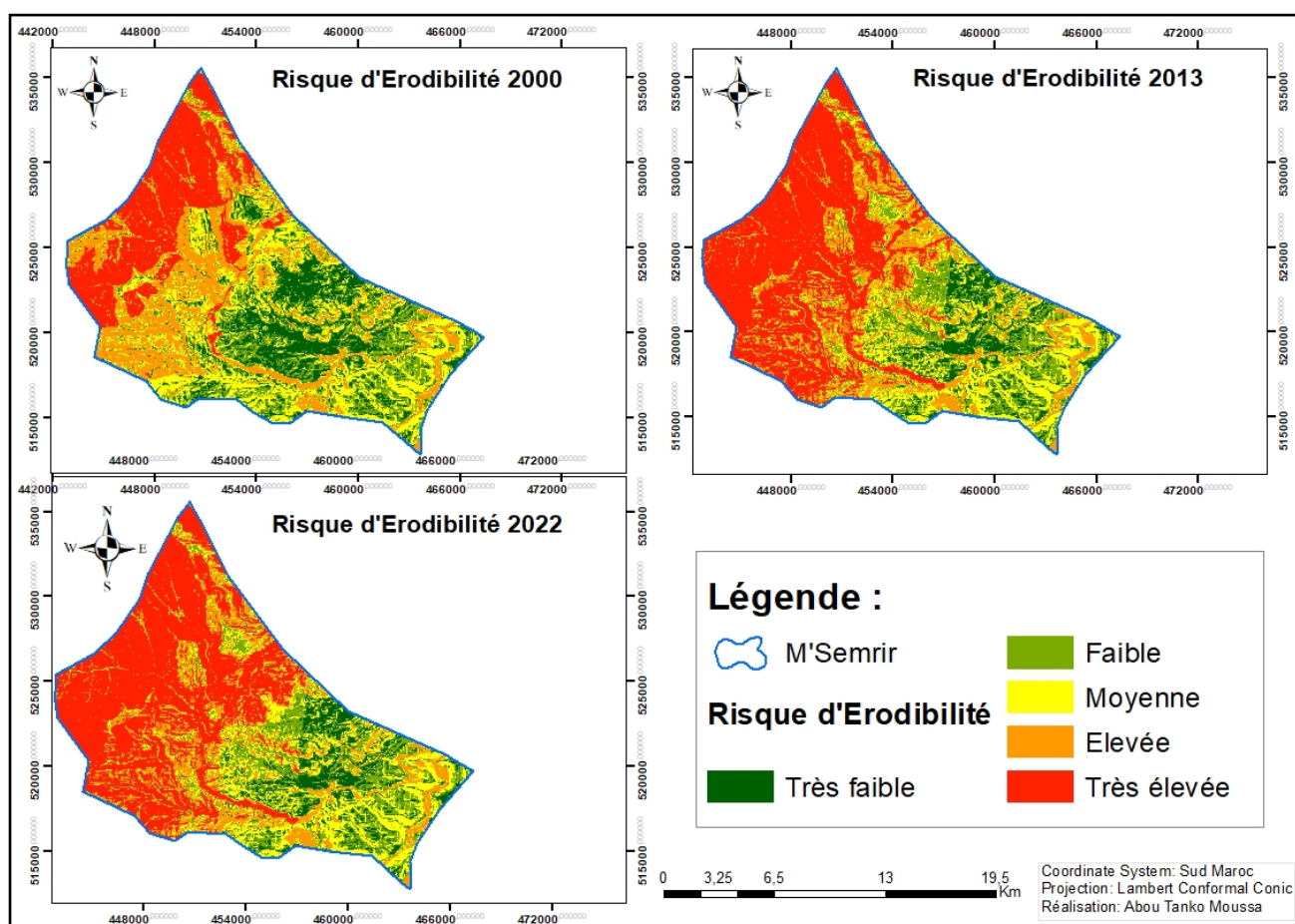
Carte 24 : Erosivité des précipitations de 2000 à 2022

Le facteur R d'intensité des précipitations augmente du Sud au Nord, à M'Semrir, suivant l'altitude. En 2000, il varie de 137,42 à 220,74 mm/an, en 2013 de 141,87 à 240,82 mm/an, et en 2022 de 134,85

à 276,48 mm/an. Ces données reflètent les fluctuations pluviométriques dans la région au fil des années, témoignant d'une augmentation de l'intensité des précipitations de 2000 à 2022, confirmant l'impact persistant du changement climatique dans la zone.

III.2.2.2 Risque d'érodibilité des sols de 2000 à 2022

L'érodibilité des sols au fil du temps résulte de la combinaison des facteurs pentes, lithologie et l'intensité des précipitations, exprimée par le facteur R de l'agressivité des précipitations. La carte suivante illustre la dynamique de risque d'érodibilité des matériaux dans la zone de M'Semrir.



Carte 25 : Variation des risques d'érodibilité de 2000 à 2022

Le résultat de la dynamique du risque d'érodibilité montre des variations significatives au fil du temps pour les périodes allant de 2000 à 2022. On observe une régression des classes d'érodibilité, de Très faible à Elevée, tandis que l'érodibilité très élevée a augmenté au fil de cette période. En plus de cette variation temporelle significative, on note également dynamique spatiale de cette érodibilité des sols, montrant un risque élevé à très élevé au Nord par rapport au Sud qui affiche un risque faible et très faible. L'année 2000 montre une érodibilité très élevée de 21,06%, qui augmente à 41,8% en 2022. Ces variations spatio-temporelles de l'érodibilité des sols peuvent être expliquées par les variations de l'intensité des précipitations qui sont plus agressives au Nord par rapport au Sud de la zone, qui est le facteur variable sur les trois périodes étudiées pour cette analyse du risque d'érodibilité.

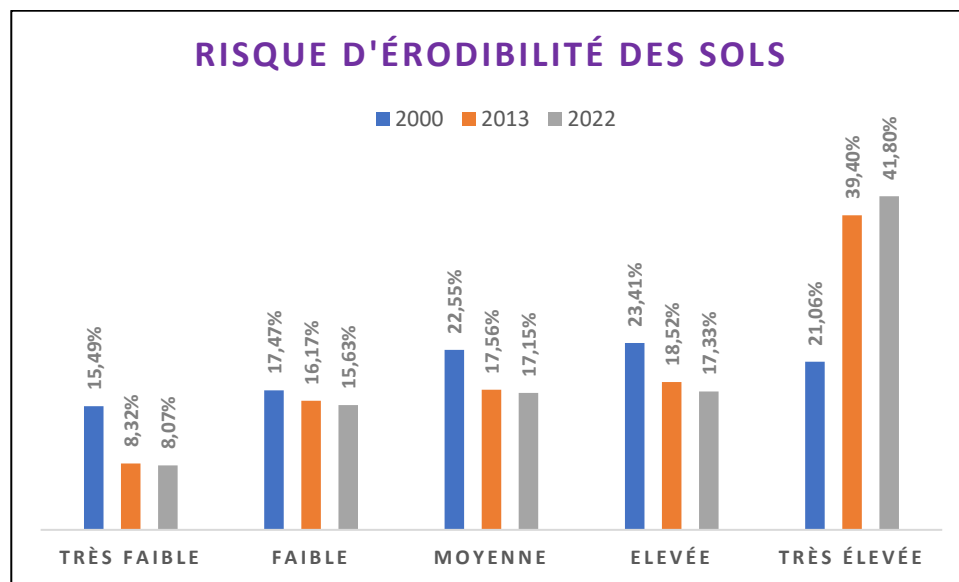
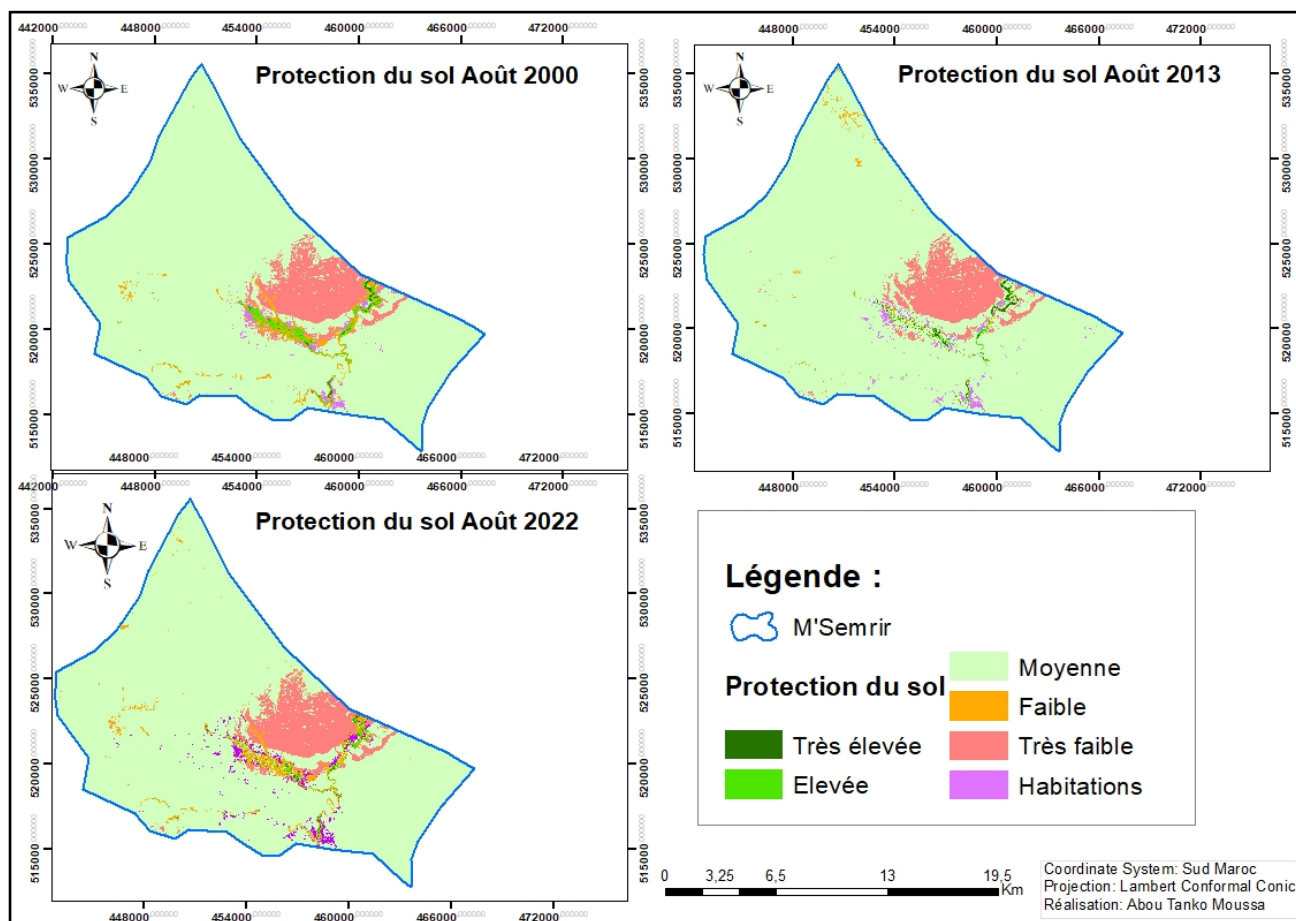


Figure 19 : Spatialisation des risques d'érodibilité

III.2.2.3 Protection de sol de 2000 à 2022

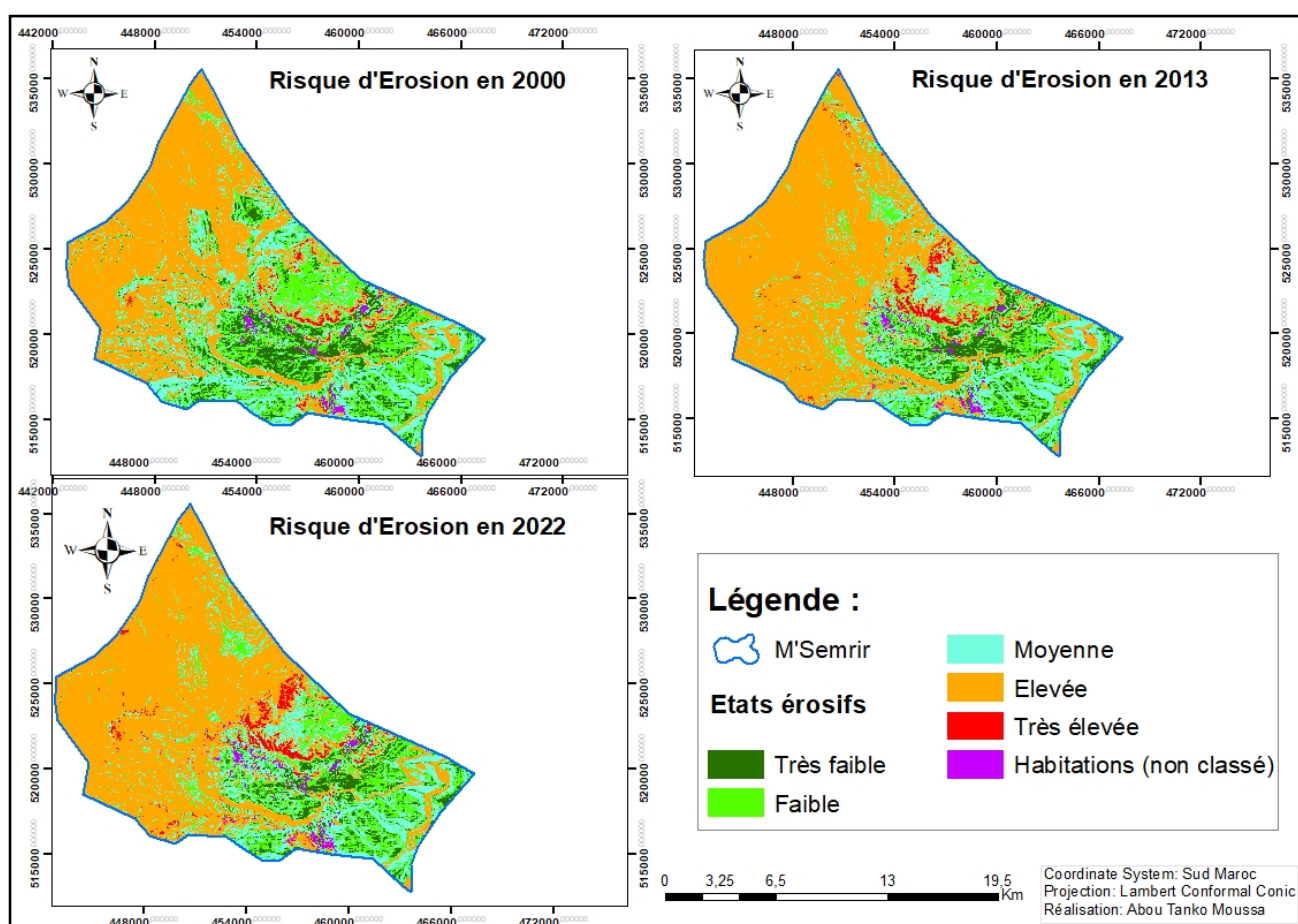
Cette représentation de la protection des sols résultante de la combinaison de l'occupation de sol avec le degré de recouvrement végétal, montre une légère variation des niveaux de protection des sols dans la zone par le couvert végétal.



