



Centre des Etudes Doctorales : Langues, Sciences Humaines, Arts et Sciences de l'Education

Formation Doctorale : Ressources, Aménagement et Développement Territorial

Discipline : Géographie

Spécialité : Géographie Physique

Equipe de recherche : Milieux Naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-Spatiales

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

La dynamique des milieux naturels dans le Haut Ouergha (Rif Central- Maroc)

Préparée par :

EL OUAZANI ECH-CHAHDI Khadija

Sous la direction de :

M. AMYAY Mhamed

Soutenue le 20 Mars 2023 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
M. OBDA Khalid	PES	FLSH, Saïs-Fès	Président
M. IDRISSE JANATI Abdelhamid	PES	FLSH, Saïs-Fès	Membre
M. EL GHACHI Mohamed	PES	FLSH, Beni Mellal	Membre
M. LAAOUANE Mohamed	Emérite	FLSH, Saïs-Fès	Expert
M. AMYAY Mhamed	PES	FLSH, Saïs-Fès	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2022/2023

Dédicace

Je dédié ce travail

A ma très chère mère

A mon très cher père

A mon marie EL-BOUHALI Abdelaziz et ma princesse AMAL

A mes chers frères

A ma grande famille

Remerciement

Au terme de ce travail, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier monsieur **AMYAY Mhamed** d'avoir accepté l'encadrement de ce travail et pour tous ses orientations au cours de son encadrement. Je le remercie chaleureusement pour ses précieux conseils, sa patience et sa disponibilité.

Il est également de mon devoir de remercier tous les professeurs de géographie au sien de la faculté de lettre et de science humain (Sais-Fès). J'insiste à les remercier chacun par son nom : M. Abdelatif TRIBAK, M. Abdelghani EL HOUARI, M. Youssef BENBRAHIM, M. Ali TAOUS, M. Khalid OBDA, M. Mohamed AKODAD, M. Mohamed LAAOUANE, M. Brahim AKDIM et M. Adbelhamid IDRISI JANATI. J'ai l'honneur d'être parmi vos étudiants.

Mes remerciements s'adressent également à mon marie et mon collègue EL-BOUHALI Abdelaziz qui m'a beaucoup aidé à la réalisation de cette thèse.

Abréviations

¹³⁷ C	Radio-isotope Césium 137
ASTER GDEM	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Digital Elevation Model
C°	Degré Celsius
CES	Conservation de l'Eau et des Sols
CUSUM	Méthode du simple cumul
DERRO	Projet de Développement Economique Rural du Rif Occidental
DRS	Défense et Restauration des Sols
EPM	Erosion Potential Method
FAO	Food and Agriculture Organisation (Organisation des nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
GCES	Gestion Conservatoire des Eaux et des Sols
HCP	Haut-Commissariat au Plan
IP	Indice Pluviométrique
IQC	Indice de Qualité de Climat
IQS	Indice de Qualité des Sols
IQSA	Indice de Qualité de Système d'Aménagement des terres
IQV	Indice de Qualité de Végétation
ISD	Indice de sensibilité à la désertification
L (m)	Longueur en mètre
l (m)	Largueur en mètre
LAE	Lutte Anti-Erosive
Max	Maximal

MEDA	Développement rural intégré
ha	Hectare
MEDALUS	Mediterranean Desertification And Land Use
mm	Millimètre
Min	Minimal
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OLI	Operational Land Imager
PAAE	Plans d'Aménagement Anti-Erosif
PAM	Plan d'Action pour la Méditerranée
PAP/CAR	Le Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires
PDI	Programme de Développement Intégré
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RTM	Restauration des Terrains en Montagne
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SIG	Système Informatique Géographique
TAAM	Taux de croissance Annuel Moyen
TM	Landsat Thematic Mapper
USLE	Equation Universelle de Pertes en Sol

Résumé

Les études axées sur le Rif montrent que cette partie du Maroc a subi au cours des dernières décennies une dynamique remarquable de ses milieux, sous l'effet de la combinaison des facteurs d'ordre naturel et anthropique. Cette dynamique a conduit à l'amplification du risque de l'érosion hydrique qui est une cause majeure de la désertification. Les conséquences de la production des quantités considérables de sédiments par l'érosion et de l'avancement continu de la désertification résident dans la dégradation des terres et des infrastructures.

Par sa situation dans le Rif, la zone d'étude est caractérisée par une dynamique importante des milieux. L'analyse des facteurs qui interviennent dans cette dynamique indique que la zone d'étude se situe dans un contexte environnemental très fragile. À cela, s'ajoutent les interventions anthropiques inadéquates. La fragilité des milieux se traduit par la variété des formes de l'érosion et l'augmentation de la sensibilité à la désertification. Le suivi de la dynamique des ravins montre une variation très nette au niveau du rythme d'évolution et les processus intervenants, selon le type d'occupation des sols et selon les conditions lithologiques et topographiques.

L'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique par l'application des deux méthodes (EPM et PAP/CAR) montre que la zone d'étude est très vulnérable à l'érosion hydrique avec une dominance remarquable des milieux instables qui couvrent plus de 82 % selon la méthode PAP/CAR. Ainsi, le modèle EPM indique que 64 % de la zone d'étude produit une quantité considérable de sédiments. En outre l'application de l'approche MEDALUS nous a permis de mettre en évidence que 58% de la superficie totale de la zone d'étude est classée dans les milieux critiques et très sensibles à la désertification.

Pour lutter contre les différentes formes de dégradation des terres dans le Haut Ouergha, des interventions étatiques et paysannes ont été réalisées. Les observations sur terrain montrent que ces interventions sont insuffisantes ce qui exige une approche participative qui prend en considération les besoins des populations et les conditions physiques et socio-économiques du milieu.

Mots clés : le Haut Ouergha, dynamique, érosion hydrique, sensibilité à la désertification, dégradation des milieux, aménagement.

Abstract

The studies focused on the Rif show that this part of Morocco has submitted during the last decades a remarkable dynamic of these environments under the effect of the combination of natural and anthropogenic factors. This dynamic has contributed to the amplification of the risk of water erosion which is a major cause of desertification. The consequences of the production of considerable quantities of sediments by erosion and the continuous advancement of desertification reside in the degradation of land and infrastructure.

By its location in the Rif, the study area is characterized by a significant dynamic of the environments. The analysis of factors intervening in this dynamic indicates that the study area is located in a very fragile environmental context. In addition to this, the inadequate anthropogenic interventions. The fragility of the environment is reflected in the variety of forms of erosion and increased sensitivity to desertification. The monitoring of the dynamics of the ravines shows a very clear variation in the rate of evolution and the processes intervening, according to the type of land use and according to the lithological and topographical conditions.

The qualitative and quantitative evaluation of water erosion by applying the two methods (EPM and PAP/CAR) shows that the study area is very vulnerable to water erosion with a remarkable dominance of unstable areas that cover more than 82% according to the PAP/CAR method. Thus, the EPM model indicates that 64% of the study area produces a considerable quantity of sediment. In addition, the application of the MEDALUS approach allowed us to highlight that 58% of the total surface of the study area is classified in critical environments and very sensitive to desertification.

To confront the various forms of land degradation in the Upper Ouergha, state and farmer interventions have been realized. Field observations show that these interventions are insufficient, which requires a participatory approach that takes into consideration the needs of the populations and the physical and socio-economic conditions of the environment.

Key words: The Upper Ouergha, dynamics, water erosion, desertification Sensitivity, environmental degradation, management.

ملخص

أظهرت الدراسات التي أنجزت حول منطقة الريف أن هذا الجزء من المغرب قد عرف في العقود الأخيرة دينامية ملحوظة للأوساط الطبيعية بفعل تظافر مجموعة من العوامل الطبيعية والبشرية. وقد أدت هذه الدينامية إلى تفاقم حدة التعرية المائية التي تعد سبباً رئيسياً للتصحّر. تكمن النتائج المترتبة عن إنتاج كميات كبيرة من الرواسب عن طريق التعرية وتزايد خطر التصحر في تدهور الأراضي الفلاحية والبنية التحتية.

نظراً لموقعه ضمن مجال الريف الأوسط، يعرف مجال الدراسة دينامية مهمة للأوساط. حيث يشير تحليل العوامل المتدخلة في هذه الدينامية إلى أن منطقة الدراسة تقع في سياق بيئي هش تزيد من حدته التدخلات البشرية الغير الملائمة. تتجلى هشاشة الأوساط في تعدد أشكال التعرية المائية وزيادة الحساسية للتصحّر. كما يُظهر تتبع دينامية الخدات تبايناً واضحاً في وثيرة التطور والعوامل المتدخلة في ذلك، وفقاً لاستخدام الأراضي وحسب الخصائص الصخرية والطبوغرافية.

يُظهر التقييم النوعي والكمي للتعرية المائية من خلال تطبيق مقاربتين مختلفتين (EPM و PAP / CAR) أن مجال الدراسة يعرف دينامية مهمة للتعرية المائية، مع هيمنة المجالات الغير المستقرة التي تغطي أكثر من 82% وفقاً لمقاربة PAP / CAR. كما يشير نموذج EPM إلى أن 64% من منطقة الدراسة تنتج كمية كبيرة من الرواسب. بالإضافة إلى ذلك، مكّنتنا تطبيق مقاربة MEDALUS من إبراز أن 58% من المساحة الإجمالية لمنطقة الدراسة مصنفة ضمن المجالات ذات الحساسية القوية والقوية جداً للتصحّر.

للمحد من الأشكال المختلفة لتدهور الأراضي في منطقة ورغة العليا، تم إنجاز مجموعة من التدخلات من طرف الدولة والفلاحين. تظهر الملاحظات الميدانية أن هذه التدخلات غير كافية، مما يتطلب مقاربة تشاركية تأخذ بعين الاعتبار احتياجات السكان والخصائص الطبيعية والسوسيو اقتصادية للمجال.

الكلمات المفتاحية: ورغة العليا، الدينامية، التعرية المائية، الحساسية للتصحّر، تدهور الأوساط، التهيئة.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La région méditerranéenne est considérée parmi les zones qui enregistrent une grave dégradation des milieux naturels (kosmas et al., 2000) sous l'effet de la combinaison des facteurs naturels et anthropiques. La dégradation des terres se traduit par l'augmentation de l'intensité de l'érosion hydrique qui est une cause majeure de la désertification. En effet, Karamesouti et al., (2015) ont montré que la désertification est un type de détérioration avancé des terres dans la région méditerranéenne, ce phénomène est devenu plus intense durant ces dernières années, par l'effet des changements climatiques (diminution des précipitations et le prolongement de la sécheresse) et le changement des types d'utilisation des terres. Dans cette région, la production des quantités considérables des sédiments par l'érosion hydrique a conduit à une dégradation alarmante des terres (perte de fertilité des sols, diminution de la production...) et des infrastructures (routes, barrages...).

Au Maroc, 40 % des terres sont affectées par l'érosion hydrique (Ayt Ougougdal et al., 2020). Ce phénomène a fait l'objet de plusieurs études (Moukhchane, 2002 ; Damnati et al, 2010 ; Tribak, 2000 ; Abhrour, 2009 ; El Garouani et al., 2003...) par l'utilisation des différentes méthodes et approches (USLE, EPM, PAP/CAR, bathymétrie...). Les résultats obtenus montrent que l'intensité de l'érosion varie d'une région à l'autre et d'un chercheur à l'autre en fonction des caractéristiques de chaque milieu et en fonction de la méthode appliquée. Ainsi, les résultats ont signalé que les montagnes du Rif produisent les taux les plus élevés des sédiments (Sabir et al., 2002 ; Iaaich et al., 2016). Dans cette partie du Maroc, l'érosion hydrique est une cause majeure de la dégradation des terres et des barrages. Selon le ministère de l'Aménagement du territoire, les barrages perdent chaque année environ 125 millions de m³ de leur capacité initiale de stockage (Ayt Ougougdal et al., 2020).

Ce travail se focalise sur l'étude du Haut Ouergha qui fait partie du Rif marocain. En effet, la zone d'étude se caractérise par un contexte environnemental très fragile (dominance des formations lithologiques tendres, couvert végétal incapable de protéger les versants et l'agressivité des précipitations) qui contribue à la dégradation des milieux qui s'est accélérée durant les dernières années. Les aspects de cette dégradation résident dans l'augmentation du risque l'érosion hydrique et l'accélération des processus de la désertification des terres.

À travers ce travail, nous avons étudié la dynamique des milieux naturels dans le Haut Ouergha, qui réside dans l'augmentation de l'érosion hydrique, la sensibilité à la désertification, et le recul alarmant des massifs forestiers. Pour l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique, nous avons utilisé l'approche PAP/CAR (Centre d'Activités Régionales pour le Programme d'Actions Prioritaires) et le modèle EPM (Erosion Potential Method) qui sont largement appliqués au Maroc. Tandis que l'évaluation de la sensibilité à la désertification se base sur l'approche MEDALUS (Mediterranean desertification and land Use), qui est adaptée aux conditions des régions méditerranéennes. Nous avons également focalisé sur l'analyse de la dynamique d'occupation des sols dans la zone d'études, par la présentation des cas typiques. Le travail de terrain dans cette étude constitue une base pour la détermination des formes de dégradation des milieux et pour suivre l'évolution des ravins dans les différents types d'occupation des sols et des formations lithologiques. Ainsi, le terrain permet l'identification des aménagements réalisés pour la stabilisation des versants et pour la lutte contre la désertification.

La réalisation des cartes de l'érosion et de la sensibilité à la désertification repose sur l'utilisation des données multi-sources (données climatiques, travail de terrain, images satellites, cartes des sols, cartes lithologiques...). Ces cartes permettent de déterminer les zones les plus fragiles à l'érosion et à la désertification. La combinaison de différents types de données est basée sur l'utilisation des systèmes d'information géographique.

1. Structure de la thèse

Nous avons subdivisé notre travail en cinq chapitres :

Le premier chapitre expose les caractéristiques générales de la zone d'étude et présente les facteurs clés dans la dynamique des milieux. Il se focalise essentiellement sur l'étude des caractéristiques topographiques, géologiques, pédologiques et climatiques. Ce chapitre vise aussi l'étude des caractéristiques anthropiques, notamment les données relatives à la répartition des populations, la croissance démographique, les types d'occupation du sol... Afin de comprendre les pressions exercées sur le milieu. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des cas typiques de la dynamique d'occupation du sol pour illustrer l'évolution des milieux entre 1985 et 2018.

Le deuxième chapitre porte sur la spatialisation et l'analyse des différentes formes de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha et la détermination des facteurs de genèse et de la répartition de ces formes. Le suivi spatiotemporel des ravins fait également l'objet de ce chapitre, afin de comprendre les processus de leurs évolutions et d'analyser le rythme de la dynamique.

Le troisième chapitre est réservé à l'évaluation de l'érosion hydrique par l'application de la méthode EPM et l'approche PAP/CAR. La première permet de quantifier le taux d'érosion produit dans la zone d'étude. Tandis que la deuxième fournit une évaluation qualitative de l'érosion hydrique par l'identification des zones potentiellement sensibles à l'érosion.

Le quatrième chapitre expose les résultats d'application de l'approche MEDALUS. L'intérêt, c'est de spatialiser la sensibilité à la désertification dans la zone d'étude et de fournir une carte synthétique de ce phénomène. Cette carte permet d'identifier les zones les plus sensibles à la désertification.

Le cinquième chapitre est destiné à la mise en évidence des différents types et des techniques de lutte antiérosive existant dans le secteur d'étude, de traiter leurs rôles antiérosifs et leurs modes de mise en place.

2. Problématique

De nos jours, la problématique de la dégradation des milieux dans le bassin méditerranéen occupe une place très importante dans les recherches scientifiques. Cette dégradation est liée au facteur climatique défavorable, aux changements d'utilisation des terres (kosmas et al., 2000) et à la présence des formations lithologiques, très fragiles. Les études axées sur les bassins situés dans la région méditerranéenne montrent que l'érosion hydrique et la désertification sont considérées parmi les principaux aspects de dégradation des terres et de l'environnement (Sadiki 2005 ; Sadiki et al 2007 ; Aiello et al 2015 ; Karamesouti et al., 2015, Iaaich H et al., 2016).

Durant les dernières années, les bassins rifains ont fait l'objet de plusieurs études relatives à l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique. Tandis que les études qui s'intéressent à l'évaluation de la sensibilité à la désertification restent encore faibles. Dans ce contexte, ce travail vise à étudier la dynamique des milieux liés principalement au phénomène de

l'érosion et de la désertification dans le Haut Ouergha et de montrer la dégradation inquiétante des terres dans cette région du Maroc.

Par sa situation dans le Rif, le Haut Ouergha est considéré parmi les zones les plus fragiles, il a connu des changements profonds et une dynamique accélérée des milieux durant les dernières années, suite d'une interaction des facteurs naturels (l'agressivité des précipitations, la prédominance des roches fragiles à l'érosion, la présence des pentes fortes et des sols sensibles à l'arrachement) et anthropiques (pratiques inadéquates, densité très élevée des populations). La combinaison de ces facteurs provoque la régression accélérée des massifs forestiers, la diminution de la disponibilité des ressources en eau, la dégradation des terres agricoles et l'envasement des barrages.

À travers ce travail, on va essayer d'analyser les processus interviennent dans la dynamique de la zone d'étude, de déterminer les formes de dégradation et de dysfonctionnement du milieu, d'étudier les techniques de sauvegarde et de lutte antiérosives réalisées (traditionnelles et étatiques) et d'évaluer leurs fiabilités contre l'érosion hydrique. Dans ce contexte, on peut poser les questions suivantes :

Quels sont les processus qui interviennent dans la dynamique des milieux dans la zone d'étude ?
Qu'il est le rythme de cette dynamique ? Quelles sont les stratégies de valorisation et de sauvegarde réalisées ? Et quelle est la fiabilité de ces techniques ?

3. Les objectifs

L'intérêt de cette étude est d'évaluer la dynamique des milieux naturels dans le Haut Ouergha, et de mettre en évidence les facteurs qui interviennent dans cette dynamique. Ainsi, d'identifier les zones les plus vulnérables à la dégradation et qui nécessitent une intervention prioritaire. En fonction de la problématique de notre travail, nous avons souligné les objectifs suivants :

- + La détermination des facteurs physiques et humains responsables au déclenchement de la dynamique des milieux dans la zone d'étude.
- + La spatialisation des formes d'érosion hydrique et la mise en évidence de leur relation avec les paramètres explicatifs.

- + L'analyse et la quantification de la dynamique d'occupation des sols par l'étude des cas typiques.
- + L'évaluation de la dynamique des ravins et le suivi de leurs évolutions, par des mesures sur terrain.
- + L'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique par l'application des modèles PAP/CAR et EPM, pour l'identification des zones les plus dégradées et les plus vulnérables. Il s'agit de la détermination des zones prioritaires à l'aménagement.
- + La spatialisation de la sensibilité à la désertification par l'application de l'approche MEDALUS, et l'identification des facteurs responsables, par l'intégration de quatre indices de qualité à savoir : la qualité de végétation, la qualité du sol, la qualité du climat et la qualité du système d'aménagement des terres.
- + L'étude et l'analyse des différentes techniques de lutte antiérosive menées par les paysans et par l'État afin de déterminer et d'évaluer leurs rôles dans la stabilité des milieux.

4. Méthodologie

4. 1. Bibliographie et collecte des données

Dans cette étape, nous avons focalisé sur la collecte des différents types des données, par la consultation des travaux et des recherches qui s'intéressent à l'étude de la dynamique des versants, les méthodes d'estimation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique, la dynamique d'occupation des sols, la sensibilité à la désertification et les techniques de lutte antiérosive. En outre, les données relatives aux caractéristiques géologiques, topographiques, lithologiques, climatiques et démographiques sur le Rif en général et le Haut Ouergha en particulier ont été collectées.

Le travail bibliographique nous a permis de consolider et d'approfondir nos connaissances sur la zone d'étude et de découvrir les méthodes et les approches appliquées par les chercheurs pour étudier la dynamique des milieux. En revanche, la comparaison entre les résultats obtenus dans différents secteurs étudiés. Les informations obtenues à partir de la bibliographie constituent une base solide pour la réalisation de la thèse.

4. 2. Le travail du terrain

Il est indéniable que le travail du terrain constitue une étape très importante dans la recherche géographique. Il fournit des informations précises sur la problématique de la thèse.

Durant la période de la réalisation de la thèse, nous avons effectué plusieurs missions de terrain, afin de découvrir les caractéristiques de la zone d'étude, les types d'occupation du sol et les aspects de dégradation des milieux. Ainsi, l'identification des processus qui interviennent dans la dynamique des milieux.

Pour bien illustrer la dynamique érosive dans le secteur d'étude, nous avons réalisé des mesures sur terrain (photos 1 et 2). Celles-ci permettent de suivre l'évolution spatiotemporelle des ravins. L'objectif principal de ces mesures est de répondre aux questions suivantes : quels sont les processus qui interviennent dans l'évolution des ravins ? Quel est le rythme de cette évolution ? Est-ce que les ravins réagissent avec les processus d'érosion de la même façon ?



Photos 1 et 2. Mesure des ravins sur le terrain.

Les mesures réalisées sur l'ensemble des ravins tenir en compte la variation des sites des mesures au niveau d'occupation des sols, pente, lithologie... Les dimensions mesurées (longueur, largeur et la profondeur) sont immédiatement notées sur une fiche technique.

Bien que la modélisation permette l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique et donne une idée sur l'ampleur de la dynamique des versants, les mesures sur le terrain sont très importantes pour valider les résultats obtenus et vérifier la fiabilité des modèles utilisés.

4. 3. Traitement des données

Cette étape repose sur l'analyse et le traitement des différents types des données collectées (cartes, séries de données climatiques, images satellites, photos aériennes, MNT) et les exploitées sous forme des graphes, des tableaux et des cartes.

Le modèle numérique du terrain (MNT) est exploité pour la réalisation des cartes d'altitudes, des pentes et d'exposition des versants. Les images satellites (Landsat 5 et Landsat 8) sont utilisées pour l'élaboration des cartes de la dynamique d'occupation des sols. La classification supervisée des images a été précédée par un prétraitement radiométrique (pour améliorer la qualité des images) et géométrique (pour garantir la superposition des cartes). Les images satellites ont été utilisées également pour calculer l'NDVI qui nous a permis de réaliser la carte de recouvrement des sols.

La spatialisation et l'analyse des précipitations dans la zone d'étude se basent sur l'utilisation des séries de données mesurées par l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou. Cela a permis la mise en évidence la variation spatiale, annuelle, saisonnière et mensuelle des précipitations. Ainsi, à partir de ces données, nous avons étudié la tendance du climat par le calcul de l'indice de Nicholson et l'application de la méthode de CUSUM. Les données issues de la base de données WorldClim ont été utilisées pour montrer la variation spatiale de la température.

L'évaluation de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha est fondée sur l'application des deux méthodes : la première est l'approche PAP/CAR 1998, qui est réservée à l'évaluation qualitative d'érosion hydrique. La deuxième est la méthode EPM (Erosion Potential Method) de Gavrilovic (1954) spécifique à l'évaluation quantitative d'érosion dans les milieux montagnards. L'application de ces deux méthodes est menée par la superposition de différents facteurs via le SIG.

L'application de l'approche MEDALUS est basée sur la cartographie de plusieurs indices (indice de qualité de végétation, indice de qualité des sols, indice de qualité du climat et indice de qualité de système d'aménagement des terres). La superposition de ces cartes à l'aide du SIG, permet la réalisation de la carte de l'indice de sensibilité à la désertification dans la zone d'étude.

CHAPITRE 1

CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA DYNAMIQUE DES MILIEUX DANS LE HAUT OUERGHA

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques physiques et anthropiques dans le Haut Ouergha afin d'analyser la relation entre les différents facteurs et de comprendre les mécanismes de la dynamique des milieux. L'analyse des spécificités topographiques de la zone d'étude permet de caractériser les types des reliefs dominants et de déterminer le rôle des pentes et d'orientations des versants dans la dynamique des milieux.

L'étude du cadre géologique et pédologique est faite pour évaluer la part de la vulnérabilité des terrains liée à la sensibilité des formations lithologiques et des sols à la dégradation. En outre, nous nous sommes arrêtés sur les caractéristiques des précipitations et de la température.

Enfin l'étude du facteur anthropique pour comprendre les pressions exercées sur le milieu et leur rôle dans la dégradation de l'espace. En parallèle avec l'analyse des caractéristiques anthropiques, des cas typiques de la dynamique d'occupation des sols sont présentés pour illustrer l'évolution progressive et/ou régressive des milieux dans le Haut Ouergha.

1. la zone d'étude

La zone d'étude fait partie du Rif central (Figure 1). Elle s'étend sur une superficie d'environ 232 km² et occupe la partie sud-est du bassin versant d'oued Ouergha, qui fait partie du bassin de Sebou. Elle est délimitée au sud par le bassin d'oued Leben, au nord par le bassin Ras Ouergha, à l'ouest par le bassin de Guezzar et à l'est par le bassin d'oued El Aouaouda.

Administrativement, la zone d'étude appartient dans la province de Taounate et d'Al-Hoceima, elle englobe les collectivités territoriales de Bni Oulid, Kaf El Ghar, Fennassa Bab El Hit, Tamedit et Bni Ounjel Tafraout.

Le Haut Ouergha constitue un milieu fragile et vulnérable à la dégradation. Il se caractérise par des versants très raides, pentus et fortement exploités. Les formations lithologiques sont marquées par la dominance des roches de faible résistance (marnes, argiles, flyschs ...) et facilement érodables. Le couvert végétal naturel est fortement dégradé par le défrichement et le pâturage même sur les fortes pentes. De plus, la zone d'étude est caractérisée par des précipitations orageuses et concentrées dans le temps et dans l'espace, avec une tendance à la sécheresse durant

ces dernières années. Tous ces facteurs influencent la disponibilité des ressources en eau, la qualité des sols et de la végétation et contribuent à la dégradation des milieux naturels.

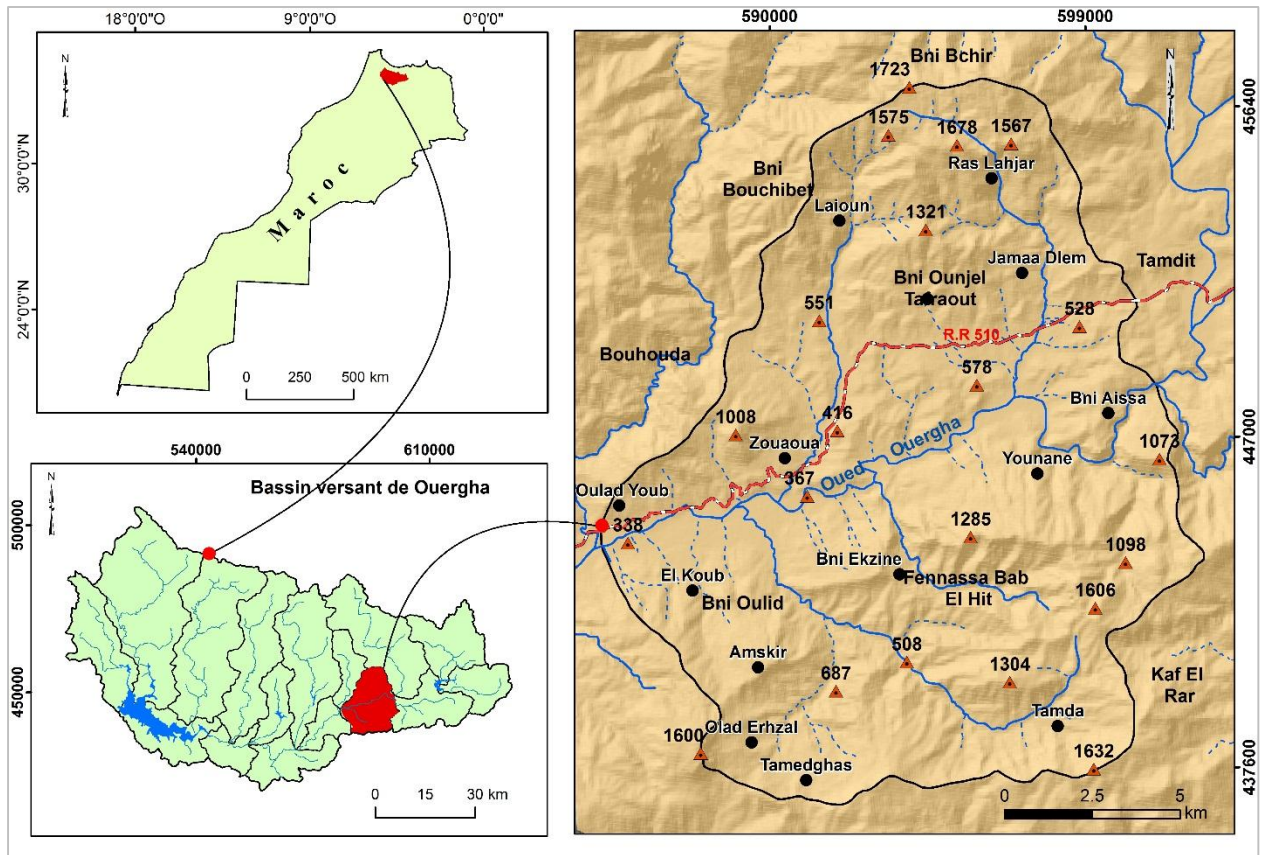


Figure 1 . Situation de la zone d'étude

2. Contexte physique de la zone d'étude

2.1. Contexte géologique

Les caractéristiques géologiques influencent la qualité des sols et les ressources en eau, aussi ils interviennent dans la stabilité et/ou dans la dynamique des milieux. Les études géologiques réalisées sur le Rif (Maurer, 1968 ; Michard, 1976 ; Pique, 1994) constituent la base pour comprendre l'impact de la géologie et de la lithologie sur la dynamique des milieux dans la zone d'étude.

2.1.1. Contexte structural de la zone d'étude

Le Rif fait partie des chaînes des montagnes alpines de la méditerranée (Maurer, 1968), il est composé de trois domaines structuraux : le domaine interne, le domaine des nappes de flyschs et

le domaine externe. Le Haut Ouergha s'inscrit dans le domaine externe du Rif et il est constitué des unités structurales suivantes :

+ **L'unité de Ktama** : Maurer, (1968) indique que l'unité de Ktama constitue le cœur de la haute montagne rifaine et s'étale sur 120 km de la région de l'oued Aoudour supérieur jusqu'au-delà de la coupure de l'oued Nekkour et large en moyenne de 30 km. Elle est dominée par les séries schisteuses armées dans la partie moyenne de bancs résistants de grès quartzite façonné en crêtes imposantes (Maurer, 1968). Cette unité est essentiellement constituée de Crétacé inférieur (Mechard, 1976). Elle occupe environ 7.92% de la zone d'étude.

+ **La nappe des Sanhaja** : La nappe des Sanhaja s'étale sur environ 20 % de la zone d'étude. Elle « *Comprend des séries relativement profondes et a même entraîné des éléments de substratum : granite de Bou-Adel à l'W, lames de granite également près de Taïnaste, ainsi que des massifs paléozoïques, l'essentiel est portant, schistes et grès du jurassique supérieur, marnes du Crétacé, le tout fortement injecté de Trias ; les affleurements de Lias en particulier constituent de beaux massifs dont les crêtes culminantes dominant tout ce pays* » (Maurer, 1968).

+ **La nappe d'Aknoul** : Est composée des matériaux semblables à ceux de l'unité de Tanger, elle comprend les marnes du Crétacé moyen et supérieur et les calcaires à silex de l'Éocène. Avec la dominance des formations de Trias (Maurer, 1968). Elle occupe une superficie limitée à environ 2 % de la zone d'étude.

+ **Les fenêtres métamorphiques** : Occupent la plus grande partie de l'aire d'étude (45.07%). Dans ces zones, on trouve le Crétacé supérieur et l'Eocène marneux et marneux calcaire (Maurer, 1968).

+ **Miocène Post-Nappes paléocène** : « *le Miocène supérieur (Tortonien) est l'époque du dépôt de l'olistostrome prérifain et des marnes et argiles "post-nappes" du Tortonien supérieur* » (Pique, 1994). Il occupe 24.19% de la superficie totale.

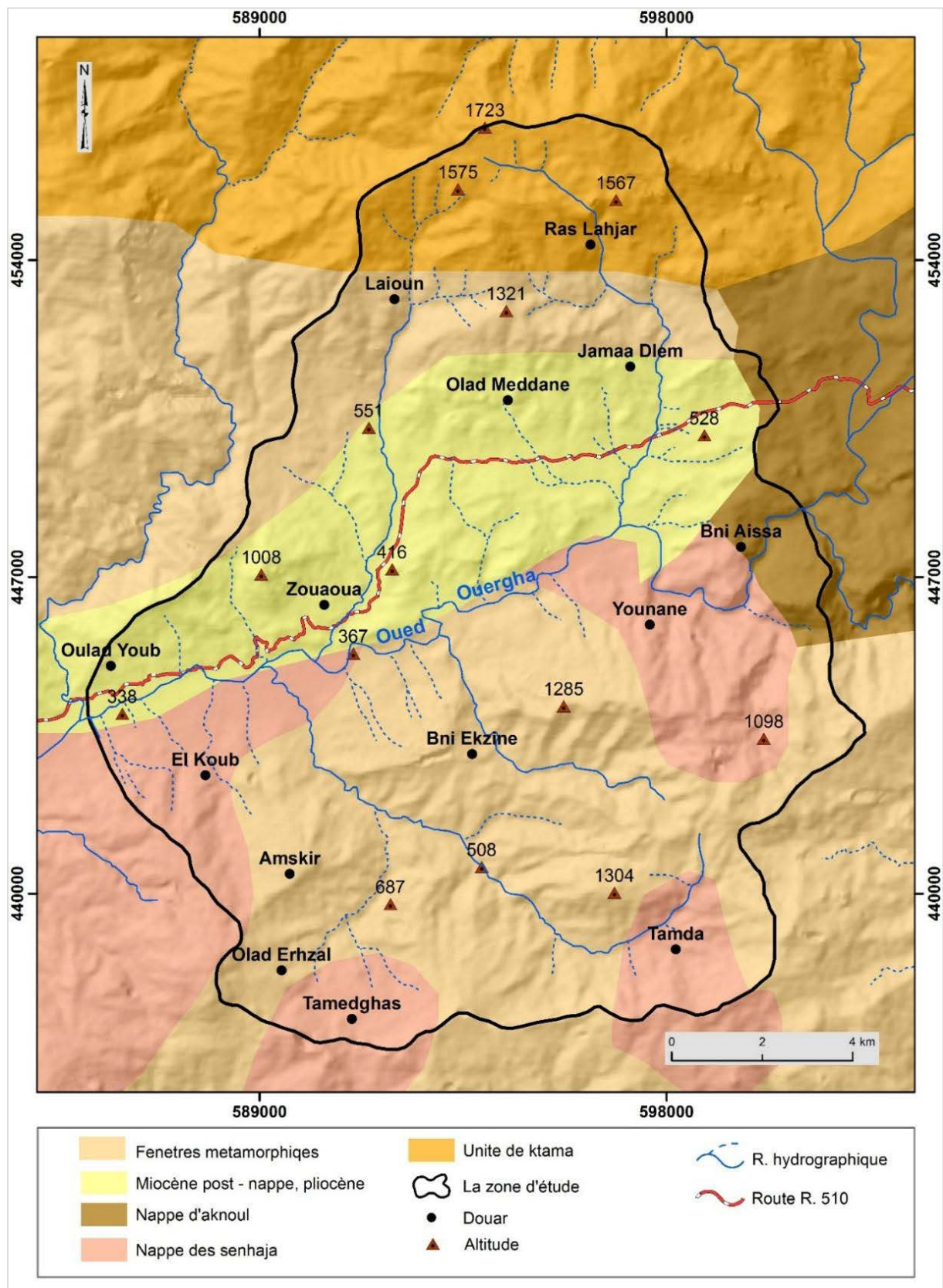


Figure 2. Les unités structurales

2.1.2. Les formations lithologiques

La lithologie des terrains influence le ruissellement de surface et la capacité d'infiltration. Les formations imperméables favorisent l'augmentation du ruissellement, par conséquent, une forte quantité des sols peut être érodée et transportée notamment sur les versants de forte pente où la vitesse du ruissellement est plus rapide. Tandis que les formations lithologiques perméables se distinguent par une diminution de la vitesse de ruissellement.

D'après la coupe géologique (figure 3) de direction nord sud-est on note que la structure géologique du Haut Ouergha est très complexe et marquée par la variation des formations lithologiques du nord vers le sud. En effet, la partie nord est marquée par la présence des formations lithologiques résistantes, tandis que la partie sud se caractérise par la dominance des formations tendres.

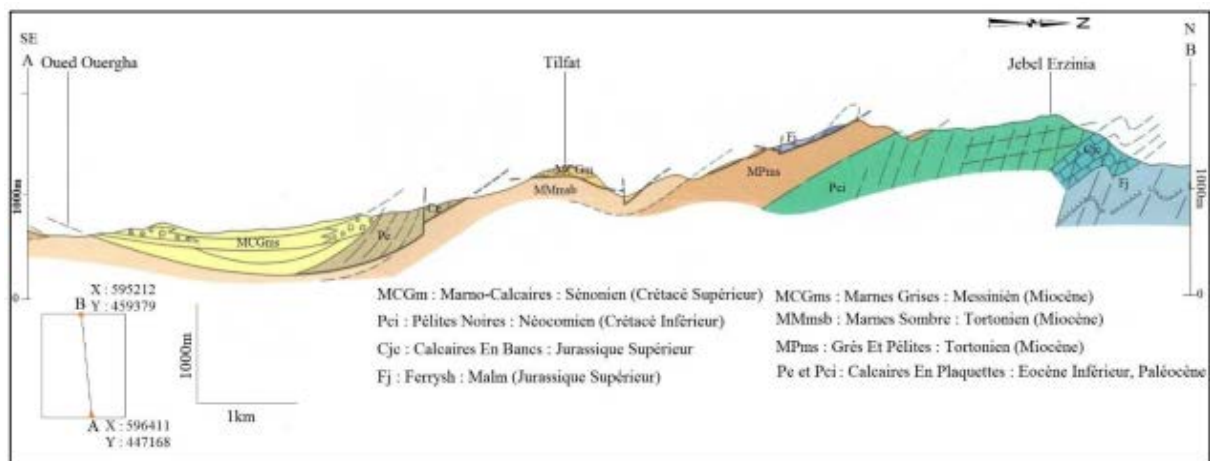


Figure 3. Coupe géologique de la partie nord de la zone d'étude de direction nord sud-est (carte géologique de Dhar Souk 1/50000)

La carte géologique de Haut Ouergha (figure 4) indique une variation notable des formations lithologiques, d'une zone à l'autre, avec une dominance des formations tendres du Miocène (figure 5).

- **Les formations de quaternaire** : occupent 16.42% de la zone d'étude. Ils sont constitués par des coulées d'éboulis (6.03%) et les éboulis (2.37%) autour des formations calcaires. Les alluvions et les cailloutis et limons se localisent le long de l'oued Ouergha et ses principaux affluents. Les colluvions occupent une superficie très faible (0.39%), au pied des montagnes dans la partie nord (douar Ras Lhjar).

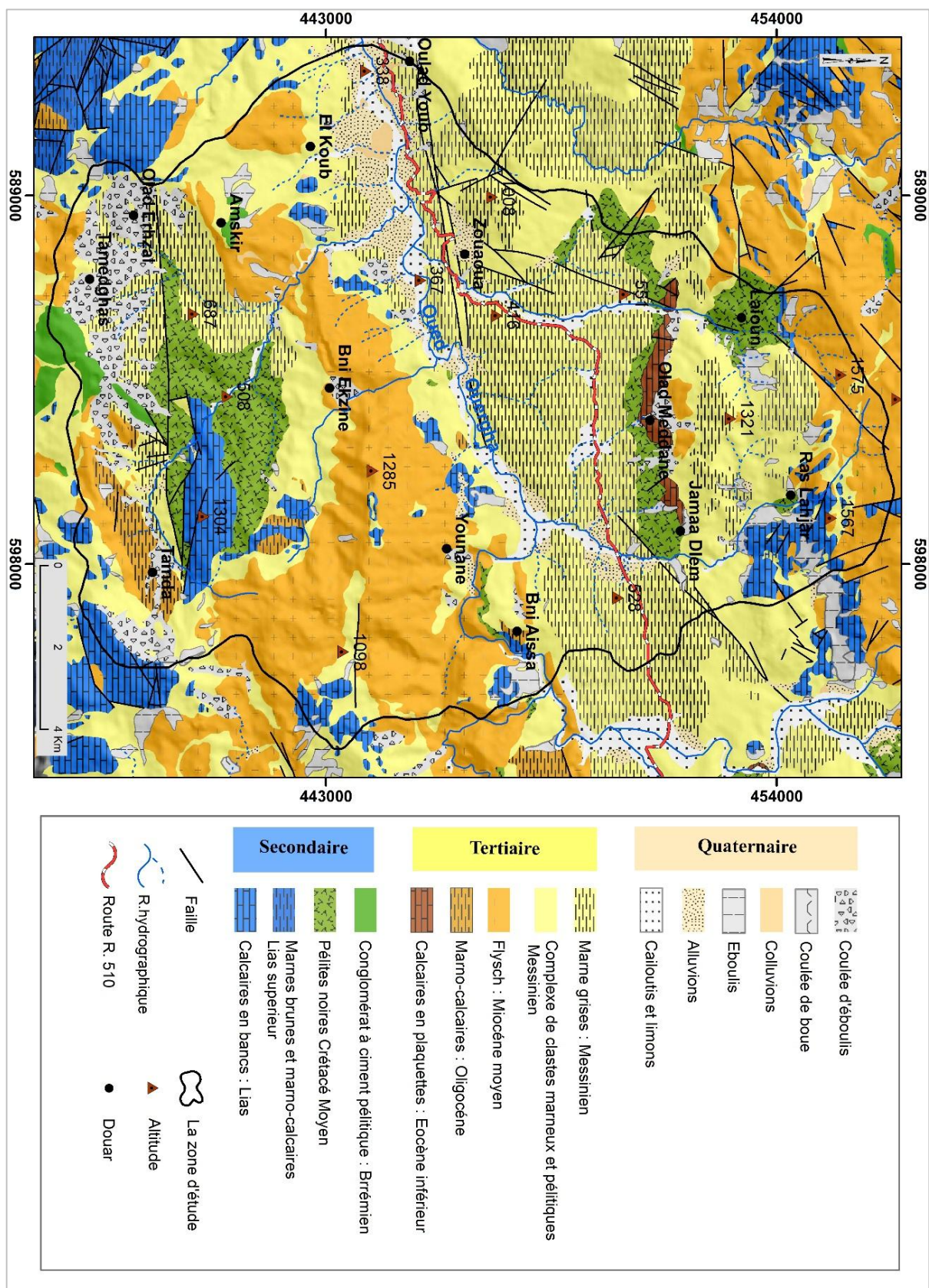


Figure 4. Les formations lithologiques de la zone d'étude (carte géologique Dhar Souk 1/50000)

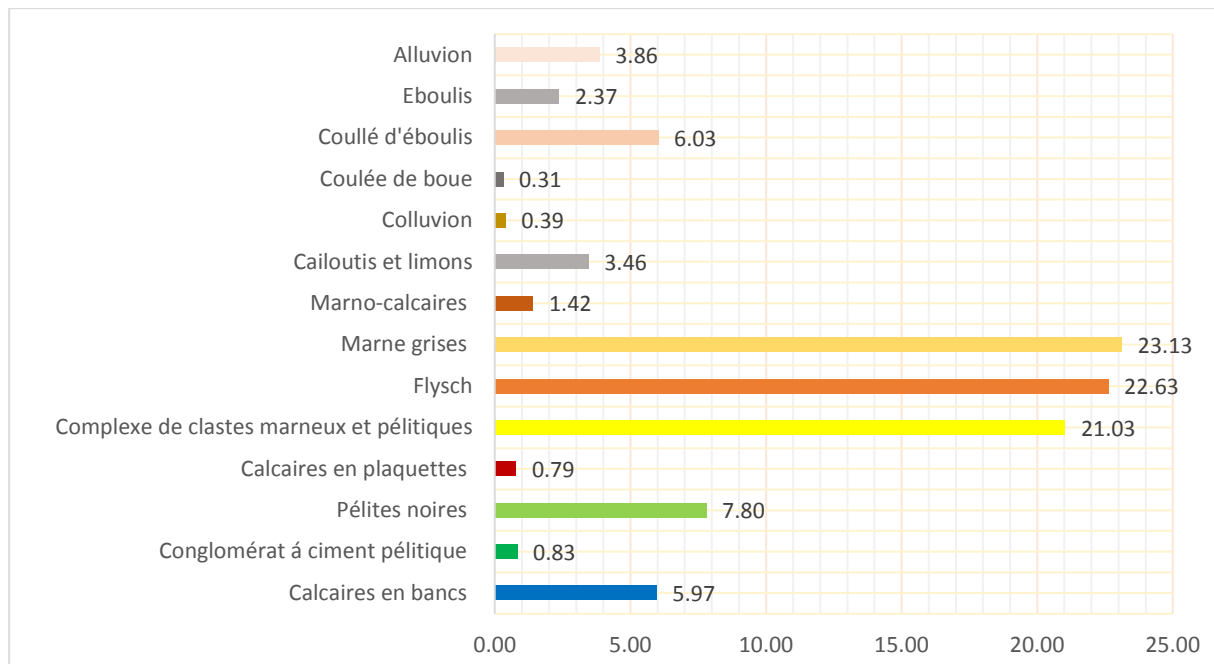


Figure 5. Répartition des formations lithologiques dans le Haut Ouergha

- **Les formations de secondaire** : représentent 14.6 % de la zone d'étude, elles sont dominées par les pélites noires de crétacé moyen (7.80%), qui sont des formations de faible résistance. Les calcaires en bancs occupent environ 5.97%, ce sont des formations à haut coefficient d'emménagement d'eau et ils apparaissent sous forme des *Sofs* qui donnent naissance aux plusieurs sources. Le conglomérat occupe une superficie très limitée inférieure à 1 %.

- **Les formations de tertiaire** : ce sont les plus dominants dans la zone d'étude, elles s'étalent sur environ 69 % de la superficie totale. Ces formations tendres (marnes grises, complexe de claste marneux et pélites Messinien et le flysch) et imperméables constituent plus de 66% de la superficie de la zone d'étude. Ces formations sont facilement érodables et présentent une sensibilité forte à l'érosion hydrique. Tandis que les formations résistantes et moyennes résistantes sont très limitées (calcaire en plaquettes et le marno-calcaires).

2.2. Les sols

Les sols sont le résultat de transformations physique et chimique des roches sous l'effet des agents climatiques (humidité et température) et biologiques (microflore, méso-flore) (Roose, 2010). Les caractéristiques des sols (texture, perméabilité, porrosité...) dépendent beaucoup de la roche-mère sous-jacente. La carte pédologique de Taounate 1/50000, nous a permis de distinguer les types des soles suivantes :

- > **Sols minéraux bruts d'érosion (régosols)** : occupent environ 7.3 % de la superficie totale. Ils se développent sur les formations très tendres et facilement érodables (marnes et flyschs),
- > **Sols minéraux bruts d'apport alluvial** : ce type de sols est développé sur les alluvions des lits des oueds. Ils occupent le lit alluvial d'oued Ouergha, oued Boumlal et oued Kasba sur une superficie très limitée d'environ 1.7 %.
- > **Sols fersialitiques** : ces sols caractérisés par une texture limono-sableuse à limoneuse en surface et argilo-limoneuse en profondeur. Situés sur des pentes faibles à moyennes. Ceux développés sur les calcaires dolomitiques du Lias et sur les flyschs marneux nécessitent une protection contre l'érosion hydrique (plan d'aménagement antiérosif d'Ouergha, 1995). Dans la zone d'étude, les sols fersialitiques occupent 8.1% de la superficie totale.
- > **Sols peu évolués** : généralement, on peut identifier trois types de sols peu évolués :
 - **Sols peu évolués d'apport alluvial** : ils sont situés sur les alluvions d'Oued Ouergha sur des pentes faibles (occupent 4.7 %). Ces sols (limono-argileux à argileux, de texture grossière) sont très profonds.
 - **Sols peu évolués d'apport colluvial** : se développent sur les colluvions marno-schisteuses de texture équilibrée à limoneuse. Ce type des sols occupe la partie médiane de l'aire d'étude et représente une superficie d'environ 25.9 %.
 - **Sols peu évolués d'érosion** : ce type des sols est le plus dominant dans la zone d'étude, ils couvrent 45% de superficie et se développent sur les matériaux de texture équilibrée à fine, reposant sur flysch ou schistes avec des affleurements rocheux.
- > **Lithosols** : il s'agit d'affleurements des massifs calco-dolomitiques du Lias et du Jurassique moyen suite à l'érosion (PAAE d'Ouergha, 1995).
- > **Sols complexes** : occupent 3.8 % de la zone d'étude et composé de plusieurs types des sols, à savoir les sols minéraux bruts d'érosion, lithosols et sols peu évolués d'érosion et sols fersialitiques à peu profonds (carte pédologique de Taounate 1/50000, 1994).

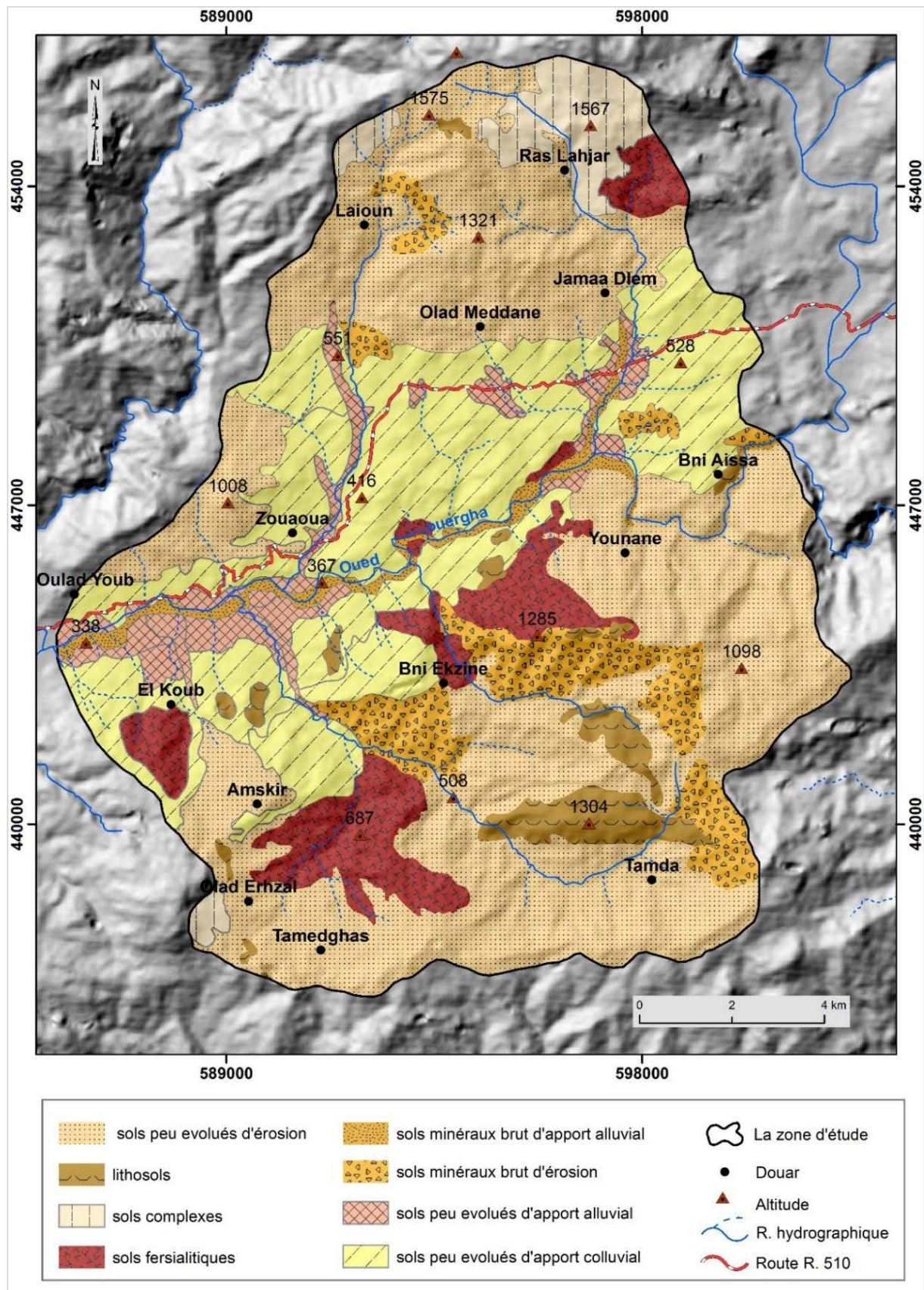


Figure 6. Les formations pédologiques de la zone d'étude (la carte pédologique de Taounate 1/50000, en 1994)

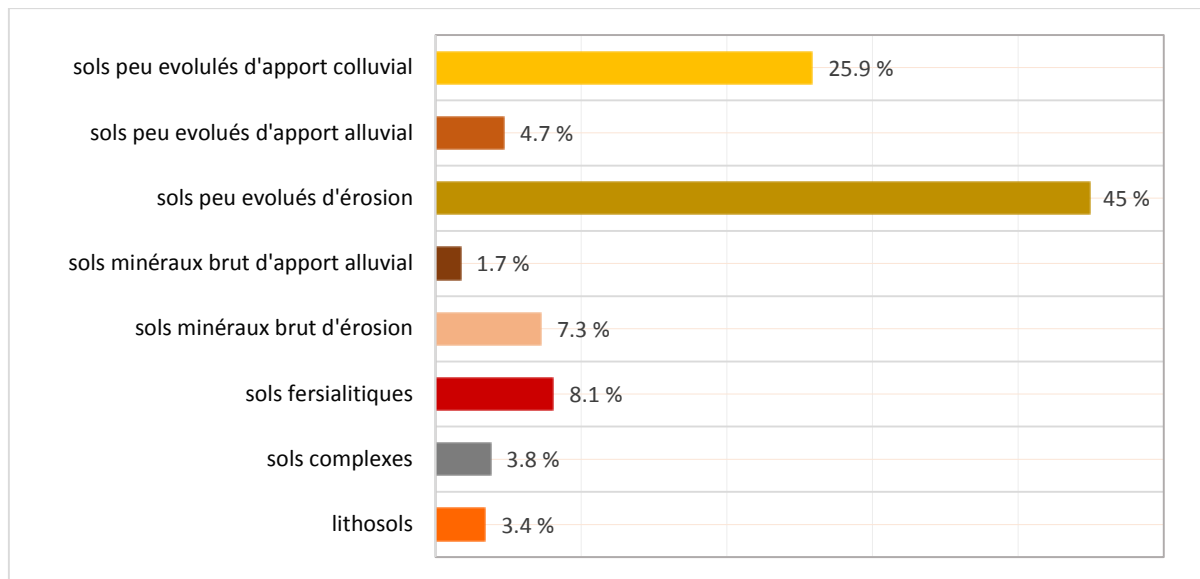


Figure 7. Répartition des types des sols en fonction de la superficie

2.3. Les caractéristiques topographiques

2.3.1. Unités topographiques

Le Haut Ouergha est caractérisé par une topographie très accidentée témoignant de la structure géologique et de la forte dynamique érosive. Généralement, on peut distinguer trois unités topographiques :

Les montagnes : se caractérisent par des altitudes très importantes, avec des sommets qui dépassent 1500 m (figures 9 et 11), ils couvrent la partie nord (douar Ras Lhjar, douar Laiouan) et sud (douar Tamda, Oulad Erhzal, douar Tamedghaas) de la zone d'étude (figure 8), et se distinguent par un découpage remarquable des versants, résultat de la forte dynamique érosive et des vallées très encaissées. Les sommets les plus élevés sont : jbel Erzinyia 1723 m, Bab Aka 1728 m, Sef Et Takhech 1678 m, jbel Drinkel 1600 m, jbel Lakraâ 1595 m, jbel Bab Touila 1632 m.

Les collines présentent une unité topographique transitoire entre les montagnes et la plaine et entre les hautes et les basses montagnes. Elles se distinguent par un découpage bien net, suite à l'installation d'érosion linéaire. En fonction des altitudes, on trouve les hautes collines dont l'altitude oscille entre 700 et 900 m (Bab Sellam 861m, Larhzaouna 703 m, Imessouine 868 m) et les basses collines, où les altitudes oscillent entre 500 et 700 m (Koudia Zida 554 m, Khendak Bou Sef 578 m).

La plaine alluviale de l'oued Ouergha : occupe la partie médiane de la zone d'étude et se caractérisent par des altitudes faibles (figure 10) avec une dominance des formations marneuses du miocène et des formations du quaternaire (alluvions, colluvions...).

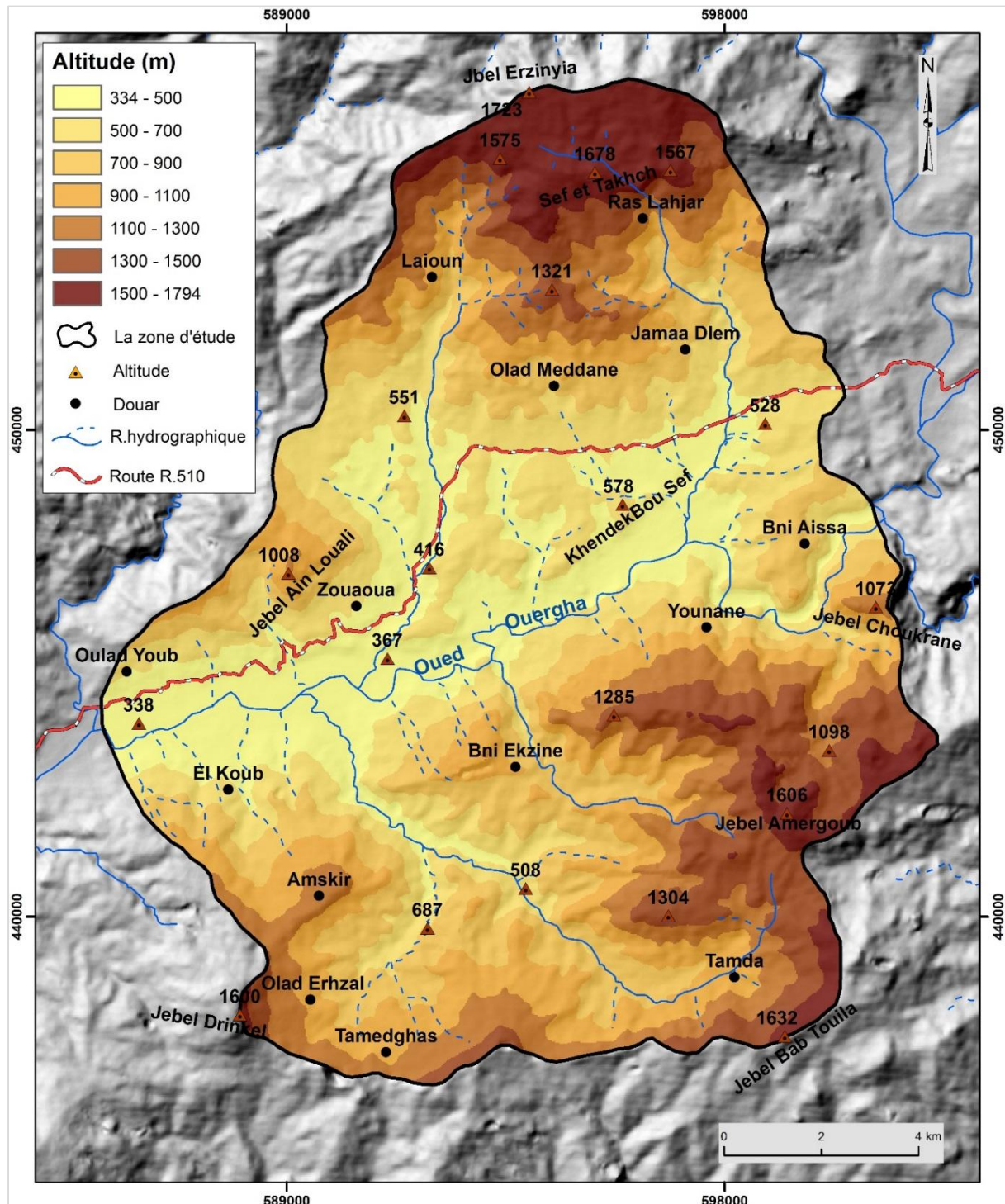


Figure 8. Répartition des tranches d'altitude dans le Haut Ouergha (MNT 30 m)

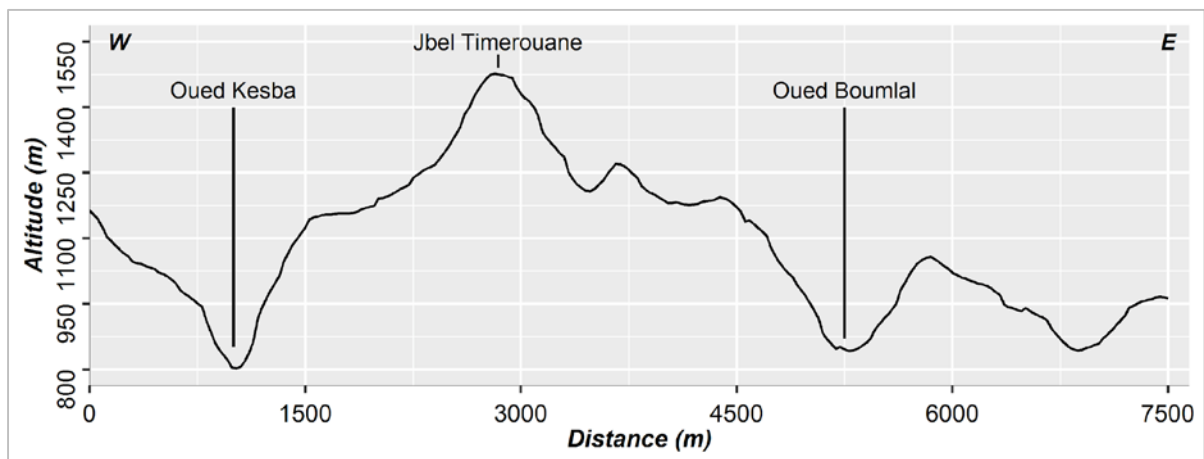


Figure 9. Profile topographique dans la partie nord de la zone d'étude

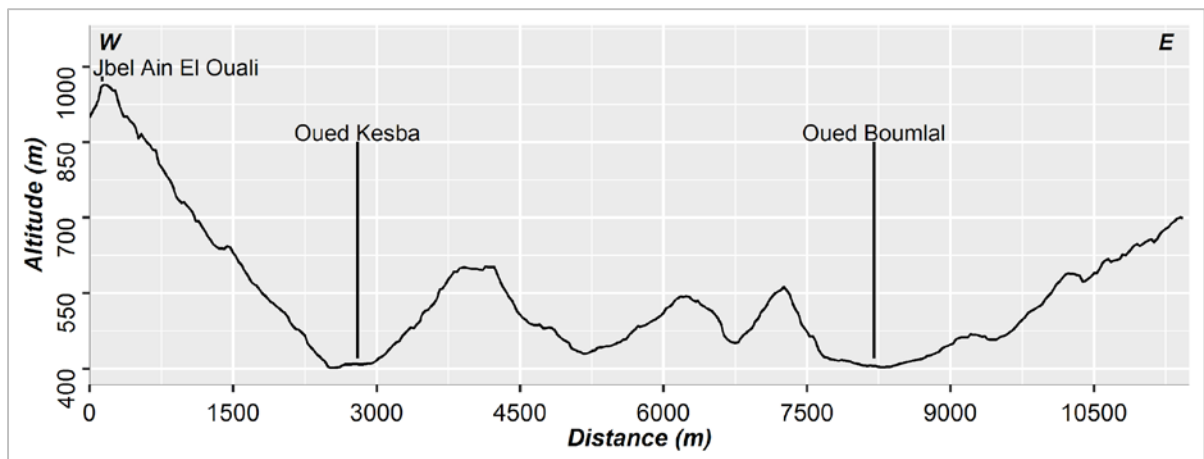


Figure 10. Profile topographique dans la partie médiane de la zone d'étude

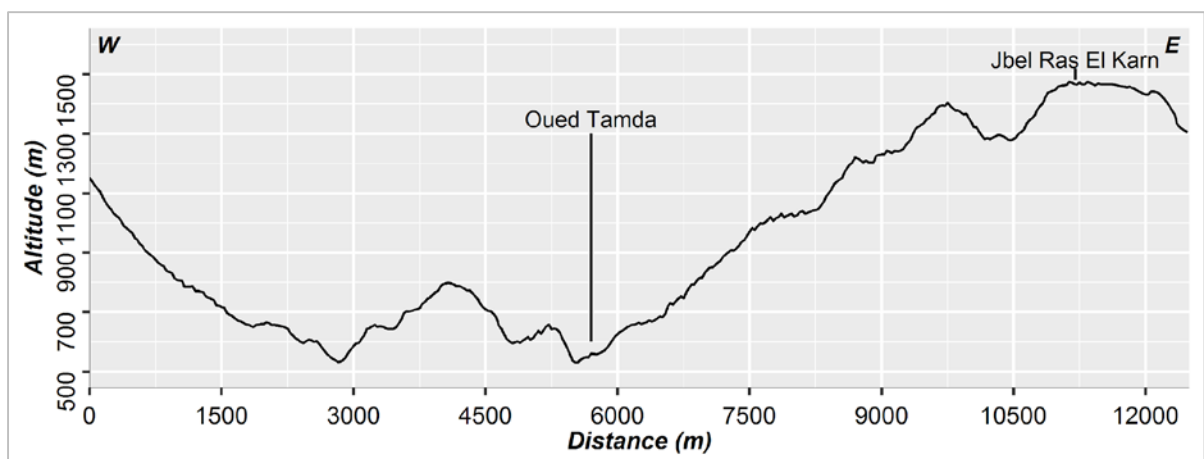


Figure 11. Profile topographique dans la partie sud de la zone d'étude

2.3.2. Les pentes

La pente est l'un des facteurs principaux dans les processus morphogéniques sur les versants. Elle contrôle la capacité du ruissellement et du transport des particules (Tribak, 2000). Bou Kheir et al., (2001) indiquent que l'eau de pluie ruisselle très vite sur les fortes pentes et provoque une érosion grave.

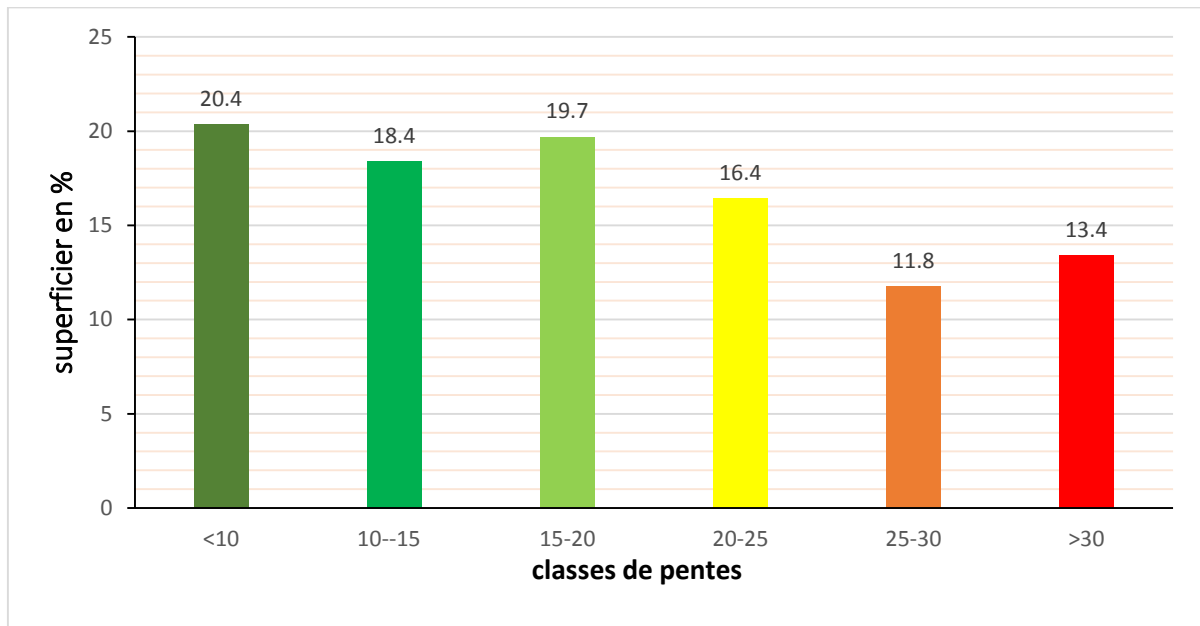


Figure 12. Répartition des classes de pente en fonction de la superficie en % dans la zone d'étude

La figure 12 montre que la zone d'étude est caractérisée par des versants raides et pentus. Les pentes fortes à très fortes et extrêmes (20 - 30 %) occupent plus de 41 % de la superficie totale. Elles se situent dans la partie nord au niveau de douar Ras Lhjar, douar Jamaa Delam, douar Laioun et dans la partie sud au niveau de douar Bni Ekzin, Tamda, Amskir, Tamedrhas où les altitudes sont plus élevées (figure 13). Les pentes faibles et très faibles représentent 38.8%, ce sont des zones d'accumulations qui occupent la partie médiane de l'aire d'étude, au niveau de la plaine alluviale d'oued Ouergha et le centre rural de Beni Oulid, où les altitudes sont faibles. Tandis que les pentes moyennes (15-20) s'étalent sur 19.7%, elles occupent des surfaces limitées dispersées sur l'ensemble de la zone d'étude.

Donc, le facteur topographique dans la zone d'étude participe à la mise en place des conditions très favorables au déplacement rapide de l'eau de ruissellement et augmente l'énergie d'écoulement. Cela favorise l'augmentation de taux des matériaux arrachés de l'amont vers l'aval et influence la résistance des sols contre l'érosion et la désertification.

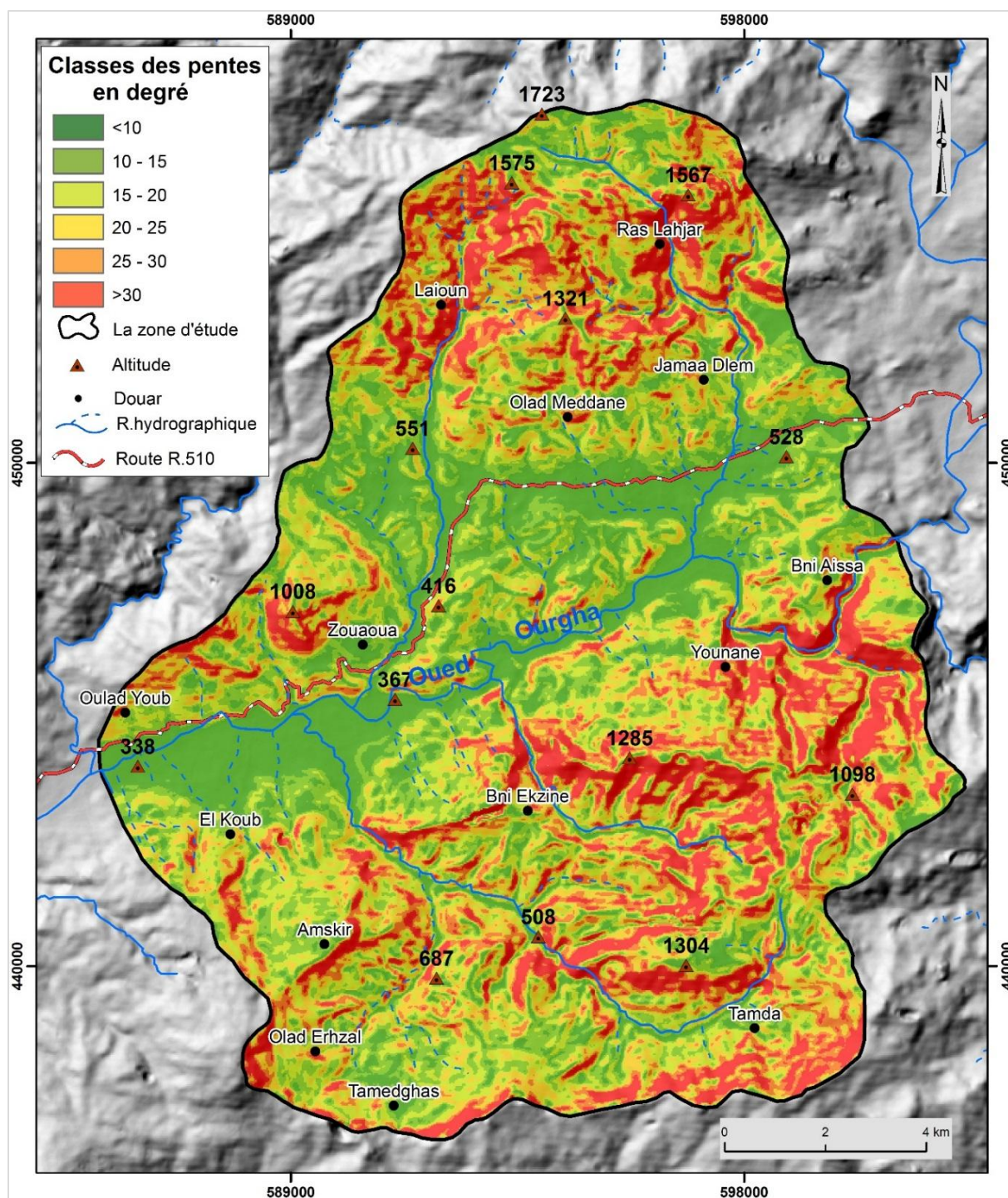


Figure 13. Répartition des classes de pente dans la zone d'étude (MNT résolution 30 m)

2.3. 3. Exposition des versants

L'exposition des versants est un élément clé dans la dynamique des milieux. Les observations sur terrain montrent que les versants exposés vers le nord, le nord-ouest et l'ouest sont des versants humides, ce qui favorise l'évolution d'un couvert végétal dense et des sols épais. Par contre, les versants exposés vers le sud, le sud-est et le sud-ouest sont des versants ensoleillés et les sols sont

très érodés et parfois dépourvus de toute végétation, ce qui permet l'installation de toutes formes d'érosion (Sabir, 1986).

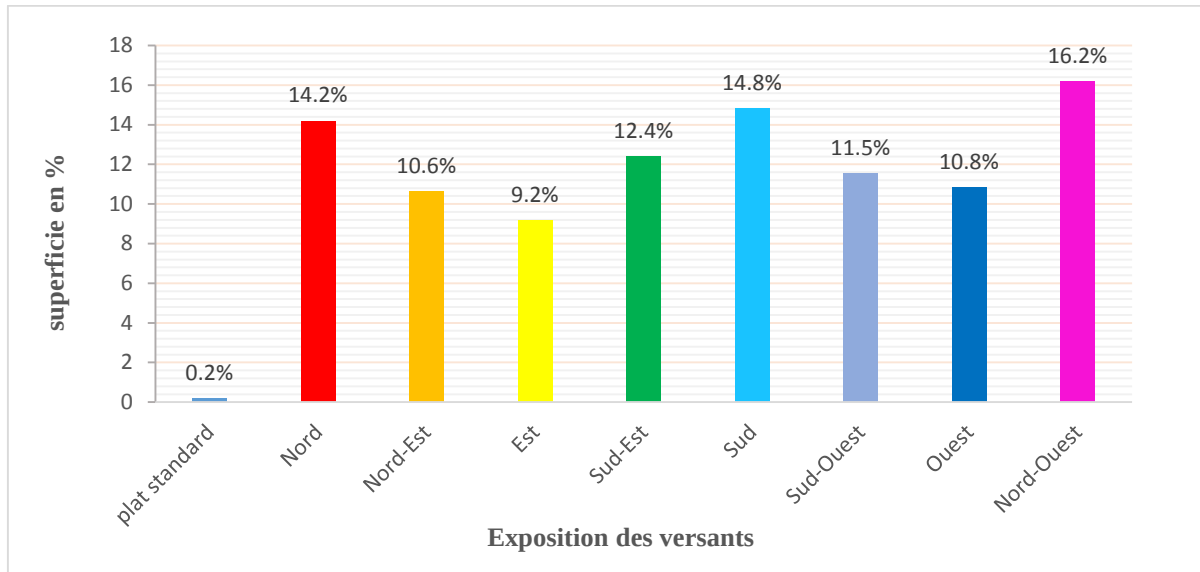


Figure 14. Répartition d'exposition des versants dans le Haut Ouergha

Les figures 14 et 15 illustrent que les versants exposés vers le Sud, le Sud-Est et le Sud-Ouest occupent 38.7 %. Ce sont des versants moins arrosés et plus ensoleillés, ainsi, ils se caractérisent par un couvert végétal clairsemé et les formes d'érosion sont très nettes. Les versants d'exposition nord, nord-est et nord-ouest représentent environ 41% de la superficie totale. Ce sont des versants humides avec un couvert végétal dense, ce qui favorise un bon recouvrement des sols.



Photo 3. La différence entre les versants d'exposition nord et sud de la zone d'étude

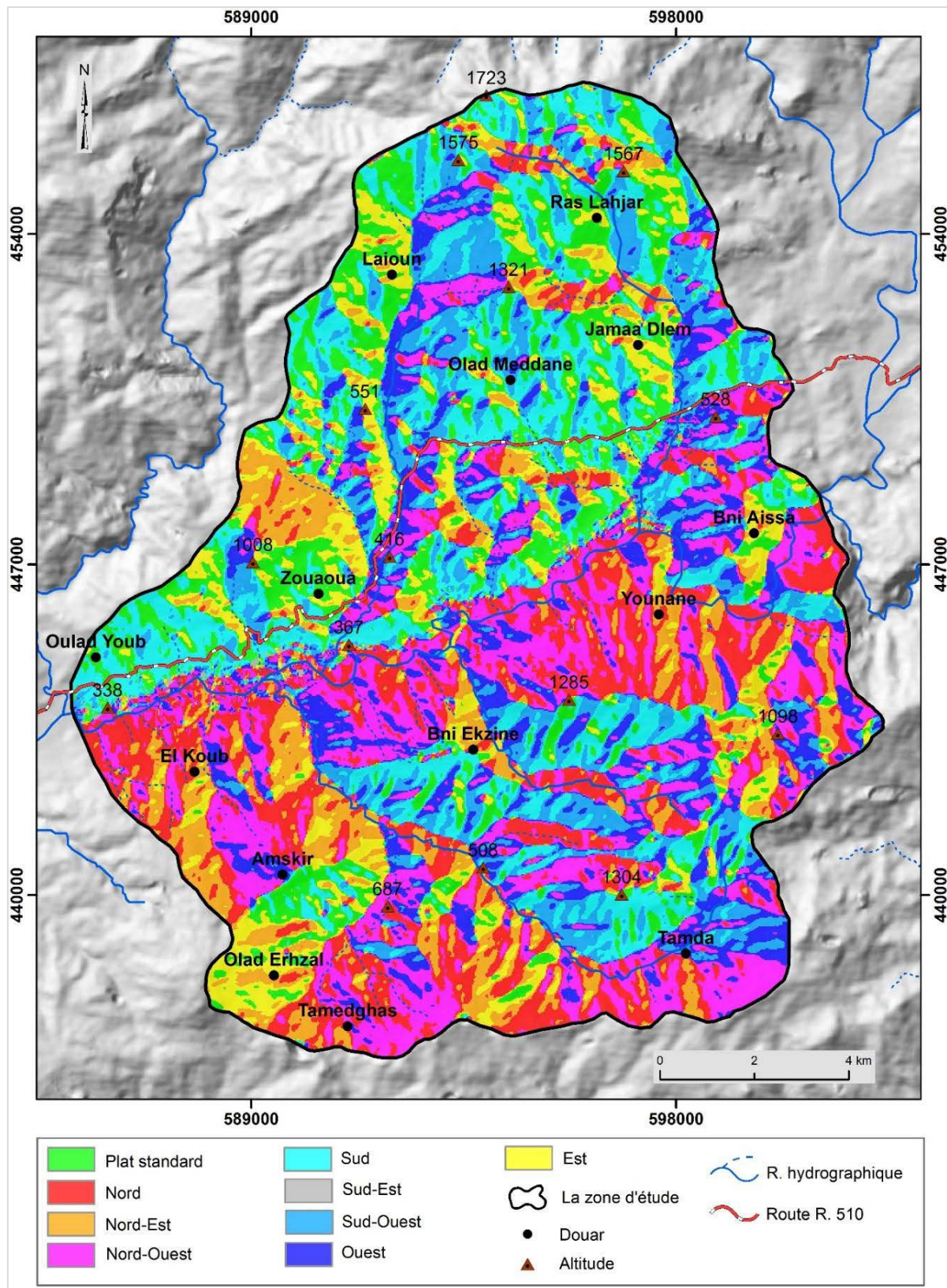


Figure 15. Répartition de l'exposition des versants dans la zone d'étude (MNT à résolution de 30 m)

2.4. Caractéristiques hydrologiques

Le Haut Ouergha est caractérisé par un réseau hydrographique assez dense et complexe qui adopte une structure ramifiée, ce qui explique une dynamique importante du ruissellement. Il est marqué par un écoulement temporaire fortement lié aux précipitations. La densité du réseau hydrographique diffère d'une zone à l'autre dans l'aire d'étude. Elle est forte dans la partie médiane du bassin à cause de l'existence des formations lithologiques imperméables (marnes) et un couvert végétal clairsemé. Par contre, la densité du réseau hydrographique est faible dans la partie nord et sud, en raison de la présence des roches perméables (calcaire) et un couvert végétal important.

Oued Ouergha est le cours d'eau principale dans la zone d'étude, il draine la partie médiane où les altitudes sont faibles et les formations lithologiques sont tendres. Les principaux affluents d'oued Ouergha son oued Boumlal, oued Lkasba, oued El Haj et oued Tamda (figure 16).

La distribution des sources dans le Haut Ouergha est contrôlée par le substrat. En effet, l'existence des formations lithologiques à fort coefficient d'emménagement favorise l'abondance des sources, notamment dans la partie nord (douars Ras Lhjar, Oulad Bouslama, Oulad Hamza) et la partie sud de la zone d'étude (Olad Erhzal, Tmedghas). En revanche, les sources sont moins abondantes dans la partie médiane, où le substrat est imperméable. Généralement, le débit des sources est fortement influencé par la quantité des précipitations, il connut une diminution remarquable durant les années sèches où les précipitations sont incapables d'alimenter la nappe.

2.5. Cadre climatique

Le facteur climatique joue un rôle très important dans les processus d'érosion et la sensibilité des milieux à la désertification, notamment les précipitations et la température. La concentration spatio-temporelle des précipitations et leurs brutalités provoquent une grande activité morphodynamique, ce qui engendre la dégradation des terres mal protégées par le couvert végétal. La température a beaucoup d'influence sur les sols. Elle intervient directement dans la structure des matériaux, en particulier pour le détachement des particules rocheuses et des formations superficielles durant la longue période sèche.

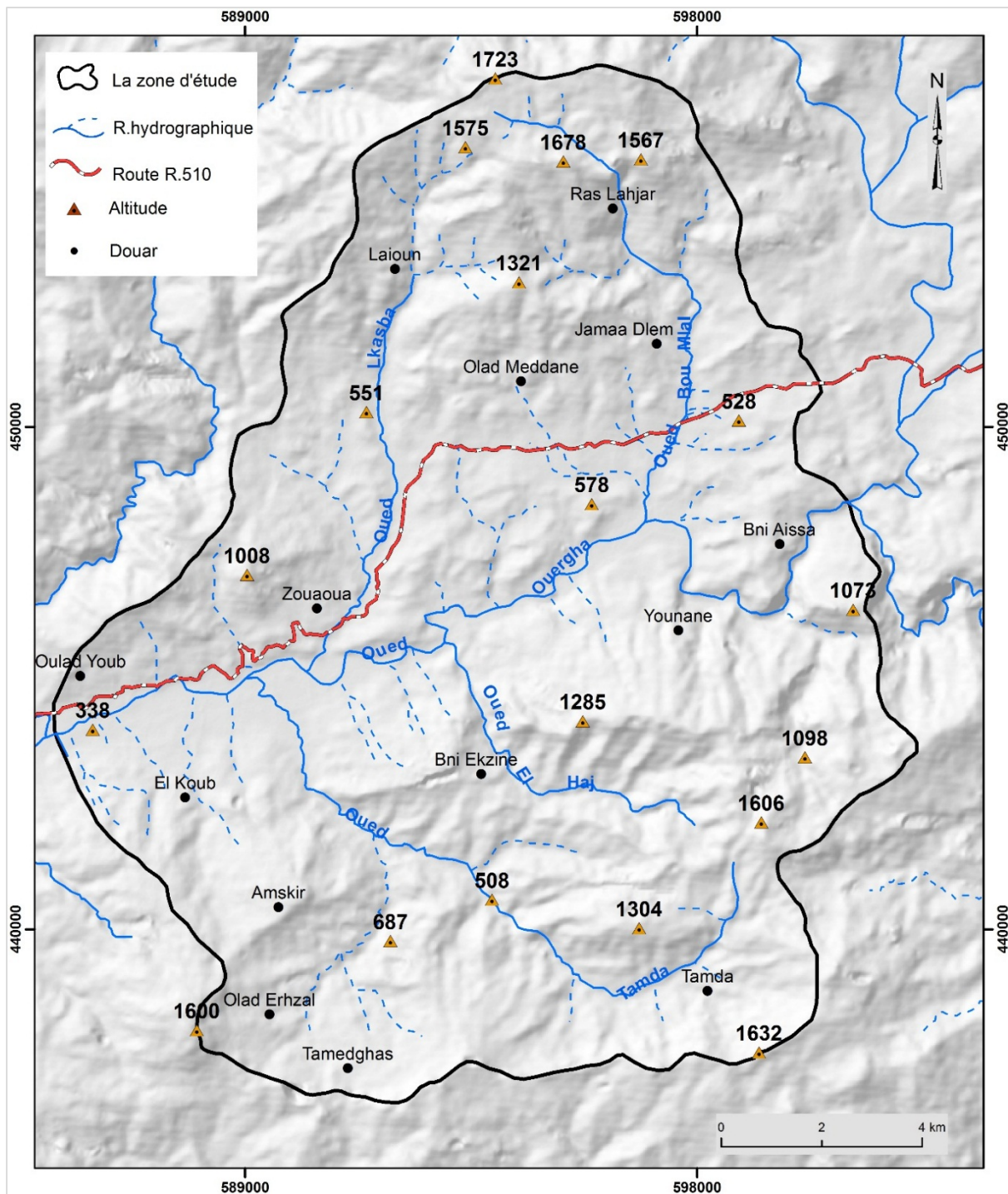


Figure 16. Réseaux hydrographiques de la zone d'étude

2.5.1. Précipitations

Le Haut Ouergha évolue dans un contexte climatique méditerranéen semi-aride, caractérisé par des irrégularités remarquables des précipitations. Les épisodes pluvieux sont brutaux et concentrés dans le temps et dans l'espace, ce qui donne des quantités très importantes d'eau en quelques jours

de la saison humide. L'intensité des précipitations et leur caractère orageux, déclenchent les mécanismes d'érosion sur les versants et provoquent un écoulement torrentiel dans les cours d'eau.

Pour bien comprendre les caractéristiques des précipitations dans la zone d'étude et leurs influences sur la dynamique des milieux, nous nous sommes basés sur l'analyse des données disponibles des stations climatiques qui entourent la zone d'étude.

2.5.1.1. La répartition spatiale des précipitations

Pour mettre en évidence la répartition spatiale des précipitations dans le secteur d'étude, nous avons réalisé la carte des isohyètes à travers l'utilisation des moyennes des précipitations de différentes stations situées à proximité de la zone d'étude (tableau 1).