Carte 26 : Dynamique de la protection du sol de 2000 à 2022

III.2.2.4 Dynamique du risque de l'érosion de 2000 à 2022

La compréhension de la dynamique du risque d'érosion dans la zone de M'Semrir est d'une grande importance. Dans cette étude spécifique, nous avons analysé les variations du risque d'érosion sur la période allant de 2000 ; 2013 et 2022. Pour ce faire, nous avons croisé la carte d'érodibilité des sols avec la carte du niveau de protection des sols. L'objectif de cette étude était d'analyser la dynamique du risque d'érosion à M'Semrir en utilisant des images satellites, notamment celles du Landsat ETM 2000 et 2013 et du Sentinel-2A, 2022. Cette approche nous a permis d'avoir une vision globale et détaillée des processus érosifs dans la zone étudiée.



Carte 27 : Dynamique des risques d'érosion hydrique des sols de 2000 à 2022

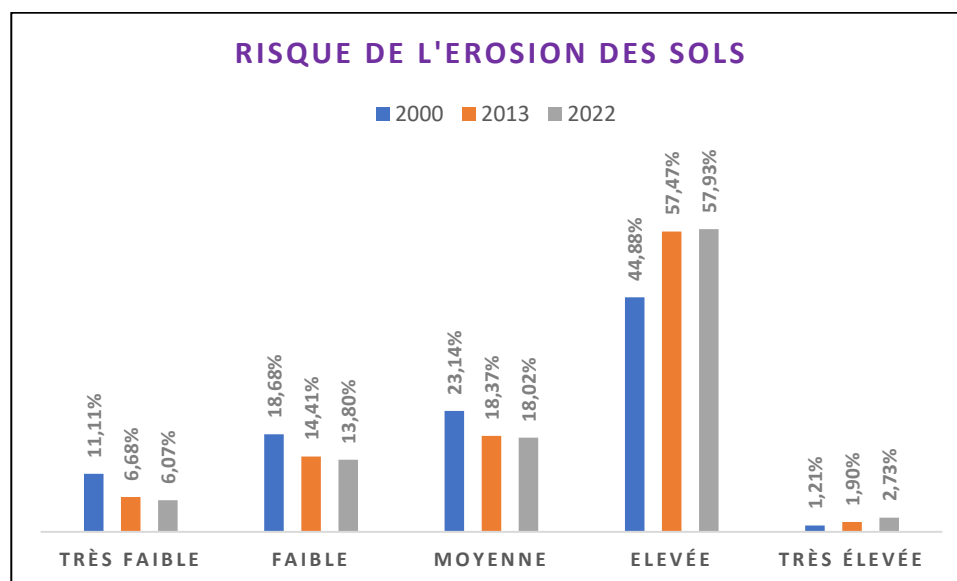


Figure 20 : Spatialisation des risques d'érosion sur trois périodes

L'examen de ces résultats met en évidence des variations du risque d'érosion et de leur dynamique spatio-temporelle. L'analyse de ces données laisse observer une régression des états érosifs de très faibles à moyennes pour les années 2000, 2013 et 2022 et une augmentation des états érosifs élevés à très élevés. Cette variation de la superficie des zones est attribuable à la diminution du couvert végétal protecteur et à l'intensité des précipitations qui sont plus agressives au Nord de la zone. En 2000, les états érosifs élevés représentent 44,88 %, comparés à 57,47 % en 2013 et 57,93 % en 2022. Ces variations sont étroitement liées à l'évolution de l'érodibilité en fonction de l'intensité des précipitations et des fluctuations du couvert végétal.

Une évolution de la superficie des zones d'habitation est observée entre 2000, 2013 et 2022, représentant respectivement 0,96 %, 1,1 % et 1,42 % de la superficie totale. Cela reflète la présence humaine dans la zone et témoigne de l'influence de l'activité humaine sur les facteurs responsables de l'érosion des sols.

L'analyse de ces résultats met en évidence des variations significatives du risque d'érosion au fil du temps, avec des proportions variables d'états érosifs très faibles, faibles, moyens, élevés et très élevés, due à la variation de l'érodibilité des sols et de la variation du couvert végétal protecteur. De plus, les chiffres relatifs aux habitations montrent une évolution de la présence humaine dans la zone de M'Semrir, qui ont une influence sur les facteurs de l'érosion.

IV. Partie IV : IMPACTS DE L'ÉROSION ET PRATIQUES D'AMÉNAGEMENTS ANTIÉROSIFS A M'SEMRIR

IV.1 Les impacts d'érosion hydrique au niveau de M'Semrir :

L'érosion constitue un sérieux défi environnemental qui affecte de vastes étendues de ce territoire insuffisamment protégé, mettant en danger leur intégrité. Ce phénomène se déclenche lorsque les précipitations dépassent la capacité d'absorption du sol, entraînant le ruissellement et l'emportement des particules de terre. Une fois que le ruissellement commence, l'érosion peut prendre différentes formes qui se superposent dans le temps et l'espace.

Dans la zone de M'semrir, l'érosion des sols engendre de nombreux problèmes d'ordre environnemental et socio-économique. Les conséquences peuvent être évaluées selon deux axes : d'une part, sur le site lui-même, où l'on observe la perte de sédiments. Il s'agit des endroits où les particules se détachent et sont transportées, sans être déposées. C'est donc sur ces sites que la dégradation et la perte de sol se manifestent. Cependant, les problèmes engendrés par l'érosion ne se limitent pas aux zones de perte de sol, car le dépôt des sédiments détachés et transportés en amont entraîne également ses propres conséquences environnementales et géophysique en aval.

IV.1.1 Dégradation des sols

À M'Semrir, l'érosion des sols a des répercussions majeures sur la fertilité et la productivité des terres, ainsi que sur la dégradation des parcours. Elle élimine les couches supérieures du sol riches en éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes, ce qui réduit sa capacité à retenir l'eau et les nutriments nécessaires aux cultures, entraînant ainsi une limitation des rendements agricoles. Parallèlement, les sols érodés compromettent la croissance de l'herbe et la disponibilité de pâturages de qualité pour le bétail, ce qui affecte la capacité des éleveurs à nourrir leurs animaux correctement.

Dans cette zone, la dégradation des terres due à l'érosion pluviale atteint des proportions considérables, se manifestant sous différentes formes de tailles et d'étendues variées. Ces formes d'érosion se dispersent dans toute la zone, notamment sur les versants et près des cours d'eau, où elles agissent comme des accélérateurs de dégradation des sols en surface, tant dans les terres agricoles que dans les parcours.



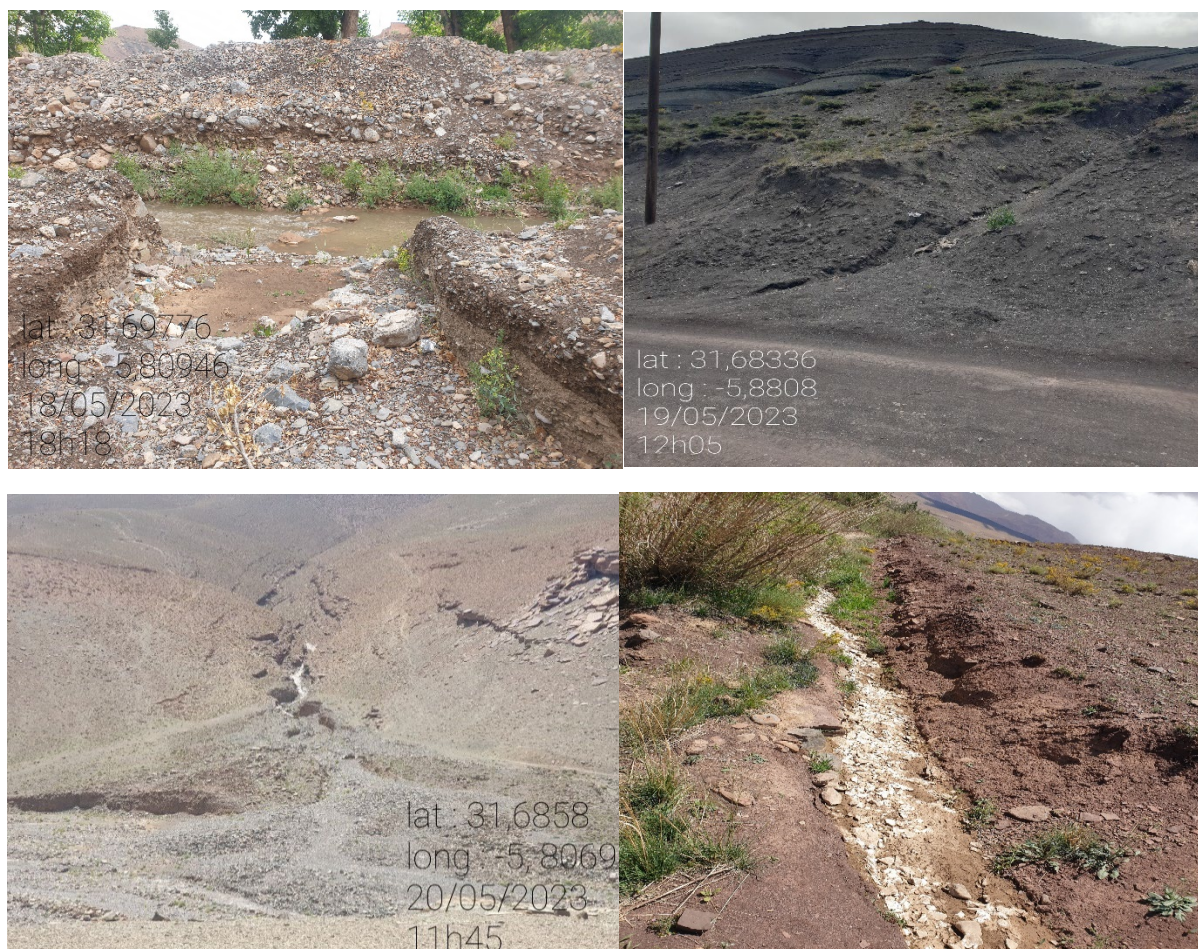


Photo 8 : Etat de dégradation des sols par l'érosion à M'Semrir

IV.1.2 Destruction du couvert végétal

L'érosion entraîne la destruction de la végétation en dégradant les couches fertiles du sol. Lorsque les matériaux du sol sont enlevés par l'érosion, les racines des plantes sont exposées, compromettant leur stabilité et perturbant leur fonctionnement. Cette destruction est particulièrement grave lorsque la végétation pousse sur des sols fragiles et faciles à détacher.



Photo 9 : Effet sur le couvert végétal dans la zone de M'Semrir

IV.1.3 Génération des risques

Parmi les risques associés au problème d'érosion à M'Semrir, on peut citer (Photos) :

- Inondations,
- Destruction des canaux d'irrigation (séguia),
- Chute de blocs et éboulements,
- Destruction des aménagements routiers et du réseau électrique.



Photo 10 : Destruction des aménagements et chutes des blocs

Les crues dans la zone revêtent une importance primordiale en raison de leur apport en eau considérable qui dépasse temporairement la quantité fournie par les sources permanentes. Ces crues

jouent un rôle essentiel en alimentant les nappes souterraines, mais elles entraînent également d'importantes pertes, telles que l'inondation des parcelles et emportent les plantations, la destruction des aménagements en béton. Ces inondations sont principalement causées par l'érosion et les sédiments qui obstruent les rivières. L'Oued connaît plusieurs inondations pendant les pluies hivernales et les orages intenses de l'été dans la zone, dépassant la zone de M'Semrir jusqu'à Dadès, entraînant des pertes matérielles considérables, comme cela s'est produit en 2010 et en juin 2011. La plupart des crues surviennent en mars et en avril. La vallée traverse des défilés étroits avant d'atteindre la zone de plaine portant le nom de Dadès, et le niveau d'eau varie en fonction des saisons. Ces crues dévastatrices emportent des champs et des infrastructures, comme cela s'est produit en 1942, 1964, 2004, 2010 et 2011 (Commune M'Semrir, 2022). Causant ainsi de graves dégâts au niveau des rendements, au système d'irrigation et du régime des cours d'eau. Ce phénomène se produit presque deux fois par an (Caïdat M'Semrir, 2009).

Selon l'entretien réalisé avec M. Mbarak, instituteur à M'Semrir, le ministère n'intervient pas pour aider à protéger les parcelles contre les inondations récurrentes de l'oued. Le problème principal causant ces inondations est l'accumulation de sédiments dans la rivière, ce qui entraîne des débordements et des dommages au niveau des parcelles lorsque l'eau monte. Les sédiments provenant des versants, sans aucune mesure de protection contre l'érosion, constituent une menace pour les agriculteurs.

Chaque année, ils font appel au ministère de l'Équipement et de l'Agriculture à intervenir face à cette menace, en construisant des infrastructures et en entretenant la rivière. Malheureusement, ils n'obtiennent pas de réponses favorables. Même le barrage d'Oussikis, depuis sa construction, n'a pas bénéficié d'entretien ni de mesures préventives en amont pour retenir les sédiments et prévenir l'envasement. Aujourd'hui, le barrage est complètement ensablé, ce qui représente un risque pour les agriculteurs et les habitants environnants en cas de fortes pluies, car le barrage est rempli de boue.

M. Mbarak ajoute qu'une association leurs a apporté une aide en fournissant des équipements (engins) pour évacuer les sédiments de la rivière et ainsi prévenir les inondations, même si elles persistent en raison du manque d'aménagements sur les versants. Cependant, cela n'est pas suffisant, car il y a maintenant un problème de carburant, d'entretien et de conducteurs pour les engins. Suite à une assemblée générale de toutes les communes de la province de Tinghir, il a été décidé que chaque commune contribuerait chaque année avec une somme de 80 000 dhs pour les entretiens de la rivière, afin de protéger les agriculteurs des dommages causés par les inondations.

En 2011, les inondations ont causé de nombreux dégâts, y compris la destruction de la route (**Photo.12**).



Photo 11 : Images des inondations de 2011 et en janvier 2012, opérations de désensablement (Commune M'Semrir, 2022)

IV.1.4 Envasement de barrage et séguias

Dans les régions montagneuses telles que le Haut Atlas, les processus d'érosion hydrique sont accentués en raison des fortes pentes et de la faible couverture végétale du sol. Les barrages qui sont alimentés par ces zones sont sujets à l'envasement causé par ce phénomène d'érosion.

Dans notre zone d'étude, la zone de M'Semrir, un barrage, connu sous le nom de barrage d'Oussikis, a été construit en amont du village d'Oussikis. Cependant, ce barrage est menacé par les dépôts de sédiments charriés par l'oued d'Oussikis et ses affluents, provenant des versants environnants. À l'heure actuelle, le barrage est complètement ensablé, ce qui représente un risque pour les agriculteurs et les résidents locaux en cas de fortes précipitations, car il est rempli de boue des sédiments.



Photo 12 : Barrage totalement ensablé

Même les canaux d'irrigation, appelés "séguia" dans le langage local, ne bénéficient malheureusement pas de mesures de protection appropriées ou des aménagements en aval pour retenir des sédiments, ce

qui entraîne des problèmes d'ensablement et d'obstruction qui compromettent leur bon fonctionnement. Les images qui suivent illustrent l'effet de l'érosion des sols sur les séguias. Entraînant leur ensablement total dans certaines zones.



Photo 13 : Impacts de l'érosion sur les séguias

IV.2 Pratiques d'aménagements dans la zone de M'Semrir

IV.2.1 Quelques aménagements existants visités

Lors de notre prospection sur le terrain dans la zone de M'Semrir, nous avons eu l'occasion de rencontrer différents types d'aménagements antiérosifs. Bien que leur nombre soit limité à l'échelle de la zone, ces aménagements jouent un rôle crucial dans la préservation des sols. Ils sont localisés à l'aval. La contrainte majeure à l'installation des aménagements réside sur le statut social du territoire qui reste très complexe. Des terres réservées aux transhumants par tribu.