La carte (figure 17) montre que la répartition spatiale des précipitations dans la zone d'étude se caractérise par une variation très nette en fonction de l'altitude et l'exposition des versants. Les précipitations les plus importantes se localisent sur les massifs les plus élevés de la partie nord (Jbel Erzinyia, Sef et Takhch, Jbel Timerouane) et sur les crêtes montagneuses de la partie sud (Jbel Drinkel, Jbel Bab Touila, Jbel Amergoub), où la moyenne annuelle des précipitations oscille entre 700 et 809 mm. Par contre, les précipitations sont de plus en plus faibles dans la partie intermédiaire (plaine alluviale d'oued Ouergha). Dans cette partie, la moyenne annuelle des précipitations diminue jusqu'à 617 mm.

2.5.1.2. Variation annuelle des précipitations

L'analyse des précipitations annuelles permet d'obtenir une idée générale sur les caractéristiques du climat dans la zone d'étude et d'identifier les périodes sèches et humides, notamment dans le cas de la disponibilité d'une longue série des données.

Pour mettre en évidence la répartition annuelle des précipitations, nous avons traité les données disponibles à la station de Bab Ouender située à proximité de la zone d'étude, sur une altitude de 310 m. Ainsi, le choix de cette station est justifié par la disponibilité d'une longue série des données (entre 1957 et 2018).

L'étude des données pluviométriques annuelles (figures 18 et 19) pour la station Bab Ouender, montre une oscillation bien nette des précipitations annuelles entre 1957 et 2018, avec la

succession des années sèches et humides. Durant cette période, la station a enregistré des précipitations maximales qui ont atteint 1600 mm entre 1962-1963 et minimales de 291 mm durant la période 1998-1999.

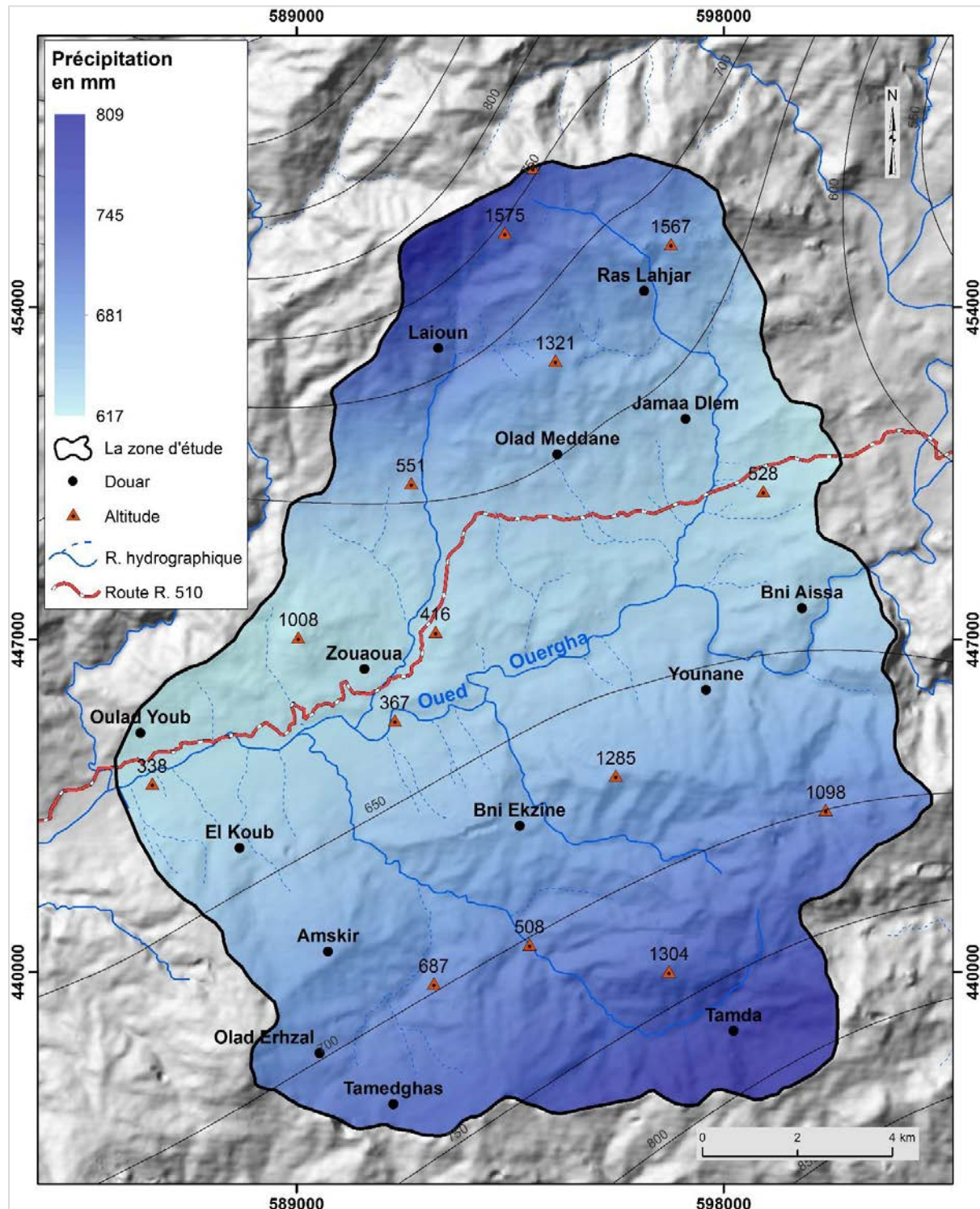


Figure 17. Répartition des précipitations moyennes annuelles dans la zone d'étude

Station	P (mm)	Période	X	Y	Altitude
Bab ouender	645	1957-2015	579800	440100	310
Pont de sker	741	1956-2002	572900	441900	320
Asfalou	584	1997-2015	610720	449000	760
Trzout	754	1998-2015	575150	454900	450
Galaz	629	1980-2015	555320	439850	214
Boufelou	856	2000-2015	560000	459650	790
Ketama	1802	-	575704	479685	2100
Bouhouda	667	-	575900	444500	400
Kef el Rhar	919	-	604200	434800	600
Taineste	879	-	616200	439600	1250

Tableau 1. Données climatiques disponibles dans les stations qui entourent le Haut Ouergha

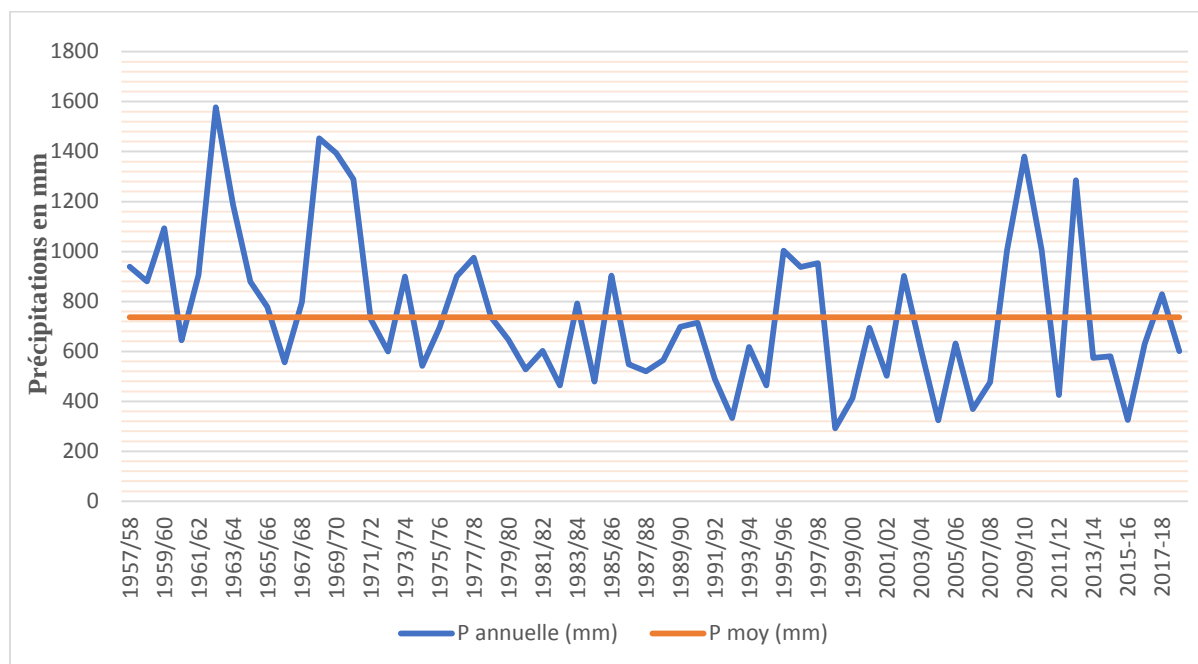


Figure 18. Variation des précipitations annuelles entre 1957 et 2018 la station de Bab Ouender (ABHS)

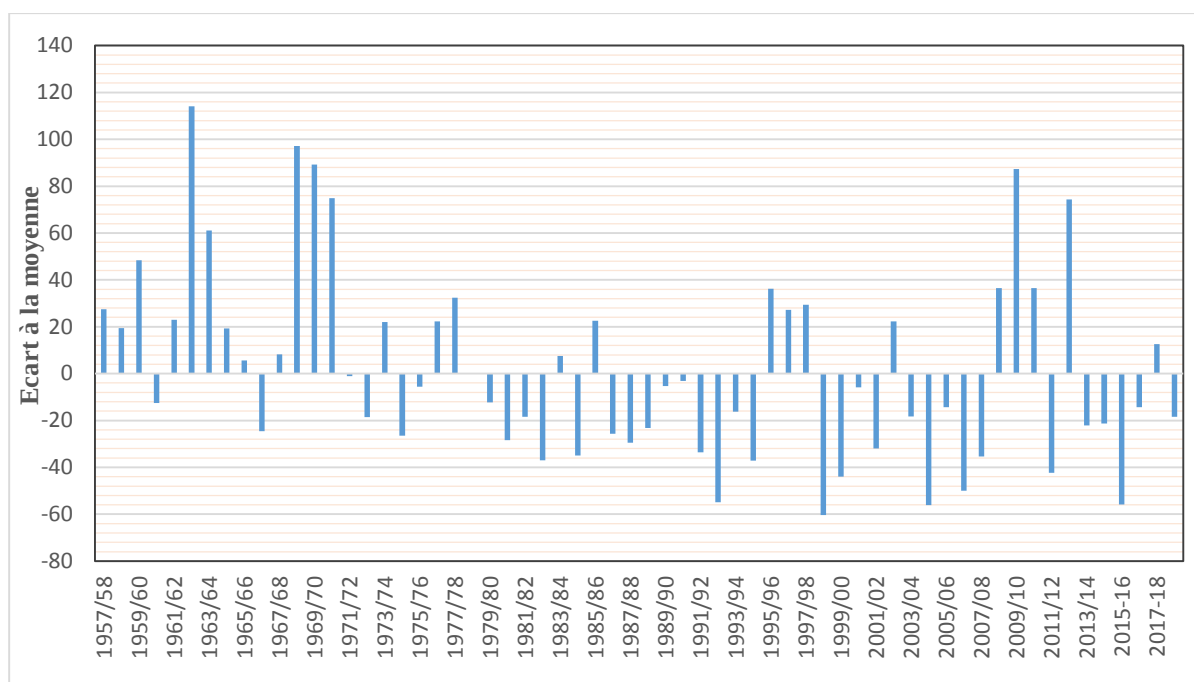


Figure 19. Écart à la moyenne des précipitations annuelles entre 1957 et 2018 pour la station Bab Ouender

2.5.1.3. Précipitation saisonnière

Le climat méditerranéen est caractérisé généralement par un hiver froid et humide et un été chaud et sec, donc les variations saisonnières des précipitations dans ce type de climat sont très nettes. Les données de la station de Bab Ouender (figure 20) montrent que le maximum des précipitations a été enregistré en hiver. Maurer, (1968) déclare que les événements pluviométriques dans le Rif sont longs, et se prolongent pendant 8 ou 15 jours durant l'hiver, avec des averses très intenses. De ce fait, la concentration des précipitations durant la saison hivernale déclenche les glissements du terrain notamment sur les versants marneux.

La zone d'étude reçoit aussi des précipitations concentrées et orageuses durant l'automne (environ 187 mm en moyen), la saison où les sols sont dénudés après une longue période sèche ce qui influence la qualité des sols.

Les périodes estivales enregistrent les minima des précipitations (14.2 mm). C'est la période de l'insolation, à l'exception des averses orageuses qui ont des impacts très importants sur les versants. Durant cette saison, les ressources en eaux sont fortement influencées, notamment durant les années sèches où les précipitations sont insuffisantes pour alimenter la nappe.

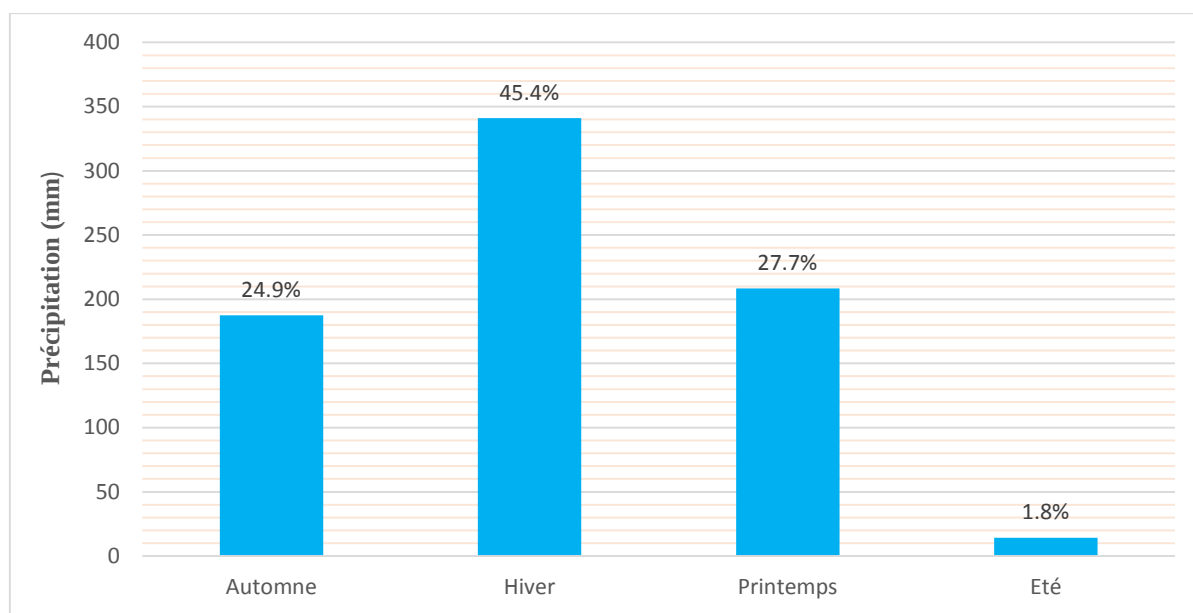


Figure 20. Variation saisonnière des précipitations (station Bab Ouender 1957-2018)

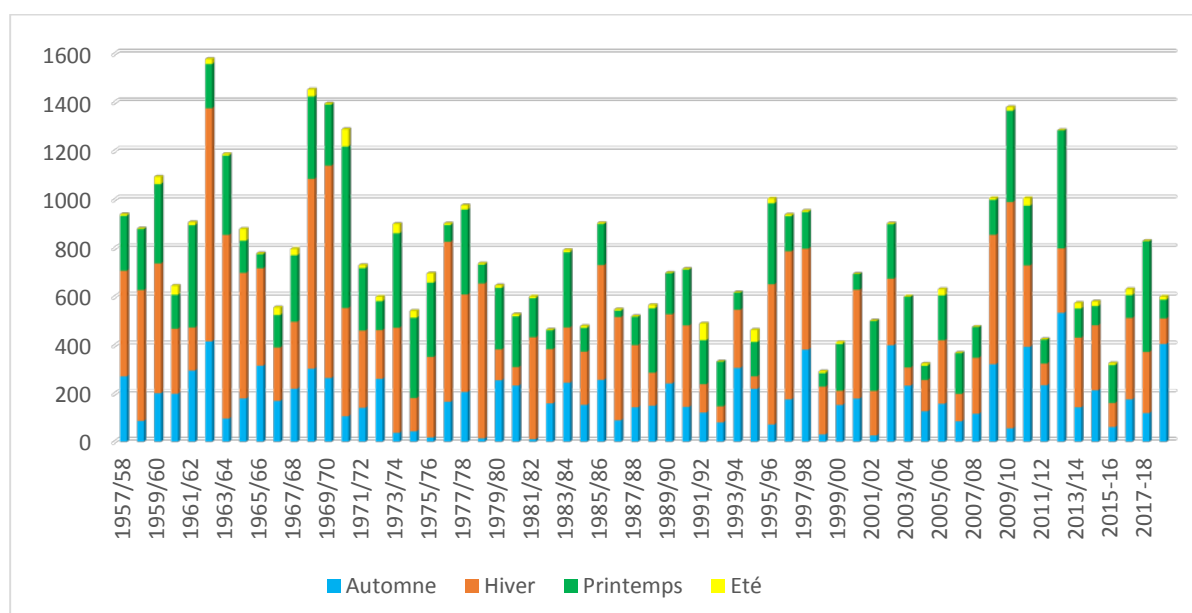


Figure 21. Variation des précipitations saisonnières d'une année à l'autre dans la station Bab Ouender (1957 – 2018)

Comme nous avons indiqué auparavant, les précipitations saisonnières dans la zone d'étude sont généralement fréquentes durant l'hiver, mais l'analyse des données climatique entre 1957 et 2018 (figure 21) à la station Bab Ouender, montre certaine variation de la répartition saisonnière des précipitations d'une année à l'autre. Cette variation saisonnière influence directement le couvert végétal et les cultures saisonnières qui dépendent des précipitations.

2.5.1.4. Variation mensuelle des précipitations

La répartition mensuelle des précipitations est caractérisée par la différenciation d'un mois à l'autre et dans le même mois d'une année à l'autre. L'analyse des données climatiques mensuelles de la station Bab Ouender, indique que la période sèche de l'année commence du mois d'avril jusqu'au le mois d'octobre. La figure 22, montre que les valeurs moyennes maximales sont enregistrées en mois de décembre 135,6 mm suivi par le mois de janvier 110,3 mm. Les valeurs moyennes minimales sont enregistrées durant les mois ; juin, juillet et août, dont les plus basses valeurs enregistrées en août 1, 9 mm.

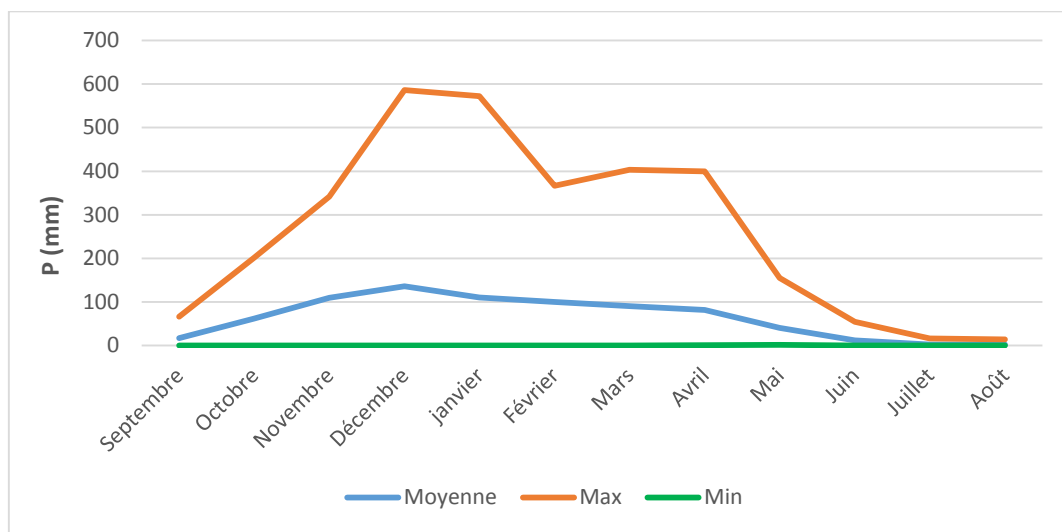


Figure 22. Moyennes mensuelles des précipitations (station Bab Ouender 1957-2018)

2.5.1.5. Tendances climatiques

Nous avons indiqué auparavant que le secteur d'étude est caractérisé par une variation remarquable des précipitations annuelles, marquée par la succession des années humides et sèches. Pour visualiser cette variabilité, nous avons appliqué deux méthodes statistiques qui sont largement utilisées par les chercheurs. La première, c'est l'indice de Nicholson et la deuxième, c'est la méthode de CUSUM.

A. L'indice pluviométrique de Nicholson

Pour diagnostiquer si une année est pluvieuse ou sèche, l'indice de Nicholson (IP) est fortement utilisé par les chercheurs. Selon cet indice, l'année est qualifiée d'excédentaire (humide) si $IP > 0$ et déficitaire (sèche) si $IP < 0$ (Ali et al., 2008). Il présente le rapport de la différence entre la

hauteur des précipitations annuelles à la station (i) et la hauteur moyenne annuelle des précipitations à l'écart type (Noufé et al., 2011). Le calcul de l'indice est exprimé par l'équation ci-dessous, proposée par Lamb, (1982) et Nicholson et al., (1988).

$$I_i = (X_i - \bar{X}) / \sigma$$

Où I_i est l'indice de pluie de l'année i ; X_i la pluviométrie de l'année i ; $\bar{X}$ la pluviométrie moyenne annuelle sur la période étudiée ; σ l'écart-type de la pluviométrie sur la période étudiée.

L'indice pluviométrique calculé à la station Bad Ouender (figure 23), indique que la série qui s'étend de 1957-2017 est caractérisée par la présence de deux grandes périodes.

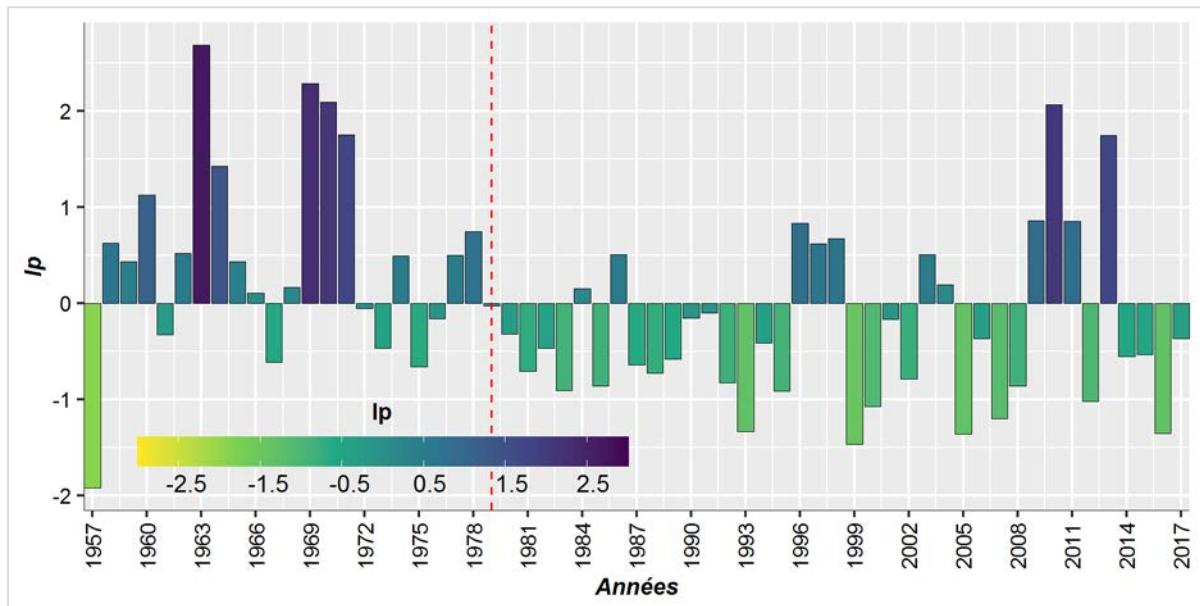


Figure 23. Indice pluviométrique de la station Bab Ouender

La première période s'étend de 1958 à 1971, correspond à une période humide avec des valeurs d'indice généralement positives. Des années extrêmement humides (1963, 1969 et 1970) se distinguent par des valeurs supérieures à 2.

La deuxième période s'étale de 1972 à 2018, elle est caractérisée par la dominance des années sèches avec des indices pluviométriques présentant de façon continue des valeurs négatives proches de -1 ou inférieures. Des années extrêmement sèches (1993, 1999, 2005, 2007, 2016 ...) enregistrent des valeurs proches de -2. Cette période se caractérise également par l'existence des courtes périodes humides notamment les périodes de 1996 à 1998 et de 2009 à 2011.

B. Méthode du CUSUM

Le CUSUM est un test statistique issue de la méthode du simple cumul (Brunet Moret, 1971 ; Lettenmaier, 1976 *in* Nejari et al., 2000), elle permet de tester l'homogénéité de la série pluviométrique des stations données (Nejjari, 2002). Ainsi elle a été utilisée pour exprimer la tendance des années humides et/ou sèches (Nejjari et al., 2000 ; Qadem, 2015). La valeur C_j est calculée pour chaque année par l'application de l'équation suivante :

$$C_j = \sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})$$

Où X_j , $\bar{X}$, et n correspondent respectivement à la pluie annuelle, la moyenne pluviométrique de la période étudiée et le nombre d'années.

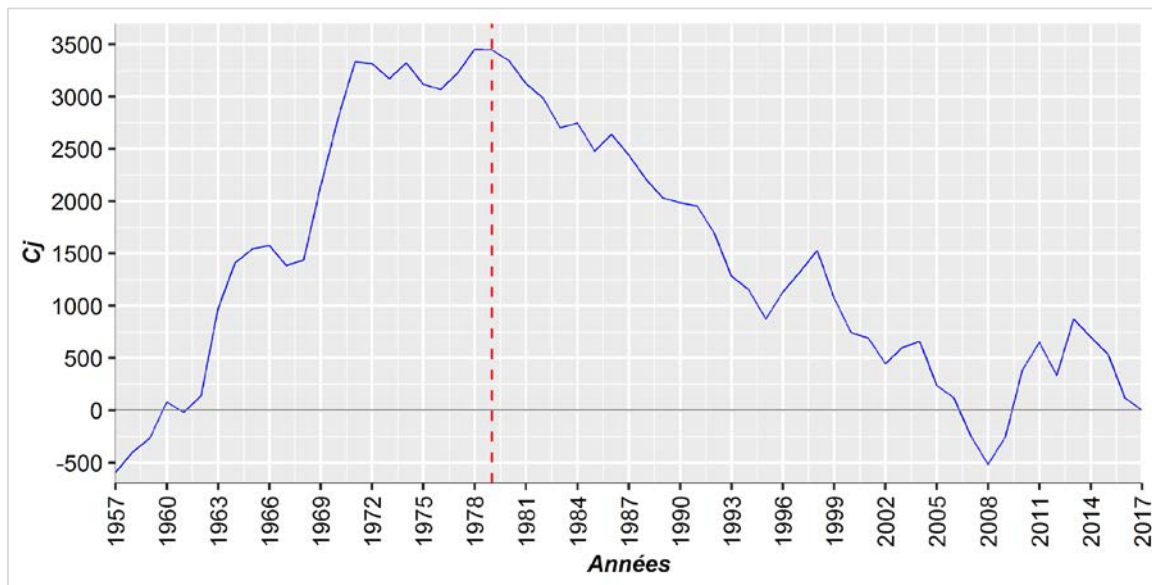


Figure 24. CUSUM de la station de Bab Ouender

Aussi, nous avons utilisé la méthode de segmentation de Hubert pour vérifier l'homogénéité de la série pluviométrique (Hubert et al., 1989).

Les résultats menés par l'application de la méthode CUSUM et de la segmentation de Hubert (figure 24 et tableau 2) indiquent une rupture dans la série à partir de l'année 1972. Relativement à la série, la période 1958/1971 est qualifiée d'humide avec un cumul pluviométrique moyen annuel de 1026.8 mm à la station de Bab Ouender. Bien que la période 1972/2017 est qualifiée sèche

avec une valeur moyenne annuelle de 673.5 mm. Donc il est bien visible que la zone d'étude connaît une tendance du climat vers la sécheresse.

Début	Fin	Moyenne	Écart type	N. années	Diagnostic
1958	2017	756	302.24	60	Série hétérogène
1958	1971	1026.8	312.23	14	Série homogène
1972	2017	673.5	248.70	46	Série homogène

Tableau 2. Résultats de la segmentation d'Hubert des précipitations annuelles de la station de Bab Ouender (1957-2017)

La zone d'étude s'inscrit dans le cadre des changements climatiques qui affectent non seulement le Maroc, mais le monde entier. Les recherches indiquent que le Maroc est influencé par les changements climatiques, qui sont manifestés par la fréquence des événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresses) (El fellah Idrissi et al., 2017), la diminution des précipitations et l'augmentation des températures (Al Karkouri, 2017). Les estimations futures pour le Maroc montrent une réduction des précipitations de 20% et une augmentation de température de 2 °C d'ici 2050 (IPCC, 2022).

La tendance du climat vers la sécheresse dans la zone d'étude durant ces dernières décennies, influence négativement les ressources en eau, le couvert végétal et a modifié largement l'occupation du sol, ce qui accentue le risque de désertification et de dégradation des milieux.

2.5.2. La température

La température influence la stabilité des sols, particulièrement sur les versants à lithologie argileuse et à faible recouvrement. Elle intervient directement dans la structuration des matériaux, en particulier pour le détachement des particules rocheuses et des formations superficielles. Donc l'analyse et le traitement des données de la température constituent un élément essentiel dans l'étude de la dynamique des milieux naturels. Vu l'absence des stations de mesures de la température dans notre zone d'étude, nous avons fait appel aux données spatialisées issues de la base de données WorldClim, version 2.1 qui est largement utilisée par les chercheurs (Mokhtari, 2016 ; Panagos et al., 2017 ; Perrin et al., 2020 ; Elnashar et al., 2022)

2.5.2.1. Spatialisation de la température annuelle

Les températures moyennes annuelles (figure 25) varient entre 8.5°C sur les crêtes nord et Sud-Est de la zone d'étude à plus de 18 °C au niveau de la plaine alluviale d'oued Ouergha (partie médiane) et au niveau des dépressions. L'analyse de la variabilité spatiale des températures moyennes montre l'influence de l'altitude sur la variation de la température.

La température annuelle maximale (figure 26) pour la période 1970-2000 montre que celle-ci varie de 14 à 24 °C (juillet). Les températures maximales les moins élevées sont situées au niveau des hautes altitudes de la partie nord et sud-est de la zone d'étude, alors que les plus hautes sont concentrées au sein de la vallée d'Ouergha où les altitudes sont faibles. La température annuelle minimale (janvier) peut descendre jusqu'à 3°C sur les crêtes montagneuses du nord et du sud-est de l'aire d'étude, qui connaissent des précipitations nivales durant l'hiver. Tandis que la température minimale atteint 13 °C dans la partie médiane (dépression de l'oued Ouergha).

D'après les figures (25,26, et 28), nous constatons que plusieurs facteurs interviennent dans la variation de la température, telles les altitudes et l'exposition des versants. La température joue un rôle très important dans la répartition du couvert végétal. Dans les parties les plus humides, on trouve un couvert végétal dense qui offre une protection forte contre l'érosion hydrique et une faible sensibilité à la désertification, par contre les parties les plus sèches et ensoleillées se caractérisent par un couvert végétal dégradé ce qui favorise l'apparition des différentes formes d'érosion et augmente la sensibilité à la désertification.

2.5. 2.2. Variation saisonnière de la température

La zone d'étude est caractérisée par une variabilité saisonnière remarquable de la température (figure 28). L'hiver enregistre les valeurs les plus basses, notamment sur les crêtes montagneuses des douars Ras Lhjar et Tamda. Généralement, la zone d'étude est marquée par un hiver froid, avec des périodes de gel durant les mois de décembre, janvier et février et des précipitations nivales sur les hautes altitudes (Jbel Erzinyia, Jbel Drinkel, Jbel Amergoub). L'été est marqué par l'augmentation de la température, durant cette saison, la zone d'étude enregistre les valeurs les plus élevées (juillet le mois le plus chaud). Les hautes températures d'été influencent les sols, ceux-ci deviennent fragiles et très sensibles aux chocs des gouttes de pluie, qui provoquent les processus d'érosion hydrique et les pertes des sols. Alors que pendant la saison d'automne, la première pluie

forme sur les surfaces qui se caractérisent par la vulnérabilité des sols, une couche imperméable (la croûte de battance) qui favorise des ruissellements importants et qui peuvent donner des formes élémentaires d'érosion. Il faut noter aussi que pendant l'été, la zone d'étude connaît une diminution remarquable des ressources en eau.

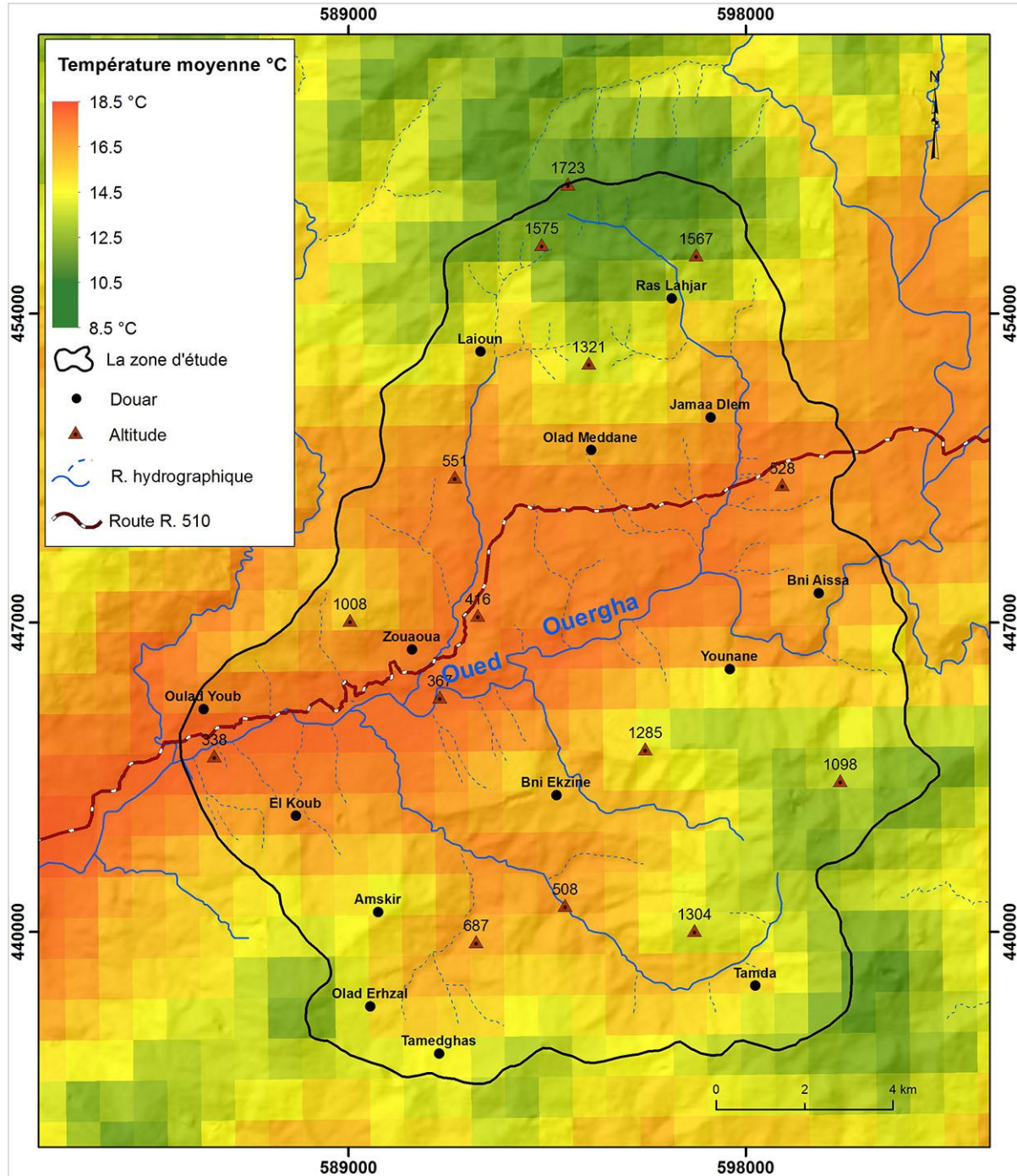


Figure 25. Température moyenne (WorldClim Database Version 2.1, 1970-2000)

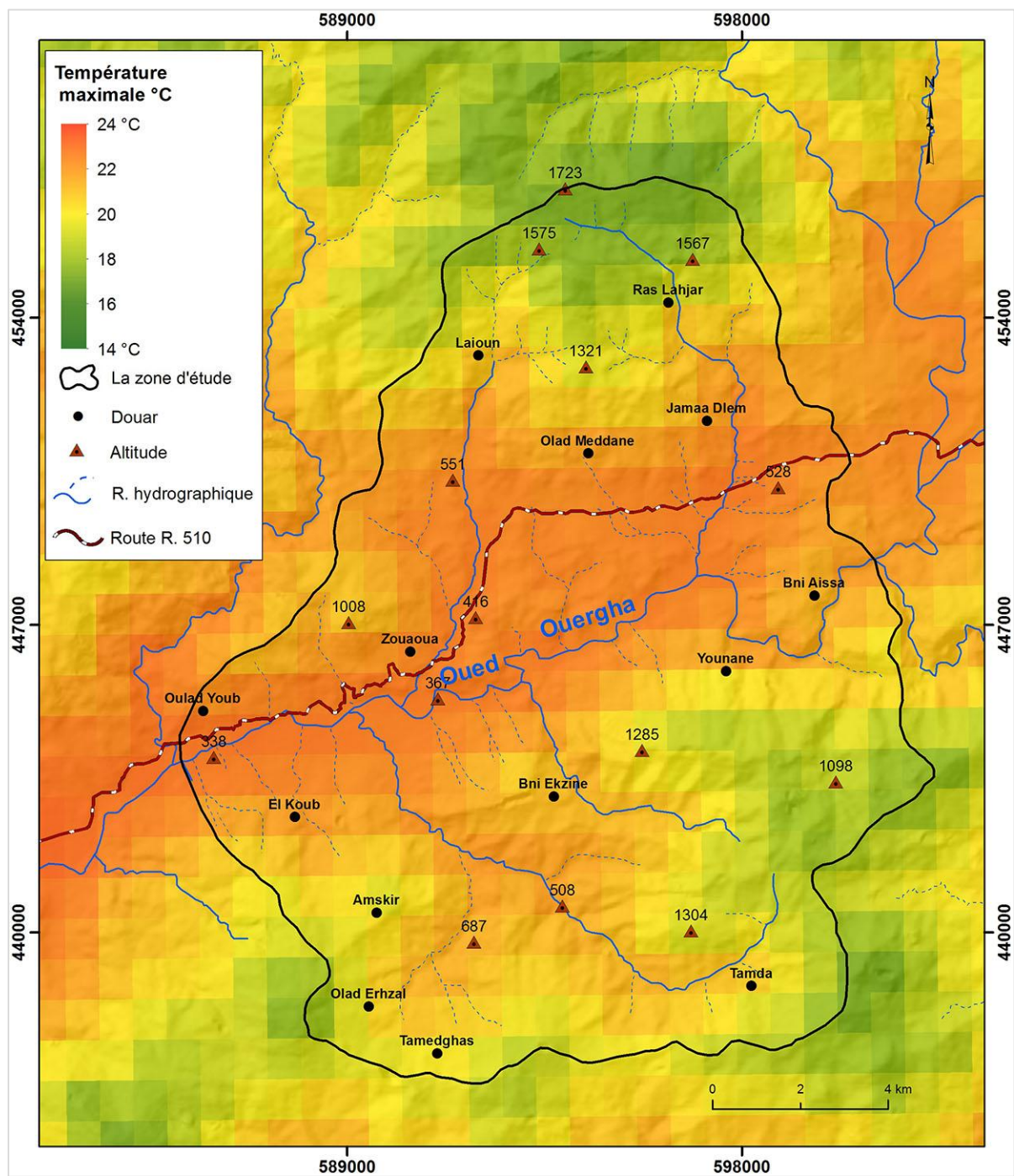


Figure 26. Température maximale en °C (WorldClim Database Version 2.1, 1970-2000)

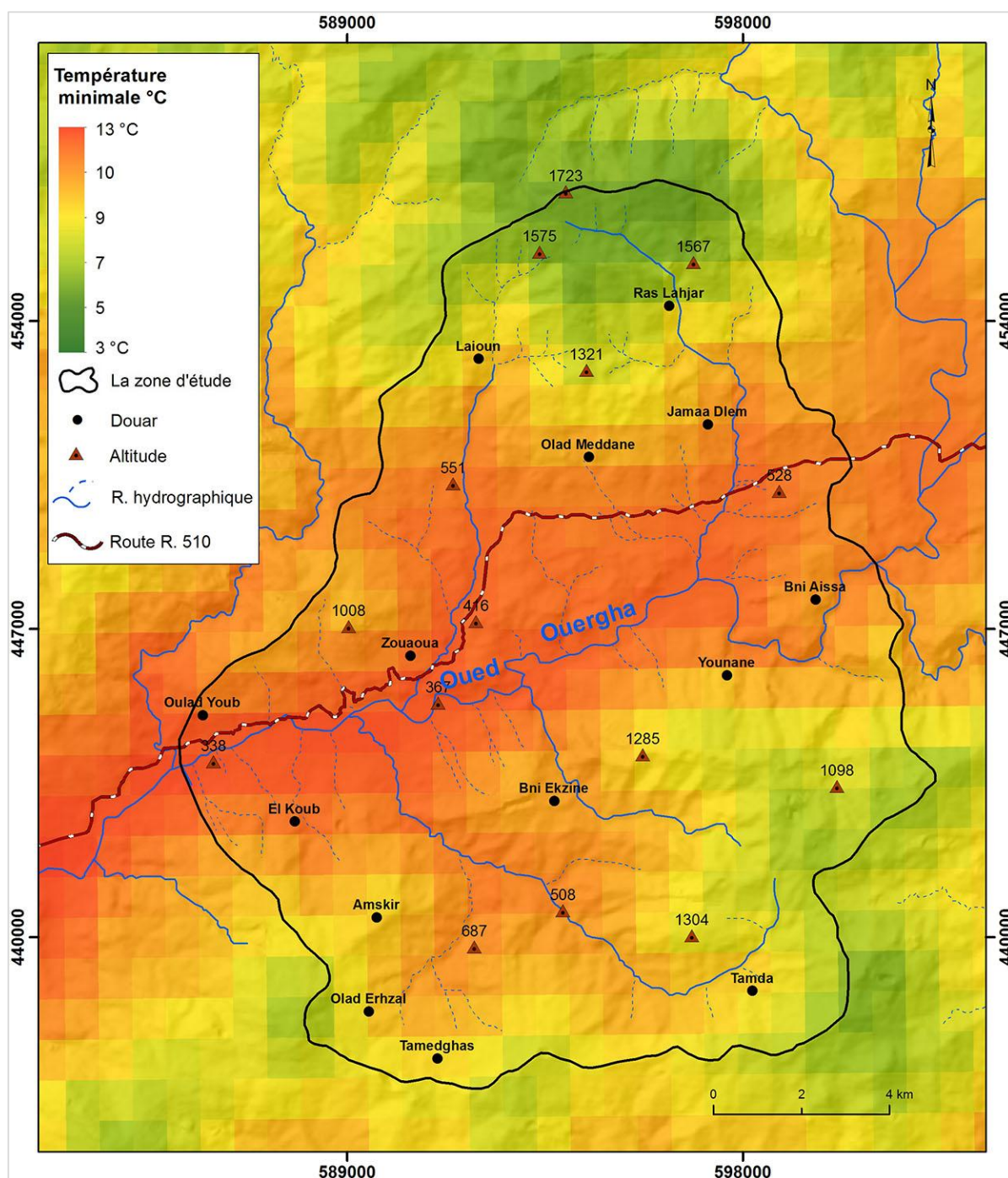


Figure 27. Température minimale en °C (WorldClim Database Version 2.1, 1970-2000)

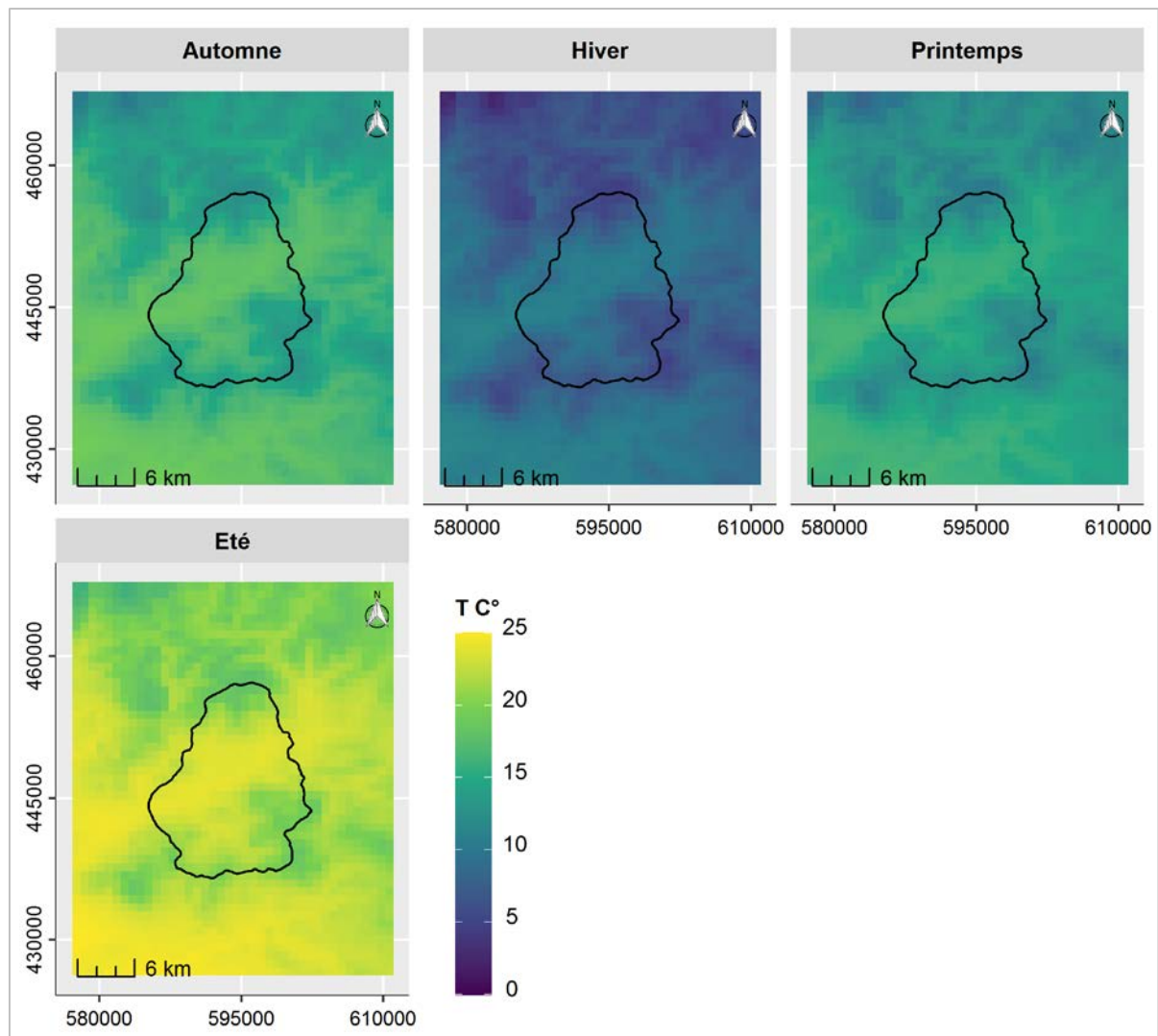


Figure 28. Température saisonnière dans la zone d'étude (WorldClim, 1970-2000)

3- Facteur anthropique

L'homme est un facteur accélérateur de l'érosion, par ces activités inadéquates (défrichement, surpâturage, incendie, construction des routes et d'ouvrages d'arts, laboure perpendiculaire aux courbes de niveau ...) rendre le sol plus vulnérable à la dégradation.

Les montagnes du Rif ont connu une occupation humaine très ancienne (Maurer, 1990 ; Tribak, 2000 *in* Morel, 2002), elles se caractérisent aussi par une densité des populations très élevée, cette densité selon Daid et Amyay, (2008), ne peut pas être expliquée uniquement par des conditions historiques. La sédentarisation ancienne des populations provoque la dégradation des milieux naturels et l'augmentation des risques des pertes de rendements, dues à la surexploitation des terres agricoles.

3.1. Densité humaine et croissance démographique

Les conditions environnementales et socio-économiques contrôlent fortement la distribution des populations dans la zone d'étude. Les figures 29 et 30 montrent la concentration de la population le long de l'oued Ouergha et le long de la route régionale 510.

La situation en hauteur des douars est très fréquente, elle est déterminée par l'existence des ressources en eau (sources). Ainsi que la localisation de l'habitat en hautes altitudes facilite le pâturage des parcours (matorral et forêts) et la surveillance de l'arboriculture (amandiers et figuiers). Durant les dernières années, ces douars ont connu une diminution remarquable des populations, soit par le déplacement vers la plaine alluviale d'Ouergha, pour s'approcher aux équipements et d'infrastructures (les écoles, transport, le souk...) soit par l'exode rural notamment vers les villes (Fès, Casablanca...). La sécheresse, la diminution des débits des sources et la baisse des rendements des terres sont les principaux facteurs de l'exode rural.

Le Haut Ouergha semble très peuplé, le nombre total des populations atteint 19162 habitants selon le recensement de 2014. Généralement, le nombre des populations a connu une baisse remarquable entre 1994 et 2014. En 1994 le nombre total des habitants dans les douars a été 21380 habitants et il est devenu 19162 en 2014.

Le taux de croissance dans le Haut Ouergha varie d'une commune à l'autre et d'un douar à l'autre (figure 34). Le taux de croissance le plus élevé est enregistré dans le douar d'Ouled Hamza, qui appartient à la commune Bni Ounjel Tafraout, avec une valeur de 4.8 entre 1994 et 2014. Suivi par douar Oued El Kasba dans la commune de Fnassa Bab El Hait avec un taux d'accroissement de 4.4. Tandis que la plus faible valeur (- 9.7) a été enregistrée dans le douar Ouelad Erhzaal qui fait partie de la commune Bni Oulid où la majorité des douars connaissent des taux de croissance négatifs entre 1994 et 2014, à l'exception de douar El Koub (2.6). Cela peut être expliqué par le déplacement de la population à partir des douars situés en hautes altitudes vers le centre rural de Beni Oulid, pour s'approcher aux équipements et aux infrastructures.

Généralement, les populations s'étendent à la baisse dans la plupart des communes en comparaison avec le taux de croissance 1994-2004. Cette régression peut être expliquée par plusieurs facteurs tels que la diminution du taux de fécondité, mais le facteur principal c'est l'exode rural.

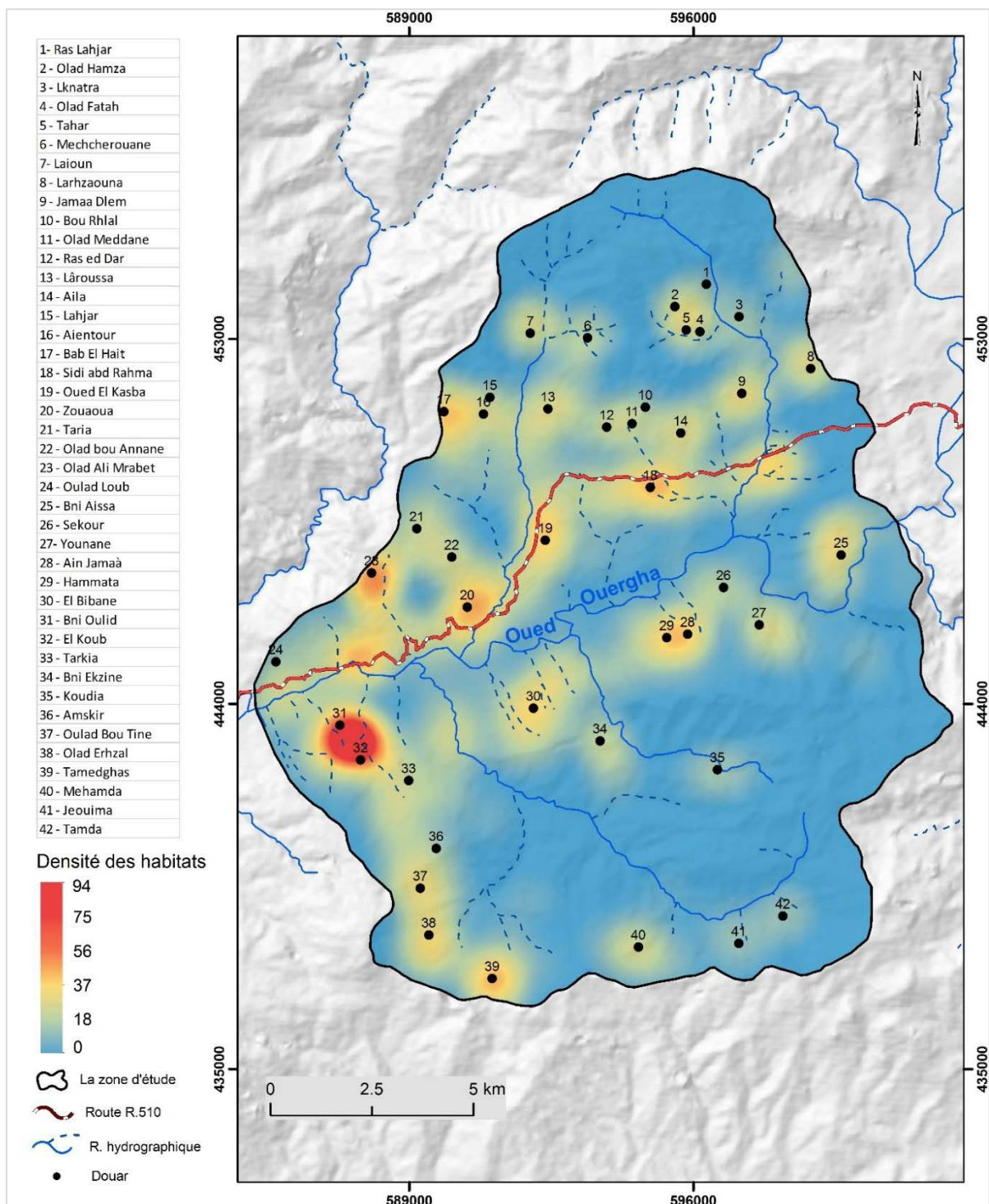


Figure 29. Répartition des habitats par densité des noyaux

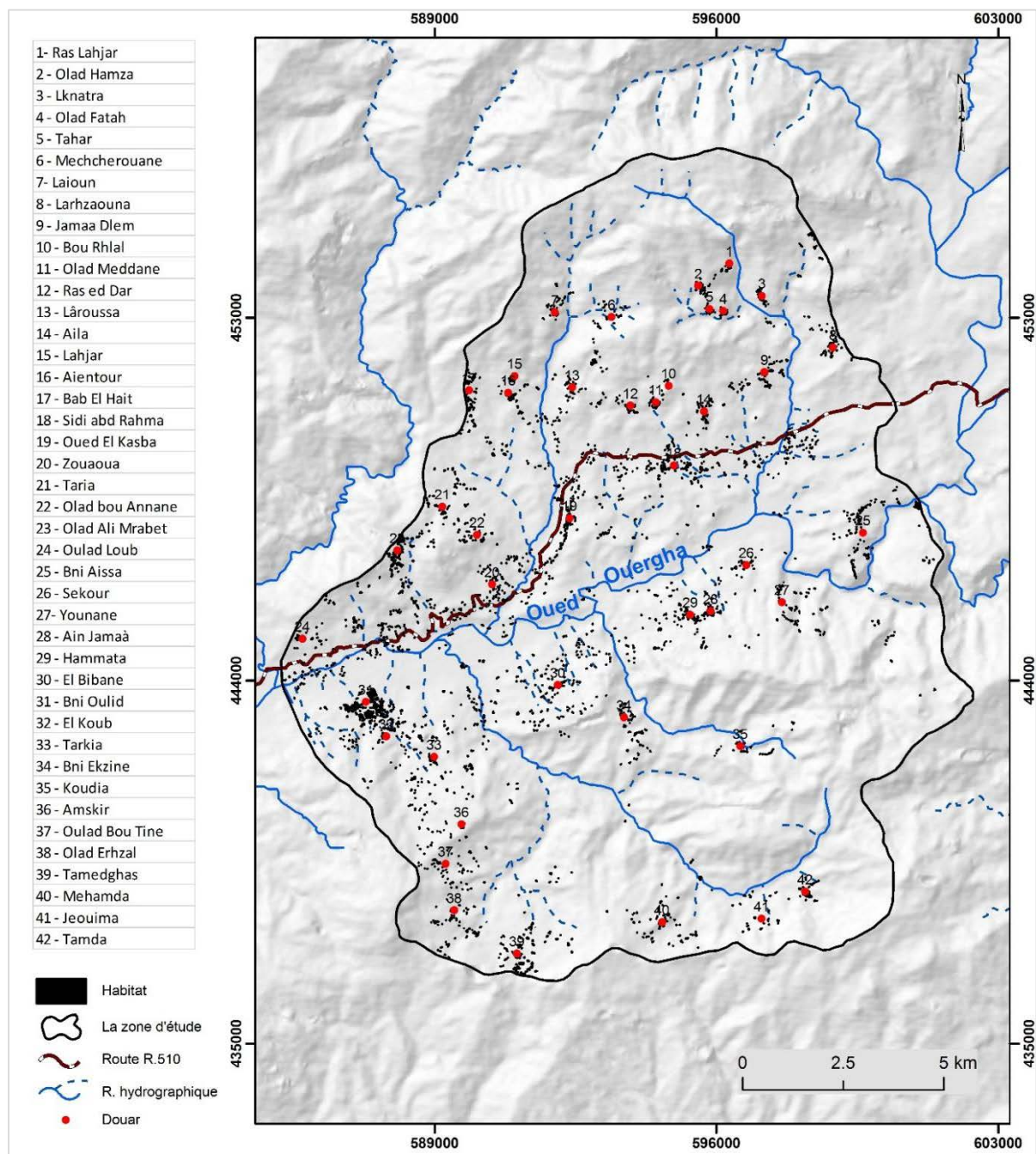


Figure 30. Répartition des habitats dans le Haut Ouergha (images Google Earth 2018)

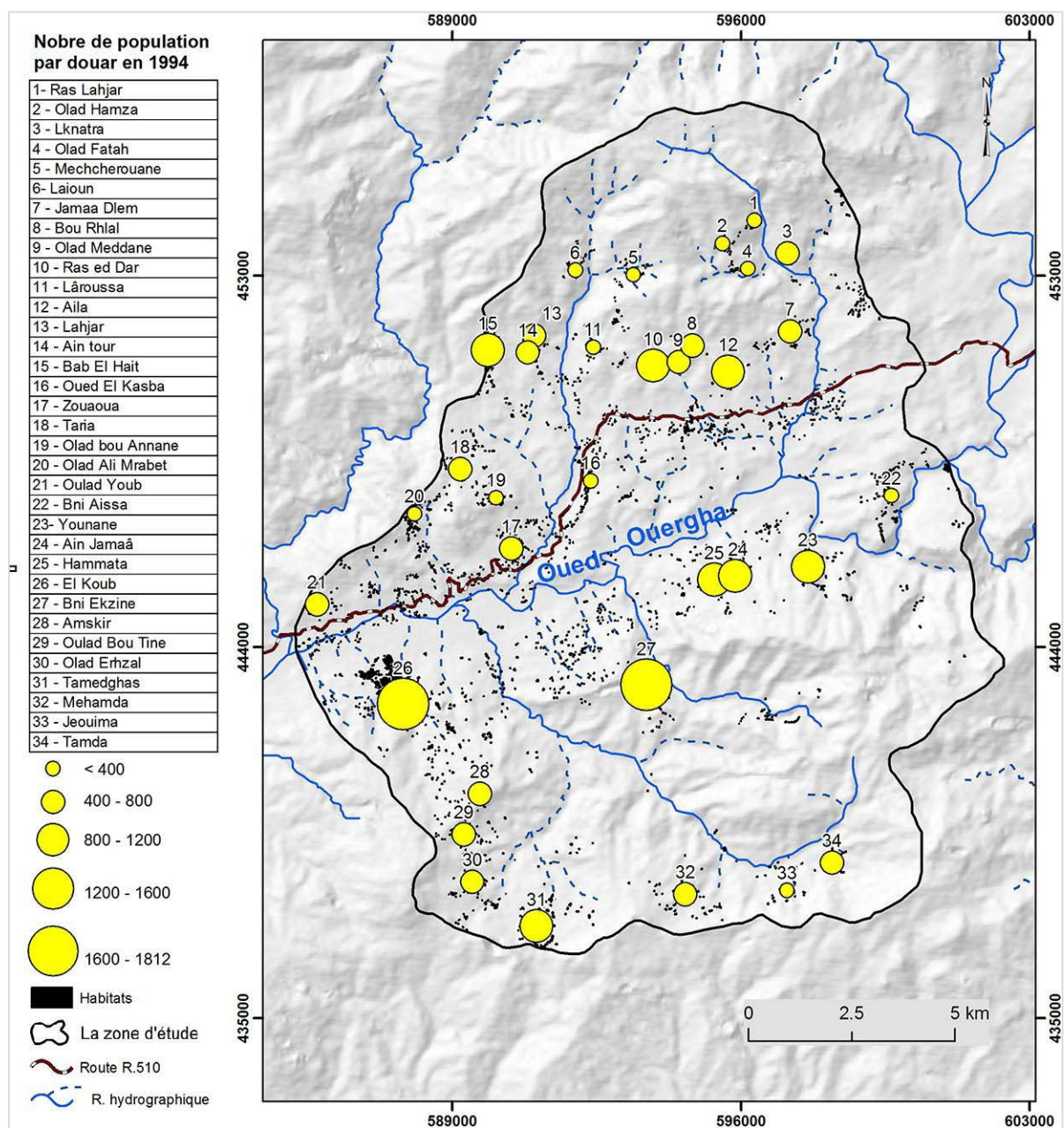


Figure 31. Nombre des populations par douars selon le recensement de 1994 (HCP)

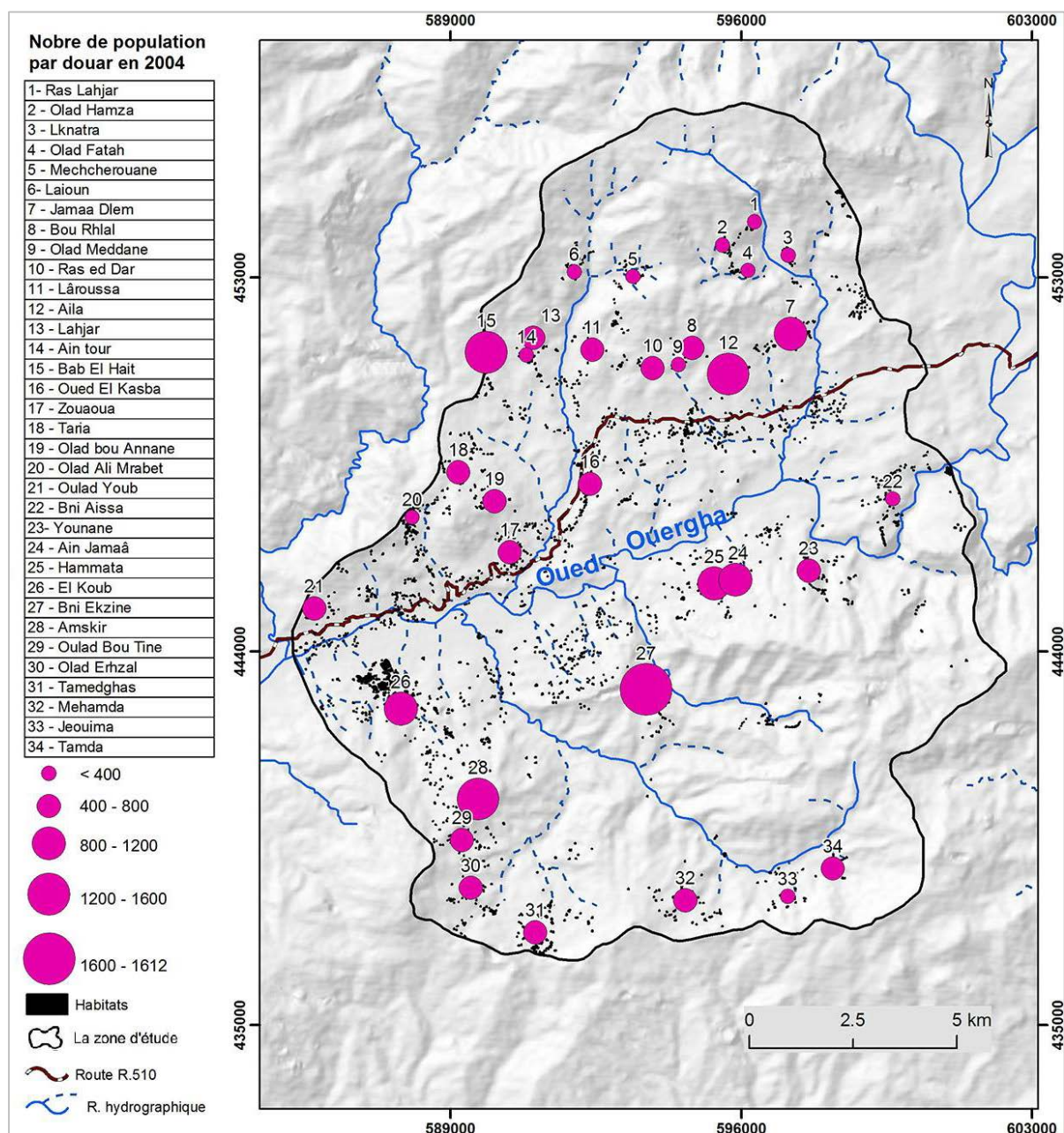


Figure 32. Nombre des populations par douars selon le recensement de 2004

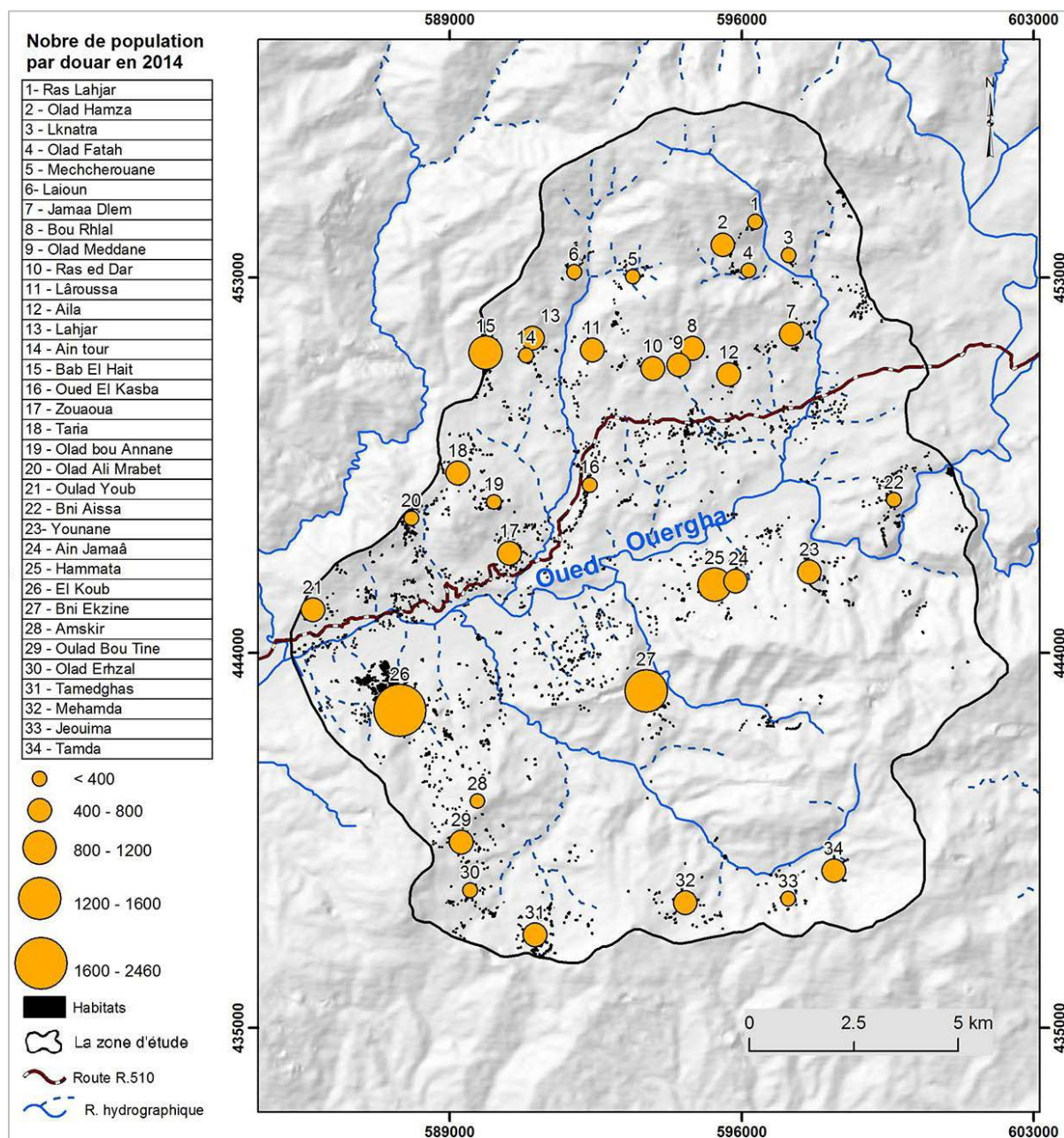


Figure 33. Nombre des populations par douars selon le recensement de 2014

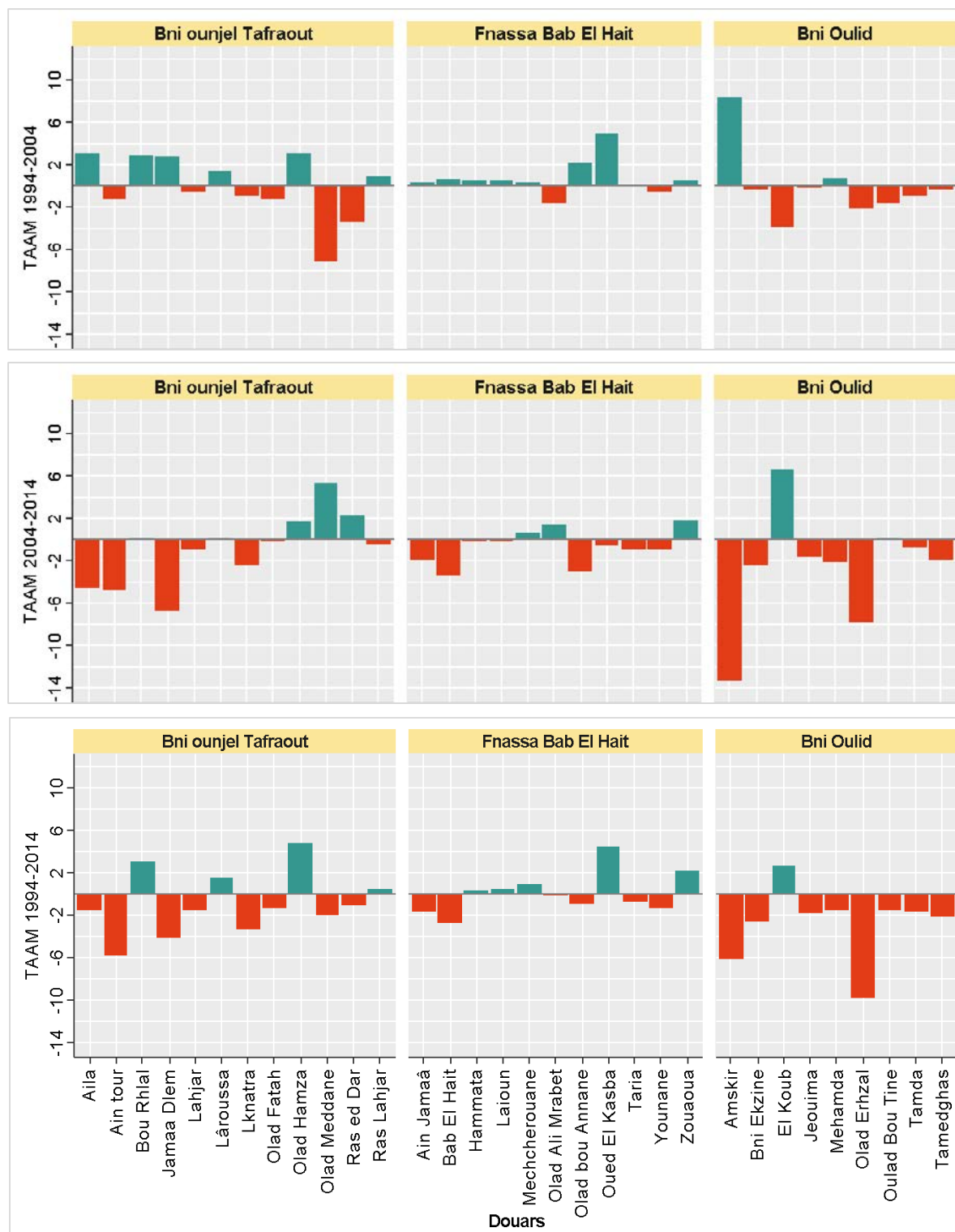


Figure 34. Taux de croissance annuel moyen (TAAM) des populations (recensements 1994, 2004 et 2014)

3.2. Occupation du sol

Le système d'occupation des sols traduit la pression humaine exercée sur les milieux, par des pratiques qui peuvent être conservatrices ou dévastatrices. La carte d'occupation du sol (figure 35)

réalisée à partir des images de Google Earth et le travail du terrain permet d'identifier sept classes d'occupation du sol dans le Haut Ouergha : les cultures sèches, les zones irriguées, les roches nues, cultures et arboricultures, arboricultures, forêts et matorrals. Les figures 35 et 36 indiquent que la zone d'étude est fortement exploitée par l'homme : les terres occupées par un mélange des cultures sèches et d'arboricultures couvrent environ 42.4% de la surface totale de la zone d'étude. Ce sont des terrains de culture saisonnière mélangés par des plantations d'oliviers, d'amandiers ou de figuiers.

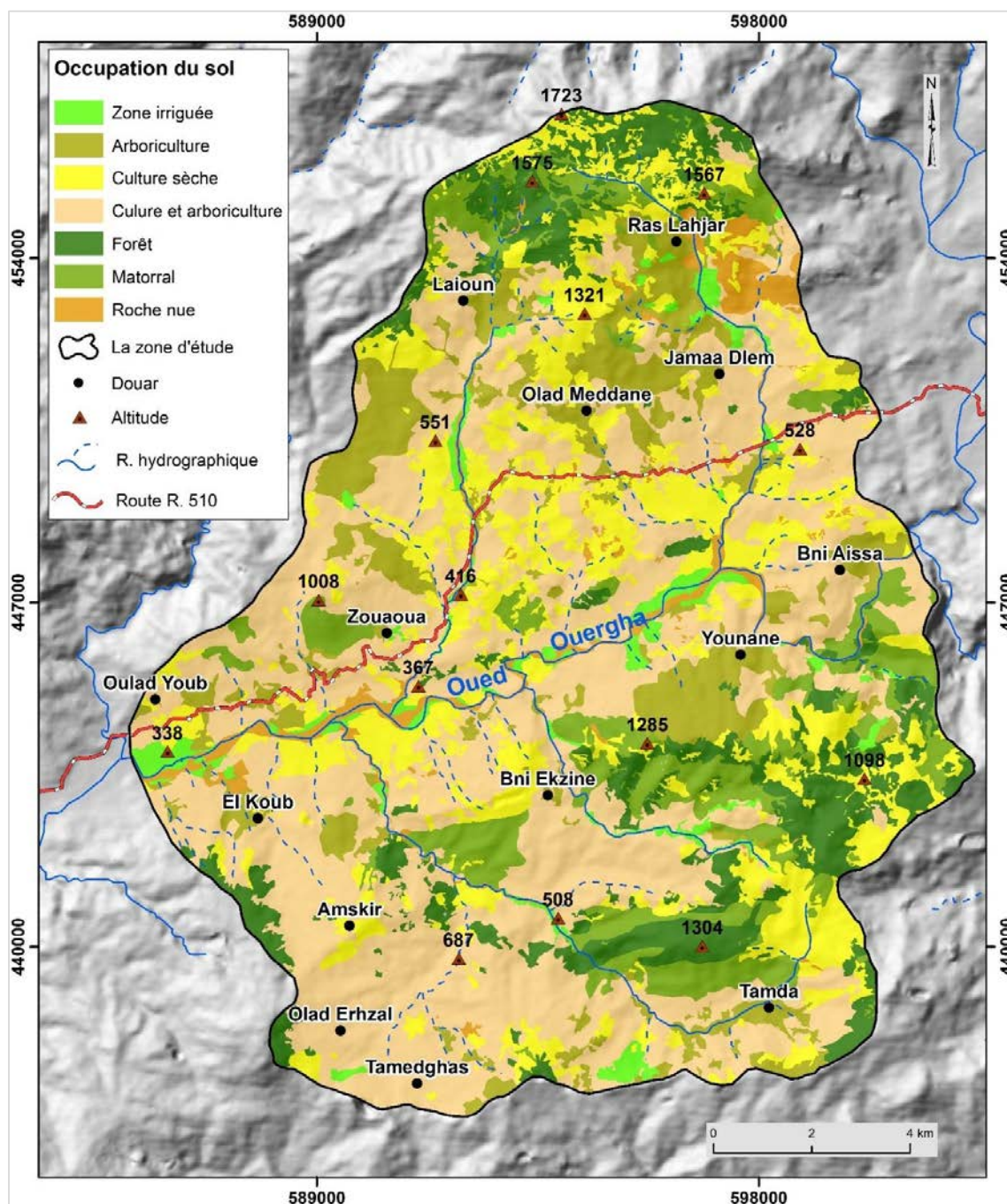


Figure 35. Types d'occupation du sol dans le Haut Ouergha (images Google Earth 2018)

Les forêts naturelles et reboisées présentent 10.7% et se localisent essentiellement dans les parties nord (forêt Jbel Erzinyia, forêt Jerf) et sud (forêt Bab Msila, forêt Jbel Souiek) de la zone d'étude. Ce sont généralement des massifs forestiers en régression à cause de l'extension des cultures de cannabis, et par l'augmentation des besoins vivriers d'une population en croissance.

Les terrains du matorral représentent environ 9.4% de la superficie totale, ils sont fortement exploités par la population locale par la coupe des branches et le pâturage.

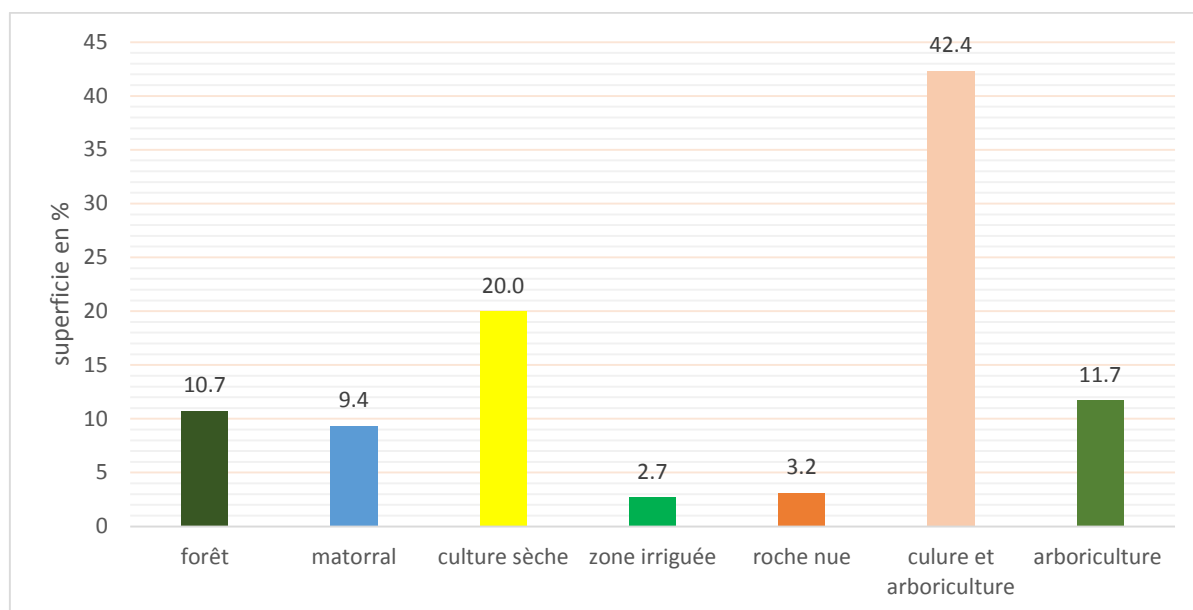


Figure 36. Répartition des types d'occupation du sol

L'arboriculture a connu une extension notable dans la zone d'étude (elle occupe environ 11.7% de la superficie), grâce à des projets réalisés par l'État (Projet de développement économique rural du Rif occidental DERRO en 1961, projet de développement rural intégré MEDA en 1999 et le programme de développement intégré de l'arboriculture fruitière en 2008). L'olivier est l'essence la plus dominante, il constitue soit des plantations pures avec ou sans aménagement, soit des plantations diffusées en mélange avec le figuier et l'amandier.

Les zones irriguées occupent une surface limitée environ 2.7 % de superficie totale de la zone d'étude. Elles sont localisées essentiellement à proximité de l'oued Ouergha et ses affluents (oued Chouaoula, oued Temda, oued Boumlal, ...) et à proximité des sources. Elles sont réservées pour la culture des légumes et de cannabis, ce dernier a connu une extension remarquable dans la zone d'étude.

3.3. La dynamique d'occupation des sols dans la zone d'étude

Vu que la zone d'étude est caractérisée par la complexité des reliefs, le problème de l'ombrage se pose dans le traitement des images pour la totalité de la zone d'étude, ce qui influence les résultats. Pour cette raison, nous avons travaillé sur des exemples typiques de la dynamique d'occupation du sol (les surfaces irriguées et les massifs forestiers), afin de bien illustrer l'évolution des milieux.

La démarche méthodologique adoptée est basée sur le traitement des images satellites multi dates (Landsat 5 et Landsat 8) et le travail de terrain. En effet, nous avons choisi trois dates (1985, 2000 et 2018) pour montrer la variation spatiotemporelle des surfaces irriguées et des massifs forestiers.

La classification des images satellites a été précédée par un prétraitement radiométrique (pour améliorer la qualité des images) et géométrique (pour garantir la superposition des cartes). La classification supervisée appliquée aux images Landsat TM et OLI nous a permis d'identifier la dynamique de chaque type d'occupation du sol. La vérification des résultats obtenus a été faite à partir des images Google Earth et les visites de terrain.

3.3.1. La dynamique des forêts

Le paysage forestier du Haut Ouergha a connu au cours des dernières décennies des transformations remarquables, caractérisées par la régression progressive des massifs forestiers et l'extension continue du cannabis. Pour illustrer cette dynamique, nous avons choisi un cas typique qui a connu des changements importants. Il s'agit de la forêt de jbel Erzinyia située dans la partie nord de la zone d'étude.

Les massifs forestiers de jbel Erzinyia ont connu un recul alarmant (photo 4), dû essentiellement à l'évolution des surfaces du cannabis. Cette dernière a connu une extension remarquable dans le Rif central depuis les années 1970, lorsque les cultivateurs ont commencé à transformer le cannabis en haschisch pour l'exportation (Afsahi et Khalid, 2014). Cela est justifié par l'augmentation de la demande européenne en haschisch, qui s'est déclarée au cours des années 1960 et surtout, 1970 (Chouvy, 2018). Avant cette période, la culture de cannabis a été limitée est destinée principalement à la consommation locale. Mouliéras, (1899) dans son ouvrage « le Maroc inconnu » indique que « *les habitants de Bni-Ouandjel sont tous grands fumeurs de Kif, mangeurs de haschisch* ».

Les rendements importants de cette culture notamment par l'extraction de Hachich empêchent les paysannes d'agrandir leurs champs, en exploitant les versants pentus et les lits des oueds, et vu l'augmentation des besoins en terre de culture et la rareté des terrains fertiles, les populations locales commencent le défrichement des massifs forestiers de chênes verts, qui constitue la réserve foncière. Le traitement des images satellites Landsat 5 des années 1985 et 2000 (figures 38 et 39) montre que la forêt de jbel Erzinyia a perdu environ 76 hectares de la superficie, avec un pourcentage de 18.5 entre 1985 et 2000, en parallèle, une extension remarquable de la cannabiculture.

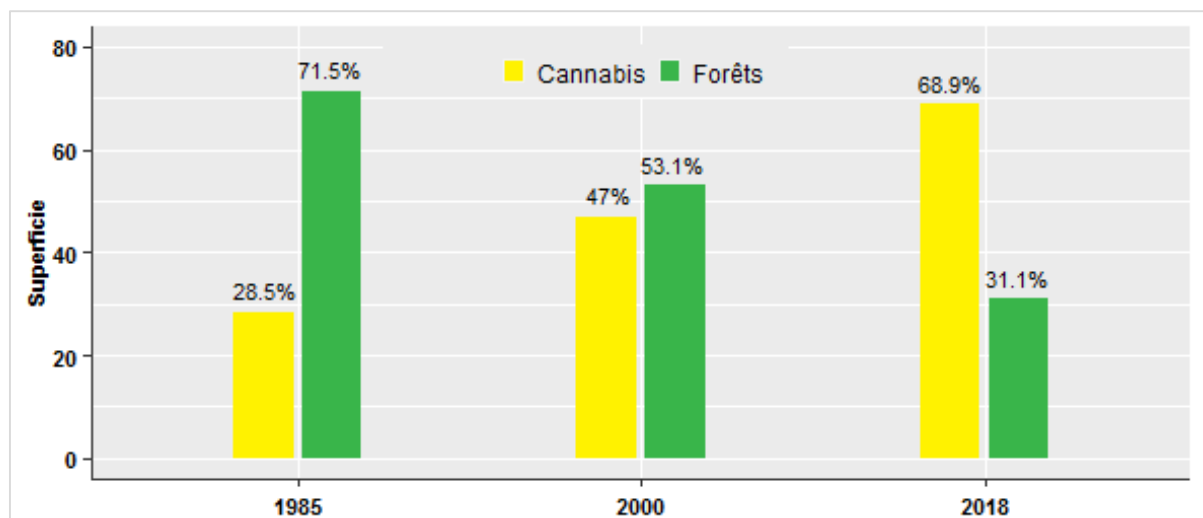


Figure 37. La dynamique de la forêt jbel Erzinyia entre 1985 et 2018

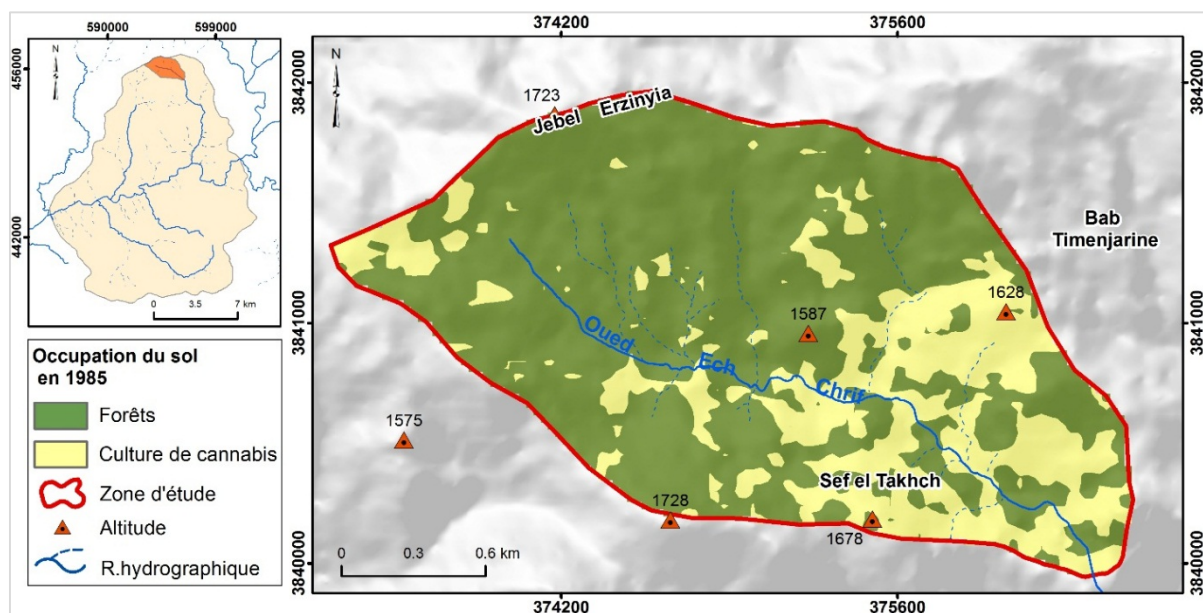


Figure 38. Occupation du sol en 1985 (image satellite Landsat 5, 04/12/1985)

Vers la fin des années quatre-vingt-dix, le cannabis devient la culture principale (monoculture) pour les paysans, qui représente pour eux une source rapide de rendement et de rente (Grovel, 1996).