IV.2.1.1 Seuils en pierres

Nous avons observé des seuils en pierres sèches construits par les habitants selon leurs propres volontés. Ces seuils servent à freiner l'écoulement des eaux et à retenir les sédiments, contribuant ainsi à la protection des terrains avoisinants. Les habitants ont utilisé les pierres disponibles localement pour ériger ces seuils, ce qui témoigne de leur engagement envers la préservation de leur environnement.



Photo 14 : Seuils en pierres sèches de la zone de M'Semrir

IV.2.1.2 Seuils en gabion

Présence de seuils en gabions, établis par les autorités communales pour protéger les infrastructures routières. Les gabions, qui sont des structures en treillis métallique remplies de pierres, sont destinés à offrir une protection solide contre les écoulements d'eau agressifs et l'érosion des sols. Cependant, nous avons noté que ces seuils sont sujets à l'ensablement en raison de l'absence d'arbres en amont pour stabiliser les sols.



Photo 15 : Seuils en gabions de la zone de M'Semrir

IV.2.1.3 Seuils en maçonnerie

Certains versants identifiés comme drainant de grandes quantités d'eau vers le village d'Oussikis ont été équipés de seuils en maçonnerie. Ces seuils, construits en utilisant des matériaux de construction durables tels que le béton, ont pour objectif de stabiliser les pentes et de corriger les ravins. Ces mesures sont particulièrement importantes pour protéger la communauté locale contre les catastrophes naturelles potentielles.



Photo 16 : Seuils en maçonneries dans la zone de M'Semrir

IV.2.1.4 Aménagements en terrasses agricole

Les aménagements en terrasses dans la zone de M'Semrir ont gagné en importance ces dernières années avec l'extension des zones de parcelles pour la préservation des sols et le développement agricole durable. Ils permettent de casser les pentes, réduisant ainsi la vitesse de ruissellement et prévenant l'érosion des sols. Les terrasses favorisent également la rétention d'eau et créent des conditions propices à la croissance des cultures.



Photo 17 : Les terrasses de la zone de M'Semrir

IV.2.1.5 Boisement

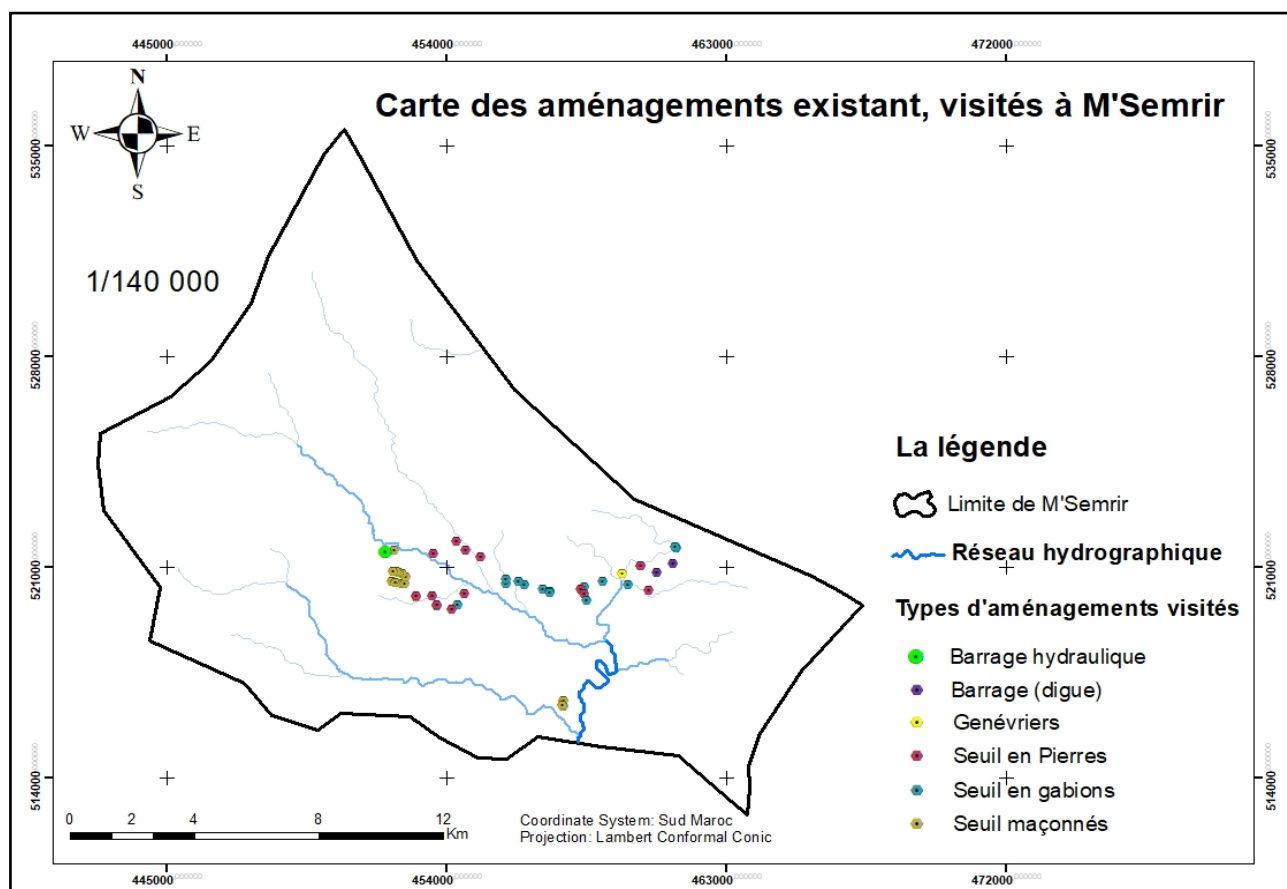
En ce qui concerne les pratiques biologiques, elles restent assez rares dans la zone. Cependant, nous avons pu identifier quelques aménagements, notamment des génévriers plantés sur une petite partie de M'Semrir, qui se sont développés pour stabiliser le sol. De plus, lors de notre rencontre avec M. Hamid, un investisseur possédant une entreprise à Rabat et cultivant des pommiers à Oussikis, il nous a expliqué que les jeunes oliviers qu'il a plantés en haut de la montagne lui permettent de stabiliser le sol et de prévenir les glissements de terrain et l'érosion. Cependant, il a admis qu'il n'avait pas suffisamment réfléchi avant de choisir les oliviers et que les cerisiers auraient pu lui offrir un meilleur rendement économique.



Photo 18 : Plantation d'arbres pour la protection des versants à M'Semrir

IV.2.1.6 Carte des pratiques d'aménagements antiérosifs visités

La cartographie des aménagements existants dans la zone de M'Semrir révèle une faible présence de pratiques anti-érosion dans la zone d'étude, dû à la complexité du statut social du territoire.

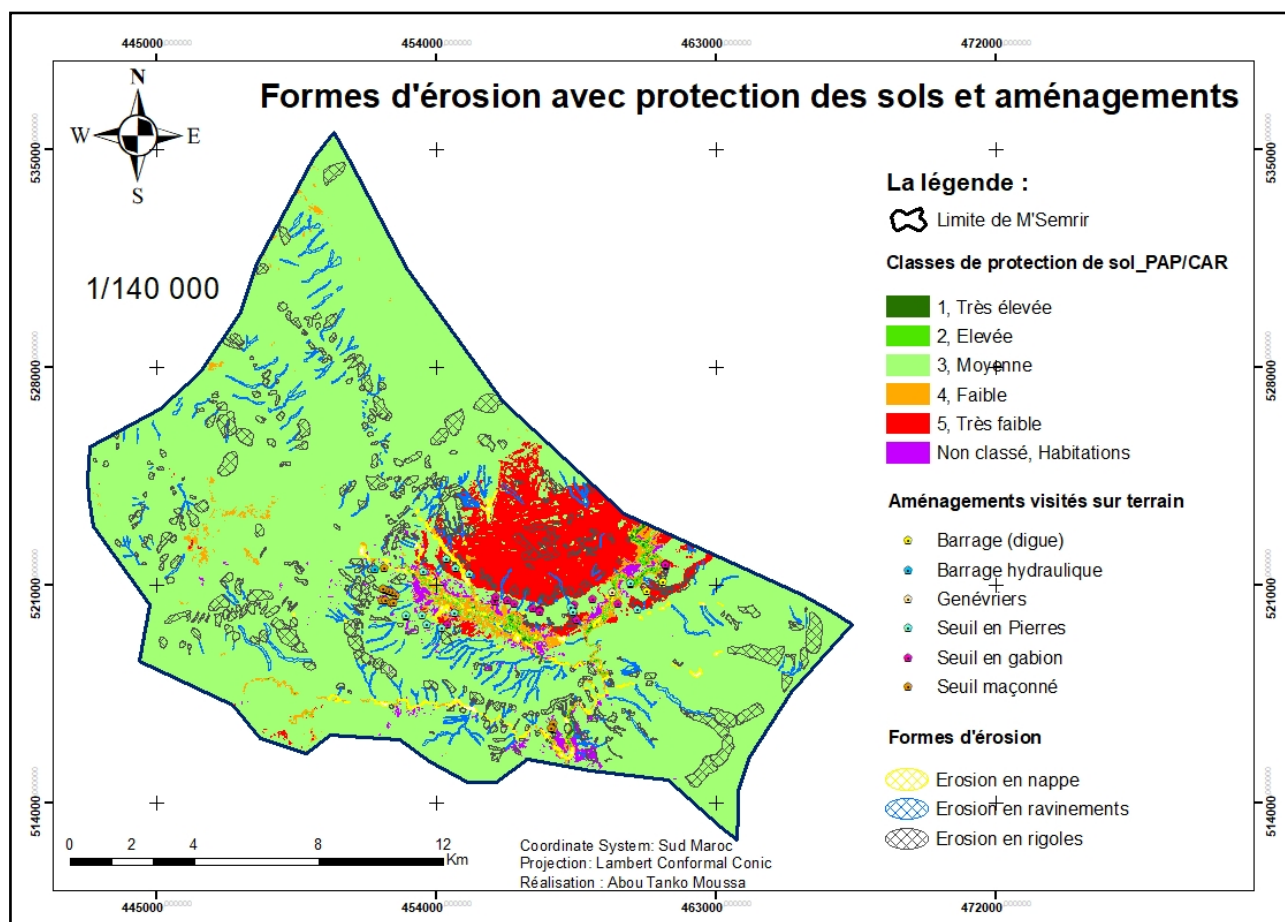


Carte 28 : Les aménagements existants visités à M'Semrir

Tableau 13 : Liste des coordonnées des aménagements visités dans la zone de M'Semrir

Latitude	Longitude	Type	Latitude	Longitude	Type
31,6887	-5,83354	Seuil en gabion	31,68385	-5,89679	Seuil en Pierres
31,68702	-5,83989	Seuil en gabion	31,6528	-5,84662	Seuil maçonné
31,68632	-5,841	Seuil en Pierres	31,65095	-5,84649	Seuil maçonné
31,68498	-5,83995	Seuil en Pierres	31,65129	-5,84724	Seuil maçonné
31,6854	-5,85159	Seuil en gabion	31,68594	-5,8181	Seuil en Pierres
31,68615	-5,85378	Seuil en gabion	31,69075	-5,82679	Seuil en gabion
31,68752	-5,8601	Seuil en gabion	31,68284	-5,83889	Seuil en gabion
31,69589	-5,87515	Seuil en Pierres	31,6856	-5,85159	Seuil en gabion
31,69324	-5,8206	Seuil en Pierres	31,6883	-5,86221	Seuil en gabion
31,6934	-5,8206	Seuil en Pierres	31,6879	-5,86654	Seuil en gabion
31,69139	-5,81521	Barrage (digue)	31,6883	-5,8622	Seuil en gabion
31,69386	-5,80971	Barrage (digue)	31,6855	-5,85158	Seuil en gabion
31,698668	-5,80856	Seuil en gabion	31,6966	-5,891	Seuil en Pierres
31,698831	-5,80901	Seuil en gabion	31,68515	-5,85153	Seuil en gabion
31,698833	-5,80889	Seuil en gabion	31,68925	-5,86644	Seuil en gabion
31,69767	-5,88012	Seuil en Pierres	31,69742	-5,9074	Barrage hydraulique
31,70045	-5,88328	Seuil en Pierres	31,68835	-5,90486	Seuil maçonné
31,69775	-5,9043	Seuil maçonné	31,68809	-5,90372	Seuil maçonné
31,68481	-5,88044	Seuil en Pierres	31,68771	-5,9017	Seuil maçonné
31,68756	-5,82495	Seuil en gabion	31,68763	-5,90091	Seuil maçonné
31,68384	-5,89142	Seuil en Pierres	31,68972	-5,90048	Seuil maçonné
31,68114	-5,8896	Seuil en gabion	31,69054	-5,90164	Seuil maçonné
31,68134	-5,8898	Seuil en Pierres	31,69085	-5,90258	Seuil maçonné
31,6813	-5,88258	Seuil en gabion	31,69133	-5,90365	Seuil maçonné
31,68016	-5,88465	Seuil en Pierres	31,69146	-5,90472	Seuil maçonné
31,68375	-5,89666	Seuil maçonné			

La superposition de la carte des formes d'érosion (**Carte.19**) avec celle de protection des sols de la zone de M'Semrir (**Carte.17**), ainsi que celle des aménagements antiérosifs visités (**Carte.21**), permet d'observer la répartition des différentes formes d'érosion sur le terrain, en relation avec le niveau de protection des sols offert par le couvert végétal en place et les aménagements existantes.



Carte 29 : Formes d'érosion avec protection des sols et aménagements

On remarque que la faible protection des sols dans la zone de M'Semrir, combinée à d'autres facteurs tels que la lithologie et les précipitations, est à l'origine de l'évolution des différentes formes d'érosion présentes sur les versants. Une observation de la carte révèle que toutes les formes concentrées d'érosion, telles que les rigoles et les ravine, se localisent principalement dans les zones présentant un niveau de protection moyen à très faible. En revanche, l'érosion en nappe se manifeste davantage dans les zones où la protection des sols est également moyenne à faible.

IV.2.2 Proposition des pratiques d'aménagements

Dans cette partie, nous proposons quelques solutions afin de limiter le risque à défaut de le supprimer. Les actions de protection sont multiples et varient d'un phénomène à l'autre.

Pour lutter contre la dégradation des milieux et des ressources, il est nécessaire d'intégrer les programmes dans une politique globale d'aménagement régional, qui prenne en compte les conditions physiques et socio-économiques. Cette approche requiert une modernisation de l'économie montagnarde, avec une rénovation des moyens d'exploitation et une amélioration des méthodes de culture (Abdellatif, 2002).

En ce qui concerne les mesures d'aménagement visant à réduire ou à éliminer les risques et les conséquences catastrophiques de l'érosion hydrique dans la zone de M'Semrir, nous proposons quelques solutions pour limiter le risque, même si l'élimination complète n'est pas toujours possible. En fonction de la topographie des formes d'érosions déjà observés, nous avons sélectionné divers aménagements de protection, qui doivent être adaptés à chaque situation. Ces mesures de protection peuvent varier d'un cas à l'autre.

Pour protéger les sols de la zone de M'Semrir contre l'érosion pluviale, il est nécessaire de perturber le ruissellement et éviter toute forme d'accumulation de l'eau.

Les aménagements antiérosifs proposés dans la zone de M'Semrir s'intègrent dans l'un des deux objectifs

- Maîtriser la composante érosive du ruissellement.
- Réduire la vulnérabilité du sol.

Pour le traitement des zones affectées par l'érosion hydrique dans la zone de M'Semrir et les possibilités d'aménagement, les techniques de lutte contre l'érosion hydrique peuvent être divisées en deux catégories : des mesures mécaniques et mesures biologiques sont proposées, parmi lesquelles l'utilisation de seuils en gabion, de seuils en pierre sèche, ainsi que des pratiques culturelles visant à réduire le ruissellement et stabiliser le sol, sont les plus efficaces.