Cela favorise l'accélération du rythme de défrichement des forêts. Entre 2000 et 2018, la zone d'étude a perdu une superficie d'environ 90 hectares (figures 37, 39 et 40). Généralement, le recul des massifs forestiers de jbel Erzinyia entre 1985 et 2018 est estimé par une superficie de 166 hectares.

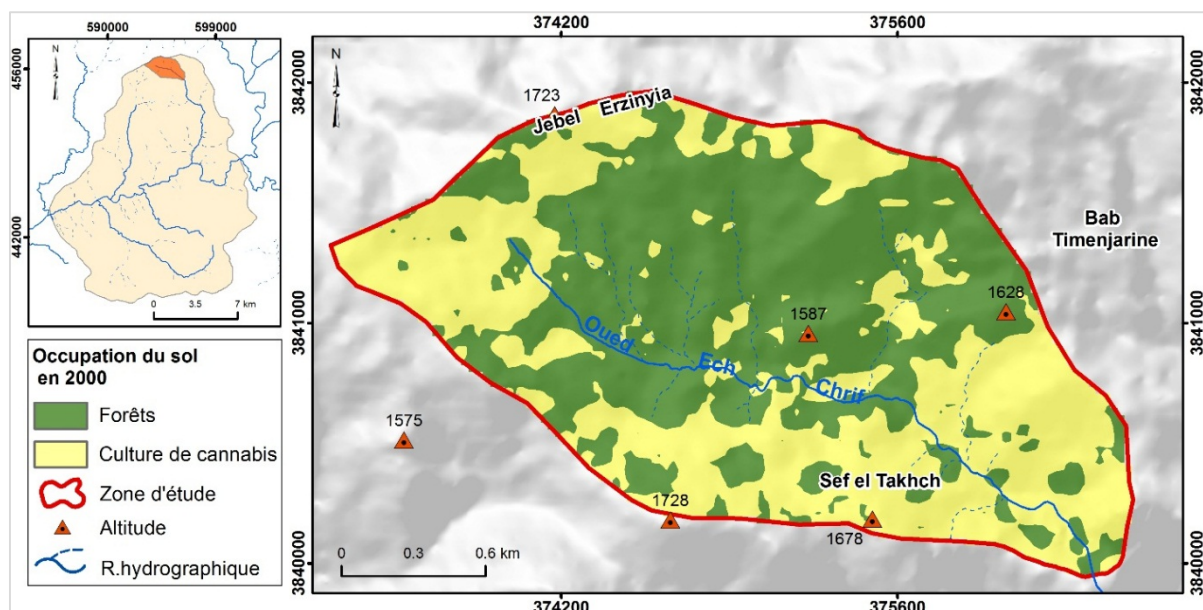


Figure 39. Occupation du sol en 2000 (image satellite Landsat 5,13/12/2000)

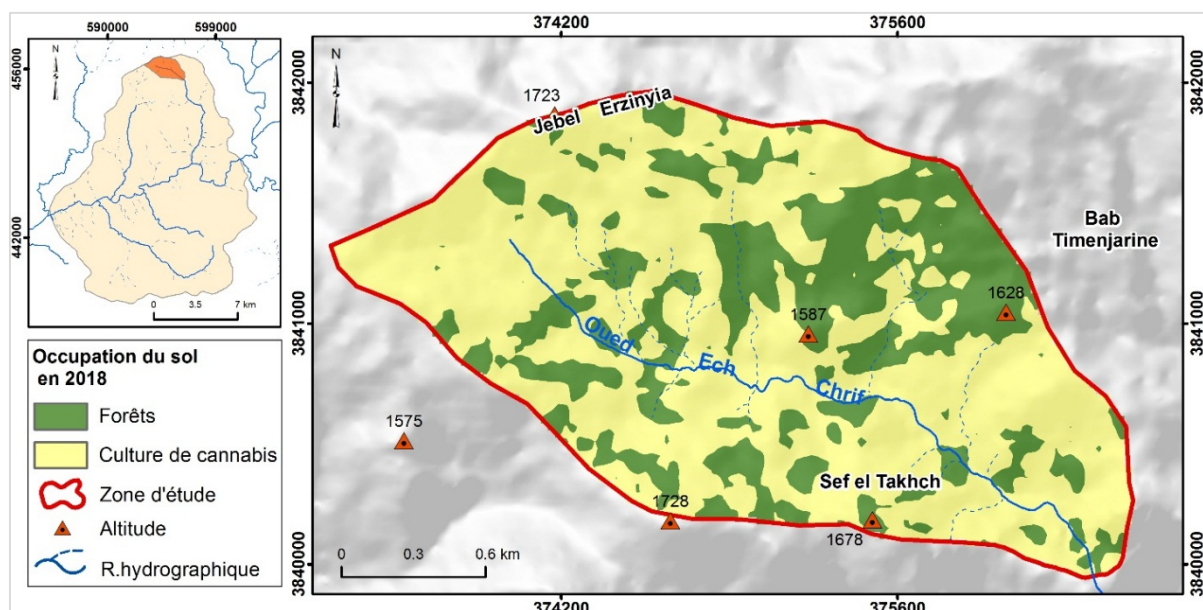


Figure 40. Occupation du sol en 2018 (image satellite Landsat 8, 15/12/2018)



Photo 4. Défrichement de la forêt de jbel Erzinyia, situation 2019

Bien que la culture de cannabis soit la responsable principale de recul des espaces forestiers, il existe d'autres pratiques qui complètent ce processus de déforestation : les besoins croissants en bois de feu, bois de construction, branchages pour les troupeaux, terrains de parcours... (Benabid, 1984), qui participent à la dégradation des forêts. Ainsi, les défrichements permettent à la fois d'étendre la cannabiculture et de satisfaire les besoins des populations locales.

Le recule alarmant des massifs forestiers dans la zone d'étude, accentue l'érosion hydrique notamment sur les fortes pentes et influence la qualité et la quantité des sols. Ainsi il augmente la sensibilité des milieux à la désertification.

3.3.2. La dynamique des surfaces irriguées dans la plaine alluviale de l'oued Ouergha

La plaine alluviale d'oued Ouergha a connu une extension remarquable des surfaces irriguées, cela est lié principalement à la construction du barrage Asfalou en 2000, sur oued Asfalou, (affluent de l'oued Ouargha) situé à l'est de la zone d'étude. Le lâchement du barrage alimente oued Ouergha durant l'été et permet un écoulement permanent, ce qui favorise l'irrigation des surfaces agricoles.

Avant la construction du barrage, les surfaces irriguées ont été très limitées (figure 41), et localisées dans la partie Est de la plaine alluviale d'Ouergha. Après l'année 2000 la zone a enregistré une extension remarquable des surfaces irriguées (figure 43), due à l'entrée de la cannabiculture. Les rendements importants de cette culture et le lâchement du barrage Asfalou encouragent les paysans à chercher d'autres terrains de culture.



Photo 5. Extension de la cannabiculture dans la plaine alluviale d'oued Ouergha

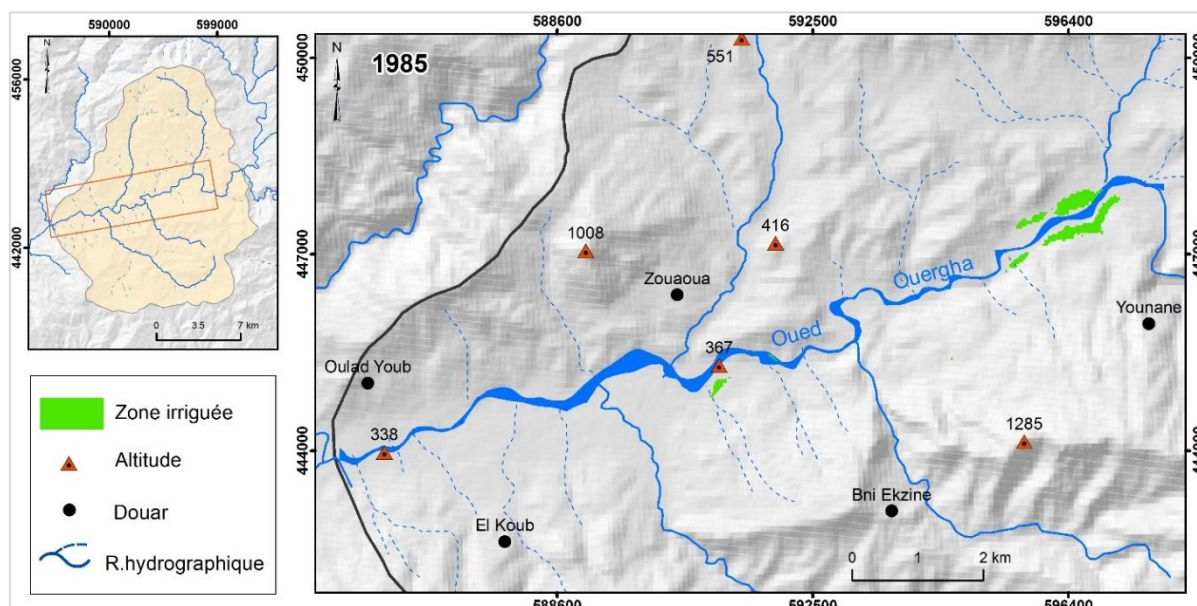


Figure 41. L'extension des zones irriguées dans la plaine d'Ouergha en 1985 (image satellite Landsat 5, 14/08/1985)

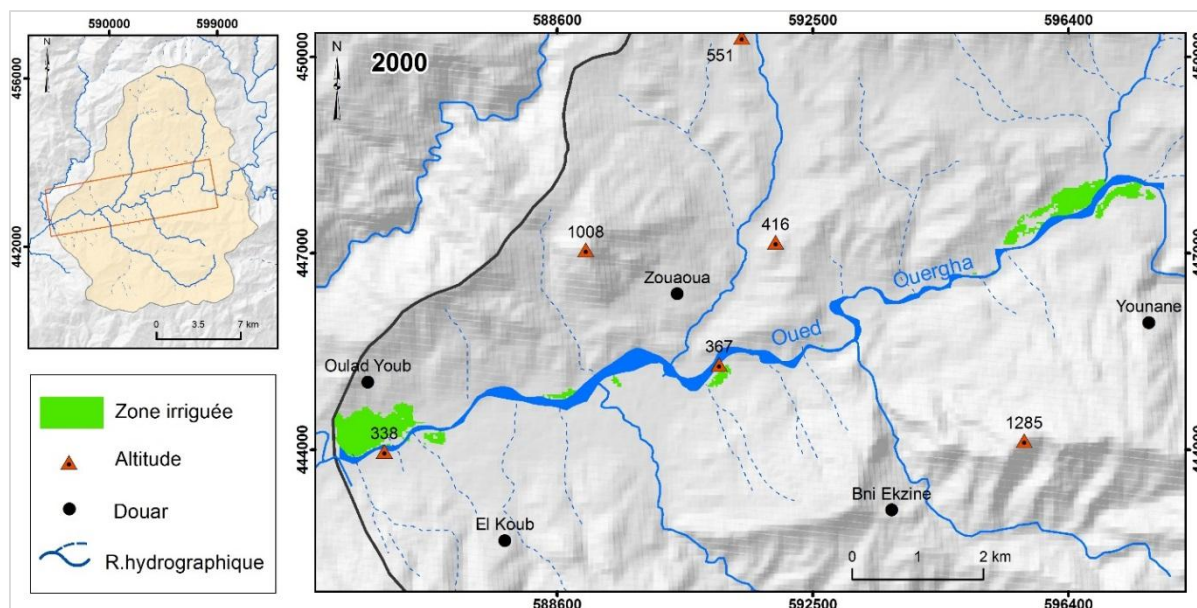


Figure 42. L'extension des zones irriguées dans la plaine d'Ouergha en 2000 (image satellite Landsat 5, 07/08/2000)

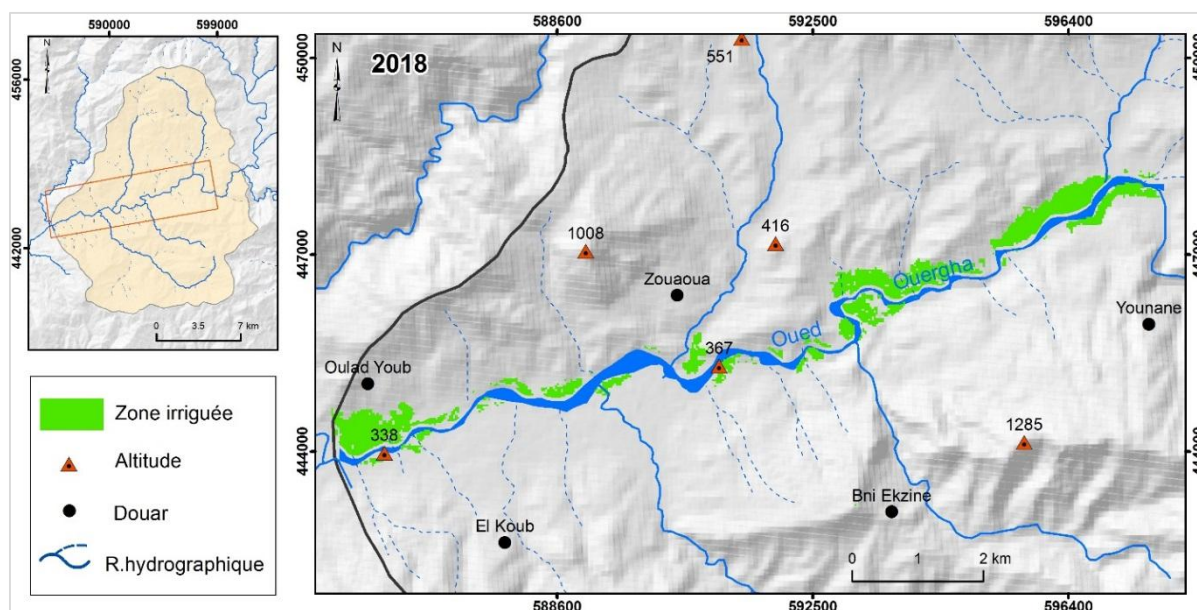


Figure 43. L'extension des zones irriguées dans la plaine d'Ouergha en 2018 (image satellite Landsat 8, 09/08/2018)



Photos 6 et 7. L'utilisation des motopompes en gaze pour l'irrigation du cannabis.

Auparavant, la cannabiculture était limitée dans les hautes altitudes, isolées et mal contrôlées par l'État, sous l'effet de la complexité des reliefs. Durant ces dernières années, le cannabis est cultivé dans la plaine alluviale d'Ouergha, et provoque la pression sur les ressources en eau notamment que cette culture est très consommatrice de l'eau.

Les rendements importants de la cannabiculture permettent l'introduction des motopompes (photos 6 et 7). Ces derniers participent à l'extension des surfaces irriguées, vers les champs lointains d'oued Ouergha. Par conséquent, ils provoquent une forte pression sur les ressources en eau et contribuent à la diminution du débit de l'oued à l'aval.

Conclusion

Les facteurs intervenant dans l'explication de la dynamique des milieux dans le Haut Ouergha sont variés. L'analyse de ces facteurs montre une sensibilité intrinsèque de la zone d'étude à la dégradation, qui tient surtout à :

La dominance des formations lithologiques tendres et imperméables sur des pentes généralement fortes à très fortes, facilite l'arrachement et le déplacement des quantités considérables des matériaux, dans un temps court.

Un climat semi-aride, marqué par la brutalité des précipitations et leurs concentrations spatiotemporelles, ce qui déclenche la dynamique des versants. Ainsi les variations saisonnières et interannuelles des précipitations, sont nettement marquées, avec une tendance vers la sécheresse durant ces dernières années. Ce qui influence les ressources en eau, la qualité des sols et de la végétation et augmente la sensibilité à la désertification.

Le cadre humain est caractérisé par une densité remarquable des populations, ce qui provoque une forte pression sur les ressources et accentue la fragilité du milieu, par le défrichement, la dégradation du couvert végétal et la mise en culture des terrains en fortes pentes.

L'interaction des facteurs physique et humain dans la zone d'étude engendre une dynamique remarquable, marquée par le recul alarmant des massifs forestiers et l'extension de la cannabiculture et des surfaces irriguées.

CHAPITRE 2

SUIVI ET SPATIALISATION DE LA DYNAMIQUE DES VERSANTS DANS LE HAUT OUERGHA

Introduction

Le Haut Ouergha se caractérise par une forte dynamique de l'érosion hydrique, en raison des fortes pentes, l'absence ou l'insuffisance du couvert végétal, la prédominance des formations lithologiques tendres, la brutalité et la concentration spatiotemporelle des précipitations et la surexploitation des versants par les activités anthropiques inadéquates. Ces facteurs contribuent à l'évolution des différentes formes d'érosion hydrique (l'érosion en nappe, le ravinement, le ravinement généralisé, les glissements, les éboulements rocheux...).

L'érosion en ravin présente un signe important de la dégradation des terres (Poesen et al., 2003), elle produit des quantités importantes des sédiments et contribue à la réduction des surfaces agricoles, ainsi elle menace les infrastructures et les retenues des barrages. Le suivi de l'évolution des ravins durant des périodes différentes et des sites dans plusieurs endroits de la zone d'étude, semble très important dans l'étude de l'érosion hydrique.

Ce chapitre vise d'une part la spatialisation des différentes formes d'érosion à partir des images de Google Earth et des observations directes sur terrain. D'autre part, la compréhension des processus intervenant dans la dynamique et l'évolution des ravins dans la zone d'étude et d'évaluer le rythme de cette dynamique.

I- La spatialisation des formes d'érosion dans le Haut Ouergha

Le Haut Ouergha est marqué par une dynamique érosive intense, dont les modalités sont très variées. La répartition des formes d'érosions varie d'un secteur à l'autre, selon la résistance des terrains, la nature des pentes et leurs expositions, la densité du couvert végétal et la nature des activités anthropiques.

La détermination des formes d'érosion n'est pas une opération facile, car elle dépend de la connaissance scientifique d'une part, et de la connaissance du terrain d'autre part. Pour la réalisation de la carte des formes d'érosion dans le Haut Ouergha, nous avons utilisé les images de Google Earth à haute résolution spatiale et le travail du terrain. La carte (figure 44) permet de spatialiser les formes d'érosion dans la zone d'étude et de déterminer les zones les plus affectées par l'érosion hydrique.

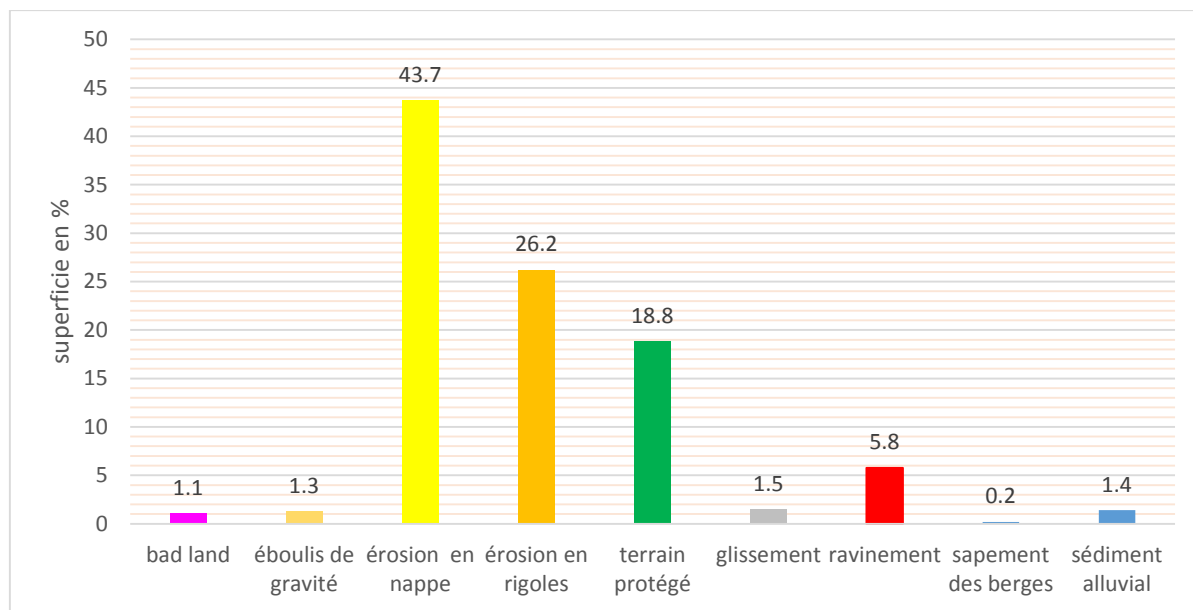


Figure 44. Répartition des formes d'érosion dans la zone d'étude

Les figures 44 et 45 indiquent que l'érosion en nappe est développée partout, elle couvre environ 43 % de la zone d'étude. Cette forme de dégradation menace directement la productivité des terres. Tandis que les bad lands, qui représentent le stade ultime de la dégradation des terres, couvrent environ 1.1 % de la superficie totale de l'aire d'étude, elles sont bien présentées dans la partie médiane (douar Aila, Oulad Meddane, Bni Aissa), et au niveau des douars Amskir et Oulad Erhzal (partie sud-ouest de la zone d'étude), suite à l'existence des formations marneuses.

L'érosion linéaire (rigoles, griffes et ravinements) couvre environ 32 % de la superficie de la zone d'étude, elle se développe sur les terrains imperméables (marnes, flyschs...) et sur les versants pentus mal protégés par le couvert végétal. Le sapement des berges représente une superficie très limitée (0.2 %) et affecte les berges friables d'oued Ouergha et ses affluents.

Les zones où l'érosion non apparente ou très faible couvre environ 18.8 % de la superficie de l'aire d'étude, elles se localisent sur les versants d'exposition nord ou nord-ouest des hauts massifs où la végétation est relativement dense et joue encore son rôle protecteur. Aussi, ces zones correspondent aux terrains irrigués situés le long d'oued Ouergha et ses affluents qui se caractérisent par des pentes faibles et par la présence des aménagements de lutte anti érosifs.

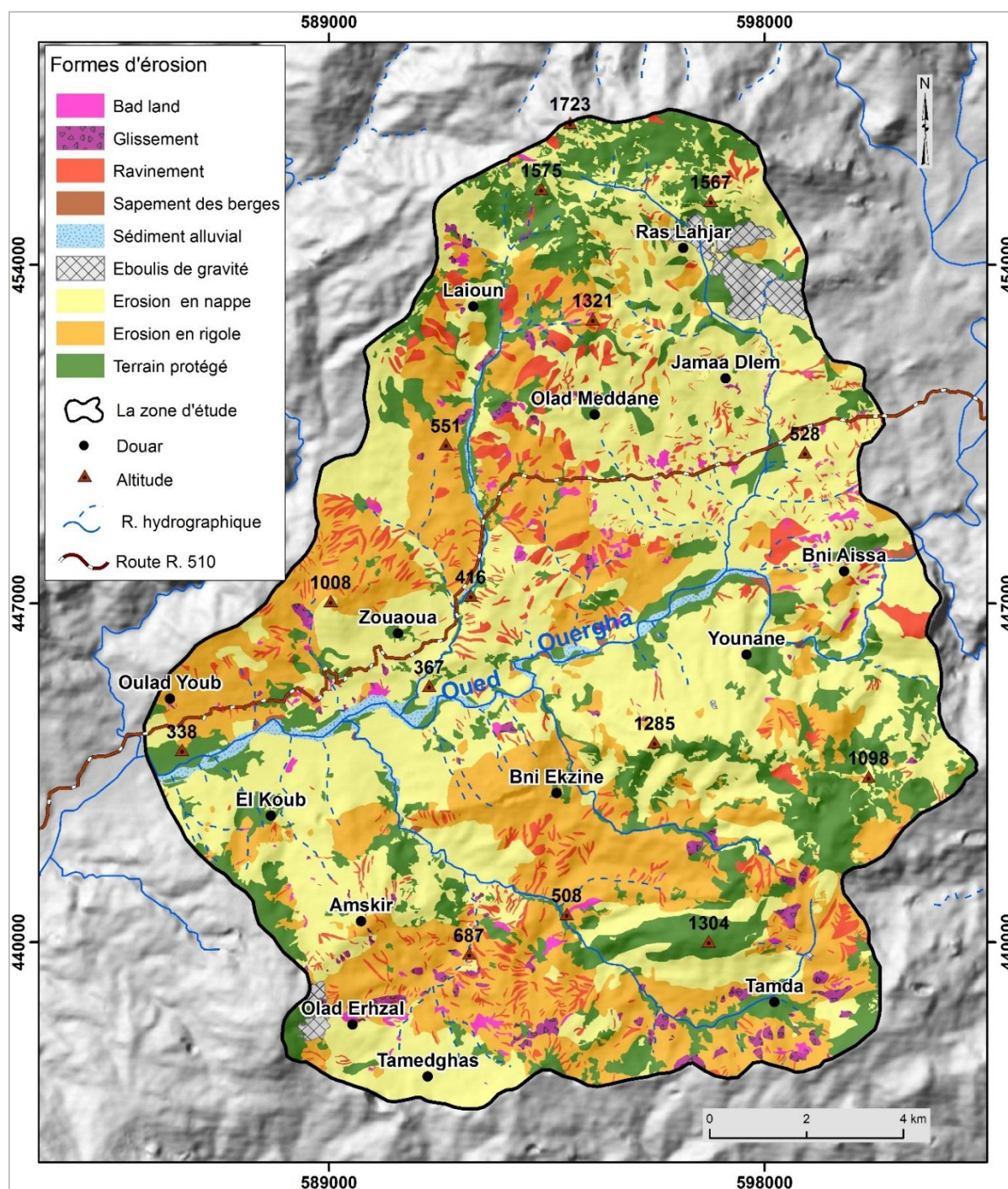


Figure 45. Spatialisation des formes d'érosion dans le secteur d'étude

Les éboulis de gravité sont localisés sur les versants des hautes crêtes du douar Ras Lahjar et douar Oulad Erhzal. Leur extension est relativement faible, ils occupent environ 1.3 % de la superficie totale. Les glissements couvrent une superficie limitée d'environ 1.5 %, mais leur effet érosif est marqué sur les versants pentus, dénudés et fortement exploités par la population locale.

1. L'érosion en nappe est le stade initial de l'érosion hydrique

L'érosion en nappe ou aréolaire (sheet erosion) est la conséquence directe des précipitations (Belzard, 1999). Ce type d'érosion commence quand l'énergie des gouttes des pluies attaque la surface des sols dénudés (Roose, 1999 ; Roose et Sabir, 2002). Ainsi, le ruissellement en nappe contribue aux transports des matériaux détachés (Roose, 2010).

Sur le terrain, le signe le plus connu de l'érosion en nappe est la présence des plages de couleur claire aux endroits les plus décapés (Roose, 1999) par le fait de l'érosion sélective qui transporte les éléments fins (argile, humus...) et cumule en surface les éléments grossiers (sables, cailloux ...).

L'érosion en nappe représente le stade initial de la dégradation du sol, elle réduit fortement sa capacité d'infiltration due à la formation de croûte de la battance ; elle enlève sélectivement les particules fines (matière organique et argile) riches en nutriments et par conséquent, elle diminue la fertilité des sols ; elle accumule en surface les sables et cailloux et elle réduit progressivement la capacité de stockage de l'eau et des nutriments.

Pour bien comprendre les relations entre les différents facteurs d'érosion hydrique et la répartition de l'érosion en nappe dans notre zone d'étude, nous mettons l'accent sur trois facteurs clés dans notre analyse : la déclivité des pentes, la nature des formations lithologiques et les types d'occupation des sols.

Les résultats obtenus par la superposition de la carte des formes d'érosion et les facteurs d'érosion permettent de comprendre le rôle de chaque facteur dans la genèse et la répartition de chaque forme d'érosion.

Les résultats de la superposition de la carte de l'érosion en nappe et la carte d'occupation des sols (figure 46) montrent la dominance de cette forme d'érosion sur les terrains de cultures et d'arboricultures (45.8 % d'érosion en nappe), et sur les terrains de cultures sèches et matorral. Cela est lié aux taux de recouvrement des sols, la densité de végétation et le type de couvert végétal.

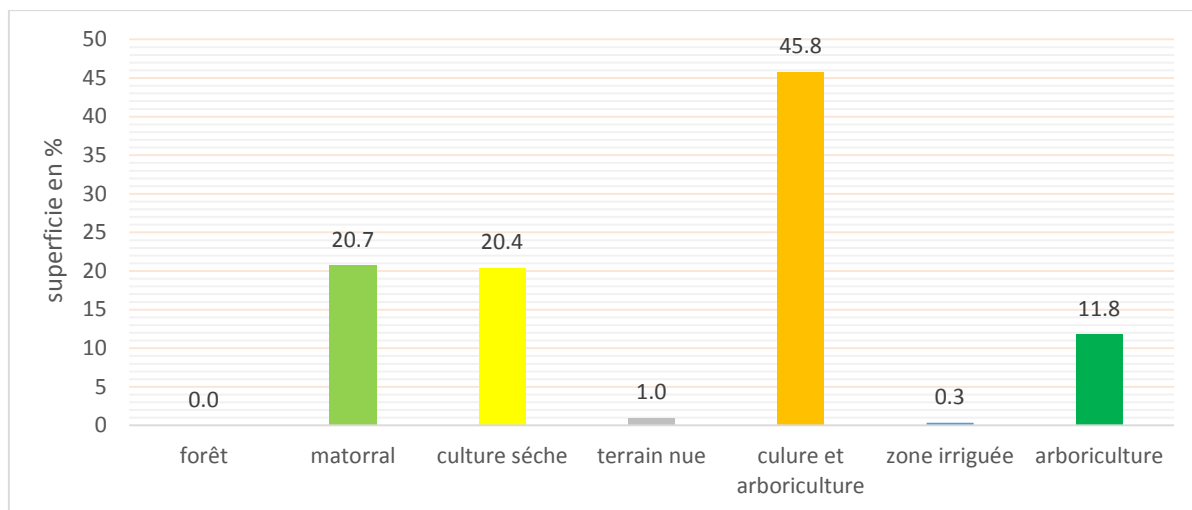


Figure 46. Répartition de l'érosion en nappe selon le type d'occupation des sols

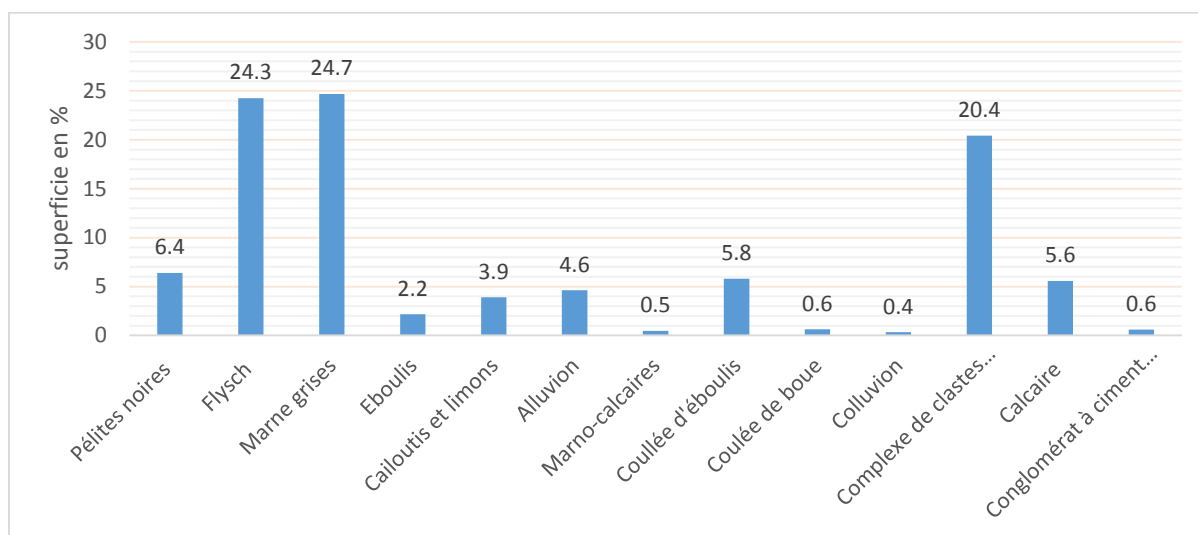


Figure 47. Répartition de l'érosion en nappe selon les formations lithologiques



Photo 8. Érosion en nappe et formation de croûte de la battance sous l'effet des gouttes de pluie

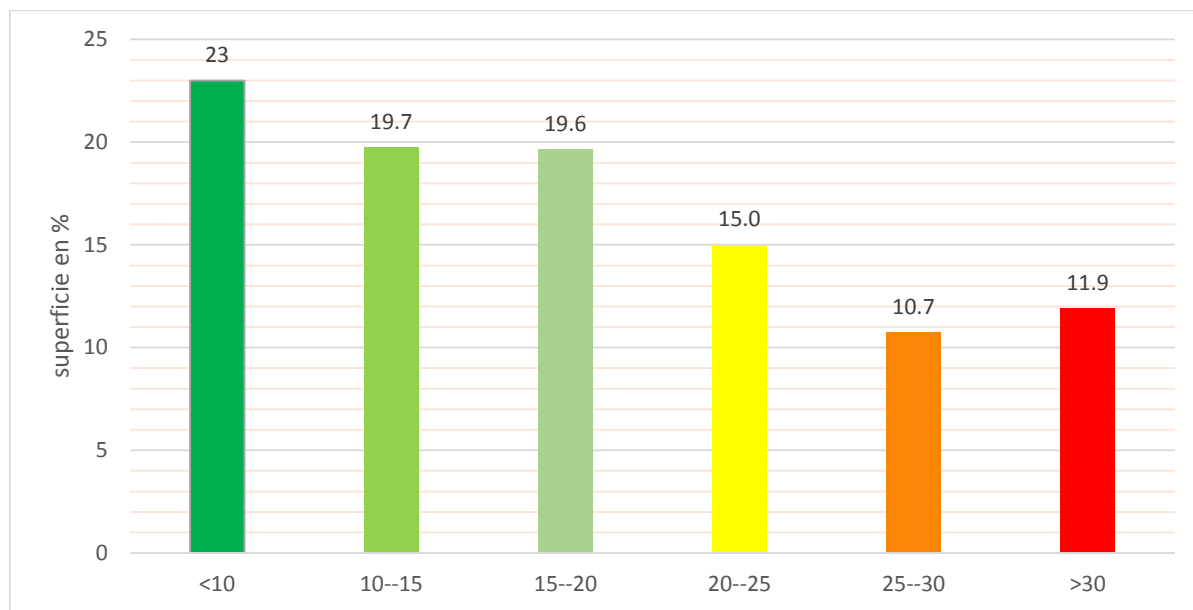


Figure 48. Répartition de l'érosion en nappe selon les classes de pentes

L'intersection de la carte d'érosion en nappe et la carte des pentes (figure 48) montre que cette forme d'érosion se développe sur toutes les gammes de pentes. En fonction des formations lithologiques (figure 47), cette forme d'érosion est dominée sur les terrains de flysch, de marne grise et de complexe de clastes marneux et pélitiques qui sont généralement des formations friables.

2. L'érosion linéaire (Rill Erosion)

L'érosion linéaire apparaît quand le ruissellement se concentre, et commence le creusement des formations superficielles (Roose, 1994). Selon les travaux de Roose (1994 ; 2010) on peut distinguer plusieurs formes d'érosion linéaires en fonction du degré d'incision des sols. Le stade initial de cette érosion c'est l'apparition des griffes qui sont des petits canaux de quelques centimètres de profondeur, lorsque ces canaux dépassent 10 cm de profondeur, mais sont encore effaçables par les techniques culturales on parle de rigoles. Ces derniers évoluent en nappe ravinant lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm, mais que leur largeur atteint plusieurs mètres. On parle de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) et en particulier, lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales.

2-1 Érosion en rigoles et griffes

Ce type d'érosion se développe dans le cas des pluies abondantes et sur des versants pentus ou longs, ce qui favorise la concentration du ruissellement en filets et prennent une énergie capable de creuser des griffes de quelques centimètres ou des rigoles de 10 à 50 cm de profondeur à la surface du sol (Roose, 2010). Généralement, l'érosion en rigole et griffe est très active en automne et au début de l'hiver, durant ces périodes les pluies brutales et concentrées dans le temps attaquent directement les surfaces du sol, qui sont nues et mal protégées par la végétation.

Pour les paysans, l'érosion commence avec les rigoles et les ravines. Si on n'intervient pas sur les champs après les orages pour effacer les traces du ruissellement concentré, les rigoles vont nécessairement évoluer en ravines et ruiner la terre. (Roose et Sabir, 2002).

La superposition de la carte d'érosion en rigole et griffe avec la carte d'occupation des sols (figure 49) indique que 64.74 % de ces rigoles et griffes sont installés sur les terrains de culture et d'arboriculture, et 28.15 % sur les terrains de cultures sèches. Cela est lié à l'effet des précipitations orageuses durant l'automne et le début d'hiver après une longue période estivale où les sols sont secs, tassés par le pâturage et dénudés, ce qui diminue l'infiltration et favorise la concentration du ruissellement qui commence à inciser la surface du sol. Ce type d'érosion provoque la diminution de la fertilité des sols et contribue à la perte des terres de cultures si les paysans n'interviennent pas à les effacer par le labour.

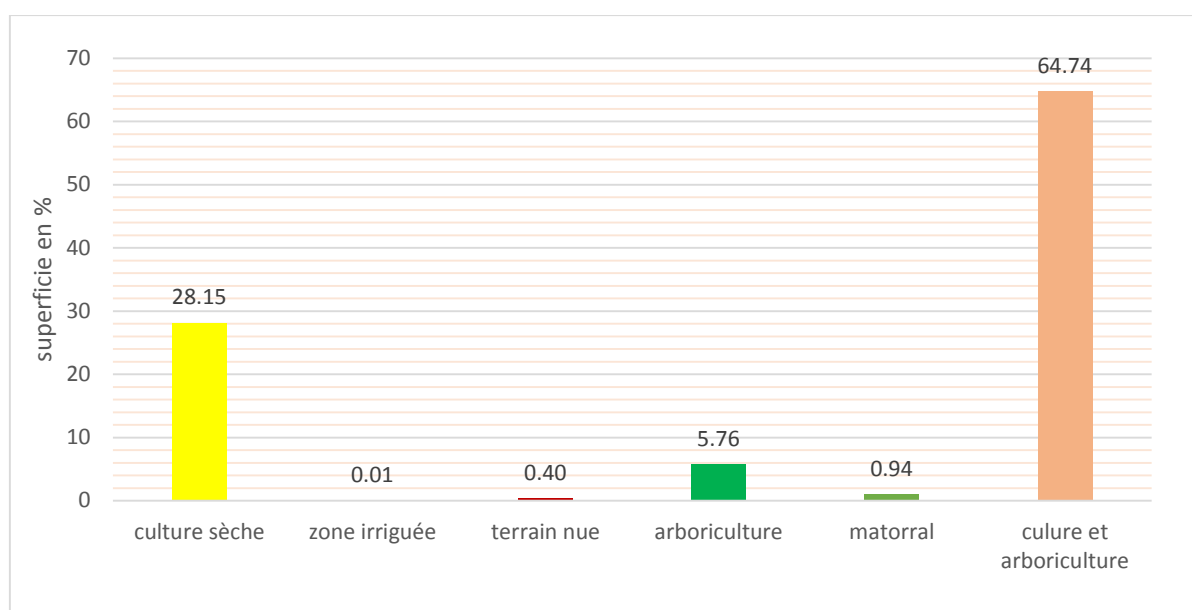


Figure 49. Répartition de l'érosion en rigole selon les types d'occupation des sols



Photo 9. Érosion en griffes

La répartition de l'érosion en rigole selon le facteur pente (figure 50) indique que ce type d'érosion s'installe sur les différentes classes de pentes, mais il se développe plus vite sur les terrains de forte pente (supérieure à 20°) où la concentration du ruissellement devient rapide et leur énergie d'incision s'augmente vers l'aval.

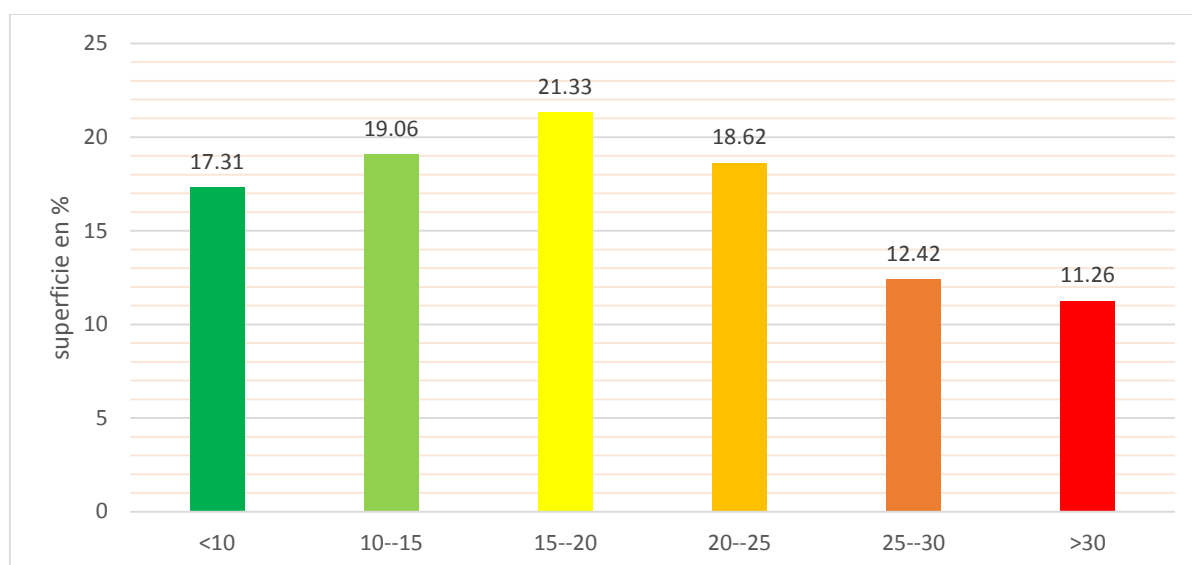


Figure 50. Répartition de l'érosion en rigole selon les classes de pente

La figure 51 (résultats de superposition de l'érosion en rigole et griffe avec la carte des formations lithologiques) montre que l'érosion en rigole et griffe attaque les terrains de faible résistance. Ils sont bien marqués dans les marnes grises avec un pourcentage de 28.93 % et sur le complexe de clastes marneux et pélitiques (23.89 %) et sur les flyschs avec un pourcentage de 16.40 %. Ces formations lithologiques caractérisées par une faible infiltration favorisent la concentration du

ruissellement en surface, ce qui facilite le décapage des sols et l'installation des sillons parallèles qui se développent vers le sens de la pente.

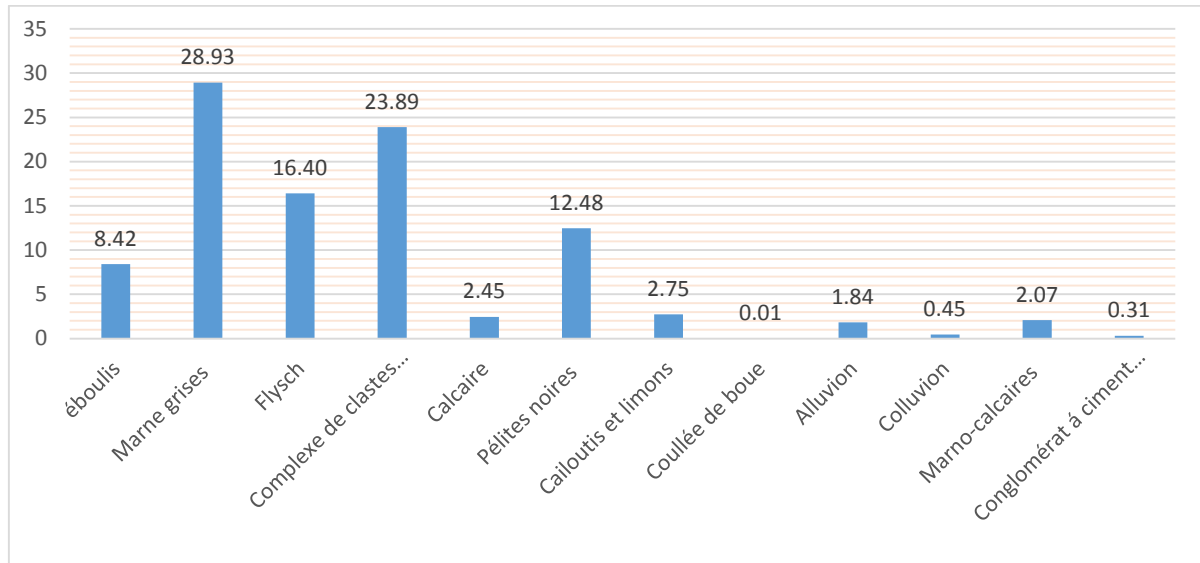


Figure 51. Répartition de l'érosion en rigole et griffe selon les formations lithologiques

2.2. Érosion en ravine

On parle de ravine quand la profondeur d'incision dépasse 50 cm, et qu'elle ne peut plus être effacée par le labour (Roose, 2010). La classification de Roose (1994 et 2010) indique que les ravines diffèrent en taille et en forme.

> Selon la taille on peut distinguer les petits ravins, les ravines de taille moyenne et les grandes ravines torrentielles, qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central est tapissé de blocs rocheux, témoins d'un charriage de pierres important.

> Selon la forme, deux types des ravines peuvent être distingué ; les ravins en forme V se développent sur des matériaux tendres et homogènes (marnes, argilites, schistes tendres, grès tendres), et les ravines en formes U dans le cas des matériaux cohérents et hétérogènes.

Généralement, les ravines dans le Haut Ouergha se caractérisent par la dominance de forme V, cela est justifié par la présence des formations lithologiques homogènes et tendres, notamment les marnes et les flyschs.

La superposition de la carte d'érosion en ravine avec les facteurs causaux montre que ce type d'érosion est omniprésent sur les terrains de culture et arboriculture avec un pourcentage de 53.30

% et 36.32 % sur les terrains de cultures sèches (figure 52). Ce sont des terrains mal protégés par le couvert végétal. Selon les formations lithologiques, ce type d'érosion affecte les formations de faible résistance notamment les marnes grises, flyschs et le pélite noire (figure 53). Les ravines s'installent sur les différentes classes des pentes (figure 54), mais ils se développent rapidement sur les versants pentus suite à l'augmentation de l'énergie de ruissellement.

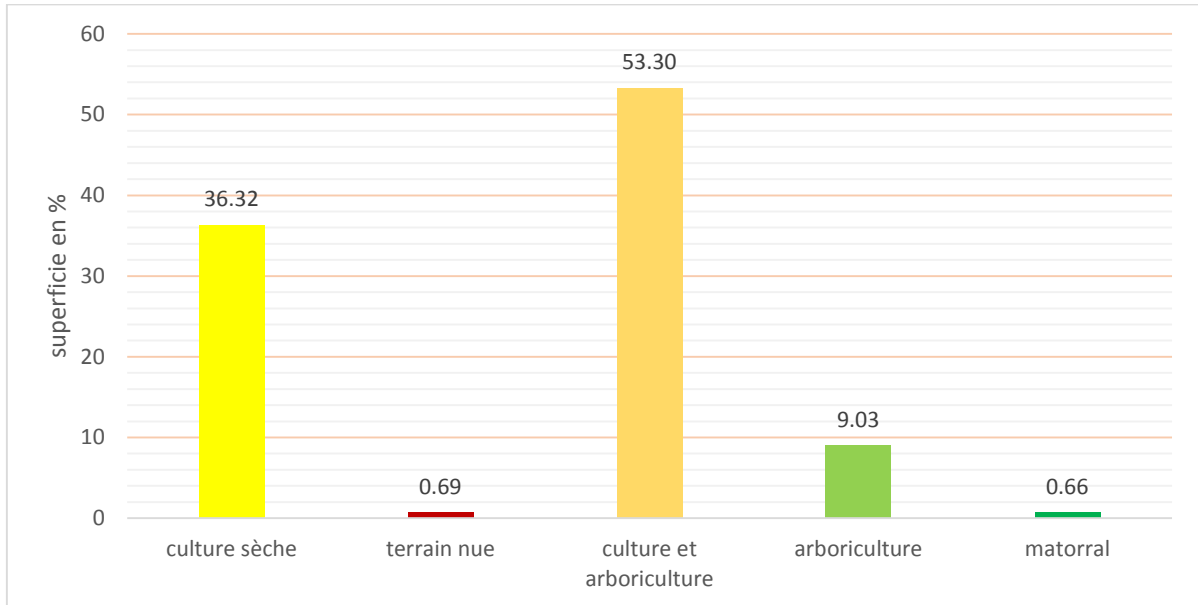


Figure 52. Répartition de l'érosion en ravin selon l'occupation des sols

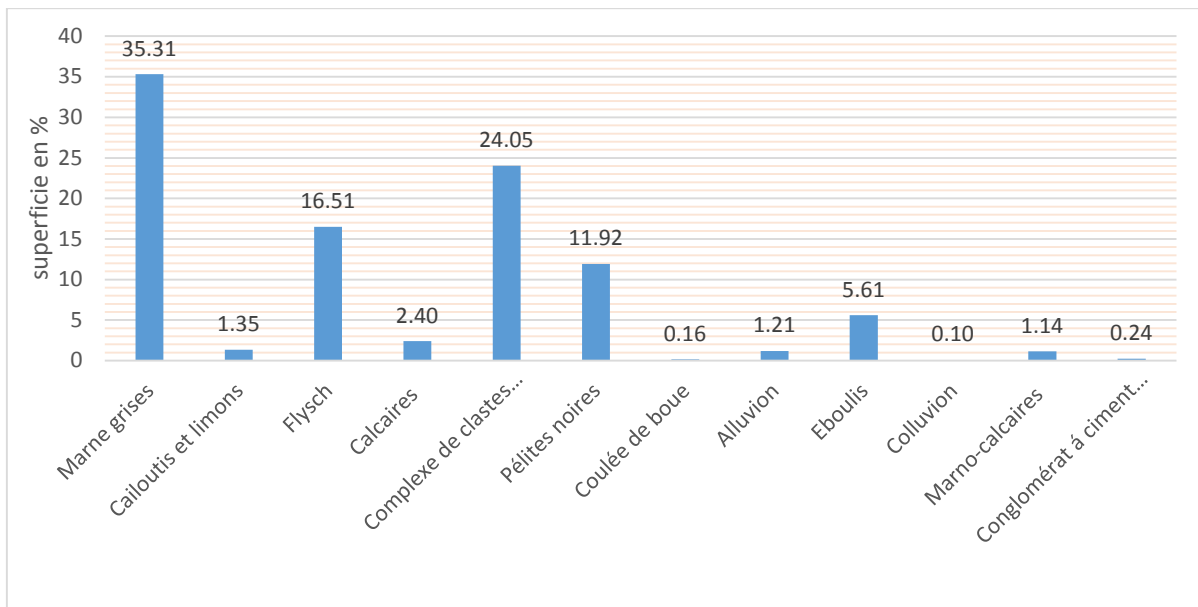


Figure 53. Répartition de l'érosion en ravin selon les formations lithologiques

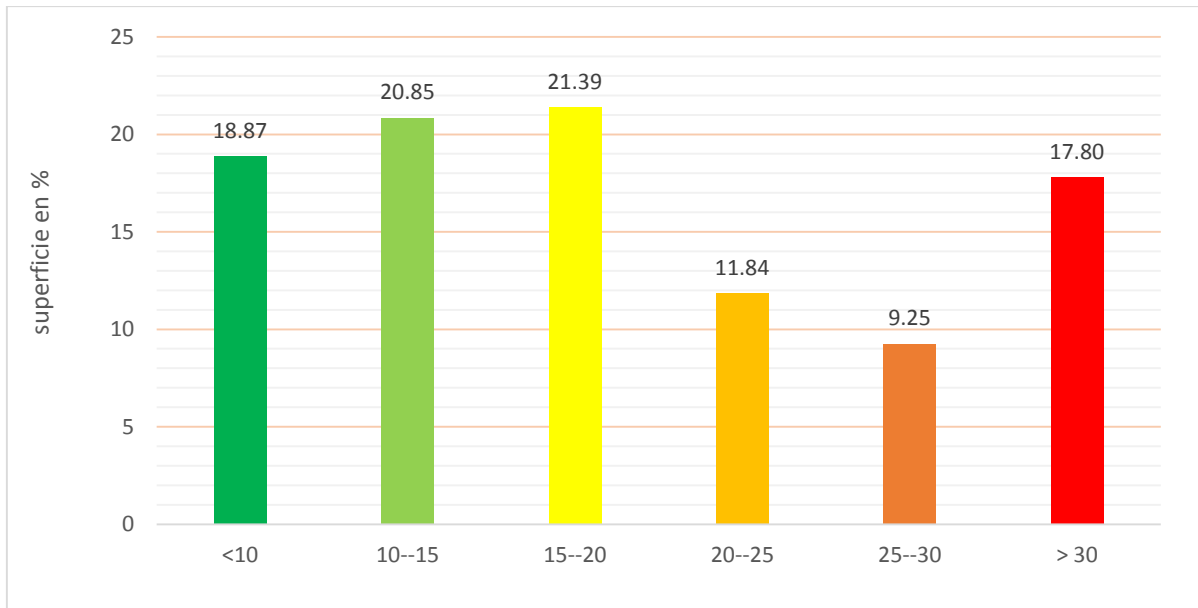


Figure 54. Répartition de l'érosion en ravin selon la pente

3. ravinement généralisé (Bad land)

Cette forme correspond au stade très évolué de l'action du ruissellement, la multiplication des ravines sur un versant conduit à un ravinement généralisé ou bad lands. C'est un type d'érosion très localisé, mais qui peut fournir une très grande quantité des sédiments.

Les résultats de superposition montrent une relation très forte entre la spatialisation des bad lands et les formations lithologiques. Plus de 70% des ravinements généralisés se développent dans les terrains de marnes grises (figure 56). Les ravines se développent rapidement dans ces terrains ce qui donne naissance aux bad lands. Ces derniers évoluent dans le Haut Ouergha sur les pentes faibles et moyennes (figure 57) et sur les formations marneuses très vulnérables à l'érosion.

Les résultats montrent que 43.73 % des bad lands sont développés dans les terrains de cultures et d'arboricultures sur une superficie d'environ 28.71 % et 26 % dans les terrains nus (figure 58). Cela indique une forte relation entre la spatialisation de cette forme d'érosion et les types d'occupation des sols. Les terrains nus, les terrains de culture sèche et les terrains mal protégés par le couvert végétal constituent des milieux favorables au développement du ravinement généralisé.

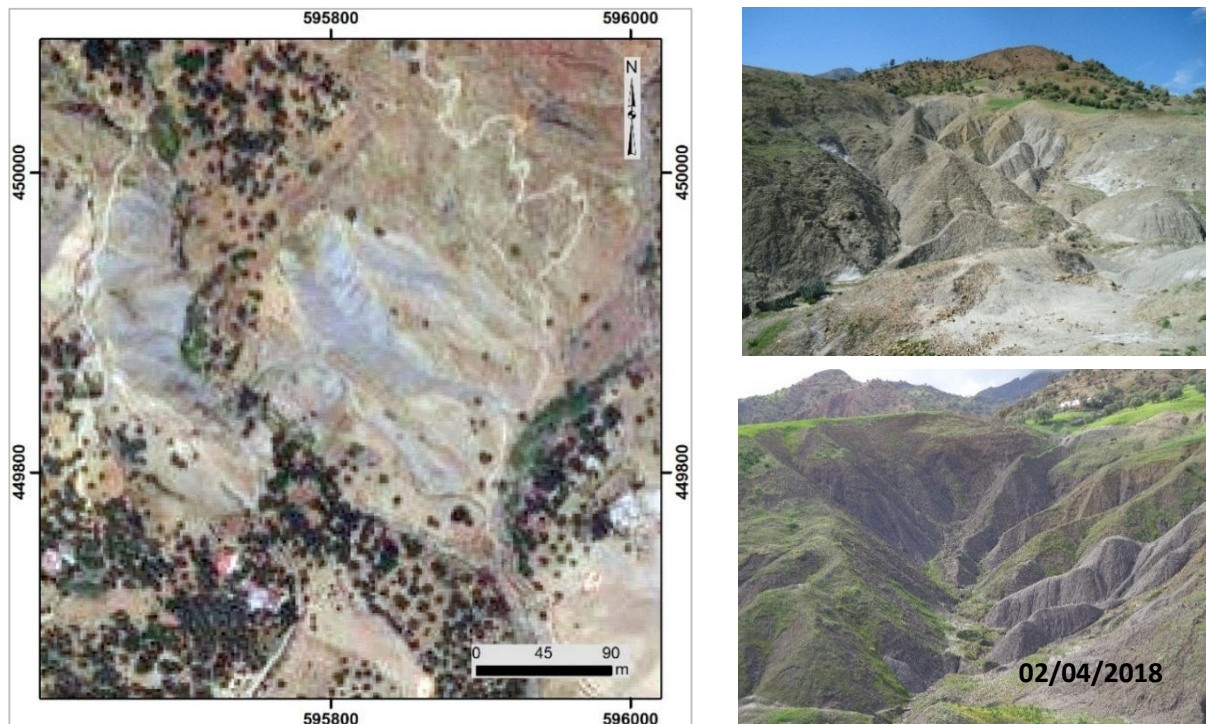


Figure 55. Ravinement généralisé (bad lands) dans la zone d'étude (image Google Earth + travail du terrain)

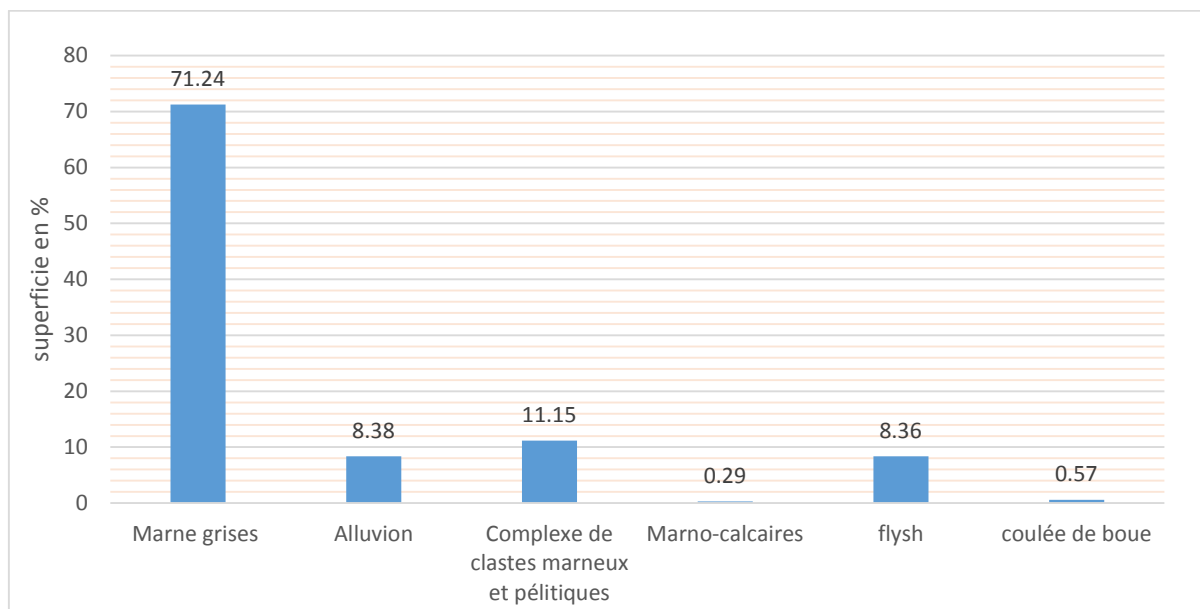


Figure 56. Répartition des bad lands selon les formations lithologiques

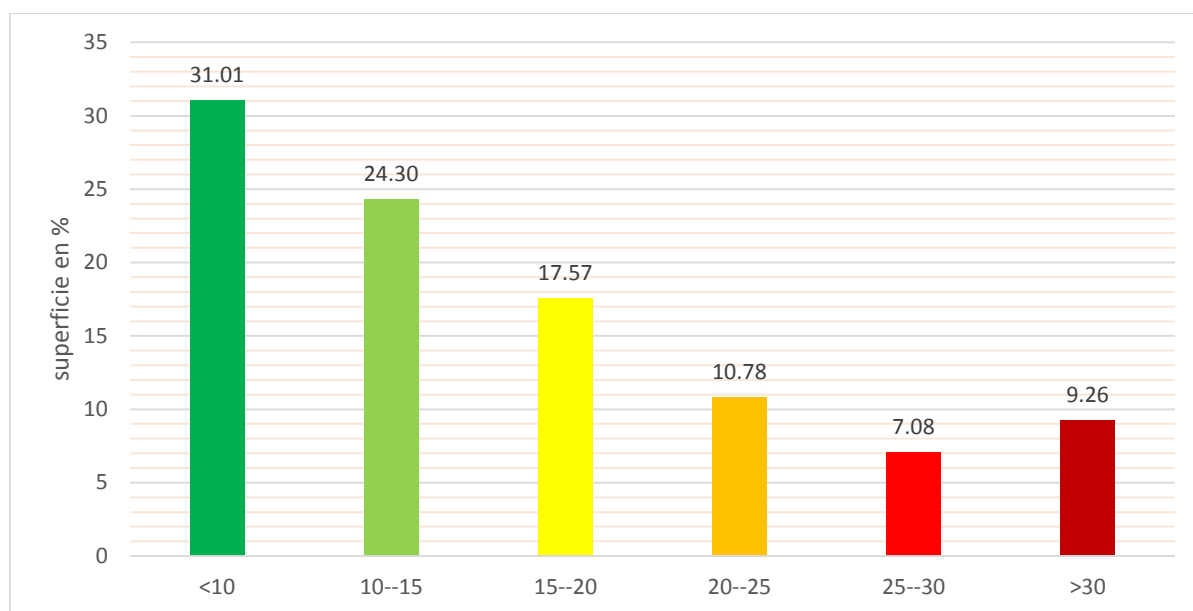


Figure 57. Répartition des bad lands selon la pente

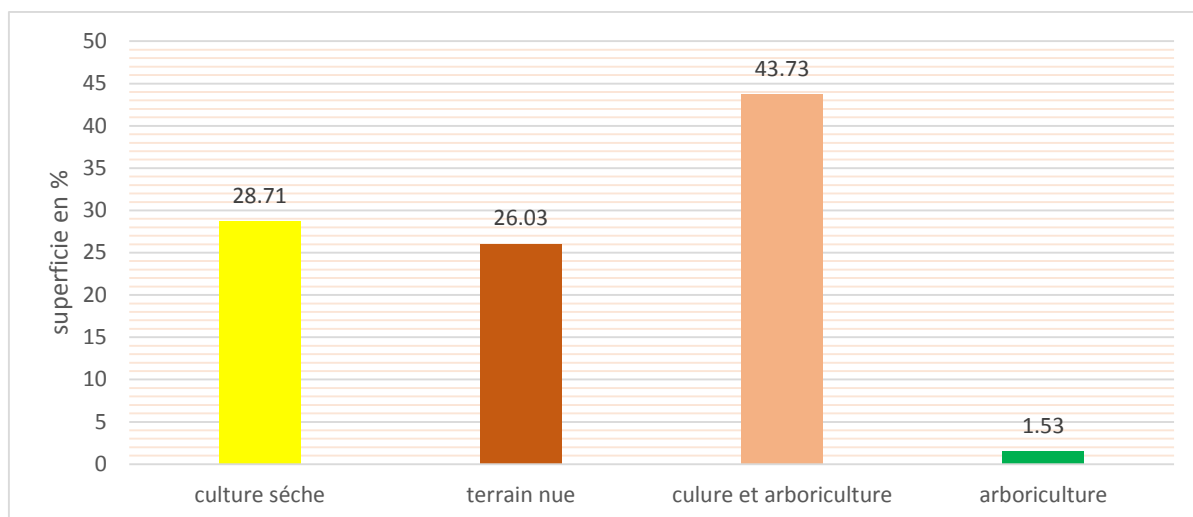


Figure 58. Répartition des bad lands selon l'occupation des sols

4. Érosion par sapement des berges

Ce type d'érosion affecte essentiellement les versants qui surplombent les oueds, notamment les méandres, dans leurs parties convexes. Cette dynamique est fortement liée à la saison pluvieuse, durant laquelle le débit des oueds augmente, notamment par la présence des pentes fortes et des formations lithologiques imperméables, ce qui accélère la vitesse du courant qui sape la base des versants. Cette forme d'érosion provoque la production d'une quantité considérable des matériaux de différentes tailles (grossières et fines) et elle est remarquable sur les rives de l'oued Ouergha et ces affluents (photos 10 et 11).



Photo 10. Sapement de la rive droite d'oued
Ouergha



Photo 11. Sapement de la rive droite d'oued
Boumlal

5. Les glissements

Selby, 1982 définit les glissements comme étant « *des mouvements de matériaux qui s'effectuent le long d'une surface de cisaillement bien délimitée à des vitesses plus ou moins lentes et continues* ». Les glissements varient en fonction de leur morphométrie, de leur dynamique et de la nature des matériaux affectés (Tribak, 2006).

Flageollet (1989) indique que les glissements présentent une grande diversité, à cause des différenciations dans la nature et la taille des matériaux, fragments des roches cohérentes, de roches meubles ou de sols, dans la forme de la surface de rupture, dans la distance parcourue par les matériaux glissés au-delà de la zone de rupture, dans la vitesse...

Dans la zone d'étude les glissements sont assez fréquents, les résultats de superposition de la carte des glissements avec les facteurs causaux (formations lithologiques, occupation des sols et la pente), montrent que ce type d'érosion touche les matériaux meubles tels que les marnes et les flyschs (figure 59). Selon les types d'occupation des sols, les glissements se développent essentiellement sur les terrains de culture et d'arboriculture et les terrains de cultures sèches (figure 60) mal protégés par le couvert végétal. En effet, les glissements se développent rapidement sur les versants de moyenne et forte pente (pente supérieure à 15°) (figure 61).

Dans le secteur d'étude on peut distinguer différents types des glissements, les plus importants sont les glissements pelliculaires, les glissements rotationnels et les coulées boueuses.

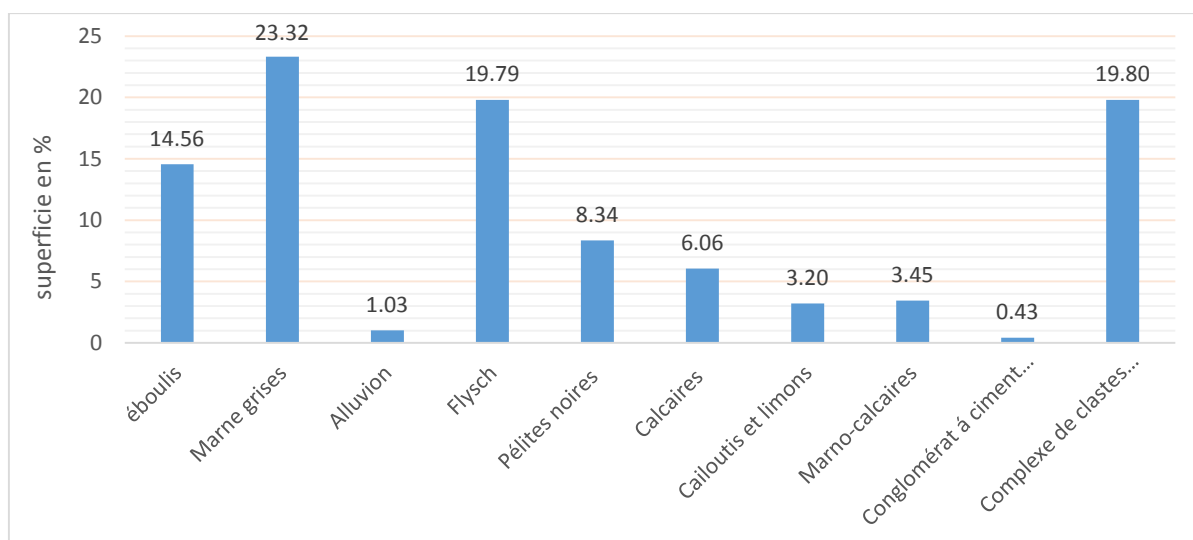


Figure 59. Répartition des glissements selon les formations lithologiques

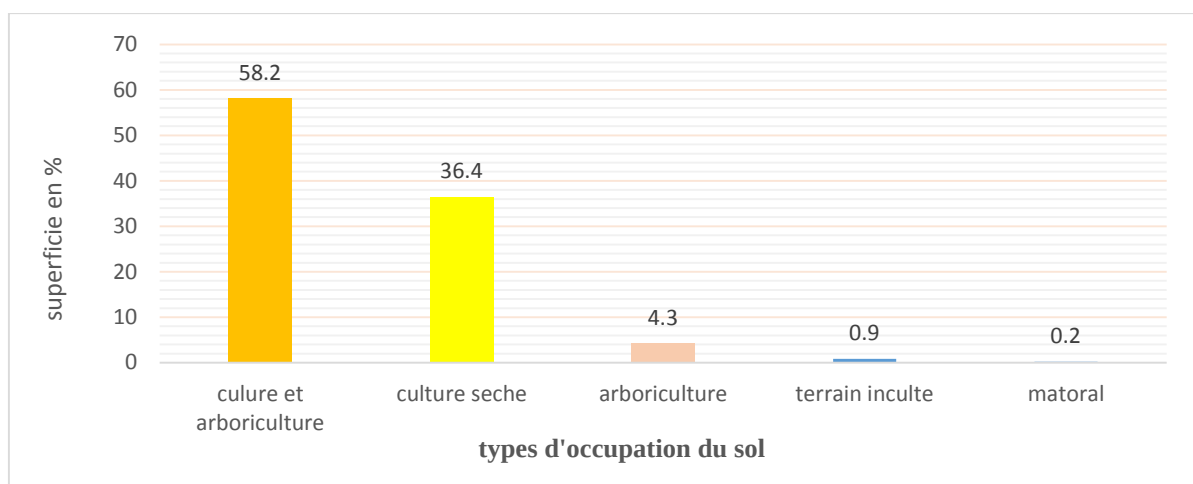


Figure 60. Répartition des glissements selon l'occupation des sols

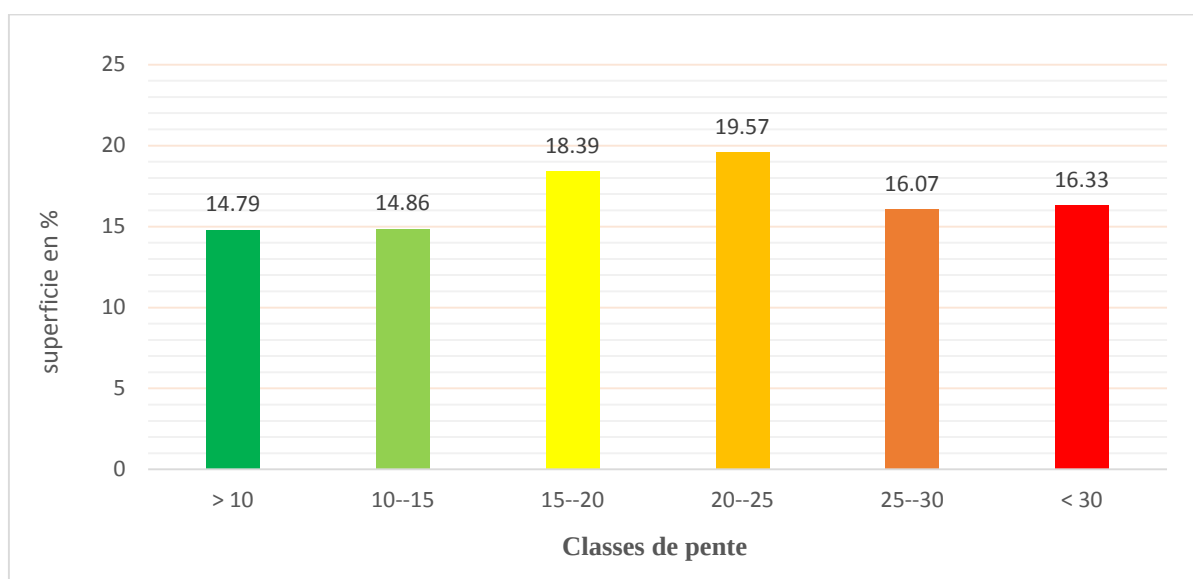


Figure 61. Répartition des glissements selon les classes de pente

5. 1. Les glissements rotationnels

Les glissements rotationnels sont des mouvements en masse qui produisent des quantités importantes des matériaux. La masse glisse en faisant une rotation qui laisse apparaître sur le versant une série de coups de cuillères (Roose 1999). L'eau est le facteur déterminant dans le déclenchement de ce type des glissements, mais le rôle des autres facteurs est important tels que la pente, la tectonique et les actions humaines (Sdiki, 2005).

Ce type des glissements est fréquent sur les versants pentus et dénudés ou mal protégés par le couvert végétal (figure 62), il affecte principalement les versants caractérisés par des formations lithologiques friables et homogènes. Ces glissements deviennent actifs durant les épisodes pluvieux.



Figure 62. Les glissements au niveau de Douar Jamaa Delem (El-Bouhali, 2016)

5.2. Glissements boueux (muldslides)

Ce type de glissement se produit sous forme d'une coulée visqueuse, lorsque les matériaux affectés sont saturés d'eau et atteignent leurs limites de liquidités (Tribak, 2000). Le coulé prend la forme d'un canal terminé par une longue de boue (Roose, 2010). Il se déclenche notamment sur les terrains marneux et durant les événements pluviométriques concentrés dans le temps et dans l'espace.

Les observations sur terrain montrent que ce type de glissement affecte les formations marneuses. Durant les périodes pluvieuses, ces formations deviennent visqueuses puis elles descendent vers l'aval sous l'effet de gravité (photos 12 et 13). Ils sont remarquables sur la marne grise dans les douars Jama Dlem, Oulad Meddane et Bni Aissa (partie médiane de l'aire d'étude).



Photos 12 et 13. Coulée de boue sur les marnes grises (douar Jamaa Dlem)

5.3. Les glissements pelliculaires

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes (Roose, 1999). Ce sont des arrachements mineurs qui affectent la couverture superficielle des sols sans faire apparaître le substratum rocheux. Ils prennent une forme semi-circulaire, avec une niche d'arrachement bien nette sur le versant, qui montre la zone de départ (Tribak, 2000).

La photo 10 présente un exemple de glissement pelliculaire dans la partie médiane de l'aire d'étude, il est situé sur un versant abrupt et se développe dans les formations marneuses du

miocène. Le déplacement de la mince pellicule vers le bas s'est déclenché après une pluie intense d'hiver (de février à mars). La masse saturée en eau est glissée vers le bas sous l'effet de la gravité. Un autre facteur intervient dans cette dynamique c'est la faible protection par le couvert végétal et l'existence d'un cours d'eau en bas qui sape latéralement le versant et conduit à leur déstabilisation.



Photo 14. Glissement pelliculaire dans le douar Ain Jamaâ

6. Les éboulis de gravité

Les éboulements sont des chutes soudaines de masse rocheuse à partir d'une paroi ou d'un versant. (Flageollet, 1989). Ils résultent de l'action de la pesanteur qui affecte les matériaux rigides, durs et fracturés. (Gartet, 2010).

Ce type de mouvement affecte essentiellement les zones caractérisées par une pente forte. Le phénomène commence par le détachement d'une masse à partir d'une paroi rocheuse, puis il se déplace vers l'aval d'une manière brutale et rapide, ils touchent essentiellement les crêtes gréseuses ou calcaro-dolomitiques fracturées et fissurées. Dans la zone d'étude, les éboulis de gravité se développent sur les crêtes du calcaire en banc du Lias et calcaire en plaquette d'Eocène inférieur sur des pentes fortes (photo 15).

L'étude et la spatialisation des différentes formes de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha montrent que la plupart des formes d'érosion évoluent dans les zones où le couvert végétal est

absent ou clairsemé, sur des formations lithologiques friables (marnes, flyschs...) et des pentes moyennes à fortes. En revanche, les parties de la zone d'étude où le couvert végétal est dense et les roches sont résistantes, les formes d'érosions sont peu visibles.



Photo 15. Eboulement de gravité dans la partie sud au niveau du douar Tamedghas

II- l'évolution de la dynamique des ravins dans le Haut Ouergha : mesure et processus

L'érosion en ravines est un risque environnemental important, qui menace le monde entier (Ionita et al., 2015 ; Li et al., 2015). Cette forme d'érosion est la plus dominante dans les montagnes du Rif marocain (Naimi et al., 2002). C'est un signe important de la dégradation des terres, suite à la forte production des sédiments (Poesen et al., 2003). Elle est considérée aussi comme un indice de la désertification (UNEP, 1994). Torri et al. (1994) indiquent que les pertes en sol produit par les ravines peuvent atteindre 100 à 200 t/ha-1 an-1. Ces pertes en sol peuvent atteindre 800 t/ha-1 an-1 en haute province en France (Mathys et al., 2003 ; Rebai et al., 2013). En Tunisie, une étude menée par Collinet et Zante (2005), montre que le ravinement pouvait produire 10 à 50 fois plus de sédiments que l'érosion diffuse à l'échelle du versant (Rebai et al., 2013).

Donc le suivi des changements des ravins dans le temps est essentiel pour mettre en œuvre des mesures des conservations des sols (Shruthi et al., 2015), ainsi que la compréhension de l'évolution temporelle des ravines est essentielle pour identifier les causes et les conséquences de la dégradation des terres (Frankl et al., 2013).

Les études qui ont traité l'évolution des ravins sont nombreuses, elles s'intéressent à l'étude de leurs morphologies et les processus interviennent dans leurs dynamiques. Parmi ces travaux on peut citer : le travail d'Achim, (2019) sur le bassin Sălătrucelul en Rumania. L'étude de Tribak,

(1998) sur le bassin de Tarmast au Maroc, fondée sur le suivi d'un ravin pendant un an, et il a montré que le pic d'incision observé en fin de décembre, est estimé à environ 12 cm au sein de la roche mère. L'étude de Naimi et al., (2002), concernant le bassin versant de Nakhla au Rif occidental marocain, montre que l'érosion en ravin produit une perte totale en sol de 187 tonnes, soit 35,95 tonnes par hectare pour la période allant du 28/11/1997 au 12/06/1998. En Nord d'Éthiopie, Frankl et al., (2013), indiquent que les pertes en sol par ravinement atteignent $17,6 \text{ t/ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ entre 1963 et 1994. Cheng et al., (2007) ont utilisé le système de positionnement global (GPS) de haute précision pour mesurer la morphologie de ravines dans la province du Shaanxi en Chine, ils ont montré que la perte de sol due à ces ravines équivaut à 30 – 70 % de la perte totale du sol.

Dans l'étude des ravins, le suivi de l'évolution de la morphologie est le signe principal de leurs dynamiques. Les caractéristiques morphologiques des ravins sont déterminées par les interventions humaines et les conditions environnementales, telles que le climat, le sol, la lithologie, la topographie et l'utilisation des terres (Deng et al., 2015 ; Conoscenti et al., 2014).

Dans la zone d'étude, nous avons effectué le suivi des ravins par des mesures sur le terrain. Les ravins ont été mesurés à trois endroits : la partie amont, la partie médiane et la partie aval. Pour chaque ravin, nous avons effectué deux mesures de la longueur, la largeur et la profondeur des deux berges (berge droite et gauche), dans les trois sections de mesures. Nous avons noté aussi le type d'occupation des sols, le degré de pente, l'altitude, l'exposition des versants et les caractéristiques de la lithologie des sites de mesures, afin de mieux comprendre le contexte général de leur évolution et les processus intervenant dans leurs dynamiques.

D'après les mesures des ravins dans le Haut Ouergha nous constatons que leur morphodynamique, se fait de différentes manières : l'érosion régressive entraînant le recul de la tête du ravin, le creusement et l'affouillement du fond du ravin, l'élargissement du ravin par le sapement de ses berges, le colmatage total du ravin par les glissements et les ravins stables.

1. Dynamique des ravins par l'érosion régressive (recule de tête du ravin)

L'érosion régressive remontante où le recul de tête de ravin est un phénomène d'élargissement de ravin par propagation vers l'amont, c'est-à-dire dans le sens inverse de l'écoulement de l'eau. Dans la zone d'étude, ce type de dynamique se développe sur les terrains marneux riches en gypse, tel

le cas du site de Khandak Zeyaten situé dans la partie médiane de l'aire d'étude. Le ravin que nous avons suivi dans ce site se développe sur un versant d'exposition nord-ouest, sur une altitude de 645 m et une pente de 13°, et il correspond au terrain de pâturage avec quelques arbres d'oliviers très dispersés (photos 17).

Nous avons effectué deux mesures pour ce ravin, le premier était le 02/04/2018 et la deuxième mesure était le 17/03/2021 (un décalage de 3 ans). Le tableau 3 présente les résultats des deux mesures effectuées. Celles-ci permettent de montrer que le ravin a enregistré des changements remarquables dans ces dimensions (longueur, largeur et profondeur). La première remarque c'est la progression du ravin, en effet la longueur a évolué de 11.50 m en 2018 à 16.60 m en 2021, soit une progression de 5.1 m. L'élargissement se fait par le recul de tête de ravin sous l'effet de la suffusion. Ce phénomène affecte les terrains marneux riches en gypse. Sous l'effet de la dissolution des encroûtements gypseux durant la période pluviale, des formes minuscules cylindriques apparaissent (photo 16) et créent des tunnels permettant une circulation interne des eaux de pluie (Tribak, 1998), ce qui conduit à un effondrement successif et par conséquent l'élargissement du ravin.

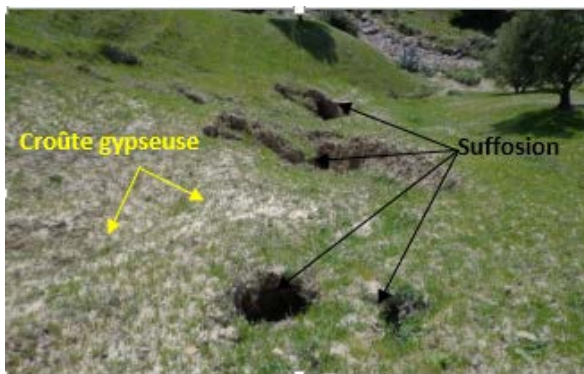
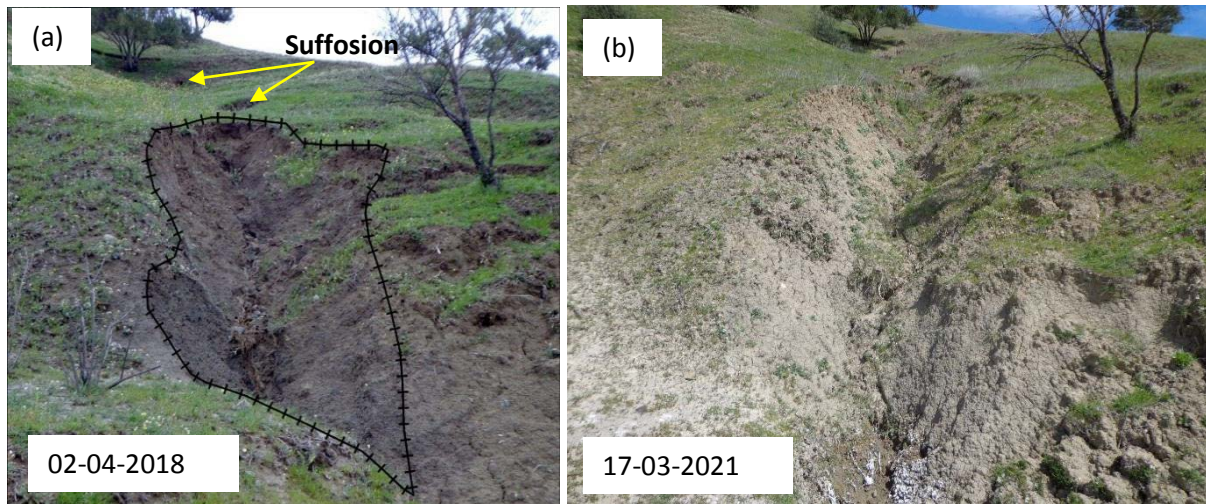


Photo 16. Phénomène de suffosion en bas du ravin de Khandak Zeyaten qui se caractérise par l'existence des encroûtements gypseux sous forme des taches blanchâtres, la dissolution de ces derniers conduits à l'apparition des tunnels responsables d'un cheminement interne de l'eau pluviale. L'effondrement de ces suffosions participe au développement du ravin.

Les résultats de mesures montrent une dynamique au niveau de la largeur dans les trois parties du ravin (amont, médiane et aval). Dans la partie médiane, la largeur du ravin a évolué de 1.9 m en 2018 à 3 m en 2021, soit un élargissement de 1.1m. Cela est justifié par le sapement de la rive droite du ravin dans sa partie médiane (tableau 3) par le fait de la concentration des eaux de ruissellement qui provoquent des petits glissements superficiels.

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie avale			Occupation du sol	Lithologie
1 ^{ère} mesure	11.5	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrain de pâturages avec quelques arbres d'oliviers très dispersés	Marnes
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
		1.3	1.36	1.30	1.9	1.76	1.30	1.6	1.24	1.10		
2 ^{ème} mesure	16.6	2.2	1.10	1.50	3.0	1.60	2.10	2.5	2.40	0.8		

Tableau 3. Caractéristiques morphologiques du ravin de Khandak Zeyaten



Photos 17. Ravin de Khandak Zeyaten. (a) situation du ravin en 2018 (b) situation du ravin en 2021

La photo 17 (b) montre un faible comblement dans les rives gauches du ravin dans sa partie amont et médiane. Cela est lié à l'accumulation des sédiments produits par le sapement des berges. Tandis que les rives droites de ces parties connues un creusement faible (- 0.2 m dans la rive droite de la partie amont et -0.8 m pour la rive droite de la partie médiane) (tableau 4), les sédiments creusés dans ces parties sont transportés et déposés dans le fond de ravin.