- Mesures mécaniques : Elles consistent à installer un réseau de seuils dans les ravins présentant une forte activité érosive, dans le but de stabiliser leur fond et leurs bords.
- Mesures biologiques : Elles consistent à planter de la végétation sur les versants et les ravins afin de renforcer la protection des sols.

IV.2.2.1 Mesures mécaniques

Il s'agit d'une méthode qui repose sur la construction de seuils. Un seuil est un ouvrage érigé à travers le lit d'un ravin, pouvant être réalisé en maçonnerie, en béton, en pierres sèches, en grillage métallique ou en gabion. Placé perpendiculairement à l'axe du lit, son objectif est de stopper l'érosion en profondeur et sur les côtés, de retenir les matériaux charriés, et de stabiliser les éboulis des berges en leur procurant un appui (Arrebei et al., 2019). Pour être efficace, la durabilité du seuil est primordiale, en utilisant des matériaux adaptés et en réalisant une construction soignée. Ces aménagements sont surtout utilisés dans les ruisseaux, ravins et ravines, pour réduire la vitesse de ruissellement, retenir les sédiments et protéger les infrastructures socio-économiques en aval. Il existe différents types de seuils, selon les matériaux de construction utilisés (Boughalem et al., 2012).

IV.2.2.1.1 Seuil en pierres

Le seuil en pierres est un ouvrage constitué de pierres non cimentées solidement ancrées dans les berges pour augmenter leur cohésion et rigidité. L'assemblage soigneux des pierres est essentiel pour assurer la stabilité de l'ouvrage. En outre, la construction en pierre sèche permet la filtration de l'eau de ruissellement à travers les parois de l'ouvrage, tandis que l'excès d'eau est évacué par un déversoir central, et de limiter sa capacité de creusement (Abdellatif, 2002). C'est un ouvrage qui praticable au niveau de la zone gréseuse de M'semrir. L'exemple de ces types d'aménagements est illustré dans les photos qui suivent, présent lors de la prospection terrain.



Photo 19 : Seuils en pierres installés sur la zone de M'Semrir

IV.2.2.1.2 Seuil en gabion

Les gabions sont des structures modulaires constituées de caisses en grillage en acier à maille hexagonale double torsion, transportées pliées sur le terrain et déployées au moment de l'utilisation. Le grillage métallique est résistant aux agents du milieu grâce à la galvanisation et le tissage à double torsion empêche les démaillages. Les gabions sont assemblés sur site à l'aide d'un fil de ligature ayant les mêmes caractéristiques que celles du grillage. C'est un type d'ouvrage robuste plus stable pour la correction des ravins profondes situés dans la zone de M'Semrir par rapport au seuil en pierres et exigent le plus de technicité (Boughalem et al., 2012). L'exemple de ces types d'aménagements est illustré dans les photos qui suivent, présent lors de la prospection terrain.



Photo 20 : Seuils en gabions installé sur la zone

IV.2.2.1.3 Les terrasses de cultures

Les terrasses de cultures sont des aménagements agricoles qui consistent à créer des niveaux horizontaux ou légèrement inclinés en escalier sur les flancs de montagne pour recueillir et distribuer l'eau d'irrigation sur les cultures en aval. Ces niveaux sont construits en utilisant des murs de soutènement en pierres, et permettent de contrôler l'érosion et la perte de sols en réduisant l'impact des précipitations tout en optimisant l'utilisation des ressources en eau pour l'agriculture (MARTIN, 2014). Dans notre zone d'étude, les unités de terrasses se localisent à Oussikis, dans la montagne gréseuse au centre-est, qui présente des conditions lithologiques et topographiques favorables à leur mise en place.

La pratique agricole en terrasses est très active dans le territoire de M'Semrir et mérite d'être encouragée tout en fournissant un encadrement aux agriculteurs. Cependant, certains producteurs créent des terrasses dans des endroits où il est difficile d'obtenir de l'eau d'irrigation, en creusant des puits qui sont ensuite abandonnés. Cette situation entraîne une perte économique des ressources, de temps et de main-d'œuvre et peut même conduire à un exode rural. C'est l'exemple de cet agriculteur qui voit perdre tout son investissement sur une zone où l'eau n'y est pas. On peut voir les plantations et les tuyaux d'irrigation abandonnés.



Photo 21 : Plantations abandonnées ; manque d'eau

Les systèmes de terrasses sont conçus pour valoriser les faibles surfaces agricoles disponibles aux paysans en y cultivant des espèces fruitières ou des cultures irriguées. En associant des cultures denses et variées, les terrasses maintiennent une végétation quasi permanente qui réduit l'effet du ruissellement et protège les terrains contre l'érosion (Abdellatif, 2002).



Photo 22 : Terrasses agricoles dans la zone de M'Semrir

IV.2.2.2 Les mesures biologiques

Ce sont des pratiques qui utilisent des plantes et des méthodes naturelles pour prévenir ou réduire l'érosion des sols en ralentissant le ruissellement et en favorisant la rétention d'eau dans le sol et permettent de stabiliser les sols.

IV.2.2.2.1 Végétalisation

Dans les conditions de la zone de M'Semrir où le couvert végétal est faible sur des zones à altitudes élevées, la végétalisation est une technique efficace pour la protection des parcours. Elle consiste à planter des espèces végétales qui s'adaptent aux conditions locales sur les versants et les ravins, afin de renforcer la stabilité des sols. Les racines des plantes jouent un rôle important en retenant les sols et en les rendant plus résistants à l'érosion. De plus, la végétation ralentit l'écoulement des eaux de pluie, ce qui favorise leur infiltration dans le sol et réduit l'érosion en surface, ainsi que les risques de coulées de boue. Bénéfique également pour les troupeaux d'élevage.



Photo 23 : Végétation sur les zones des parcours

IV.2.2.2 Boisement

L'oasis de M'Semrir est un territoire montagneux à vocation agricole, principalement connu pour sa production de pommes. Toutefois, il souffre d'une faible couverture végétale ligneuse en altitude, ce qui le rend vulnérable à la dégradation des sols. Le boisement des versants par des essences végétales ligneuses permettrait de réduire l'érosion et de protéger les sols, tout en représentant un enjeu majeur pour les zones à forte importance socio-économique et les milieux semi-naturels.

Le secteur gréseux situé au centre-est de M'Semrir est considéré comme la priorité pour la plantation d'arbres. L'introduction d'arbres fruitiers est vivement recommandée, car ils assurent la protection du sol contre l'érosion tout en générant des revenus pour la population locale. Les espèces sélectionnées doivent être adaptées aux exigences agro-climatiques de la région, et les espèces rustiques comme l'olivier, le genévrier, le figuier et l'amandier doivent être privilégiées car elles sont capables de survivre et de se développer dans des conditions difficiles.

Pour renforcer les berges, la méthode de fixation biologique est efficace, mais des mesures techniques telles que des procédures mécaniques sont nécessaires pour ralentir l'écoulement des eaux de ruissellement.

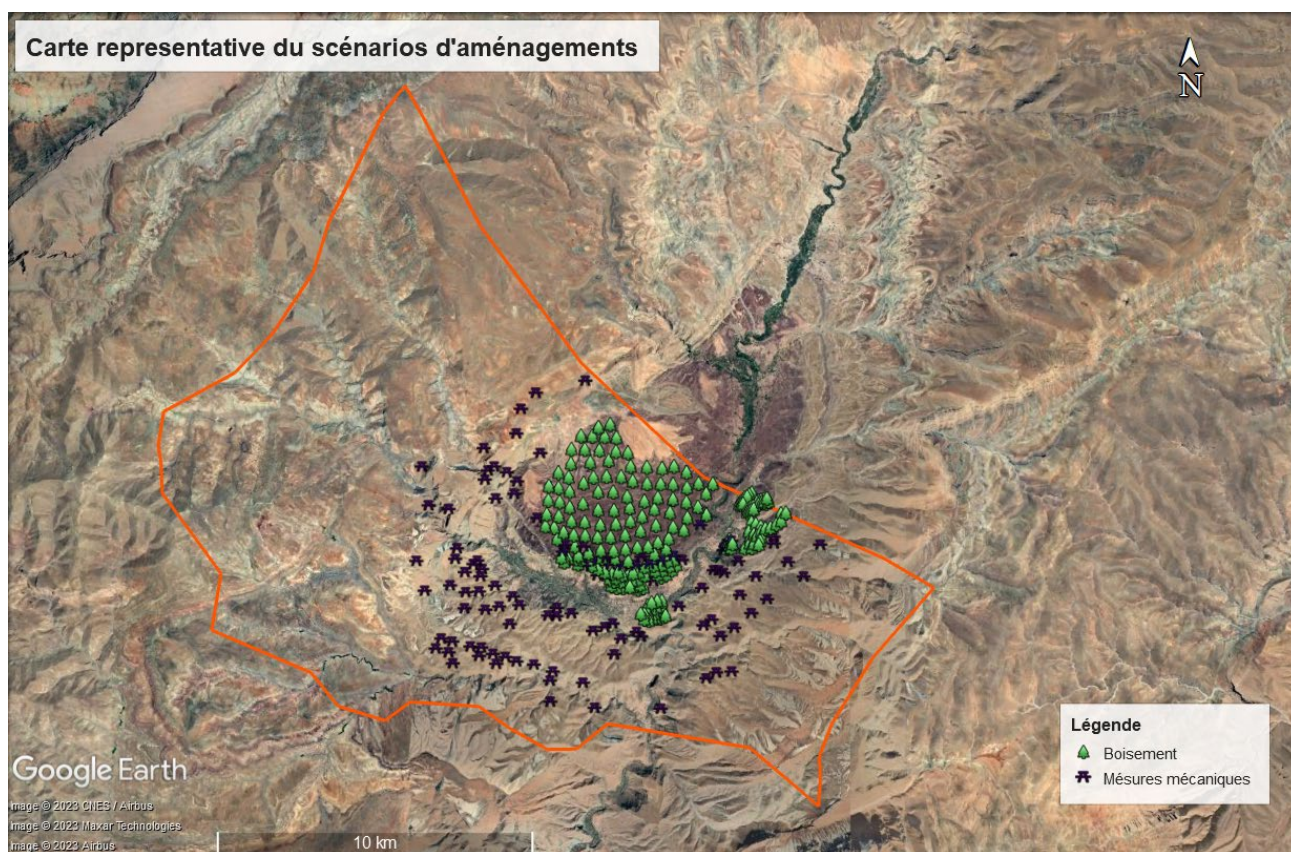
Une petite zone a été aménagée au niveau de M'Semrir avec le genévrier thurifère. Une espèce adaptée à des conditions climatiques difficiles et peut tolérer des températures froides ainsi que des sols pauvres. Il pousse principalement dans les régions montagneuses et peut résister à des hivers rigoureux. Quelques photos pour illustration sont présentées lors de la prospection terrain.



Photo 24 : Aménagements en genévrier dans la zone de M'Semrir

IV.2.2.3 L'efficacité des aménagements

Il est essentiel et efficace de lutter contre l'érosion en utilisant la technique de correction mécanique. Toutefois, l'efficacité des seuils est temporaire car ils se remplissent rapidement de sédiments charriés par les ravins, après quoi ils agissent simplement comme des plateformes de rupture de la pente du ravin. En outre, la durée de vie moyenne des seuils est d'environ une décennie, après quoi les sédiments peuvent être à nouveau déplacés en cas de rupture. Par conséquent, une fixation biologique rapide des atterrissements, des versants et de l'amont des ravins est nécessaire pour compléter la correction mécanique. En combinant ces techniques d'aménagement, il est possible de protéger efficacement les sols en réduisant leur érodibilité au minimum (LAKHDAR & SAMSON, 1989).



Carte 30 : Scénarios d'aménagements antiérosifs à M'Semrir

CONCLUSION

La commune de M'Semrir est fortement influencée par l'Oued Dadès, le cours d'eau principale, caractérisé par un contexte très vulnérable. Le climat de la zone est principalement aride et semi-aride, avec des précipitations plus fréquentes et intenses de Novembre à Avril, et des températures élevées de Mai à Septembre.

La dégradation de la végétation entraîne une augmentation du ruissellement, une diminution de l'infiltration et une aggravation des processus morphogéniques sur les versants. Les types de roches prédominants sont des marnes, des calcaires, des grès et des alluvions.

Le réseau hydrographique est très actif pendant les périodes de pluie. Les activités humaines telles que l'agriculture intensive et le surpâturage contribuent à la dégradation de l'environnement.

Ces conditions expliquent la vulnérabilité des terres à l'érosion, ce qui se traduit par une abondance de formes d'érosion hydrique sur les versants. La zone est marquée par des coulées des laves torrentielles très dangereuses pour les habitants.

La cartographie et l'évaluation qualitative de l'érosion hydrique au moyen de la méthode PAP/CAR modifiée, basés sur les facteurs naturels uniquement (pente, couvert végétal, précipitations et lithologie) dans la zone de M'Semrir ont permis d'analyser et de comprendre les risques érosifs dans cette zone. Ces outils ont été particulièrement utiles pour identifier les zones les plus vulnérables.

La carte d'érodibilité de la phase prédictive, montre que 59,13% de la zone présente un degré d'érodibilité forte à extrême en raison de pentes très abruptes, de l'intensité forte des précipitations (facteur $R= 276,48$ mm/an) et d'une lithologie de faible résistance. Les zones avec une érodibilité moyenne couvrent 17,15% de la superficie totale et sont caractérisées par des pentes abruptes, précipitations d'intensité moyenne et d'une lithologie résistante. Les érodibilités faibles et modérées occupent une part relativement faible (23,7%) et se trouvent dans des zones de faible intensité des précipitations (facteur $R= 150$ mm/an) avec des pentes douces et une lithologie plus résistante.

En ce qui concerne le couvert végétal, la carte de protection montre que 97,72% de la superficie totale de la zone d'étude est mal protégée en raison de la faible densité de la végétation (< 25%), qui est principalement composée de plantes épineuses, herbacées et de petite taille.

La carte des états érosifs, qui représente l'état actuel de la dégradation, indique que 60,67% de la surface totale de la zone de M'Semrir est caractérisée par un état érosif élevé à très élevé, principalement en raison de la dominance de fortes pentes (plus de 74% de la surface) et d'une forte intensité des précipitations. Les états érosifs moyens représentent 18,02% de la superficie et se situent

dans des zones avec des pentes modérées et une lithologie résistante. Les états d'érosion faibles et très faibles occupent seulement 19,1% de la zone d'étude, principalement dans des zones avec des pentes douces et de faibles précipitations.

L'approche descriptive montre plusieurs formes d'érosion hydrique dans la commune de M'Semrir, la plus dominante étant l'érosion concentrée, qui couvre 94,83% de la surface totale des formes érosives. Les zones instables sont représentées par différents types d'érosion, avec l'érosion en rigole occupant 75,65% de la surface menacée, suivie par l'érosion concentrée en ravinements (19,18%), l'érosion en nappe (5,16%).

La carte consolidée de l'érosion, qui intègre toutes les données prédictives et descriptives, met en évidence les zones à risque élevé à très élevé d'érosion, principalement là où l'érosion en rigole est prédominante. L'érosion en ravins est observée dans les zones avec un état érosif variant de moyen à très élevé. L'érosion en nappe se manifeste principalement dans les zones où la pente est nulle à faible. Cette carte consolidée constitue un outil précieux pour guider les décisions en matière d'aménagement du territoire afin de limiter les risques d'érosion hydrique dans la région de M'Semrir.