	Profondeur de la rive gauche en (m)		Bilan	Conclusion	Profondeur de la rive droite en (m)		Bilan	Conclusion
	2018	2021			2018	2021		
Partie amont	1.36	1.10	- 0.26	Comblement	1.30	1.50	+ 0.20	Creusement
Partie médiane	1.76	1.60	- 0.16	Comblement	1.30	2.10	+ 0.80	Creusement
Partie avale	1.24	2.40	+ 1.16	Creusement	1.10	0.80	- 0.3	Comblement

Tableau 4. Évolution de la profondeur des rives du ravin de Khandak Zeyaten entre 2018 et 2021

2. Dynamique des ravins par un affouillement des berges

2.1. Site de mesure forêt Jeref

La dynamique des ravins par un affouillement des berges se développe sur les terrains marneux, par l'effet de masse d'eau qui crée un tourbillon qui attaque le bas des berges du ravin. Pour le Haut Ouergha ce type d'évolution des ravins est bien présenté dans la partie médiane : site de la forêt de Jeref. Ce ravin se localise sur un versant d'exposition nord-ouest, sur une altitude de 565 m et une pente de 10°. Ainsi, il se développe sur un substrat de marnes grises Messinien, et correspond à un terrain de pâturages avec quelques arbres d'oliviers situés en amont du versant (photos 18).

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie avale			Occupation du sol	Lithologie
1 ^{ère} mesure	15.55	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrain de pâturages	Marnes grises Messinien
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
			2.4	2,65	1,58	3.3	2.70	1.80	2.2	2.20	1.40	
2 ^{ème} mesure	16.00	3.0	2.10	1.90	4.1	2.70	2.50	2.8	2.20	1.40		

Tableau 5. Caractéristiques morphologiques du ravin de Jeref

Dans ce site, deux mesures ont été effectuées, la première a été le 02/04/2018 et la deuxième le 17/03/2021 (un décalage de 3 ans). Les résultats des deux mesures sont présentés dans le tableau 5. La première remarque que nous avons obtenu c'est la faible progression du ravin au niveau de longueur (0.45 m seulement durant 3 ans), cela est justifié par le fait de ruissellement qui se concentre dans le lit du ravin et attaque le bas de ces berges droites ce qui conduit au développement de leurs profondeurs (tableau 6), et par conséquent l'évolution du ravin au niveau du largeur dans ces trois parties de mesures amont (élargissement de 0.6 m), médiane (élargissement de 0.8 m) et avale (élargissement de 0.6 m).



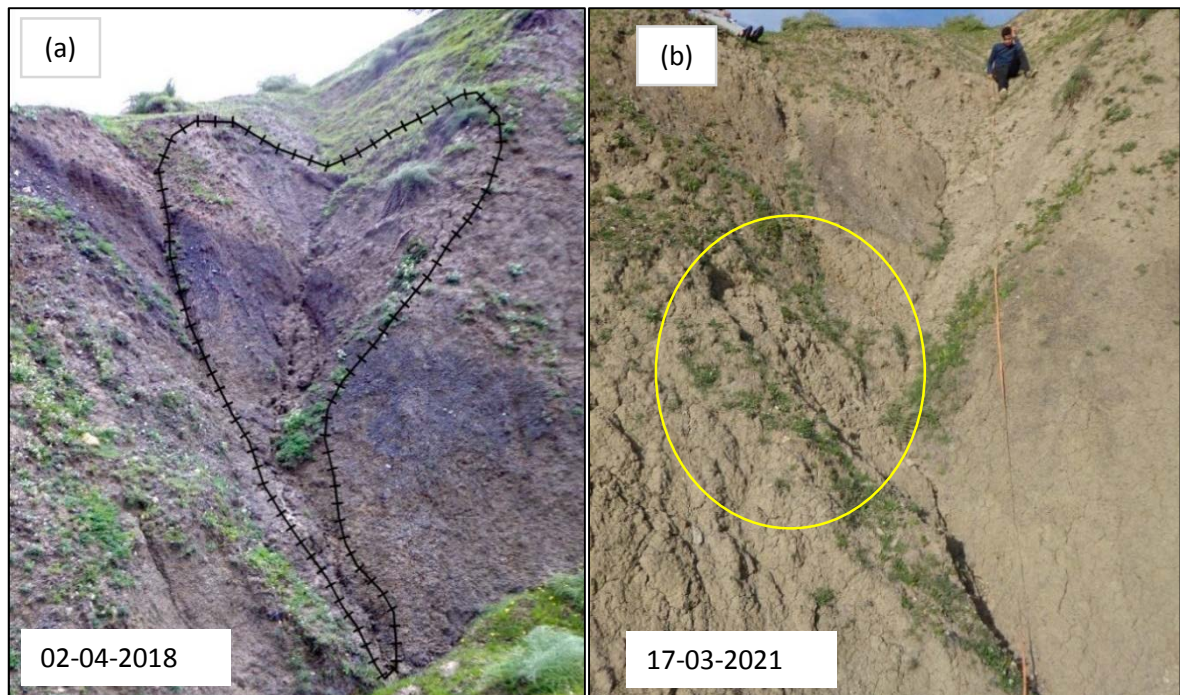
Photos 18. Situation de ravin Jeref en deux périodes de mesures : a (2018) et b (2021)

	Profondeur de la rive gauche en (m)		Bilan	Conclusion	Profondeur de la rive droite en (m)		Bilan	Conclusion
	2018	2021			2018	2021		
Partie amont	2.65	2.10	- 0.55	Comblement	1.58	1.90	+ 0.32	Creusement
Partie médiane	2.70	2.70	0	Stable	1.80	2.50	+ 0.70	Creusement
Partie avale	2.20	2.20	0	Stable	1.40	1.40	0	Stable

Tableau 6. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Jeref entre 2018 et 2021

2. 2. Site de mesure d'Ain Chibrik

Un autre exemple de la dynamique des ravins par un affouillement des berges, c'est le site d'Ain Chibrik, le ravin en question se développe sur un versant d'exposition nord-ouest, d'une pente de 5° et sur une altitude de 559 m et un substrat de marnes grises Messinien. Le suivi de leur évolution a été effectué par deux mesures (le 2/04/2018 et le 17/03/2021). Les résultats obtenus (tableau 7) indiquent que la longueur du ravin est stable dans les deux mesures (19 m) mais il a légèrement développé au niveau de la largeur dans les trois sections de mesure : la partie amont a élargi d'environ 30 cm, la partie médiane environ 14 cm et la partie aval d'environ 63 cm, cela est lié à l'affouillement des berges du ravin sous l'effet des précipitations qui prolongent sur une longue durée notamment durant la période hivernale. Durant cette période les sols imbibés par l'eau deviennent très visqueux et se développent en glissement superficiel vers l'aval et contribue au comblement de lit du ravin. La concentration du ruissellement dans le fond de ce dernier provoque l'élargissement de la section aval.



Photos 19. Ravin d'Ain Chibrik. (a) Situation du ravin en 2018. (b) situation du ravin en 2021

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie avale			Occupation du sol	Lithologie
1 ère mesure	9.0	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrain nu sur un versant pentu	Marne grise Messinien
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
		4.5	1.48	2.35	2.96	1.53	1.97	1.87	1.10	1.0		
2 ème mesure	9.0	4.8	2.90	2.60	3.10	2.50	1.70	2.5	0.9	2		

Tableau 7. Caractéristiques morphologiques du ravin d'Ain Chibrik

L'installation des griffes sur la berge droite du ravin sous l'effet des précipitations (photo 19 b), est le facteur responsable de l'augmentation de leur profondeur. La rive droite du ravin a approfondi d'environ 25 cm dans la partie amont et d'environ 1m dans la Partie avale (tableau 8).

	Profondeur de la rive gauche en (m)		Bilan	Conclusion	Profondeur de la rive droite en (m)		Bilan	Conclusion
	2018	2021			2018	2021		
Partie amont	1.48	2.90	+ 1.42	Creusement	2.35	2.60	+ 1.9	Creusement
Partie médiane	1.53	2.50	+ 0.97	Creusement	1.97	1.70	- 0.27	Comblement
Partie avale	1.10	0.9	- 0.20	Comblement	1.0	2.0	+ 1.0	Creusement

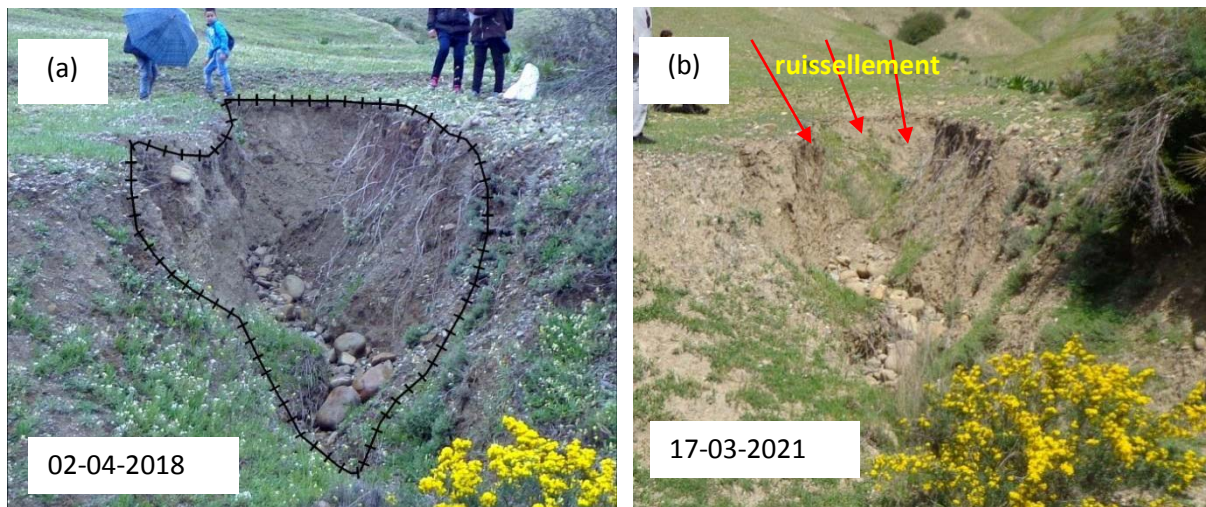
Tableau 8. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin d'Ain Chibrik entre 2018 et 2021

2. 3. Site de mesure de Ech-Chetba

Le ravin d'Ech-Chetba présente un autre exemple de la dynamique des ravins dans la zone d'étude. Il se développe dans un terrain de pâturage d'exposition nord-ouest, sur des pentes faibles d'environ 5° et 225 m d'altitude. Aussi, nous avons effectué deux mesures (le 02/04/2018 et le 17/03/2021), dont les résultats sont présentés dans le tableau 9.

Les résultats des mesures montrent une progression très nette du ravin d'Ech-Chetba au niveau de la longueur. Il a accru de 15 m en 2018 à 17 m en 2021. La deuxième remarque c'est

l'élargissement du ravin dans les trois sections de mesures, la partie amont a élargi d'environ 2 m, la partie médiane 1 m et la partie aval 1.02 m (tableau 10). La partie amont du ravin est la plus dynamique, elle a connu des évolutions remarquables au niveau du largueur et de la profondeur (creusement d'environ 1.9 m dans la rive droite), cela est expliqué par le fait d'acheminement des eaux de ruissellement proviennent des versants limitrophes, chargés des matériaux et qui sont concentrés dans le fond de ravin ce qui provoque le creusement de son lit et le sapement de ses berges.



Photos 20. Ravin Ech-Chetba. (a) situation du ravin en 2018. (b) situation du ravin en 2021

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie aval			Occupation du sol	Lithologie
1 ère mesure	15	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrains de pâturages	Marnes
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
		3.5	2.20	1.60	3.0	2.20	1.90	1.8	2.20	2.30		
2 ème mesure	17	5.5	2.90	3.50	4.0	2.80	2.80	2.2	2.20	2.0		

Tableau 9. Caractéristiques morphologiques du ravin d'Ech-Chetba

	Profondeur de la rive gauche en (m)		Bilan	Conclusion	Profondeur de la rive droite en (m)		Bilan	Conclusion
	2018	2021			2018	2021		
Partie amont	2.20	2.90	+ 0.70	Creusement	1.60	3.50	+ 1.9	Creusement
Partie médiane	2.20	2.80	+ 0.90	Creusement	1.90	2.80	+ 0.9	Creusement
Partie aval	2.20	2.20	0	Stable	2.30	2.0	-0.30	Comblement

Tableau 10. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin d'Ech-Chetba entre 2018 et 2021

Un autre processus intervient dans l'évolution de ce ravin c'est la dynamique exercée par l'oued de Khandak Zeyaten qui se caractérise par un écoulement saisonnier. Durant l'hiver et sous l'effet des précipitations concentrées dans le temps, le cours d'eau devient torrentiel et commence le sapement des berges, et les eaux débordent le lit de l'oued vers le ravin et contribuent à leur évolution. C'est pour cette raison que le lit de ravin est colmaté par des sédiments de grande taille (photo 20).

2. 4. Site de mesure de Redem

Le site de mesure de Redem correspond à un bad land qui se situe sur des matériaux très visqueux (marnes grises). Il est affecté par des glissements boueux et des glissements superficiels. Ce ravin est caractérisé par l'absence du couvert végétal et évolue sur un versant d'exposition sud, de 10° de pente et 462 m d'altitude.



Photos 21. Ravin de Redem. (a) situation du ravin en 2018. (b) situation du ravin en 2021

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie avale			Occupation du sol	Lithologie
1 ère mesure	12	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrains nus (Bad lands)	Marnes grises
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauc he	P.R droit		
		0.9	1.0	0.67	1.5	1.5	0.93	1.2	1.10	0.80		
2 ème mesure	12	0.9	1	0.9	1.5	1.5	1	1.3	1.10	1.0		

Tableau 11. Caractéristiques morphologiques du ravin de Redem

Les résultats de mesures (tableau 11) indiquent que le ravin de Redem a connu une faible dynamique entre les deux périodes de mesures (2018 et 2021). Le ravin n'a pas évolué en longueur (12 m dans les deux mesures) ni en largeur dans les parties amont et médiane, à l'exception de la partie avale qui a connu un léger élargissement de 10 cm.

La rive droite du ravin a connu une légère évolution au niveau de profondeur dans les trois sections de mesures (0.23 m dans la partie amont, 0.27 m dans la partie médiane et 0.20 m dans la partie avale), tandis que la rive gauche est stable (tableau 12).

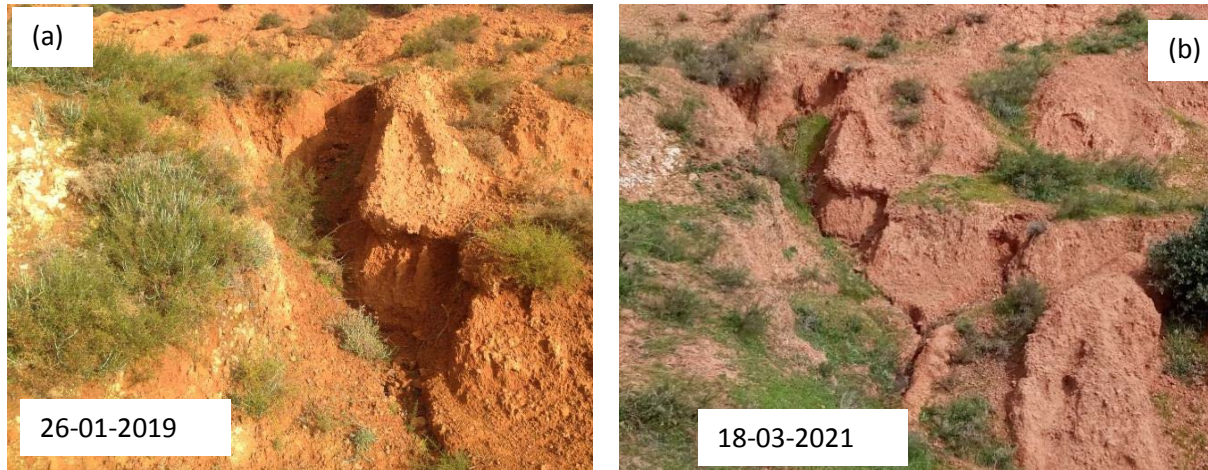
	Profondeur de la rive gauche en (m)		Bilan	Conclusion	Profondeur de la rive droite en (m)		Bilan	Conclusion
	2018	2021			2018	2021		
Partie amont	1.0	1.0	0	Stable	0.67	0.9	+ 0.23	Creusement
Partie médiane	1.50	1.50	0	Stable	0.93	1.2	+ 0.27	Creusement
Partie avale	1.10	1.10	0	Stable	0.80	1.0	+ 0.20	Creusement

Tableau 12. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Redem entre 2018 et 2021

Le ravin de Redem évolue sur un versant d'exposition sud qui est un versant ensoleillé et qui reçoit moins des précipitations (facteur générateur de la dynamique érosive). Ainsi que le ravin situé dans un terrain de ravinement généralisé qui atteint le stade final de dégradation. Il faut noter aussi que les précipitations étaient faibles durant les années 2018 et 2021. Tous ces facteurs expliquent la faible dynamique de ce ravin.

2. 5. Site de mesure de Bab Salam

Le ravin de Bab Salam présente un autre exemple de la dynamique des ravins par affouillement des berges. Le ravin se développe dans des colluvions rougeâtres, sur un versant d'exposition Sud caractérisé par une pente faible (4°) et une altitude de 802 m. Le site de mesures correspond à un terrain de pâturage colonisé par des plantes variées (photos 18).



Photos 22. Ravin de Bab Salam. (a) situation du ravin en 2019. (b) situation du ravin en 2021

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie aval			Occupation du sol	Lithologie
1 ère mesure	5.70	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrains de pâturages	Colluvions de couleur rouge
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
		0.8	0.85	0.9	1.6	1.5	1.60	1.2	0.90	1.10		
2 ème mesure	5.70	2.1	1.60	1.30	1.7	1.60	1.60	1.5	1.0	1.20		

Tableau 13. Caractéristiques morphologiques du ravin de Bab Salam

	Profondeur de la rive gauche en (m)		Bilan	Conclusion	Profondeur de la rive droite en (m)		Bilan	Conclusion
	2019	2021			2019	2021		
Partie amont	0.85	1.60	+ 0.75	Creusement	0.9	1.30	+ 0.40	Creusement
Partie médiane	1.5	1.60	+ 0.10	Creusement	1.60	1.60	0	Stable
Partie avale	0.90	1.0	+ 0.10	Creusement	1.10	1.20	+ 0.10	Comblement

Tableau 14. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Bab Selam entre 2019 et 2021

Le suivi de l'évolution de ce ravin est effectué par deux visites du terrain (le 26 janvier 2019 et le 18 mars 2021). Les résultats obtenus (tableau 13) montrent que le ravin de Bab Selam est stable au niveau de la longueur, en revanche, il a connu une évolution remarquable au niveau de la largeur et de la profondeur dans les trois sections mesurées.

Les résultats présentés dans le tableau 13 indiquent que la partie amont du ravin est la plus dynamique, le largueur de cette partie a évolué de 80 cm en 2019 à 2.1 m en 2021 soit un élargissement de 1.3 m. Elle a connu aussi une évolution au niveau de profondeurs dans ces deux rives, la rive gauche a approfondi de 0.75 m, tandis que la rive droite a approfondi de 0.40 m. La partie médiane a connu un léger élargissement de 0.10 m entre 2019 et 2021, concernant la profondeur de ces rives, on note la stabilité de la rive droite et une incision de 0.10 m pour la rive gauche. Pour la partie avale du ravin, les mesures montrent un élargissement de 0.30 m, et un profondément de 0.10 cm dans les deux rives (tableau 14).

La dynamique du ravin de Bab Selam est liée à la fragilité des formations lithologiques (colluvions), et l'agressivité des précipitations. Ainsi, ce ravin évolue dans un terrain de pâturage, donc les sols sont tassés par le piètement des troupeaux ce qui diminue l'infiltration et favorise le ruissellement qui se concentre dans le lit du ravin et contribue au sapement de ces berges.

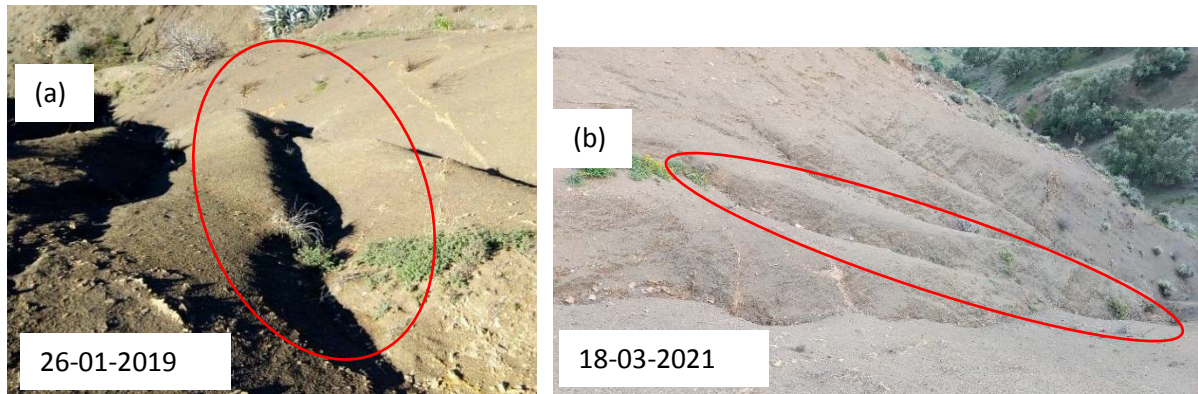
2. 6. Site de mesure du ravin de Dahir

Le ravin de Dahir est localisé dans le douar Jamaa Delem, sur un versant d'exposition Sud, caractérisé par une forte pente (15°) et une altitude de 637 m. Il évolue dans les pélites noires du Crétacé moyen, sur un versant nu.

	Profondeur de la rive gauche en (m)		Bilan	Conclusion	Profondeur de la rive droite en (m)		Bilan	Conclusion
	2019	2021			2019	2021		
Partie amont	0.55	0.55	0	Stable	0.56	1.30	+ 0.74	Creusement
Partie médiane	0.60	0.70	+ 0.10	Creusement	1.30	1.20	- 0.10	Comblement
Partie aval	0.57	0.50	- 0.07	Comblement	0.50	1.10	+ 0.6	Creusement

Tableau 15. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Dahir entre 2019 et 2021

Les résultats de mesures (tableau 16) montrent que le ravin a évolué en longueur, de 7.30 m en 2018 à 8.70 m en 2021, soit une évolution de 1.4 m. Le ravin a connu aussi une évolution au niveau de la largeur dans les parties amont (élargissement de 35 cm) et aval (élargissement de 50 cm). En revanche aucun élargissement remarqué dans la partie médiane.



Photos 23. Ravin de Dahir. (a) situation du ravin en 2019. (b) situation du ravin en 2021

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie aval			Occupation du sol	Lithologie
1 èremesu re	7.3 0	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrains nus	Pélite noire de Crétacé moyen
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
		0.85	0.55	0.56	1.7	0.60	1.30	1.0	0.57	0.50		
2 ème mesure	8.7	1.20	0.55	1.30	1.7	0.70	1.20	1.5	0.50	1.10		

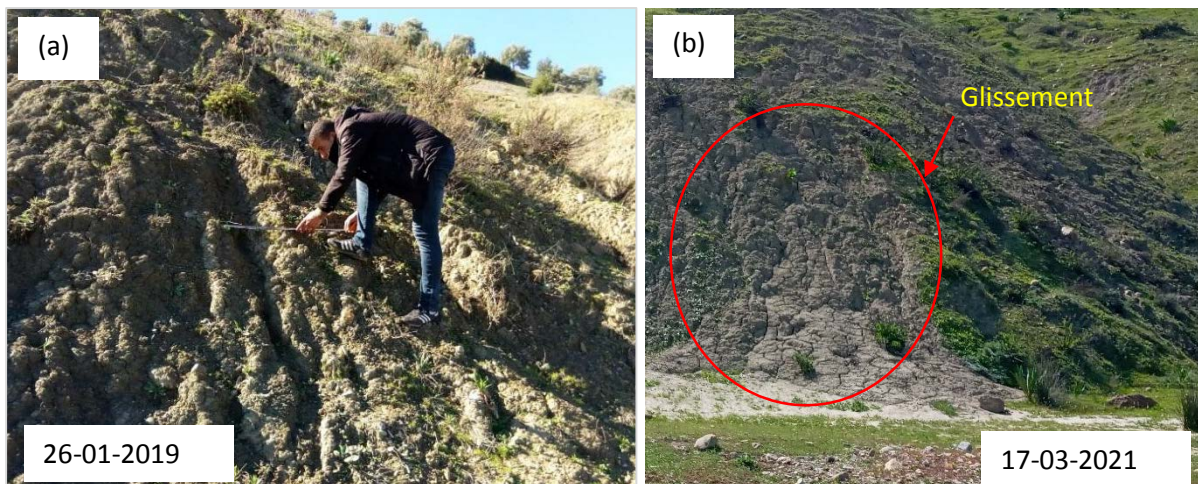
Tableau 16. Caractéristiques morphologiques du ravin Dahir

Les résultats présentés dans le tableau 15 montrent une succession de creusement et de comblement dans les deux rives du ravin de Dahir. Pour la rive gauche on note un léger creusement de 0.10 m dans la partie médiane et un faible comblement de 0.07 m dans la partie aval. La rive droite réagit d'une manière différente, on note un faible creusement dans la partie amont (0.74 m) et aval (0.6 m) et un colmatage dans la partie médiane (0.10 m). Cela est expliqué par le fait de transporter des sédiments érodés de l'amont vers l'aval et l'existence d'une certaine rupture de pente qui favorise la sédimentation des éléments arrachés depuis les parois.

3. Dynamique des ravins par colmatage total

3. 1. Site de mesure : Ravin localisé sur la rive droite d'oued Dardar

Ce ravin est développé sur un versant d'exposition nord-est, sur une faible pente d'environ 5° et sur une altitude de 405 m. Il est localisé dans un terrain nu sur la rive droite d'Oued Dardar. Aussi pour ce ravin nous avons effectué deux visites du terrain : le 26 janvier 2019 et le 13 mars 2021 (décalage de 2 ans).



Photos 24. Ravin d'oued Dardar. (a) situation du ravin en 2019. (b) colmatage total du ravin en 2021 par un glissement boueux

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie avale			Occupation du sol	Lithologie
1 ère mesure	2.3	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrains nus	Marnes
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
			0.45	0.30		0.3	0.4		0.35	0.20		
2 ème mesure	Colmatage total du ravin par un glissement											

Tableau 17. Caractéristiques morphologiques du ravin d'oued Derdar

Le ravin mesuré a connu un colmatage total par le déclenchement d'un glissement boueux, sous l'effet des précipitations. Les sols sont saturés d'eau (photos 24), ils deviennent très visqueux et s'écoulent jusqu'en bas de la pente sous forme d'un glissement. La faible résistance des matériaux (marnes) et l'absence du couvert végétal protecteur du sol sont les facteurs responsables de la dynamique érosive de ce ravin.

4. Les ravins stables

4. 1. Site de mesure : Koudiya Louza

Le ravin de Koudiya Louza présente le type des ravins stables dans la zone d'étude, il est localisé sur un terrain de conglomérat moyennement cimenté d'âge Brrémien, sur une altitude de 469 m et une pente de 11°. Le ravin est exposé vers le sud-est, localisé sur la berge gauche d'un ravin végétalisé (photo 25). Les deux mesures effectuées (le 26 janvier 2019 et le 13 mars 2021) permettent de montrer que le ravin est stable (tableau 18).

Cette stabilité est expliquée par plusieurs facteurs. Le premier, c'est la nature lithologique du substrat sous-jacent dominé par le conglomérat moyen cimenté qui présente une certaine résistance contre l'érosion hydrique. Le deuxième facteur c'est l'aménagement de la piste localisée en amont du ravin, par l'incision d'un canal de diversion à côté pour le drainage des eaux de

ruissellement. Le dernier facteur c'est l'existence du couvert végétal dense dans la partie aval du ravin qui permet l'infiltration des eaux et stabilise les berges du ravin par les racines.

	L (m)	Partie amont			Partie médiane			Partie aval			Occupation du sol	Lithologie
1 ère mesure	5	(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		(l) m	Profondeur (m)		Terrain nu sur la berge gauche d'un ravin végétalisé	Conglomérat moyen cimenté
			P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		P. R. gauche	P.R droit		
		1.0	0.70	0.80	0.8	0.60	0.50	0.6	0.30	0.50		
2 ème mesure	5	1.0	0.70	0.80	0.8	0.60	0.50	0.6	0.3	0.50		

Tableau 18. Caractéristiques morphologiques du ravin de Koudiya Louza



Photo 25. Ravin de Koudiya Louza en 13 mars 2021

Le suivi de la dynamique des ravins dans le Haut Ouergha nous a permis de montrer le rythme et la manière de leurs d'évolution et les facteurs intervenant dans cette dynamique.

Les ravins se développent rapidement sur les terrains marneux, suite à la faible infiltration et la faible résistance contre l'érosion hydrique. Durant la période pluvieuse, les sols deviennent très visqueux, et le ruissellement trouve son chemin facilement et contribue à l'incision des berges et le lit de ravins. Dans les terrains moyens résistants (flysch et conglomérat moyen cimenté),

l'évolution des ravins semble un peu lente, cela est justifié par l'infiltration des eaux de ruissellement et la cohérence du substrat.

L'exposition des versants joue également un rôle important dans l'évolution des ravins dans la zone d'étude. Les ravins exposés vers le nord et le nord-ouest se développent rapidement. Ces versants humides reçoivent des quantités importantes des précipitations qui favorisent la concentration du ruissellement. En revanche les ravins d'exposition sud et sud-est se développent d'une manière lente, puisqu'ils reçoivent de faibles quantités de précipitations.

Les résultats montrent aussi que la dynamique des ravins se fait par plusieurs manières selon les conditions et les caractéristiques du site de mesure. Certains ravins se développent par le recul de la tête, sous l'effet de la suffosion (cas de ravin Khandak Zeyaten). D'autres ravins évoluent par le creusement et l'affouillement du fond, suite à la concentration des eaux de ruissellement provenant des versants limitrophes. On trouve aussi des ravins qui évoluent à cause du sapement de ses berges, par l'effet du ruissellement qui creuse le contrebas des berges et contribue à l'élargissement du ravin. Dans certains cas, les ravins sont totalement colmatés par les glissements qui affectent les versants friables, dénudés et pentus.

Conclusion

L'érosion hydrique dans le Haut Ouergha est très active, cela se traduit par la variété des formes d'érosion qui ruinent les terrains nus et les versants pentus. En effet, l'érosion en nappe est développée partout. Elle est présente sur tous les faciès et sur toutes les gammes de pentes, ce qui menace directement la productivité des terres, mais elle est moins importante que les incisions linéaires et les ravinements qui produisent l'essentiel des sédiments dans la région.

Les mouvements de terrain sont plus fréquents sur les versants caractérisés par une lithologie hétérogène d'expositions ouest. L'extension des bad lands dans la zone d'étude est limitée, on les observe généralement sur les terrains marneux. Les éboulements rocheux sont localisés sur les versants des hautes crêtes, notamment les faciès de calcaire.

Le suivi de la dynamique des ravins dans la zone d'étude montre une variation très nette au niveau du rythme d'évolution et les processus intervenants, selon le type d'occupation des sols et les conditions lithologiques et topographiques des sites de mesure. Les ravins mesurés montrent quatre

types importants d'évolution : le recul de la tête du ravin, l'élargissement du ravin par le sapement de ses berges, le colmatage total par les glissements et les ravins stables.

L'évaluation de la dynamique érosive dans la zone d'étude par le suivi de l'évolution des ravins semble très importante pour valider les méthodes d'évaluation qualitative et quantitative d'érosion hydrique (PAP/CAR et EPM) d'une part. D'autre part, il permet de mettre le doigt sur les processus qui interviennent dans cette dynamique.

CHAPITRE 3

ÉVALUATION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE HAUT OUERGHA

Introduction

L'érosion est un problème mondial qui réduit sérieusement la productivité agricole et la disponibilité de l'eau (Parveen et Kumar, 2012 ; Koirala et al., 2019). Selon certaines estimations, les taux moyens des pertes en sol dans le monde varient entre 12 et 15 tonnes ha/an (Ayt Ougougdal et al., 2020 ; Koirala et al., 2019). En Afrique la dégradation des sols par l'érosion hydrique constitue l'une des contraintes sérieuses au développement agricole (Kimaro et al., 2008).

Au Maroc, les problèmes d'érosion sont connus depuis plusieurs décennies (sabir et al., 2002), et affectent environ 40% des terres (Chevalier et al., 1995 *in* Belasri et Lakhouili, 2016 ; El Jazouli et al., 2019 ; Acharki et al., 2022). Heusch, (1970) a montré que 60 % des pertes en sol au Maroc proviennent essentiellement du Rif, où les taux d'érosion atteignent parfois 30 à 60 t/ha/an dans certaines parties (Lahlou, 1977 ; Ait Fora, 1955 *in* Belasri et Lakhouili, 2016). Cette partie du Maroc constitue un milieu fertile pour les chercheurs, notamment les travaux concernant l'érosion hydrique. Plusieurs études ont été effectuées dans l'objectif d'évaluer le taux des sols perdus par l'application de plusieurs méthodes.

Le Haut Ouergha (Rif Central) est sujet à une dynamique érosive très intense, résultat de l'interaction des facteurs naturels et anthropiques. Les signes de cette dégradation sont nettement observables sur les versants et se traduisent par la diversité des formes d'érosion, affectant la productivité des terres et compromettant la durabilité et la stabilité des infrastructures.

Le développement des systèmes d'informations géographiques (SIG) a contribué à la spatialisation du risque de l'érosion et à la cartographie de la dégradation des milieux, en facilitant l'application des méthodes d'évaluation qualitative et quantitative de ce phénomène.

Ce chapitre est réservé à l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique, par l'application de deux méthodes ; la première est l'approche PAP/CAR, qui permet la spatialisation de l'ampleur de l'érosion dans la zone d'étude. Tandis que la deuxième est la méthode EPM de Gavrilovic réservée à l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique. L'application de ces deux méthodes permet d'une part d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique, et d'autre part, de quantifier le taux des matériaux arrachés.

1. Aperçu historique sur les études de quantification de l'érosion hydrique au Maroc

Les premières études de quantification de l'érosion hydrique au Maroc ont été effectuées dans le bassin de l'oued M'da en 1968. L'installation de trois parcelles expérimentales dans trois zones différentes (la première est occupée à 100 % par une végétation arborescente, la deuxième est partiellement défrichée et la troisième est complètement défrichée et cultivée par des céréales), permet la comparaison entre ces parcelles. En 1970, Heush et Kalman ont comparé les résultats obtenus au niveau des trois parcelles, et ils ont montré le rôle important du couvert végétal dans la diminution du taux des éléments arraché par l'érosion hydrique.

En 1990, un groupe des chercheurs du laboratoire de géomorphologie de l'Université Mohamed V de Rabat ont effectué une étude sous la direction de Laaouina. Leur principe était l'installation de plusieurs parcelles dans quatre régions différentes de point de vue bioclimatique, structural, occupation du sol... Ces régions sont le Maroc oriental, le Rif central, la forêt d'El Maamoura et la forêt de Ben Sliman. L'objectif principal a été de comparer les résultats obtenus par celle de l'oued M'da.

Durant les années quatre-vingt-dix, le centre régional d'aménagement des forêts et des bassins versants a réalisé une étude dans le cadre de projet Mor/93/010 financé par la FAO. L'objectif de cette étude a été la quantification d'érosion hydrique et l'adaptation de l'équation universelle de perte en sol (USEL) aux conditions marocaines, par l'installation d'un réseau des parcelles expérimentales.

En parallèle, plusieurs études de quantification d'érosion hydrique ont été réalisées par les agronomes, les forestiers, les géologues et les géographes, par l'utilisation des parcelles expérimentales, la simulation de pluies, les repères, C^{137} et l'équation universelle de perte en sol. (Sabir, 1989 ; Layachi, 1992 ; Tahiri, 1992 ; Bouhlassa, 1992 ; Touzani, 1993 ; Azzenfar, 1993 ; Al Aabari, 1993 ; Chaker, 1997 ; Ezzine, 1998 ; Moussadek, 1999 ; Moukhchane, 1999 ; Rahou 1999).

Au cours des années 2000 - 2010 les bassins rifains ont fait l'objet de plusieurs études relatives à l'évaluation de l'érosion hydrique par l'application de différentes méthodes (Moufaddal, 2002 ; Moukhchane, 2002 ; Naimi et al., 2002 ; Aït Brahim, 2003 ; El Garouani, 2003 ; Faleh, 2004 ; El Garouani et al., 2007 ; Mastas, 2008 ; Tribak et al., 2009 ; Abhrour, 2009 ; Damnati et al., 2010). Après l'année 2010, et par le développement du système d'information géographique, le nombre des études concernant la quantification d'érosion hydrique par l'USLE modifiée RUSLE a connu

une augmentation remarquable, tandis que les autres méthodes traditionnelles ont enregistré une faible utilisation (Raissouni et al., 2011 ; Zouagui et al., 2012 ; Tribak et al., 2012 ; Raissouni, 2012 ; Tahiri et al., 2014 ; Chaaouane, 2015 ; Khali Issa et al., 2016 ; Belasri et Lakhouili, 2016).

La méthode EPM de Gavrilovic est récemment appliquée au Maroc. Elle a connu une large utilisation par les chercheurs (Chaaouane et al., 2013 ; El-Bouhali et al., 2019 ; Zahnoun et Al Karkouri, 2020 ; El Ouazani Ech-Chahdi et al., 2021 ; Lakhili et al., 2021).

En parallèle avec l'application des méthodes d'évaluation quantitative d'érosion hydrique, l'approche PAP/CAR a été appliquée au Maroc par plusieurs chercheurs et organisations et elle a connu une large utilisation au niveau des bassins marocains, notamment les bassins situés dans le Rif et le Pré-rif (Mastas, 2008 ; Sadiki et al., 2012 ; Mesrar et al 2012 ; Ouallali et al., 2016 ; Gartet et EL-Meftahy, 2016 ; Boukrim et al., 2016 ; Hili et al., 2020 ; Tahouri et al., 2022).

Résultats d'évaluation qualitative et quantitative d'érosion hydrique dans les bassins rifains

Les résultats d'application des différentes méthodes d'estimation quantitative d'érosion hydrique dans les bassins du Rif marocain (tableau 19) indiquent que cette partie du Maroc produit des quantités importantes des sédiments.

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les bassins de Tarmast et Amzaz avec une perte moyenne de 78 t/h/an durant l'année 2015, dans le bassin de Merkat avec une valeur de 76.78 t/h/an en 2004 et 62.72 t/h/an dans le bassin de Haricha en 2014 (tableau 19).

Les études effectuées dans les bassins rifains montrent des résultats très contrastés, malgré l'application de la même méthode et durant la même année. Par exemple, l'application du RUSEL dans le bassin d'oued Tlata en 2008 a montré des résultats différents ; l'étude de El Garouani et al., (2008) indique que ce bassin produit 22 t/h/an comme une valeur minimale et 250 t/h/an comme une valeur maximale, tandis que Chen et al., (2008) ont obtenus un taux minimal de 12,51 t/h/an et un taux maximal de 200 t/h/an.

Bassin	Auteur	Année	Méthode	Superficie Km ²	Moyen t/ha/an	Min t/ha/an	Max t/ha/an
Ouergha							
Ouergha	Plan d'aménagement antiérosif	1995	USLE	7300	-	< 15	> 120
Sahla	Mastas	2008	USLE	116,3	10	-	-
	Sadiki et al	2009	USLE		22	< 7	> 35
Amzaz	Chaaouane	2015	MUSEL	572	78	0	500
			EPM		10400 (m ³ /km ² /an)	45 (m ³ /km ² /an)	114500 (m ³ /km ² /an)
Boumlal	El-Bouhali et al	2019	EPM	42	-	< 0.5 (m ³ /km ² /an)	> 200 (m ³ /km ² /an)
Nakhla							
Nakhela	Moufaddal	2002	Parcelles expérimentales	110	3,3	-	-
	Moukhchane	2002	Parcelles expérimentales		1,1	-	-
	Moufaddal	2002	Bathymétrie		17	-	-
	Moukhchane	2002	Bathymétrie		18,8	-	-

Chapitre 3 : Evaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha

	Naimi et al	2002	Levés topographiques		35,9	-	-
	Moufaddal	2002	¹³⁷ C		45,9	-	-
	Moukhchane	2002	¹³⁷ C		39,6	-	-
	Damnati et al	2010	¹³⁷ C		-	18	41
Larbaa							
Tlata	El Garouani et al	2007	RUSLE		-	12,5	200
	El Garouani et al	2008	RUSLE		-	22	250
	Chen et al	2008	RUSLE	123	-	12,51	200
	Tribak et al	2009	USLE		-	34,65	129,12
	Abhrour	2009	RUSLE		-	7.41	32,13
Tarmast	Tribak et al	2012	RUSLE	69,58	-	7	129
	Tribak et al	2015	MUSLE		78	<7	<32
Tahaddart							
Haricha	Tahiri et al	2014	RUSLE	221,82	62,72	0	>400
		2016	RUSLE				
Sania	Tahiri et al	2014	RUSLE	177	47,18	0	>600
El hachef	Moukhchane et al	1999	¹³⁷ C	219	49,10	<20	>140
Kalaya	Khali Issa et al	2016	USLE	38,37	34,74	<12	>120
El hachef	Tahiri et al	2017	RUSLE	219	27,13	-	-

Chapitre 3 : Evaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha

Mharhar				319	64,68	-	-
Kharoub				426,70	52,17	-	-
Sania				177	47,18	-	-
Merkat	Faleh	2004	USLE	48,19	76,78	< 7,41	> 32,13
			¹³⁷ C		27,5	-	-
			Bathymétrie		41,6	-	-
Aknoul	Faleh	2004	USLE	91,72	38,89	< 7	> 200
			¹³⁷ C		28,09	-	-
			Bathymétrie		39,9	-	-
Moulay Bouchta	Zouagui et al,	2012	¹³⁷ C	76,64	23	4,5	36
		2018	USLE		39,5	16,2	81,4
Boussouab	Sadiki	2005	USLE	252,20	55	0,09	1159,51
			¹³⁷ C		-	5	48,10
Jemaa	El Garouani et al	2003	USLE	120	27,5	1	264
Khmiss							
Khmiss	Raissouni et al	2011	USLE	293	37	0	> 200
Mgaz Es-Sebt	Raissouni et al	2012	USLE	37,65	48	< 3	> 150
Barrage Smir	Raissouni	2012	USLE	66,39	45,45	< 3	> 200

Barrage Raouz				46,02	35	0	> 200
Iben Batouta				178,24	39,6	0	> 200
Aliane				121,39	43,5	0	> 200
Barrage Ajras				37,87	41,7	0	> 200
Arba Ayacha	Ouallali et al	2016	RUSLE	199,95	25,77	0,11	468
Bni Boufrah	El karkouri	2003	USELE	162	45	-	-
	Zahnoun et al	2016	EPM		43,68	0,81	182,7

Tableau 19. Résultats de l'évaluation quantitative de l'érosion dans les bassins Rifains de 1995 à 2016

Bassin	Auteur	Année	Méthode	Superficie km ²	Classe d'érosion domine
Sahla	Mastas	2008	PAP/CAR	173,89	70 % : érosion élevée et très élevée
	Mesrar et al	2014	PAP/CAR modifié		> 36% : Notable
Amzaz	Mesrar	2010	PAP/CAR	572	62% : érosion élevée et très élevée
	Chaaouan	2015	PAP/CAR		38% : érosion élevée
	Chaaouan	2015	EPM		60% : Forte à très forte
Larbaa	Sadiki et al	2012	PAP/CAR	267,3	53% : très élevée et extrêmes
Aoudour	Boukrim et al	2016	PAP/CAR	1000	40 % : Faible
Bni Boufrah	Aboulabbes et al	2003	PAP/CAR	156	Plus de 50% : très élevé
Arba Ayacha	Ouallali et al	2016	PAP/CAR	199,95	51% : Forte à très forte
Oued Islane	Gartet et al	2016	PAP/CAR		50% : érosion faible

Tableau 20. Résultats de l'évaluation qualitative de l'érosion dans les bassins Rifains de 2003 à 2016

Les résultats d'application des méthodes spécifique à l'évaluation qualitative de l'érosion hydrique (PAP/CAR et EPM) dans le Rif marocain (tableau 20) montrent que la potentialité érosive diffère d'un Bassin à l'autre et les résultats d'évaluation oscillent entre des classes d'érosion notable et très élevée. Selon Boukrim et al., (2016) la classe d'érosion faible occupe 40 % du bassin d'Aoudour, dans le bassin de l'oued Sahla la classe d'érosion domine est notable, elle occupe plus de 36 % de la superficie totale du bassin (Mesrar, et al., 2014). Les classes élevées à très élevé sont dominées dans le bassin versant de l'oued Larbaa, elles couvrent 53 % de la surface totale du bassin (Sadiki et al., 2012). La corrélation entre la méthode PAP/CAR et les méthodes de quantification restent discutables (Chaaoune, 2015). L'utilisation du modèle EPM dans le bassin versant d'Amzaz montre que plus de 60 % de sa superficie est affectée par une érosion forte à catastrophique, tandis que l'utilisation du PAP/ CAR a donné un pourcentage de 38%.