L'impact de l'érosion en aval est directement lié au manque des projets d'aménagements antiérosif en amont, dû également à la complexité du statut social du territoire subdivisé en des tribus différentes qui occupent chacune une partie du territoire géré par les associations des transhumants.

L'étude de la dynamique du risque d'érosion à M'Semrir, menée sur une période allant de 2000 à 2013 et 2022, a fourni des informations essentielles sur les variations spatio-temporelles de ce risque dans la zone. On observe une régression des états érosifs de très faibles à moyennes pour les années 2000, 2013 et 2022, ainsi qu'une augmentation des états érosifs élevés à très élevés. Cette variation de la superficie des zones est attribuable à la diminution du couvert végétal protecteur et à l'intensité accrue des précipitations, en particulier au nord de la zone. En 2000, les états érosifs élevés représentent 44,88 %, comparés à 57,47 % en 2013 et 57,93 % en 2022. Les résultats obtenus soulignent l'importance cruciale de la gestion et de la prévention de l'érosion dans cette zone spécifique. L'analyse des images satellitaires, combinée à l'évaluation du NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée) et de l'érodibilité avec l'intensité des précipitations pour les trois périodes de référence, a permis de comprendre les facteurs qui influencent le risque d'érosion à M'Semrir. Les variations du couvert végétal protecteur et l'intensité des précipitations ont été identifiés comme des éléments clés dans la dynamique du risque d'érosion.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelghani, G., & Mohamed, E.-M. (2016).** *CARTOGRAPHIE ET EVALUATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE AU BASSIN VERSANT DE L'OUED ISLANE (NORD-EST DE TAOUNATE, MAROC) PAR LA METHODE PAP/CAR ET DU SIG.* <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-durable/societe-durable/information-ecologique/systeme-d-information/systemes-d-information-geographiques-sig/cartographie-et-evaluation-de-l-erosion-hydrique-au-bassin-versant-de-l-oued-islane-nord-est-de-taounate-maroc-par-la-methode-pap-car-et-du-sig>
- Abdellatif, T. (2002).** *STRATEGIES ET TECHNIQUES DE LUTTE ANTIEROSIVE DANS LES MONTAGNES DU PRERIF ORIENTAL (MAROC).* 21, 45-55.
- Aït Hamza, M., El Faskaoui, B., & Fermin, A. (2010).** *Les oasis du Drâa au Maroc. Hommes & migrations.* Revue française de référence sur les dynamiques migratoires, 1284, Article 1284. <https://doi.org/10.4000/hommesmigrations.1241>
- Akkari, D. (2022).** *L'apport du système d'information géographique (SIG) dans la définition des zones de potentiel hydrique dans le bassin versant Abou Ali (Liban Nord).* Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine, 110-4, Article 110-4. <https://doi.org/10.4000/rga.10015>
- Albab, S., Ezaidi, A., Mohammed, B., & Kabbachi, B. (2013).** *Le patrimoine naturel—Géologique et oasien—Au service du développement géotouristique dans la province de Sidi Ifni et son arrière-pays oasien (Maroc).* Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, 14, 117-130. <https://doi.org/10.3406/edyte.2013.1229>
- Ali, F., & Abderahim, M. (2014).** *CARTOGRAPHIE DES ZONES VULNÉRABLES À L'ÉROSION HYDRIQUE À L'AIDE DE LA MÉTHODE PAP/CAR ET SIG EN AMONT DU BARRAGE ALLAL EL FASSI : MOYEN ATLAS (MAROC).* <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-durable/environnement/lithosphere/croute-terrestre/erosion/cartographie-des-zones-vulnerables-a-l-erosion-hydrique-a-l-aide-de-la-methode-pap-car-et-sig-en-amont-du-barrage-allal-el-fassi-moyen-atlas-maroc>
- AMARTINI, H. (2022).** *Evaluation de l'intégration des cultures et de l'élevage dans les oasis de montagne* [Mémoire de fin d'étude]. IAV HASSAN II de Rabat.
- Arabi, M. (2021).** *La lutte contre l'érosion en Algérie : De la défense et restauration des sols (DRS) à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES).* Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 9(4), 657-665.
- Arrebei, N., Sabir, M., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Raclot, D. (2019).** *Reconstitution des données historiques et diagnostic de l'état actuel des aménagements antiérosifs dans le bassin versant Nekor.* Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 7(2). https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/view/697
- Auclair, L., Baudot, P., Genin, D., Romagny, B., & Simenel, R. (2011).** *Patrimony for Resilience : Evidence from the Forest Agdal in the Moroccan High Atlas Mountains.* Ecology and Society, 16(4). <https://www.jstor.org/stable/26268972>
- Baumhardt, R. L., Stewart, B. A., & Sainju, U. M. (2015).** *North American Soil Degradation : Processes, Practices, and Mitigating Strategies.* Sustainability, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su7032936>
- Ben Slimane, A. (2013).** *Rôle de l'érosion ravinatoire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon—Sécheresse info.* Secheresse info. <http://www.secheresse.info/spip.php?article42842>
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2008).** *Navigating Social-Ecological Systems : Building Resilience for Complexity and Change.* Cambridge University Press.
- Boughalem, M., Mazour, M., & Zaagane, M. (2012).** *Utilisation des SIG pour l'aménagement du bassin-versant de l'ISSER (Algerie).* IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.13898>
- Boukhari, A. E., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Raclot, D. (2019).** *Caractérisation de la dégradation spécifique des sols pour la région septentrionale du Maroc.* Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 7(2). https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/view/693

- Boukrim, S., Lahrach, A., Midaoui, A., Benjelloun, F., Benabdelhadi, M., Lahrach, H., & Chaoui, A.-A. (2016). *Cartographie De L'érosion qualitative des sols du bassin versant De L'Aoudour (Rif-Maroc)*. European Scientific Journal, 12, 1857-7881. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n11p295>
- Buerkert, A., Nagieb, M., Siebert, S., Khan, I., & Al-Maskri, A. (2005). *Nutrient cycling and field-based partial nutrient balances in two mountain oases of Oman*. Field Crops Research, 94(2), 149-164. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.12.003>
- Caïdat M'Semrir. (2009). *Diagnostic Territorial Participatif de la commune rurale de M'SEMRIR*.
- Chaaouan, J., Faleh, A., Sadiki, A., & Mesrar, H. (2013). *Télédétection, SIG et modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amzaz, Rif Central*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 203, Article 203. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2013.26>
- CHAKROUN, R. (2022). *Conduite, performance et analyse de la place du pommier dans les zones montagneuses : Cas de la zone de M'semrir* [Mémoire de fin d'étude]. IAV HASSAN II de Rabat.
- Commune M'Semrir. (2022). *Monographie de la commune de M'Semrir* [Monographie].
- DAHMANI, A. M. (2012). *Contribution { l'étude de l'érosion et du ruissellement des sols rouges dans les monts de Tlemcen : Utilisation de simulation de pluies }*—PDF Free Download. <https://docplayer.fr/75230092-Theme-contribution-l-etude-de-l-erosion-et-du-ruissellement-des-sols-rouges-dans-les-monts-de-tlemcen-utilisation-de-simulation-de-pluies.html>
- Dallahi, Y., Aboudi, A. E., Sahel, Y., Aafi, A., Mderssa, M. E., & Malki, F. (2021). *Evaluation de l'impact de la dynamique du couvert végétal sur l'érosion hydrique à l'aide de la méthode PAP/CAR et la télédétection spatiale dans le bassin versant de Kharouba (Plateau Central, Maroc)*. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 9(4), 562-566.
- Damien, R. (2021). *Érosion hydrique des sols en Méditerranée*. <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-durable/environnement/lithosphere/croute-terrestre/erosion/erosion-hydrique-des-sols-en-mediterranee>
- Denis, A. (2012). *Initiation à ArcGIS - Travaux pratiques sur les Systèmes d'Information Géographique—SIG*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/135775>
- Dickhoefer, U., Buerkert, A., Brinkmann, K., & Schlecht, E. (2010). *The role of pasture management for sustainable livestock production in semi-arid subtropical mountain regions*. Journal of Arid Environments, 74(8), 962-972. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.12.006>
- Driss, E. H., & Brahim, A. (2018). *Quantification De L'érosion Hydrique En Utilisant Le Modèle Rusle Et Déposition Intégrée Dans Un Sig. Cas Du Bassin Versant De L'oued Isly (Maroc Oriental)*. European Scientific Journal, 14(5), 1857. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n5p373>
- Driss, S., Benzougagh, B., Afaf, A., Habiba, A., Ferdaouss, L., & Abdel-Ilah, M. (2023). *Mapping of Zones Vulnerable to Water Erosion Using PAP/CAR and GIS Method Upper the Ait Moulay Hmad Dam, Northeast of the Central Massif, Morocco*. The Iraqi Geological Journal, 181-197. <https://doi.org/10.46717/igj.56.1B.14ms-2023-2-22>
- Duchemin, M., Lachance, M., Morin, G., & Lagacé, R. (2001). *Approche géomatique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants*. Water Quality Research Journal, 36(3), 435-473. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2001.026>
- Dumas, P. (2010). *Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta—Bouloupari (Nouvelle-Calédonie)*. Les Cahiers d'Outre-Mer. Revue de géographie de Bordeaux, 63(252), Article 252. <https://doi.org/10.4000/com.6123>
- EL HAFID, B. (2022). *Résilience de la composante pastorale dans les systèmes d'élevage ovins dans la commune de M'semrir* [Mémoire de fin d'étude]. IAV HASSAN II de Rabat.
- Elaloui, A. (2017). *Évaluation de la vulnérabilité à l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de la Tessaoute amont (Haut Atlas marocain) : Application de la géomatique et des traceurs isotopiques*.
- Elaloui, A., Marrakchi, C., Fekri, A., Maimouni, S., & Aradi, M. (2015). *MISE EN PLACE D'UN MODÈLE QUALITATIF POUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA CHAÎNE ATLASIQUE : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA TESSAOUTE AMONT. (HAUT ATLAS CENTRAL, MAROC)*. European Scientific Journal, 11, 106-121.
- El-Bouhali, A., Amyay, M., & el Ouazani ech-chahdi, K. (2020). *L'application des modèles d'évaluation de l'érosion hydrique à l'aide des SIG et de la télédétection dans le bassin versant de l'oued Boumlal—Rif Central, Maroc*.
- el Hage Hassan, H., Charbel, L., & Touchart, L. (2018). *Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant du Mhaydssé. Békaa-Liban*. Vertigo : la revue électronique en sciences de

l'environnement, 18(1). <https://www.erudit.org/en/journals/vertigo/2018-v18-n1-vertigo04481/1058444ar/>

- Ennassiri, B. (2021).** *Modélisation du risque d'érosion des sols dans le bassin versant de N'Fis Utilisation de l'Equation Universelle Révisée des Pertes en Sols (RUSLE)*. Revue Marocaine de Géomorphologie, 5, Article 5. <https://revues.imist.ma/index.php/Remageom/article/view/25621>
- Fassi, D. (2017).** *Les oasis du Monde, carrefour des civilisations et modèle fondamental de durabilité*. Cahiers Agricultures, 26, 46001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017037>
- Gabriel, N., & Diabé, E. S. (2021).** *Évaluation de la susceptibilité des sols au ruisseau dans le bassin versant du Knam (Ouest Cameroun), en appliquant la méthode Services de Conservation des Sols Numéro de Courbe*. Revista de Geomorfologie, 23(1), Article 1. <https://doi.org/10.21094/rg.2021.136>
- Habiba, O., Abdellah, E. H., Ali, E., Hachem, B., & Abdelhadi, E. O. (2017).** *Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives PAP/CAR : Cas du bassin versant de l'Oued Zgane (Moyen Atlas tabulaire, Maroc)*. <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-durable/environnement/surveillance/techniques-de-surveillance/modelisation/modelisation-et-cartographie-du-risque-de-l-erosion-hydrique-par-l-application-des-sig-et-des-directives-pap-car-cas-du-bassin-versant-de-l-oued-zgane-moyen-atlas-tabulaire-maroc>
- Hajji, O., Sahar, A., Ikram, M., & Hermassi, T. (2019).** *Quantification de l'érosion hydrique en contexte semi-aride méditerranéen (cas du bassin versant d'El Gouazine—Tunisie)*.
- Hassan, H. E. H., Touchart, L., & Faour, G. (2013).** *La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban*. M@ppemonde, 109. <https://hal.science/hal-01962928>
- HCP. (2019, 2020).** *Monographies* | Site de la Direction régionale de Drâa-Tafilalet. https://www.hcp.ma/draa-tafilalet/Monographies_r16.html
- Hili, A., Gartet, J., & Khalki, Y. E. (2017).** *Estimation qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Amlil par la combinaison de l'outil SIG et de l'approche PAP/CAR*. Espace Géographique et Société Marocaine, 0(18), Article 18. <https://revues.imist.ma/index.php/EGSM/article/view/8437>
- Hili, A., YAHIA, E. K., & JAOUAD, G. (2016).** *APPLICATION DES DIRECTIVES PAP/CAR ET DU SIG POUR LA CARTOGRAPHIE DES FORMES D'ÉROSION ET DES MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED SAHB LAGHRİK (NORDOUEST DE TAZA, MAROC). APPROCHE CARTOGRAPHIQUE*. <http://geographiejn.blogspot.com/2017/01/article-application-des-directives.html>
- Hili, A., Yahia, E. K., Reddad, H., Jad, J., & Abahrour, M. (2020).** *COMPARAISON DES RESULTATS DE L'APPROCHE PAP/CAR ET LE MODELE USLE DANS LA CARTOGRAPHIE ET L'ESTIMATION QUALITATIVE DE L'EROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMLIL, (PRERIF -MAROC)*. Papeles de Geografía, 66, 138-150.
- Hong, Z., Jian-Wei, W., Qiu-Hong, Z., & Yun-Jiang, Y. (2003).** *A preliminary study of oasis evolution in the Tarim Basin, Xinjiang, China*. Journal of Arid Environments, 55(3), 545-553. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(02\)00283-5](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(02)00283-5)
- Jihad, M.-D. E. (2010).** *Les difficultés de gestion des ressources « naturelles » et de développement rural dans un milieu anthropisé : L'expérience du Projet Oued Srou (Maroc central)*. Norois. Environnement, aménagement, société, 216, Article 216. <https://doi.org/10.4000/norois.3320>
- Jouve, P. (2012).** *Les oasis du Maghreb, des agro-écosystèmes de plus en plus menacés. Comment renforcer leur durabilité ?* Le Courrier de l'environnement de l'INRA, 62(62), 113.
- Kadri, C. (2012).** *L'agriculture solidaire dans les éco-systèmes fragiles au Maroc*. <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-economique-et-social/developpement-economique/agriculture/politique-agricole/l-agriculture-solidaire-dans-les-eco-systemes-fragiles-au-maroc>
- Karidjo, B. Y., Wang, Z., Boubacar, Y., & Wei, C. (2018).** *Factors Influencing Farmers' Adoption of Soil and Water Control Technology (SWCT) in Keita Valley, a Semi-Arid Area of Niger*. Sustainability, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su10020288>
- Khebiza, M. (2010).** *Menaces climatiques sur les écosystèmes aquatiques souterrains de la Réserve de la biosphère des oasis du Sud marocain*. https://www.academia.edu/23057911/Menaces_climatiques_sur_les_%C3%A9cosyst%C3%A8mes_aquatiques_souterrains_de_la_R%C3%A9serve_de_la_biosph%C3%A8re_des_oasis_du_Sud_marocain

- Khemiri, K., & Jebari, S. (2021).** *Évaluation de l'érosion hydrique dans des bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un Système d'information géographique.* Cahiers Agricultures, 30, 7. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020048>
- LAKHDAR, B., & SAMSON, M. (1989).** *Fixation mécanique et biologique des ravines : Expérimentation dans la région semi-aride de Béni-Slimane Algérie.* 9, 19-29.
- Lazarev, G. (2005).** *La gestion participative des terroirs de montagne au Maroc, condition d'une maîtrise de la "production d'eau".* Critique économique, 15, Article 15. <https://doi.org/10.48409/IMIST.PRSM/ce-n15.2739>
- Leguédois, S. (2003).** *Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés* [Phdthesis, Université d'Orléans]. <https://theses.hal.science/tel-00516390>
- Mamun, A. A., Islam, A. R. M. T., Alam, E., Chandra Pal, S., & Alam, G. M. M. (2022).** *Assessing Riverbank Erosion and Livelihood Resilience Using Traditional Approaches in Northern Bangladesh.* Sustainability, 14(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su14042348>
- MARTIN, S. (2014).** *Dynamique des systemes oasisien dans l'Atlas marocain.* [Mémoire de fin d'étude, Ecole Supérieure d'Agro-Développement International, France]. <https://fr.scribd.com/document/352667643/Me-moire-MARTIN-Sofyan>
- Mehdaoui, R., Mili, E.-M., Ousmana, H., Said, B. A., Khamal, Y. E., Aziz, H., & Fakir, R. E. (2023).** *Contribution of Geomatics, Priority Activity Program Guidelines, and Remote Sensing to Environmental Study in the Cretaceous Basin of Errachidia-Boudenib, Morocco.* Ecological Engineering & Environmental Technology, 24(1), 196-206. <https://doi.org/10.12912/27197050/154994>
- Mesrar, H., Sadiki, A., Navas, A., Faleh, A., Quijano, L., & Chaaouan, J. (2015).** *Modélisation de l'érosion hydrique et des facteurs causaux, Cas de l'oued Sahla, Rif Central, Maroc.* Zeitschrift Für Geomorphologie, 59(4), 495.
- Mokhtari, E. H. (2017).** *Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement du barrage Ghrib* [Thesis, Remini Boualem ; Hamoudi Saeed Abdelaamir]. <http://193.194.82.222:80/handle/123456789/1245>
- Mondal, A., Khare, D., & Kundu, S. (2017).** *Uncertainty analysis of soil erosion modelling using different resolution of open-source DEMs.* Geocarto International, 32(3), 334-349. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1140822>
- Montanari, B. (2013).** *The Future of Agriculture in the High Atlas Mountains of Morocco : The Need to Integrate Traditional Ecological Knowledge.*
- Moussadek, R., Mrabet, R., Zante, P., Marie Lamachère, J., Pépin, Y., Le Bissonnais, Y., Ye, L., Verdoodt, A., & Van Ranst, E. (2011).** *Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen.* Canadian Journal of Soil Science, 91(4), 627-635. <https://doi.org/10.4141/cjss10096>
- Naimi, M., Tayaa, M., & Ouzizi, S. (2005).** *Cartographie des formes d'érosion dans le bassin-versant de Nakhla (Rif occidentale, Maroc).* Science et Changements Planétaires - Secheresse, 16.
- Najoua, J., & Sara, C. (2018).** *Spatialisation de l'érosion hydrique dans le sous bassin versant M'dez (Partie Sud—Guigou et Maasser) Par application du modèle PAP/CAR - Sécheresse info.* <http://www.secheresse.info/spip.php?article84602>
- Nord, G. (2006).** *Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle* [Phdthesis, Université Joseph-Fourier - Grenoble I]. <https://theses.hal.science/tel-00111955>
- Ouallali, A., Moukhchane, M., Aassoumi, H., Berrad, F., & Dakir, I. (2016).** *The Mapping of the Soils' Degradation State by Adaptation the PAP/RAC Guidelines in the Watershed of Wadi Arbaa Ayacha, Western Rif, Morocco.* Journal of Geoscience and Environment Protection, 4(7), Article 7. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.47009>
- Ouedraogo, B., Kabore, O., & Kabore, M. (2019).** *Cartographie quantitative de l'érosion des sols par approche SIG/RUSLE dans la Commune de Karangasso vigué (Burkina Faso).* International Journal of Biological and Chemical Sciences, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i3>
- PAP/CAR, FAO. (1998).** *Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes.* ABHAT. <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-economique-et-social/developpement-economique/environnement/environnement-generalites/directives-pour-la-cartographie-et-la-mesure-des-processus-d-erosion-hydrique-dans-les-zones-cotieres-mediterranneennes>

- Payet, E., Dumas, P., & Pennober, G. (2012). *Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana*. Vertigo : la revue électronique en sciences de l'environnement, 11(3). <https://www.erudit.org/en/journals/vertigo/2016-v16-n1-vertigo0523/1015047ar/>
- Radjah, S. (2017). *Modélisation du transport solide par le modèle S.W.A.T* [Thesis, École Nationale Polytechnique]. <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/8737>
- Rignall, K. (2015). *The labor of agrodiversity in a Moroccan oasis*. The Journal of Peasant Studies, 43, 1-20. <https://doi.org/10.1080/03066150.2015.1034112>
- Sabiri, A. (2018). *Le Haut Dadès : Un Site Montagnard De Grande Valeur Touristique*. European Scientific Journal, 14. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n17p88>
- Sadiki, A., Mesrar, H., Ali, F., & Chaaouan, J. (2012). *Modélisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique : Cas du bassin versant de l'oued Larbaa, Maroc*. Papeles de Geografía, ISSN: 0213-1781, 55-56, 179-188.
- Salles, C., & Poesen, J. (2000). *Rain properties controlling soil splash detachment*. Hydrological Processes, 14(2), 271-282. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000215\)14:2<271::AID-HYP925>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000215)14:2<271::AID-HYP925>3.0.CO;2-J)
- Santoro, A., Venturi, M., Ben Maachia, S., Benyahia, F., Corrieri, F., Piras, F., & Agnoletti, M. (2020). *Agroforestry Heritage Systems as Agrobiodiversity Hotspots. The Case of the Mountain Oases of Tunisia*. Sustainability, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su12104054>
- Sbai, A., & Mouadili, O. (2021). *Risque d'érosion hydrique entre fragilité des équilibres environnementaux et perspectives de durabilité : Cas du bassin d'Oued El Abed (Maroc nord-est)*. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 9(4), 666-674.
- Semghoune, S., & Fendil, N. (2022). *Apport de SIG pour la cartographie du risque de dégradation des sols Cas du canton Guerouaou Parc National de Theniet El Had Wilaya de Tissemsilt*. <http://localhost:8080/dspace.univ-tissemsilt.dz/handle/123456789/2449>
- SlidePlayer. (2011). *Rôle des ravines dans les flux de sédiments*—Ppt video online télécharger. <https://slideplayer.fr/slide/1662029/>
- SOUILAH, K. (2016). *Utilisation du SIG pour l'évaluation qualitative de l'érosion hydrique du bassin versant en amont du barrage Allal El Fassi*. <https://memoirepfe.fst-usmba.ac.ma/book/3251>
- Tadrist, N., Debauche, O., Remini, B., & Degre, A. (2016). *Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne : Cas du barrage de Boukourdane (Algérie)*. Biotechnology, Agronomy, Society and Environment, 20, 453-467. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.13281>
- Tahouri, J., Sadiki, A., Karrat, L., Johnson, V. C., Chan, N. weng, Fei, Z., & Kung, H. T. (2022). *Using a modified PAP/RAC model and GIS-for mapping water erosion and causal risk factors : Case study of the Asfalou watershed, Morocco*. International Soil and Water Conservation Research, 10(2), 254-272. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.07.003>
- Touahir, S., Asri, A., Remini, B., & Saad, H. (2018). *Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Zeddine et de l'envasement du barrage Ouled Mellouk (Nord-Ouest algérien)*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 24(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.12083>
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., & Brou, Y. T. (2013). *Remote sensing and GIS applied to the mapping of soil loss by erosion in the Wadi Mina catchment*. Hydrological Sciences Journal, 58(7), 1542-1558. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>
- Toutain, G., Dollé, V., & Ferry, M. (1989). *Situation des Systèmes oasiens en régions chaudes*. Cahiers de la Recherche-Développement. <https://agritrop.cirad.fr/428016/>
- Yadari, H. E., Chikhaoui, M., Naimi, M., Sabir, M., & Raclot, D. (2019). *Techniques de conservation des eaux et des sols au Maroc : Aperçu et perspectives*. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 7(2). https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/view/700
- Youssef, Yacine, E.-A. A., Benzougagh, B., Nassiri, L., & Ibijbijen, J. (2021). *Evaluation Des Risques D'érosion Hydrique Et Cartographie Des Zones Vulnérables Par La Méthode RUSLE Couplée Aux SIG Et À La Télédétection Dans Le Bassin Versant d'Agoudal En Amont De La Vallée d'Imilchil (Haut Atlas Central, Maroc)*. European Scientific Journal, ESJ, 17(21), 66.
- Zouagui, A., Sabir, M., Naimi, M., CHIKHAOUI, M., & Benmansour, M. (2018). *Modelisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental : Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc)*. European Scientific Journal, 14.

ANNEXES

Annexes 1

Matrice de confusion 2022

La matrice de confusion résultante permet d'évaluer les performances de l'algorithme de maximum de vraisemblance utilisé pour la classification des images Sentinel-2 (Août 2022). Après avoir appliqué cet algorithme à un ensemble de données, il a produit une classification globalement précise, avec une précision de **91,99%**, et un accord solide entre les prédictions et les vraies étiquettes, avec un coefficient kappa de **87,99%**.

Confusion Matrix: C:\Users\Lenovo\Desktop\rrr\Résultat classific_ENVI.dat					
Overall Accuracy = (132674/144211) 91.9999%					
Kappa Coefficient = 0.8799					
Ground Truth (Pixels)					
Class	Batis (Train)	Végétation fa	Polycultures	Grès argileux	Massif calcai
Unclassified	0	0	0	0	0
Batis	1437	2	0	3	331
Végétation fa	25	4374	694	42	0
Polycultures	0	346	5323	0	0
Grès argileux	0	0	0	14798	0
Massif calcai	25	0	0	0	49781
Calcaire bril	279	1	0	125	1082
Total	1766	4723	6017	14968	51194
Ground Truth (Pixels)					
Class	Calcaire bril	Total			
Unclassified	0	0			
Batis	3233	5006			
Végétation fa	23	5158			
Polycultures	0	5669			
Grès argileux	0	14798			
Massif calcai	5326	55132			
Calcaire bril	56961	58448			
Total	65543	144211			
Ground Truth (Percent)					
Class	Batis (Train)	Végétation fa	Polycultures	Grès argileux	Massif calcai
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Batis	81.37	0.04	0.00	0.02	0.65
Végétation fa	1.42	92.61	11.53	0.28	0.00
Polycultures	0.00	7.33	88.47	0.00	0.00
Grès argileux	0.00	0.00	0.00	98.86	0.00
Massif calcai	1.42	0.00	0.00	0.00	97.24
Calcaire bril	15.80	0.02	0.00	0.84	2.11
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ground Truth (Percent)					
Class	Calcaire bril	Total			
Unclassified	0.00	0.00			
Batis	4.93	3.47			
Végétation fa	0.04	3.58			
Polycultures	0.00	3.93			
Grès argileux	0.00	10.26			
Massif calcai	8.13	38.23			
Calcaire bril	86.91	40.53			
Total	100.00	100.00			
Commission / Omission					
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)	
Batis	71.29	18.63	3569/5006	329/1766	
Végétation fa	15.20	7.39	784/5158	349/4723	
Polycultures	6.10	11.53	346/5669	694/6017	
Grès argileux	0.00	1.14	0/14798	170/14968	
Massif calcai	9.71	2.76	5351/55132	1413/51194	
Calcaire bril	2.54	13.09	1487/58448	8582/65543	
Prod. Acc. / User Acc.					
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)	
Batis	81.37	28.71	1437/1766	1437/5006	
Végétation fa	92.61	84.80	4374/4723	4374/5158	
Polycultures	88.47	93.90	5323/6017	5323/5669	
Grès argileux	98.86	100.00	14798/14968	14798/14798	
Massif calcai	97.24	90.29	49781/51194	49781/55132	
Calcaire bril	86.91	97.46	56961/58448	56961/58448	

Matrice de confusion 2013

Précision : 67,689%

Coefficient Kappa : 58,49%

Class Confusion Matrix						
File						
Confusion Matrix: C:\Users\Lenovo\Documents\SOL\Massire Projet\M'Searir data\Dynamique\Classi\cccc2.dat						
Overall Accuracy = (6685/9876) 67.6893%						
Kappa Coefficient = 0.5849						
Ground Truth (Pixels)						
Class	Massif calcai	Gréseux_ROI	Clair semé_RO	Dense_ROI	Calcaire bri	
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Massif calcai	3094	0	0	0	0	0
Gréseux	0	2604	0	0	0	0
clair semé	0	0	379	0	0	0
dense	0	0	0	608	0	0
habitation	0	0	0	0	0	0
calcaire bril	0	0	0	0	0	2014
Total	3094	2604	379	608	0	2014
Ground Truth (Pixels)						
Class	Habitation_RO	Total				
Unclassified	0	0				
Massif calcai	0	3094				
Gréseux	0	2604				
clair semé	0	379				
dense	0	608				
habitation	1177	1177				
calcaire bril	0	2014				
Total	1177	9876				
Ground Truth (Percent)						
Class	Massif calcai	Gréseux_ROI	Clair semé_RO	Dense_ROI	Calcaire bri	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Massif calcai	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gréseux	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
clair semé	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
dense	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
habitation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
calcaire bril	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ground Truth (Percent)						
Class	Habitation_RO	Total				
Unclassified	0.00	0.00				
Massif calcai	0.00	31.33				
Gréseux	0.00	26.37				
clair semé	0.00	3.84				
dense	0.00	6.16				
habitation	100.00	11.92				
calcaire bril	0.00	20.39				
Total	100.00	100.00				
Commission and Omission						
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)		
Massif calcai	0.00	0.00	0/3094	0/3094		
Gréseux	0.00	0.00	0/2604	0/2604		
clair semé	0.00	0.00	0/379	0/379		
dense	0.00	0.00	0/608	0/608		
habitation	100.00	100.00	1177/1177	2014/2014		
calcaire bril	100.00	100.00	2014/2014	1177/1177		
Production and User Accuracy						
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)		
Massif calcai	100.00	100.00	3094/3094	3094/3094		
Gréseux	100.00	100.00	2604/2604	2604/2604		
clair semé	100.00	100.00	379/379	379/379		
dense	100.00	100.00	608/608	608/608		
habitation	0.00	0.00	0/2014	0/1177		
calcaire bril	0.00	0.00	0/1177	0/2014		

Matrice de confusion 2000

Précision : 90,63%

Coefficient Kappa : 80,48%

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\Users\Lenovo\Documents\SOL\Massire Projet\M'Semrir data\Dynamique\Classi

Overall Accuracy = (92411/101961) 90.6337%

Kappa Coefficient = 0.8048

Class	Ground Truth (Pixels)		Dense_ROI	Grés_ROI	Calcaire bri
	Habitation_ROI	clair semé_ROI			
Unclassified	0	0	0	0	0
habitation	2274	0	0	0	110
clair semé	0	896	0	0	0
dense	0	18	958	25	0
Gréseux	1	0	0	7284	0
calcaire bril	10	0	0	0	14931
Massif calcai	0	0	0	0	702
Total	2285	914	958	7309	15743

Class	Ground Truth (Pixels)	
	Massif calcai	Total
Unclassified	0	0
habitation	1120	3504
clair semé	10	906
dense	0	1001
Gréseux	0	7285
calcaire bril	7554	22495
Massif calcai	66068	66770
Total	74752	101961

Class	Ground Truth (Percent)		Dense_ROI	Grés_ROI	Calcaire bri
	Habitation_ROI	clair semé_ROI			
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
habitation	99.52	0.00	0.00	0.00	0.70
clair semé	0.00	98.03	0.00	0.00	0.00
dense	0.00	1.97	100.00	0.34	0.00
Gréseux	0.04	0.00	0.00	99.66	0.00
calcaire bril	0.44	0.00	0.00	0.00	94.84
Massif calcai	0.00	0.00	0.00	0.00	4.46
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)	
	Massif calcai	Total
Unclassified	0.00	0.00
habitation	1.50	3.44
clair semé	0.01	0.99
dense	0.00	0.98
Gréseux	0.00	7.14
calcaire bril	10.11	22.06
Massif calcai	88.38	65.49
Total	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)		Omission (Percent)	
	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
habitation	35.10	0.48	1230/3504	11/2285
clair semé	1.10	1.97	10/906	18/914
dense	4.30	0.00	43/1001	0/958
Gréseux	0.01	0.34	1/7285	25/7309
calcaire bril	33.63	5.16	7564/22495	812/15743
Massif calcai	1.05	11.62	702/66770	8684/74752

Class	Prod. Acc. (Percent)		User Acc. (Percent)	
	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
habitation	99.52	64.90	2274/2285	2274/3504
clair semé	98.03	98.90	896/914	896/906
dense	100.00	95.70	958/958	958/1001
Gréseux	99.66	99.99	7284/7309	7284/7285
calcaire bril	94.84	66.37	14931/15743	14931/22495
Massif calcai	88.38	98.95	66068/74752	66068/66770

Annexes 2 :

Liste des coordonnées de l'ensemble des formes d'érosion de la zone de M'Semrir.

NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG
Ravins moyens	31.662237	-5.827636	Nappe	31.685271	-5.789517	Nappe	31.644866	-5.845838	Nappe	31.667744	-5.840801	Ravins moyens	31.685985	-5.844902
Ravins moyens	31.677016	-5.862095	Nappe	31.682657	-5.812379	Nappe	31.647732	-5.853729	Nappe	31.678909	-5.831281	Ravins moyens	31.686443	-5.849656
Ravins moyens	31.678825	-5.865290	Nappe	31.685525	-5.794268	Nappe	31.651192	-5.865087	Nappe	31.680729	-5.829314	Ravins moyens	31.693555	-5.860663
Ravins moyens	31.725642	-5.903751	Nappe	31.672542	-5.864494	Nappe	31.656009	-5.876342	Nappe	31.686606	-5.825351	Ravins moyens	31.717312	-5.835776
Ravins moyens	31.735975	-5.907638	Nappe	31.705599	-5.819548	Nappe	31.652535	-5.868733	Nappe	31.687309	-5.882193	Ravins moyens	31.697622	-5.842238
Ravins moyens	31.739702	-5.909634	Nappe	31.712007	-5.891269	Nappe	31.658488	-5.878232	Ravins moyens	31.641991	-5.836645	Ravins moyens	31.721479	-5.838638
Ravins moyens	31.686098	-5.847848	Nappe	31.697604	-5.878836	Nappe	31.655391	-5.881757	Ravins moyens	31.644168	-5.831739	Ravins moyens	31.697048	-5.896630
Ravins moyens	31.669231	-5.850751	Nappe	31.697315	-5.908562	Nappe	31.655645	-5.884710	Ravins moyens	31.644985	-5.834979	Ravins moyens	31.695755	-5.884163
Ravins moyens	31.666006	-5.837664	Nappe	31.696516	-5.902195	Nappe	31.656176	-5.888507	Ravins moyens	31.646323	-5.835847	Ravins moyens	31.695311	-5.888697
Ravins moyens	31.666204	-5.834622	Nappe	31.698093	-5.891259	Nappe	31.656842	-5.897280	Ravins moyens	31.650401	-5.838272	Ravins moyens	31.697018	-5.889148
Nappe	31.657375	-5.831244	Nappe	31.686539	-5.880483	Nappe	31.656395	-5.916267	Ravins moyens	31.643402	-5.838022	Ravins moyens	31.699532	-5.895064
Nappe	31.657628	-5.832374	Nappe	31.683159	-5.874358	Nappe	31.657950	-5.919337	Ravins moyens	31.646162	-5.827202	Ravins moyens	31.712797	-5.884280
Nappe	31.658087	-5.829730	Nappe	31.681770	-5.869080	Nappe	31.657061	-5.921377	Ravins moyens	31.658100	-5.837841	Ravins moyens	31.705857	-5.882623
Nappe	31.658859	-5.826806	Nappe	31.666759	-5.842591	Nappe	31.675294	-5.843858	Ravins moyens	31.653061	-5.831036	Ravins moyens	31.704637	-5.880702
Nappe	31.662395	-5.827624	Nappe	31.680895	-5.886290	Nappe	31.713158	-5.870038	Ravins moyens	31.643421	-5.810864	Ravins moyens	31.704987	-5.875708
Nappe	31.646107	-5.847567	Nappe	31.679836	-5.916400	Nappe	31.694531	-5.893806	Ravins moyens	31.667941	-5.817647	Ravins moyens	31.708659	-5.878896
Nappe	31.645952	-5.845822	Nappe	31.701153	-5.891433	Nappe	31.692508	-5.888221	Ravins moyens	31.665071	-5.821291	Ravins moyens	31.710191	-5.881372
Nappe	31.649825	-5.852252	Nappe	31.702096	-5.892510	Nappe	31.695248	-5.876701	Ravins moyens	31.664259	-5.819721	Ravins moyens	31.711191	-5.877551
Nappe	31.645719	-5.856674	Nappe	31.701144	-5.910029	Nappe	31.692843	-5.822749	Ravins moyens	31.662017	-5.827191	Ravins moyens	31.693642	-5.873275
Nappe	31.645720	-5.856911	Nappe	31.654314	-5.833991	Nappe	31.698521	-5.881158	Ravins moyens	31.661657	-5.826272	Ravins moyens	31.713094	-5.872506
Nappe	31.646160	-5.858403	Nappe	31.653917	-5.835532	Nappe	31.697652	-5.879126	Ravins moyens	31.651616	-5.854263	Ravins moyens	31.694543	-5.824357
Nappe	31.647611	-5.858626	Nappe	31.653766	-5.833048	Nappe	31.692977	-5.874719	Ravins moyens	31.652186	-5.851047	Ravins moyens	31.701567	-5.800011
Nappe	31.651002	-5.862459	Nappe	31.657952	-5.831977	Nappe	31.690614	-5.874454	Ravins moyens	31.643369	-5.857807	Ravins moyens	31.680753	-5.820305
Nappe	31.651881	-5.862809	Nappe	31.648165	-5.848892	Nappe	31.686428	-5.871374	Ravins moyens	31.642587	-5.861780	Ravins moyens	31.679736	-5.819979
Nappe	31.652521	-5.863279	Nappe	31.646311	-5.856486	Nappe	31.641433	-5.842965	Ravins moyens	31.646603	-5.860340	Ravins moyens	31.683930	-5.766881
Nappe	31.651077	-5.865196	Nappe	31.650034	-5.860997	Nappe	31.640488	-5.840953	Ravins moyens	31.654846	-5.862187	Ravins moyens	31.683816	-5.764794
Nappe	31.650935	-5.866719	Nappe	31.652445	-5.863195	Nappe	31.693026	-5.890666	Ravins moyens	31.654470	-5.860429	Ravins moyens	31.680022	-5.766533
Nappe	31.650836	-5.866934	Nappe	31.656113	-5.903842	Nappe	31.692047	-5.886573	Ravins moyens	31.647747	-5.867392	Ravins moyens	31.678280	-5.759501
Nappe	31.655400	-5.875296	Nappe	31.694707	-5.898591	Nappe	31.684597	-5.876814	Ravins moyens	31.657385	-5.872204	Ravins moyens	31.684351	-5.787953
Nappe	31.656040	-5.879786	Nappe	31.694518	-5.895465	Nappe	31.675495	-5.851431	Ravins moyens	31.656994	-5.871382	Ravins moyens	31.693541	-5.797604
Nappe	31.655925	-5.883736	Nappe	31.665540	-5.798888	Nappe	31.680390	-5.885124	Ravins moyens	31.644384	-5.880760	Ravins moyens	31.697489	-5.794563
Nappe	31.656277	-5.885644	Nappe	31.670548	-5.790803	Nappe	31.681379	-5.897078	Ravins moyens	31.660673	-5.875840	Ravins moyens	31.696374	-5.796447
Nappe	31.657273	-5.897496	Nappe	31.651828	-5.841385	Nappe	31.709546	-5.891172	Ravins moyens	31.661823	-5.882606	Ravins moyens	31.668832	-5.869452
Nappe	31.656130	-5.900031	Nappe	31.656370	-5.837855	Nappe	31.706661	-5.887981	Ravins moyens	31.660385	-5.886371	Ravins moyens	31.673147	-5.879681
Nappe	31.656774	-5.905655	Nappe	31.653917	-5.832310	Nappe	31.704391	-5.885350	Ravins moyens	31.660474	-5.889834	Ravins moyens	31.676565	-5.877067
Nappe	31.657098	-5.907251	Nappe	31.653659	-5.825811	Nappe	31.703938	-5.886201	Ravins moyens	31.665544	-5.905701	Ravins moyens	31.676481	-5.879540
Nappe	31.657152	-5.918090	Nappe	31.645571	-5.840753	Nappe	31.701766	-5.882985	Ravins moyens	31.668241	-5.917192	Ravins moyens	31.680249	-5.847282
Nappe	31.682128	-5.855386	Nappe	31.662220	-5.834768	Nappe	31.698706	-5.879978	Ravins moyens	31.661206	-5.908025	Ravins moyens	31.692454	-5.814438
Nappe	31.704172	-5.883874	Nappe	31.661089	-5.823292	Nappe	31.696729	-5.877719	Ravins moyens	31.659818	-5.893368	Ravins moyens	31.685118	-5.814538
Nappe	31.702388	-5.875957	Nappe	31.667425	-5.805324	Nappe	31.707807	-5.888781	Ravins moyens	31.679125	-5.849598	Ravins moyens	31.695528	-5.831456
Nappe	31.696852	-5.878386	Nappe	31.662676	-5.828543	Nappe	31.708153	-5.888315	Ravins moyens	31.678691	-5.851129	Ravins moyens	31.694408	-5.829937
Nappe	31.687437	-5.827646	Nappe	31.666238	-5.829910	Nappe	31.675033	-5.858106	Ravins moyens	31.679032	-5.851356	Ravins moyens	31.693043	-5.828658
Nappe	31.685873	-5.822475	Nappe	31.667826	-5.834779	Nappe	31.686108	-5.879860	Ravins moyens	31.685450	-5.853406	Ravins moyens	31.715956	-5.828536
Nappe	31.678661	-5.823436	Nappe	31.668756	-5.846690	Nappe	31.686420	-5.880493	Ravins moyens	31.686833	-5.855224	Ravins moyens	31.716229	-5.882886

NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG
Ravins moyens	31.668183	-5.761884	Ravins moyens	31.708671	-5.893203	Ravins moyens	31.735043	-5.986975	Ravins profonds	31.714825	-5.887044	Rigole	31.665036	-5.816277
Ravins moyens	31.670374	-5.766661	Ravins moyens	31.711315	-5.895501	Ravins moyens	31.723404	-5.982844	Ravins profonds	31.712445	-5.889217	Rigole	31.669233	-5.823594
Ravins moyens	31.673278	-5.831043	Ravins moyens	31.703658	-5.893634	Ravins moyens	31.724185	-5.981533	Ravins profonds	31.712049	-5.890691	Rigole	31.662285	-5.826811
Ravins moyens	31.673750	-5.841084	Ravins moyens	31.703364	-5.891933	Ravins moyens	31.714694	-5.986775	Ravins profonds	31.713084	-5.888104	Rigole	31.664791	-5.832716
Ravins moyens	31.709031	-5.877368	Ravins moyens	31.702321	-5.896373	Ravins moyens	31.714864	-5.984162	Ravins profonds	31.715678	-5.885444	Rigole	31.666389	-5.839100
Ravins moyens	31.687688	-5.791353	Ravins moyens	31.707388	-5.892055	Ravins moyens	31.712300	-5.983451	Ravins profonds	31.720085	-5.881429	Rigole	31.667457	-5.850081
Ravins moyens	31.685071	-5.870793	Ravins moyens	31.707089	-5.890637	Ravins moyens	31.708207	-5.985724	Ravins profonds	31.736668	-5.981328	Rigole	31.647403	-5.846608
Ravins moyens	31.651661	-5.881682	Ravins moyens	31.713412	-5.885423	Ravins moyens	31.708936	-5.985338	Ravins profonds	31.737119	-5.981281	Rigole	31.645380	-5.847112
Ravins moyens	31.652374	-5.875258	Ravins moyens	31.711700	-5.887573	Ravins moyens	31.711239	-5.984769	Ravins profonds	31.737403	-5.981425	Rigole	31.647266	-5.845720
Ravins moyens	31.643766	-5.889332	Ravins moyens	31.709828	-5.888018	Ravins moyens	31.708309	-5.986081	Ravins profonds	31.736355	-5.981686	Rigole	31.648248	-5.851219
Ravins moyens	31.665375	-5.843222	Ravins moyens	31.716269	-5.878540	Ravins moyens	31.708309	-5.986081	Ravins profonds	31.735359	-5.980878	Rigole	31.652398	-5.850335
Ravins moyens	31.663909	-5.906605	Ravins moyens	31.716507	-5.877512	Ravins moyens	31.742728	-5.964015	Ravins profonds	31.734784	-5.980494	Rigole	31.649860	-5.845244
Ravins moyens	31.668477	-5.874427	Ravins moyens	31.716673	-5.877072	Ravins moyens	31.733675	-5.956055	Ravins profonds	31.733925	-5.980005	Rigole	31.645664	-5.856774
Ravins moyens	31.671290	-5.883051	Ravins moyens	31.716810	-5.876777	Ravins moyens	31.695704	-5.909569	Ravins profonds	31.733407	-5.979757	Rigole	31.642413	-5.858448
Ravins moyens	31.671919	-5.889932	Ravins moyens	31.716753	-5.875500	Ravins moyens	31.695338	-5.915964	Ravins profonds	31.712468	-5.910084	Rigole	31.639081	-5.864267
Ravins moyens	31.674294	-5.896002	Ravins moyens	31.716506	-5.874630	Ravins moyens	31.696144	-5.908324	Ravins profonds	31.714907	-5.903818	Rigole	31.645729	-5.865830
Ravins moyens	31.671035	-5.906605	Ravins moyens	31.716620	-5.877989	Ravins moyens	31.731015	-5.935924	Ravins profonds	31.736353	-5.936589	Rigole	31.652911	-5.885858
Ravins moyens	31.682708	-5.893851	Ravins moyens	31.716584	-5.878385	Ravins moyens	31.754062	-5.941426	Ravins profonds	31.748824	-5.940297	Rigole	31.651299	-5.862819
Ravins moyens	31.683114	-5.904878	Ravins moyens	31.715818	-5.876623	Ravins moyens	31.758922	-5.950109	Ravins profonds	31.748255	-5.944926	Rigole	31.656329	-5.864742
Ravins moyens	31.683811	-5.902735	Ravins moyens	31.715803	-5.876089	Ravins profonds	31.657959	-5.850415	Ravins profonds	31.749187	-5.953721	Rigole	31.648627	-5.866498
Ravins moyens	31.675634	-5.916264	Ravins moyens	31.715828	-5.874468	Ravins profonds	31.667106	-5.869474	Ravins profonds	31.715515	-5.837701	Rigole	31.656710	-5.866700
Ravins moyens	31.683486	-5.913288	Ravins moyens	31.715725	-5.875674	Ravins profonds	31.696937	-5.852481	Ravins profonds	31.718230	-5.862456	Rigole	31.655855	-5.871306
Ravins moyens	31.684602	-5.920658	Ravins moyens	31.715582	-5.877383	Ravins profonds	31.663239	-5.866817	Ravins profonds	31.703398	-5.829697	Rigole	31.654681	-5.876184
Ravins moyens	31.688167	-5.915373	Ravins moyens	31.715375	-5.874856	Ravins profonds								

NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG	NOM	LAT	LONG
Rigole	31,722397	-5,848211	Rigole	31,652271	-5,868896	Rigole	31,702662	-5,899701	Rigole	31,725018	-5,981736
Rigole	31,719051	-5,844585	Rigole	31,647274	-5,886337	Rigole	31,706170	-5,897418	Rigole	31,723041	-5,978333
Rigole	31,696913	-5,884051	Rigole	31,667694	-5,870969	Rigole	31,705383	-5,898246	Rigole	31,722184	-5,981422
Rigole	31,697853	-5,889542	Rigole	31,665371	-5,858063	Rigole	31,705122	-5,897500	Rigole	31,717298	-5,983710
Rigole	31,713921	-5,882769	Rigole	31,666738	-5,871907	Rigole	31,707008	-5,894257	Rigole	31,713167	-5,985164
Rigole	31,706164	-5,882284	Rigole	31,676466	-5,883279	Rigole	31,707026	-5,894267	Rigole	31,707400	-5,987836
Rigole	31,705072	-5,880534	Rigole	31,688104	-5,910015	Rigole	31,707639	-5,896049	Rigole	31,706657	-5,988476
Rigole	31,706152	-5,875274	Rigole	31,683965	-5,913059	Rigole	31,710607	-5,898211	Rigole	31,706728	-5,987165
Rigole	31,708815	-5,879048	Rigole	31,678725	-5,898101	Rigole	31,712581	-5,894327	Rigole	31,708841	-5,975627
Rigole	31,708315	-5,881015	Rigole	31,687222	-5,913770	Rigole	31,710788	-5,892781	Rigole	31,709319	-5,971481
Rigole	31,711533	-5,877584	Rigole	31,682760	-5,912300	Rigole	31,698874	-5,899419	Rigole	31,707635	-5,970882
Rigole	31,703407	-5,848221	Rigole	31,654820	-5,791884	Rigole	31,703475	-5,896778	Rigole	31,707107	-5,966255
Rigole	31,689161	-5,803985	Rigole	31,656230	-5,775969	Rigole	31,704735	-5,892878	Rigole	31,713325	-5,962902
Rigole	31,696902	-5,878702	Rigole	31,662653	-5,813374	Rigole	31,713574	-5,884172	Rigole	31,717793	-5,975405
Rigole	31,696116	-5,874724	Rigole	31,662668	-5,836486	Rigole	31,714457	-5,883641	Rigole	31,715037	-5,968226
Rigole	31,695025	-5,869625	Rigole	31,653451	-5,817954	Rigole	31,715194	-5,881531	Rigole	31,740797	-5,964449
Rigole	31,665686	-5,825838	Rigole	31,680800	-5,907355	Rigole	31,717711	-5,880969	Rigole	31,740548	-5,958491
Rigole	31,684259	-5,812818	Rigole	31,679660	-5,900377	Rigole	31,717123	-5,882319	Rigole	31,731765	-5,940227
Rigole	31,684163	-5,782699	Rigole	31,691253	-5,952953	Rigole	31,710150	-5,886305	Rigole	31,693860	-5,911222
Rigole	31,684046	-5,759716	Rigole	31,684817	-5,961270	Rigole	31,719386	-5,879354	Rigole	31,717258	-5,918163
Rigole	31,679647	-5,765247	Rigole	31,674482	-5,948154	Rigole	31,716925	-5,877535	Rigole	31,714098	-5,908978
Rigole	31,682982	-5,787498	Rigole	31,673851	-5,944345	Rigole	31,718538	-5,876427	Rigole	31,732119	-5,931518
Rigole	31,680453	-5,784007	Rigole	31,676096	-5,956122	Rigole	31,712889	-5,878594	Rigole	31,746208	-5,946260
Rigole	31,692384	-5,797909	Rigole	31,676623	-5,968147	Rigole	31,716995	-5,895993	Rigole	31,759477	-5,951676
Rigole	31,671068	-5,860339	Rigole	31,674091	-5,979115	Rigole	31,729928	-5,902003	Rigole	31,724180	-5,907952
Rigole	31,677896	-5,878248	Rigole	31,703852	-5,974984	Rigole	31,730986	-5,907391	Rigole	31,728690	-5,890405
Rigole	31,675103	-5,878500	Rigole	31,703763	-5,983125	Rigole	31,735590	-5,910165	Rigole	31,724246	-5,888618
Rigole	31,680329	-5,847155	Rigole	31,701892	-5,984014	Rigole	31,748471	-5,903037	Rigole	31,724824	-5,887279
Rigole	31,690086	-5,835007	Rigole	31,698383	-5,973025	Rigole	31,748724	-5,915766	Rigole	31,728454	-5,880653
Rigole	31,688653	-5,835799	Rigole	31,695855	-5,985203	Rigole	31,761004	-5,921867	Rigole	31,728620	-5,878397
Rigole	31,696038	-5,830772	Rigole	31,700922	-5,992704	Rigole	31,793967	-5,939113	Rigole	31,735191	-5,884303
Rigole	31,693555	-5,828738	Rigole	31,701941	-5,994009	Rigole	31,780235	-5,945744	Rigole	31,730987	-5,886715
Rigole	31,721280	-5,895244	Rigole	31,698462	-5,987383	Rigole	31,756557	-5,921525	Rigole	31,734905	-5,881685
Rigole	31,685970	-5,869714	Rigole	31,694241	-5,978991	Rigole	31,726452	-6,001371	Rigole	31,734920	-5,880876
Rigole	31,693172	-5,892761	Rigole	31,706313	-5,946529	Rigole	31,724356	-5,998365	Rigole	31,741019	-5,876646
Rigole	31,668149	-5,763573	Rigole	31,694729	-5,930189	Rigole	31,724098	-5,997740	Rigole	31,742056	-5,872598
Rigole	31,667214	-5,762929	Rigole	31,680519	-5,968680	Rigole	31,724316	-5,996885	Rigole	31,743479	-5,863515
Rigole	31,669966	-5,766329	Rigole	31,681995	-5,965728	Rigole	31,724983	-5,998270	Rigole	31,732171	-5,863942
Rigole	31,692508	-5,887641	Rigole	31,660439	-5,917580	Rigole	31,724719	-5,998015	Rigole	31,709078	-5,840303
Rigole	31,678826	-5,853300	Rigole	31,667650	-5,928390	Rigole	31,730489	-5,993344	Rigole	31,708543	-5,844341
Rigole	31,706503	-5,877466	Rigole	31,690790	-5,899999	Rigole	31,732611	-5,994235	Rigole	31,705214	-5,831253
Rigole	31,706560	-5,877385	Rigole	31,698970	-5,902787	Rigole	31,733827	-5,994840	Rigole	31,702876	-5,819787
Rigole	31,705728	-5,878171	Rigole	31,707515	-5,897349	Rigole	31,727402	-5,978712	Rigole	31,698068	-5,823153
Rigole	31,678994	-5,758260	Rigole	31,708297	-5,895906	Rigole	31,727254	-5,977283	Rigole	31,696887	-5,822595

Coordonnées géographiques des points de contrôle visités à M'Semrir :

N° Points	Latitude	longitude	Unités	N° Points	Latitude	longitude	Unités
1	31,6855	-5,8803	végétation claire semée	26	31,6838	-5,8745	Polyculture intense
2	31,6859	-5,8805	végétation claire semée	27	31,7012	-5,7986	Terrain nu
3	31,699	-5,8524	Terrain nu	28	31,68	-5,86	Polyculture intense
4	31,6918	-5,889	Polyculture intense	29	31,6748	-5,8433	végétation claire semée
5	31,6854	-5,8994	Parcours	30	31,686	-5,824	végétation claire semée
6	31,6867	-5,8834	végétation claire semée	31	31,6834	-5,8794	Terrain nu
7	31,693	-5,89	Polyculture intense	32	31,6845	-5,8261	Polyculture intense
8	31,6874	-5,8829	végétation claire semée	33	31,6779	-5,832	Polyculture intense
9	31,6931	-5,9011	Parcours	34	31,692	-5,823	végétation claire semée
10	31,6908	-5,887	Polyculture intense	35	31,6976	-5,8089	végétation claire semée
11	31,6913	-5,8875	végétation claire semée	36	31,6856	-5,8324	Parcours
12	31,6972	-5,8991	Parcours	37	31,7038	-5,8125	végétation claire semée
13	31,6901	-5,885	Polyculture intense	38	31,6904	-5,812	Terrain nu
14	31,6899	-5,8852	Polyculture intense	39	31,7229	-5,855	Terrain nu
15	31,6917	-5,8842	végétation claire semée	40	31,693	-5,8217	Polyculture intense
16	31,6979	-5,8797	végétation claire semée	41	31,692	-5,817	Polyculture intense
17	31,6994	-5,911	Parcours	42	31,6978	-5,8159	végétation claire semée
18	31,7088	-5,8258	Terrain nu	43	31,6993	-5,8388	végétation claire semée
19	31,6961	-5,8781	Polyculture intense	44	31,6789	-5,881	Terrain nu
20	31,6712	-5,8377	Parcours	45	31,704	-5,816	Polyculture intense
21	31,6854	-5,876	Polyculture intense	46	31,6646	-5,8293	végétation claire semée
22	31,6617	-5,8354	Parcours	47	31,707	-5,815	Polyculture intense
23	31,6827	-5,827	végétation claire semée	48	31,6902	-5,8248	Polyculture intense
24	31,6883	-5,8448	Terrain nu	49	31,6836	-5,8704	végétation claire semée
25	31,685	-5,8759	Polyculture intense	50	31,6763	-5,8752	Terrain nu

ملخص :

العمل الحالي يتناول تصوير مخاطر تآكل التربة المائي في منطقة مسميرير بالإضافة إلى دينامياتها المكانية والزمانية. يهدف العمل إلى تحديد مناطق خطر التآكل المائي التي تواجه المناطق الواحية، وبخاصة منطقة مسميرير، ورسم خرائط لأشكال هذا التآكل. وتقدير تأثيراتها البيئية والجيوفيزيائية على المنطقة. تعتمد المنهجية المتبعة على إرشادات PAP/CAR المعدلة بإدراج عامل الهطول المطري. تعتمد هذه النهج على استخدام أدوات تحليل المعلومات الجغرافية (SIG) والاستشعار عن بعد (télédétection)، مع مراعاة الملاحظات الميدانية. تتعامل هذه الدراسة بشكل خاص مع قضية الحفاظ على موارد المياه والتربة أمام التدهور. تُظهر نتائج تقييم الضعف أمام التآكل أن 60.67% من منطقة الدراسة تُعتبر عُرضة بشدة مرتفعة إلى مرتفعة جدًا للتآكل. تشمل نسبة 57.93% من مساحة المنطقة عُرضة للتآكل بشدة مرتفعة و 2.73% تُعتبر عُرضة للتآكل بشدة مرتفعة جدًا. هذه المناطق تشمل أساسًا الأراضي الوعرة والمُعرضة للأمطار الأكثر غزارة في المنطقة (العامل $R = 276.48$ م/سنة)، مع وجود نباتات شوكية وعشب صغير أو متدهور، وتكوينات سطحية ضعيفة المقاومة. تشغل وحدات التآكل المتوسطة الحساسية 18.02% من مساحة المنطقة وتتوافق مع الصخور الزاوية ذات الميل المعتدل إلى الضعيف وشدة هطول متوسطة إلى ضعيفة. وعلى الجانب الآخر، تتمركز فئات مخاطر التآكل المنخفضة والشديدة منه (19.1% من المنطقة) أساسًا في مناطق الزراعة والمنحدرات الخفيفة والمنخفضة على ارتفاعات منخفضة حيث تكون شدة الهطول ضعيفة. تُظهر النهج الوصفي عدة أشكال للتآكل المائي في بلدية مسميرير، حيث يعد التآكل المركزي الأكثر انتشارًا، حيث يغطي 94.83% من المساحة الإجمالية للأشكال المؤدية. وتُمثل المناطق غير المستقرة أنواعًا مختلفة من التآكل، حيث تشمل تآكل الحاجز 75.65% من المساحة المهددة، تليها التآكل المركزي في الوادي (19.18%)، وتآكل الانتشار (5.16%). تظهر الخريطة الموحدة للتآكل، التي تدمج جميع البيانات التنبؤية والوصفية، مناطق معرضة للمخاطر من الكبيرة إلى الشديدة، خاصةً حيث يكون التآكل المركزي هو السائد. يُلاحظ التآكل في الأودية في المناطق ذات الحالة التآكلية المتوسطة إلى الشديدة. تظهر التآكل الانتشاري بشكل رئيسي في المناطق ذات الميل الضعيف إلى الصفر.

تحليل الديناميات المكانية والزمانية لمخاطر تآكل التربة بين السنوات 2000 و 2013 و 2022، يُظهر تباينات مهمة في خطورة التآكل عبر الزمن، مع تغيرات متفاوتة في نسب الحالات المؤدية إلى التآكل المختلفة. نلاحظ تراجعًا في الحالات المؤدية إلى تآكل ضعيف جدًا إلى متوسطة للسنوات 2000 و 2013 و 2022، وزيادة في الحالات المؤدية إلى تآكل مرتفع إلى مرتفع جدًا. هذا التباين في مساحة المناطق يُعزى إلى انخفاض الغطاء النباتي الواسع وزيادة شدة الهطول، خاصة في شمال المنطقة. في عام 2000، تمثل الحالات المؤدية إلى تآكل مرتفع نسبة 44.88%، مقارنة بنسبة 57.47% في عام 2013 و 57.93% في عام 2022. ترتبط هذه التغييرات ارتباطًا وثيقًا بتطور القابلية للتآكل بناءً على شدة الهطول وتقلبات الغطاء النباتي. هناك تطور في مساحة المناطق السكنية بين عامي 2000 و 2013 و 2022، تمثل على التوالي نسب 0.96% و 1.1% و 1.42% من المساحة الإجمالية. وهذا يعكس وجود الإنسان في المنطقة ويشهد على تأثير النشاط البشري على العوامل المسؤولة عن تآكل التربة. في النهاية، يُظهر هذا النتيجة الديناميكية النشطة لعملية التآكل على المنحدرات في منطقة مسميرير.

الكلمات الرئيسية: تآكل مائي، ديناميات مكانية وزمنية، تصوير، PAP/CAR، تربة، نظم معلومات جغرافية، استشعار عن بعد، واحات مسميرير.

مشروع نهاية الدراسة
للحصول على دبلوم مهندس الدولة في الهندسة الزراعية

الخيار : إدارة التربة والموارد المائية

تصوير مخاطر تعرية التربة بالمياه ودينامياتها المكانية والزمنية في واحات الجبال
حالة منطقة مسمرير

قدمها ودعمها علناً

السيد أبو تانكو موسى

أمام لجنة التحكيم المكونة من

معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	رئيس	أستاذ مصطفى نعيبي
معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	مقررة	أ. مريم سيف النص
معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	مشارك	أ. محمد شياوي مشرف
معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة	ممتحن	أ. نصر الدين معتلة
معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة / المدرسة الوطنية للزراعة	ممتحن	أ. جوليان بورت

شتنبر 2023