2. Évaluation qualitative de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha par l'application des méthodes PAP/CAR et EPM

2. 1. Estimation de l'érosion hydrique par la méthode PAP/CAR

Le centre d'activités régional pour le programme d'action prioritaire (PAP/CAR), agissant dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée (PAM) du 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" (PAP/CAR, 1998).

L'approche PAP/CAR vise un objectif immédiat qui est de rendre disponible un outil méthodologique et une source d'information pour la mise en œuvre de projets et programmes de gestion et contrôle de l'érosion et de la désertification, et des objectifs à long terme qui contribuent à atténuer et à mieux contrôler les processus d'érosion et de désertification pour améliorer l'utilisation des terres et rationaliser l'exploitation des ressources en terres. Enfin améliorer les conditions de vie et la sécurité alimentaire des populations (PNUE, PAM et PAP, 2005).

L'intérêt de cette approche est de fournir pour chaque facteur de l'érosion, une quantification et une cartographie qui est un outil important pour le diagnostic des zones les plus sensibles à l'érosion. Les SIG ont été utilisées pour l'analyse et la cartographie des différentes caractéristiques

de la zone d'étude, notamment celles intervenant dans les processus érosifs (pente, lithologie, couvert végétal et occupation des sols).

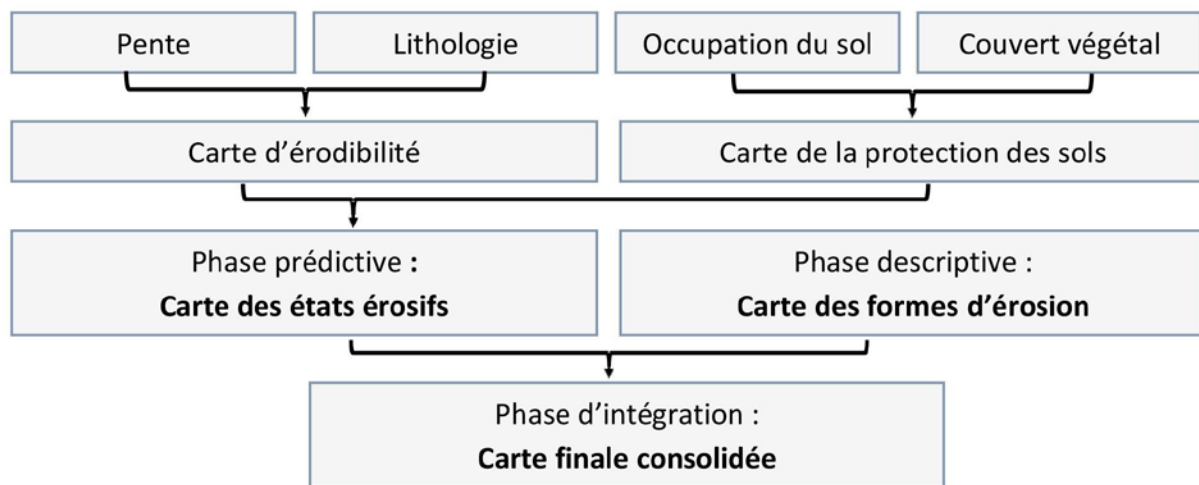


Figure 63. Schéma méthodologique de la méthode PAP/CAR

PAP/CAR se base sur trois phases bien détaillées dans la directive (PAP/CAR, 1998), qui sont la phase prédictive, la phase descriptive et la phase d'intégration (figure 63). Dans ce chapitre nous avons focalisé sur la phase prédictive de l'approche, afin de réaliser la carte de la sensibilité à l'érosion dans le Haut Ouergha. Cette phase consiste principalement à un traitement de données selon une séquence de 7 opérations différentes :

- Opérations 1 et 2 : Élaboration de la carte des classes de pentes et de lithofaciès ;
- Opération 3 : Carte d'érodibilité par superposition de la carte des pentes et la carte de lithofaciès ;
- Opérations 4 et 5 : Réalisation des cartes d'occupation des sols et de couvert végétal ;
- Opération 6 : Carte de protection des sols par croisement des cartes d'occupation des sols et de couvert végétal ;
- Opération 7 : Carte des états érosifs par superposition des cartes d'érodibilité et de protection des sols.

2. 1.1. Réalisation de la carte des pentes

La pente est un facteur clé dans le déclenchement des risques de ruissellement et d'érosion. Elle contrôle la capacité du ruissellement au détachement et au transport des particules sur les versants (Tribak, 2000). Cerdan et al., (2010) indiquent que dans les terres arables, les taux d'érosion augmentent généralement avec l'inclinaison et la longueur de la pente.

La carte de pentes est obtenue à partir d'un MNT (ASTER GDEM à résolution spatiale de 30 m). Par l'utilisation du logiciel SIG, nous avons classé les pentes selon la classification menée par l'approche PAP/CAR (1998).

Classes	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%)

Tableau 21. Classes de pentes selon (PAP/CAR 1998)

Les résultats obtenus (figures 64 et 65) indiquent que la zone d'étude est dominée par la classe des pentes très abruptes (entre 20 et 35%), qui occupe 35.58 % de la superficie totale. Les pentes abruptes couvrent 31% et les pentes extrêmes occupent 5.95%. Tandis que les pentes faibles et modérées occupent des surfaces limitées (environ 26%), et se concentrent dans la partie médiane de l'aire d'étude.

Donc, le facteur topographique dans notre zone d'étude engendre des conditions très favorables au déplacement rapide de l'eau de ruissellement de l'amont vers l'aval et augmente l'énergie d'écoulement ce qui favorise une forte dynamique des versants.

2. 1. 2. Élaboration de la carte des lithofaciès

La carte des lithofaciès (figure 66) est réalisée à partir de la carte géologique de Dhar Souk 1/50000, elle montre la répartition des différentes formations lithologiques. Ces formations sont réparties en cinq classes suivant le degré de leur résistance selon la classification propre de PAP/CAR (tableau 22).

L'analyse des résultats obtenus (figures 66 et 67) indique que le Haut Ouergha est dominé par des formations lithologiques moyennement résistantes (3 c). Elles s'étalent sur plus de 51 % de la superficie totale de l'aire d'étude. Les roches à faible résistance (4d et 5e) occupent environ 33%, ce sont des formations facilement érodables (les argiles, marnes et sol meuble). Les formations

résistantes à très résistantes (1a et 2 b), occupent des surfaces limitées environ 14% de la zone d'étude.

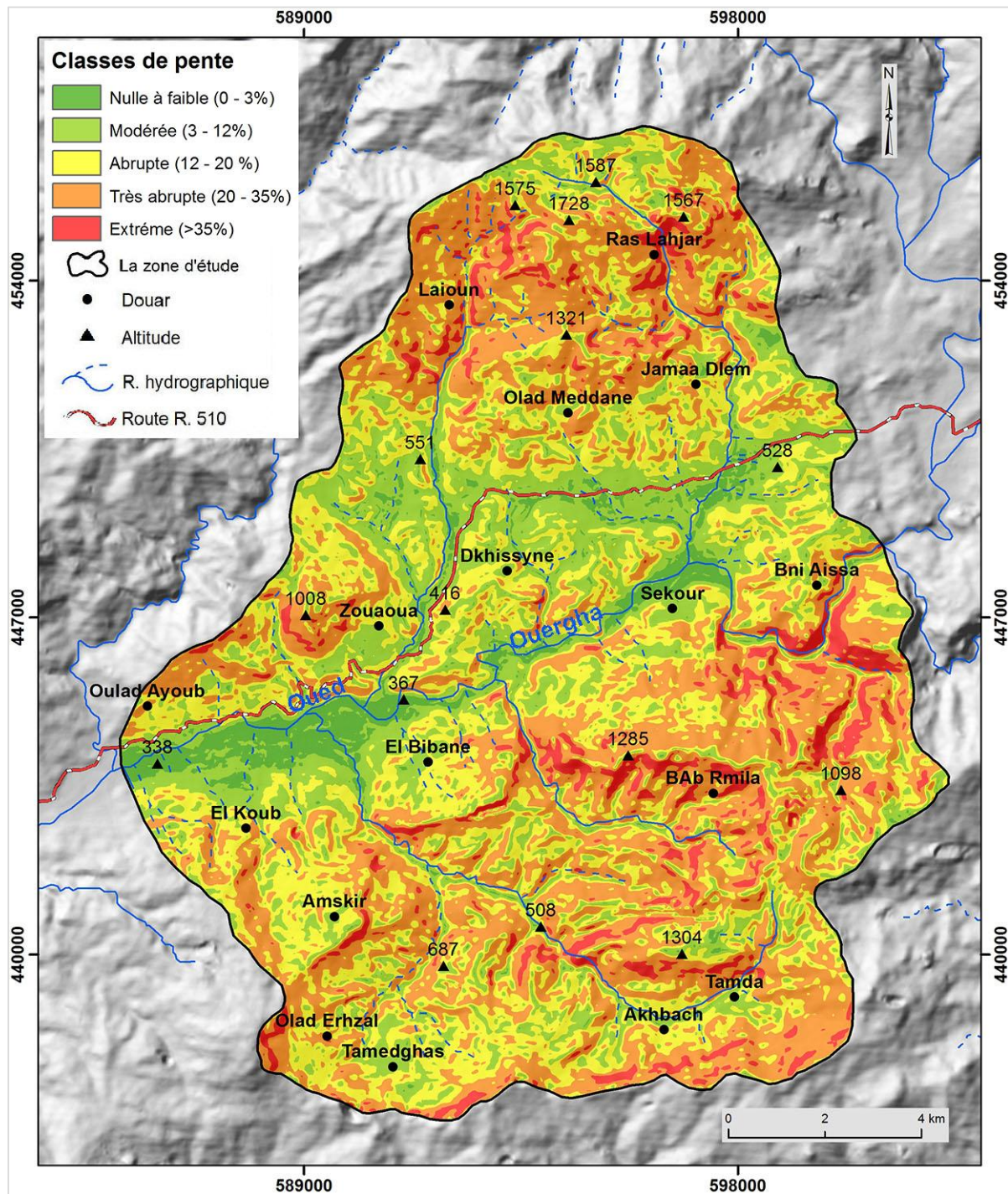


Figure 64. Répartition des pentes dans le Haut Ouergha selon la classification de PAP/CAR (MNT, ASTER GDEM résolution 30 m)

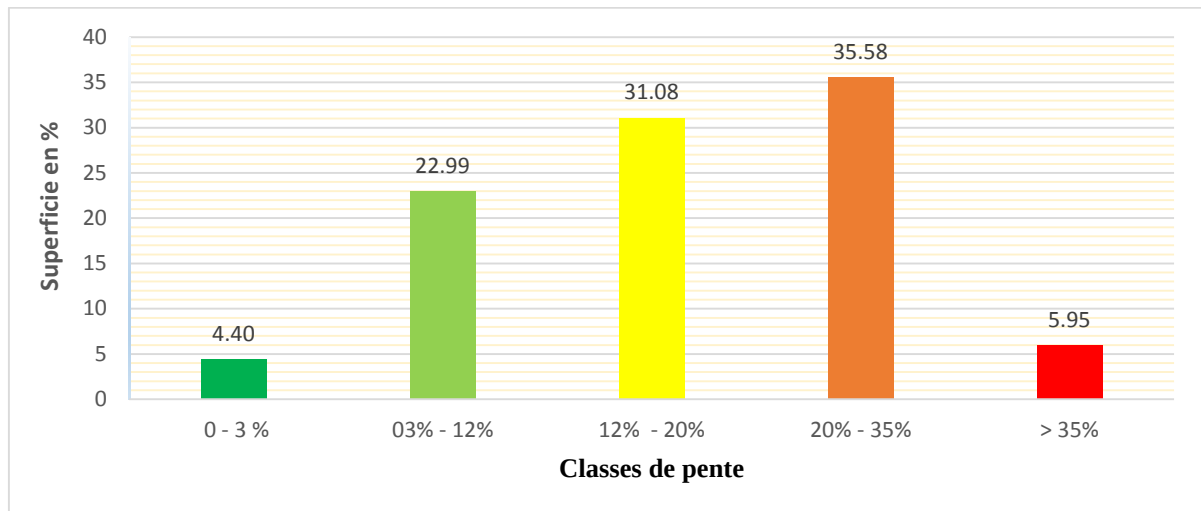


Figure 65. Répartition des classes de pentes en fonction de la superficie en %

Classes de lithofaciès	Type de matériel
1 (a)	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, croûtes, affleurements de grès ferrugineux (calcaires massifs, sols fortement rocheux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroûtés).
2 (b)	Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés.
3 (c)	Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.)
4 (d)	Roche et/ ou sols peu résistants ou fortement/ profondément altérés (marne, gypse, ardoise argileuse, etc.)
5 (e)	Sédiment ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique.

Tableau 22. Classes de lithofaciès (PAP/CAR 1998)

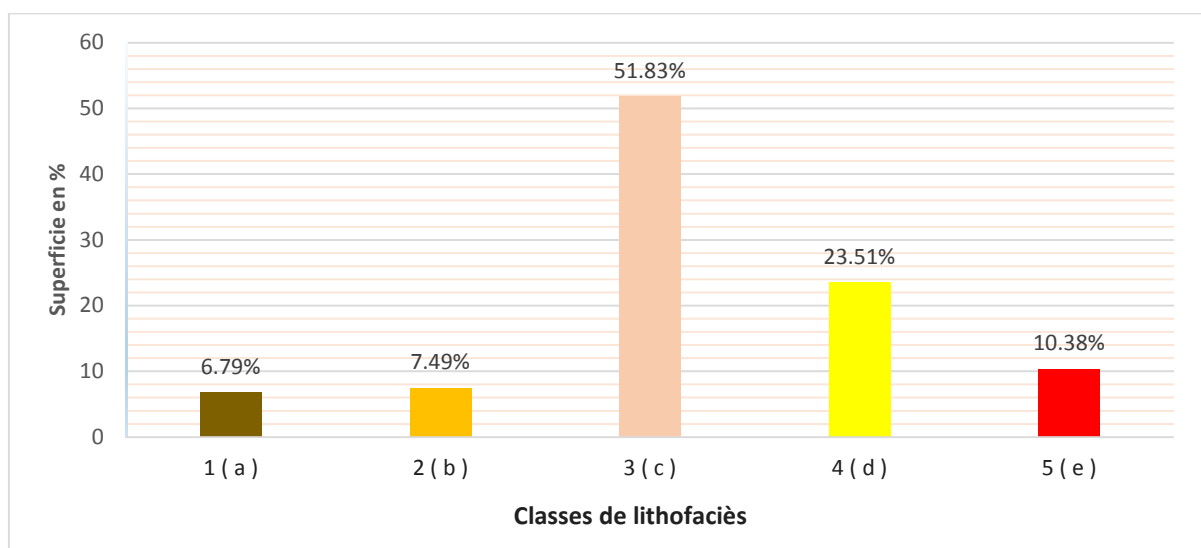


Figure 66. Répartition des classes de lithofaciès en fonction de la superficie en %

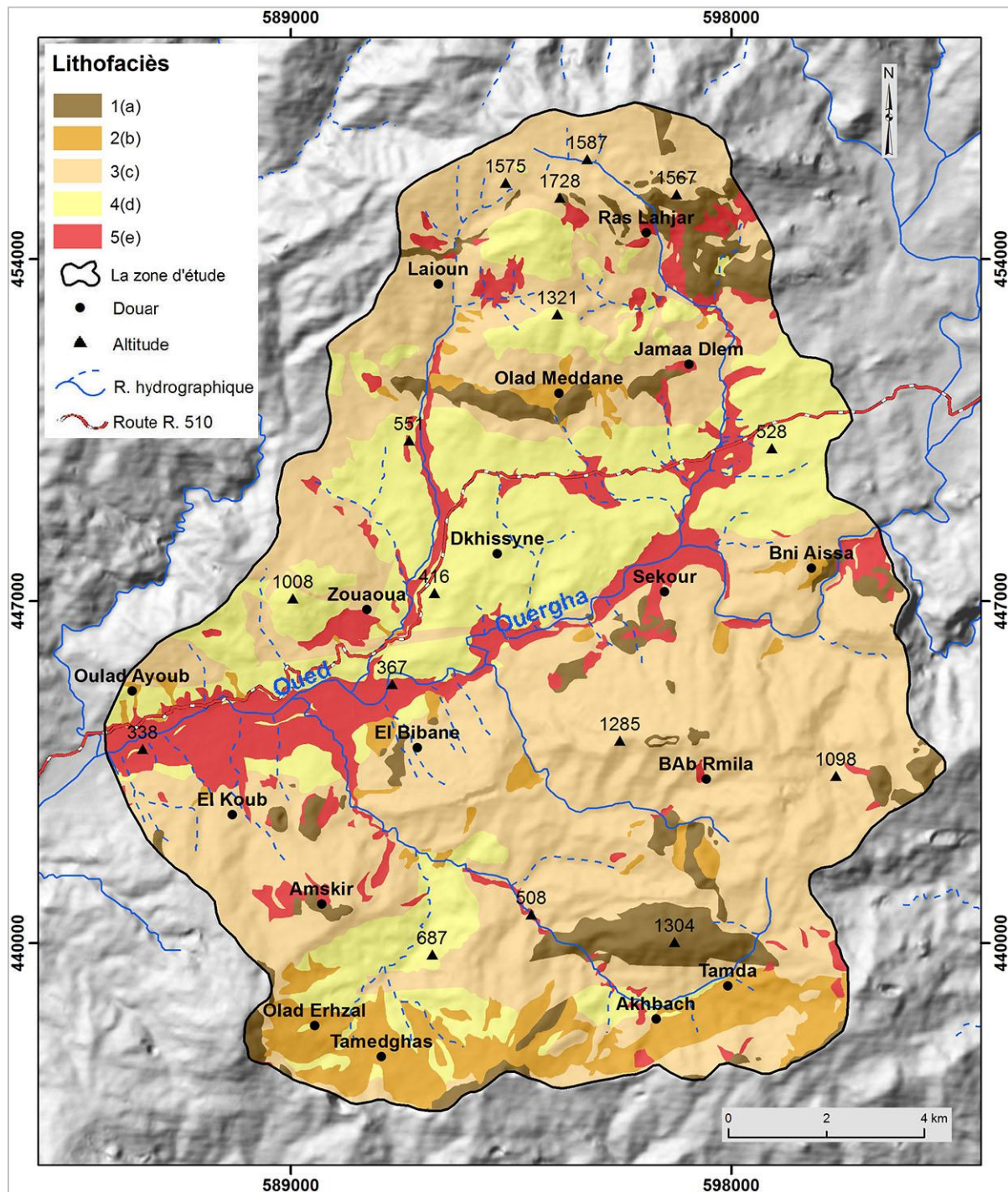


Figure 67. Carte des lithofaciès selon la classification de PAP/CAR (carte géologique de Dhar Souk 1/50000).

1(a) : Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, croûtes, affleurements de grès ferrugineux (calcaires massifs, sols fortement rocheux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroûtés). **2(b) :** Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés. **3(c) :** Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.).

4(d) : Roche et/ ou sols peu résistants ou fortement/ profondément altérés (marne, gypse, ardoise argileuse, etc.). **5 (e)** : Sédiment ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique.

2. 1. 3. Réalisation de la carte d'érodibilité

La carte d'érodibilité (figure 68) est élaborée par la superposition de la carte des pentes et la carte des lithofaciès. Les polygones résultant de la superposition des deux cartes de référence sont classés suivant la matrice présentée dans le tableau 23.

Classe de pente	Classe de lithofaciès				
	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

Tableau 23. Matrice de superposition de la carte des pentes et la carte de Lithofaciès (PAP/CAR. 1998)

La corrélation des deux cartes (pentes, lithofaciès) montre une relation très forte entre les facteurs. Le degré d'érodibilité est toujours extrême lorsque la pente est forte et/ou les formations lithologiques de faible résistance.

Les figures 68 et 69 indiquent que presque 68% de la superficie est caractérisée par un degré d'érodibilité moyen à fort. La classe d'érodibilité extrême occupe les terrains caractérisés par des pentes très abruptes et des formations lithologiques friables (douars Ras Lhjar, Bab Rmila, Aientour). Cependant, les sols d'érodibilité faible à modérée ne couvrent que 19% de la superficie totale, ce sont notamment les parties du la zone d'étude caractérisée par des pentes faibles (plaine alluviale d'oued Ouergha dans la partie médiane) ou dans les zones marquées par des formations lithologiques très résistantes (douars Olad Meddane, Tamda, El Bibane, Tamedghas).

La carte d'érodibilité montre que malgré les faibles pentes dans la partie médiane de l'aire d'étude, elle se caractérise par une érodibilité élevée en raison de la dominance des formations lithologiques meubles (marnes, argiles, terrasses alluviales...).

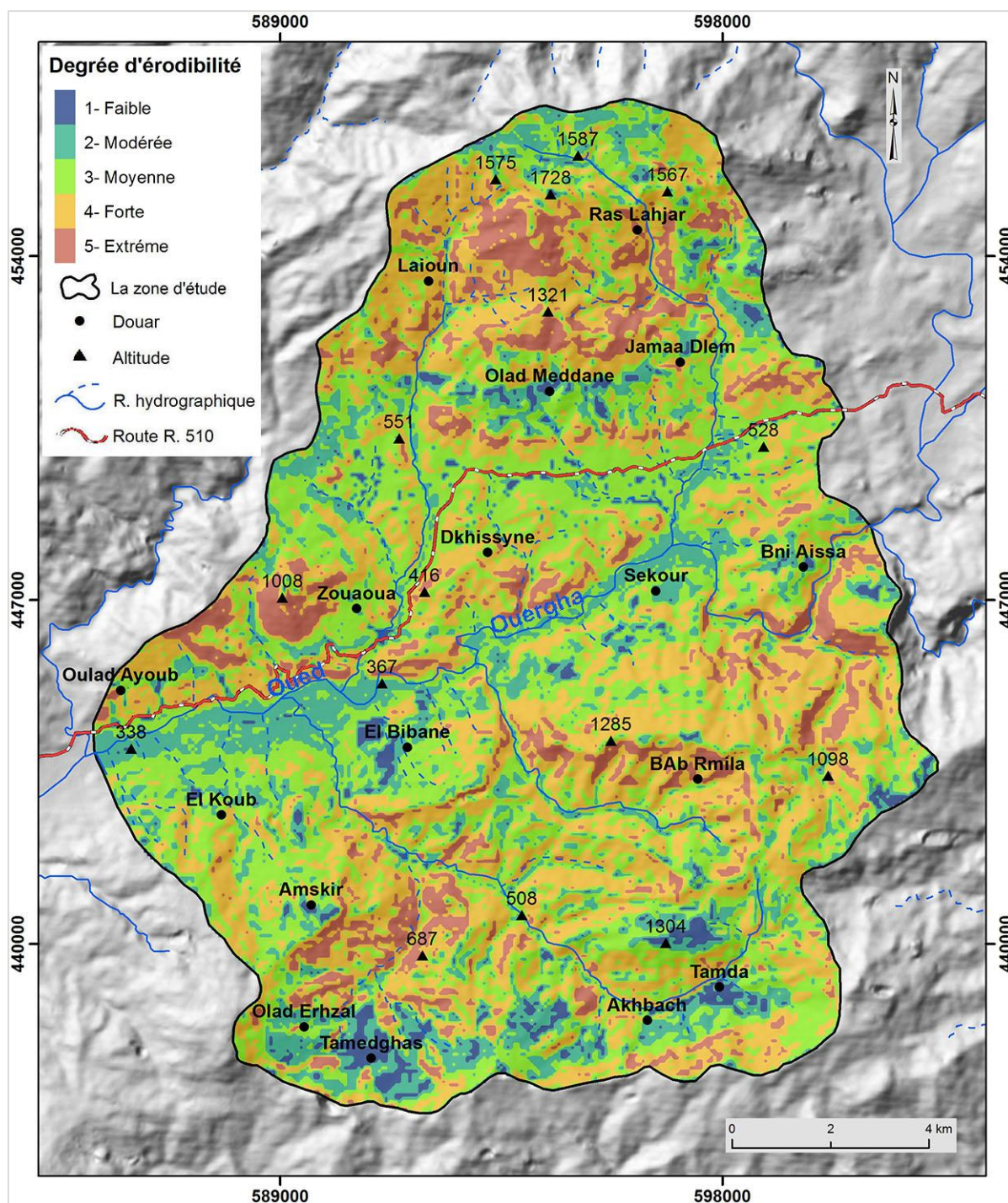


Figure 68. Carte d'érodibilité selon la classification de PAP/CAR

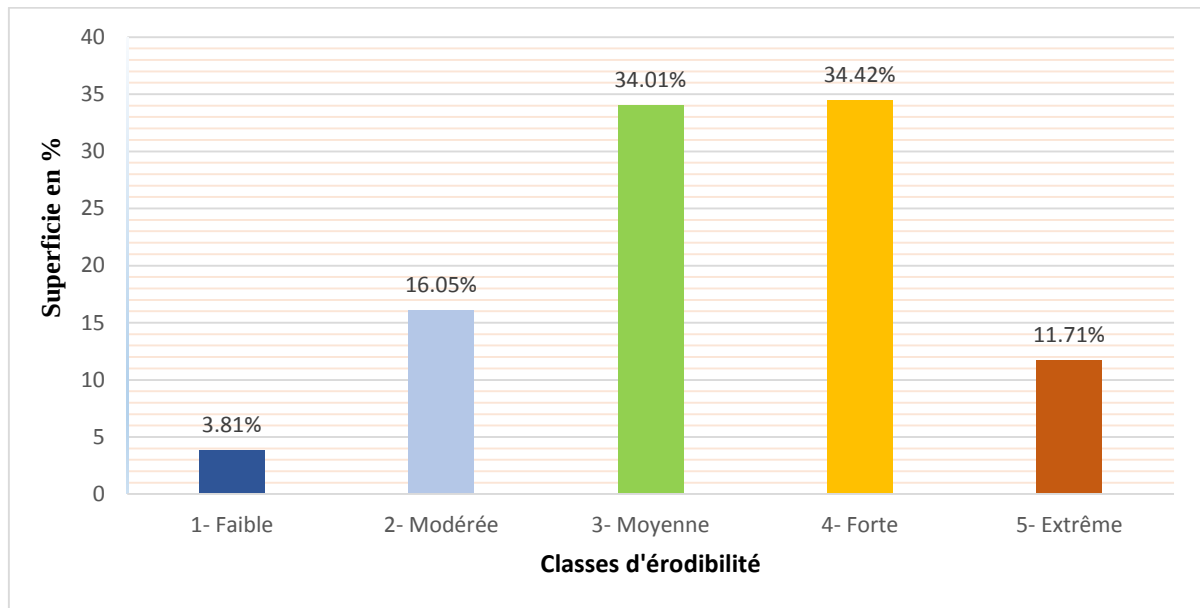


Figure 69. Répartition des classes d'érodibilité en fonction de la superficie en %

2. 1. 4. Réalisation de la carte d'occupation des sols

La carte d'occupation des sols (figure 70) est réalisée d'après le travail de terrain et l'exploitation des images de Google Earth à haute résolution. Elle permet l'identification et la répartition des types d'occupations des sols dans la zone d'étude. Nous avons ensuite, regroupé les types d'occupation des sols selon la classification mentionnée dans le directif PAP/CAR (tableau 24).

La figure 71 montre une prédominance remarquable des cultures en ligne (olivier, amandier, figuier...). Elles couvrent environ 48 % de la surface totale, suivi par les cultures sèches 23% et les arbustes denses 14 %. La zone d'étude est marquée par une extension limitée des massifs forestiers (10.73 %) et des terrains irrigués (2.70 %).

Les modes d'occupation des sols dans la zone d'étude favorisent la dynamique des versants. Cela est lié à la faible extension des forêts qui sont en dégradation par l'intervention humaine, les cultures sèches couvrant peu le sol en période pluvieuse, et la mise en culture des fortes pentes dénudées accélèrent les processus d'érosion.

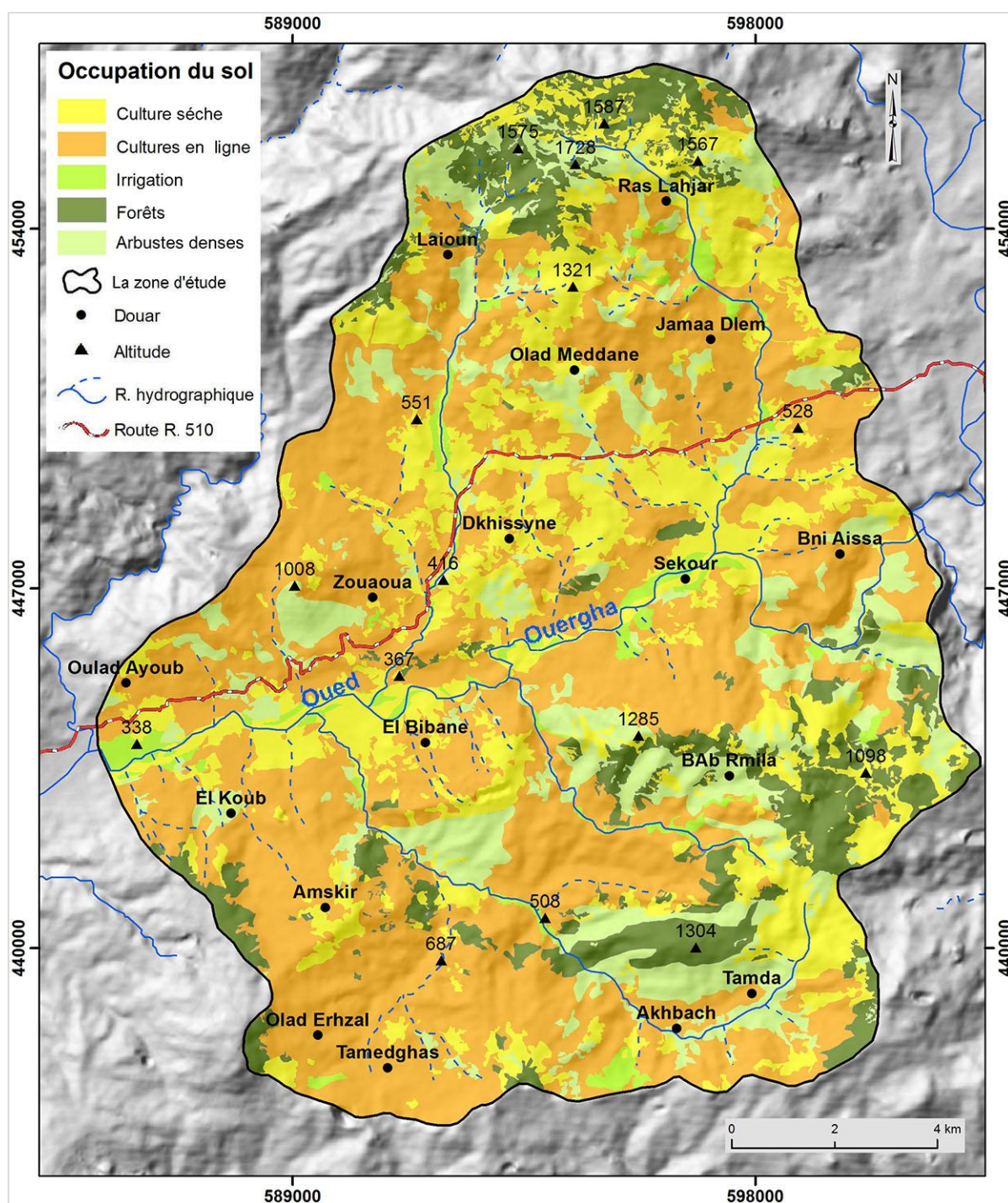


Figure 70. Carte d'occupation des sols selon la classification de PAP/CAR

classes	Occupation du sol
1	Cultures sèches
2	Cultures en lignes (oliviers, amandiers)
3	Irrigation
4	Forêts
5	Arbustes denses

Tableau 24. Classes d'occupation du sol (PAP/CAR. 1998)

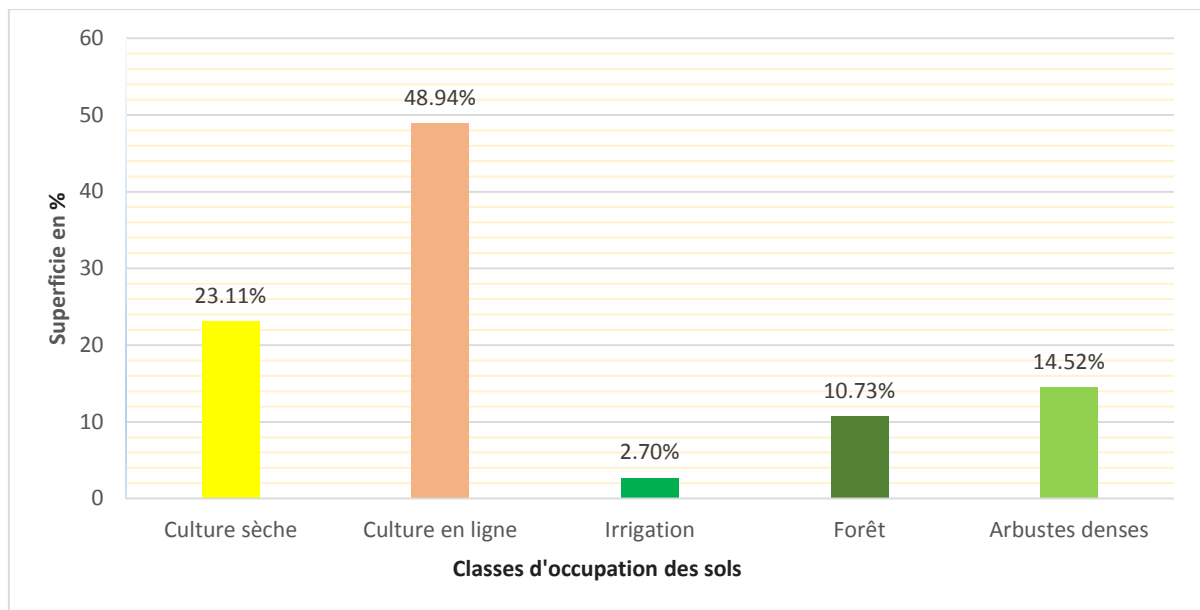


Figure 71. Répartition des classes d'occupation des sols en fonction de la superficie %

2. 1. 5. Réalisation de la carte de densité de recouvrement

Le couvert végétal est un élément clé dans le maintien des sols contre l'érosion, d'une part, il permet de réduire l'énergie des gouttes de pluie et d'autre part, il augmente l'infiltration du sol par son système racinaire (Rey et al., 2004). Leur rôle protecteur est fortement lié au degré de recouvrement des sols.

L'indice de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été exploité pour la réalisation de la carte de la densité de recouvrement (Figure 72). Les résultats obtenus permettent d'identifier quatre classes représentant différents degrés de recouvrement : très élevé (supérieur à 75 %), élevé (50 % -75 %), moyen (25% -50 %) et faible (inférieur à 25 %).

La zone d'étude est caractérisée par dominance de la classe de recouvrement moyenne (25 %-50 %). En effet, elle couvre 38 % de la superficie totale de la zone d'étude (figures 72 et 73) et

correspond aux terrains d'arboricultures moyennement denses. La classe de recouvrement faible (inférieur à 25 %) représente 33.4 % de superficie, elle occupe les terrains de culture sèche saisonnière et les terrains nus. Les classes de recouvrement élevé et très élevé occupent environ 27 %, ce sont notamment les terrains irrigués, les forêts et les terrains d'arboriculture dense.

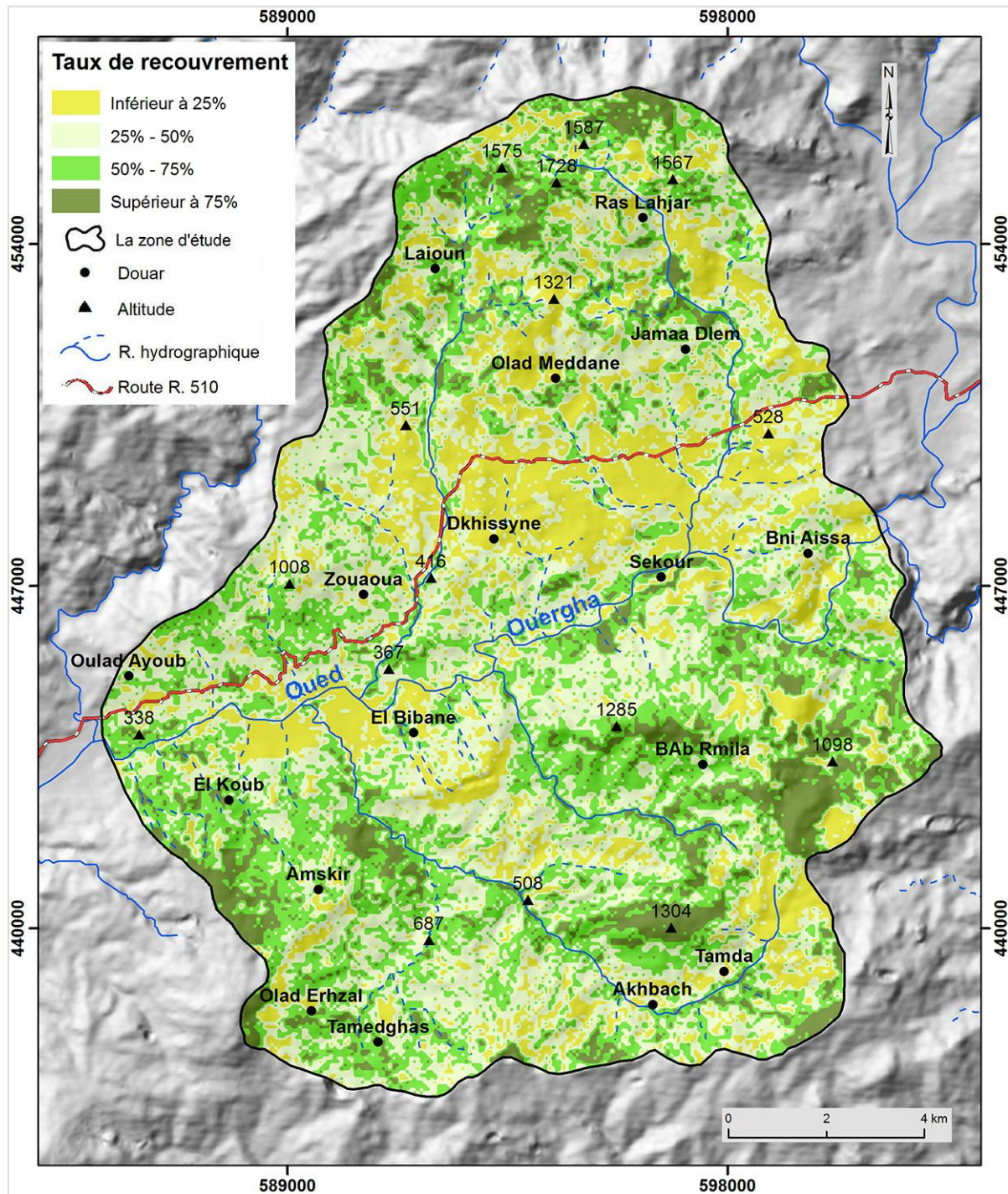


Figure 72. Carte de taux de recouvrement selon la classification de PAP/CAR (image satellite Landsat 8 le 29/11/2018)

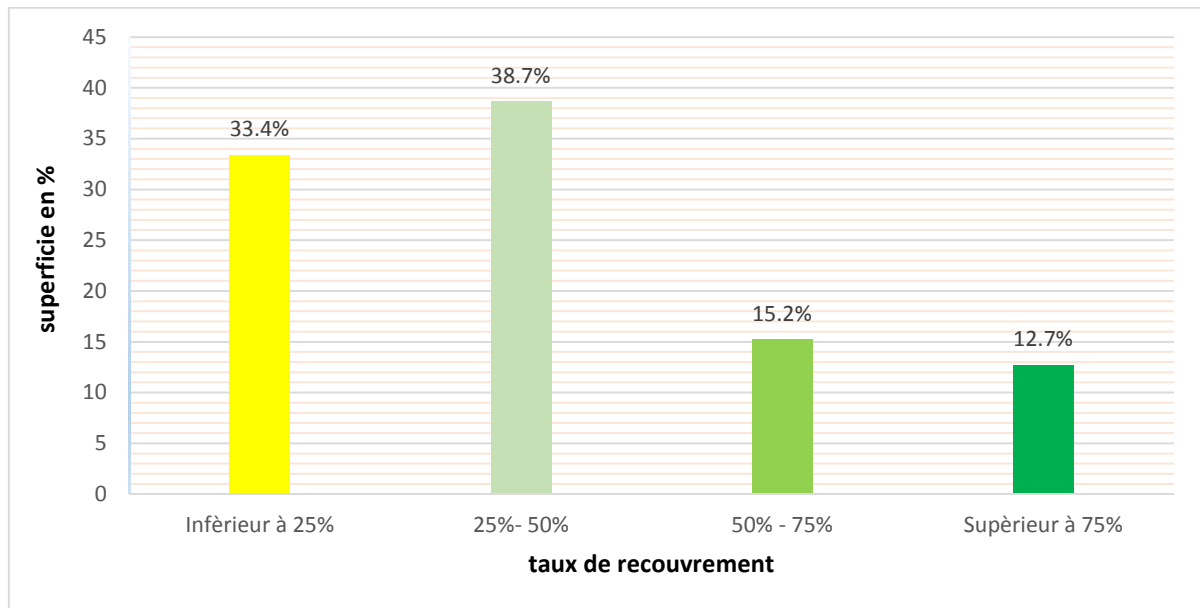


Figure 73. Taux de recouvrement en fonction de la superficie en %

Alors, la zone d'étude est caractérisée par un recouvrement moyen, qui reste incapable de protéger les sols contre l'érosion hydrique.

2. 1. 6. Réalisation de la carte de protection des sols

La carte de protection des sols (figure 74) est le résultat de la superposition de la carte d'occupation des sols et la carte de densité de recouvrement, le degré de protection des sols est obtenu grâce à l'application de la matrice présentée dans le tableau 25. La carte obtenue permet de distinguer cinq classes du degré de protection du sol : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée.

L'analyse des résultats obtenus montre que les classes de faible à très faible protection occupent la majorité de l'aire d'étude (77.9 %), elles correspondent aux terrains de faible recouvrement du sol, l'arboriculture clairsemée et les terrains nus. Cela montre qu'une partie importante des sols est faiblement protégée contre l'érosion. Les classes dont la protection du sol est considérée élevée à très élevée ne couvrent que 13.8 % de la superficie totale de la zone d'étude et correspondent notamment aux forêts de chêne vert et pin d'alpe (la forêt de jbel Erzinyia, forêt Tamda, forêt Bab Rmila), les zones irriguées et les zones d'arboriculture dense (oliviers, amandiers).

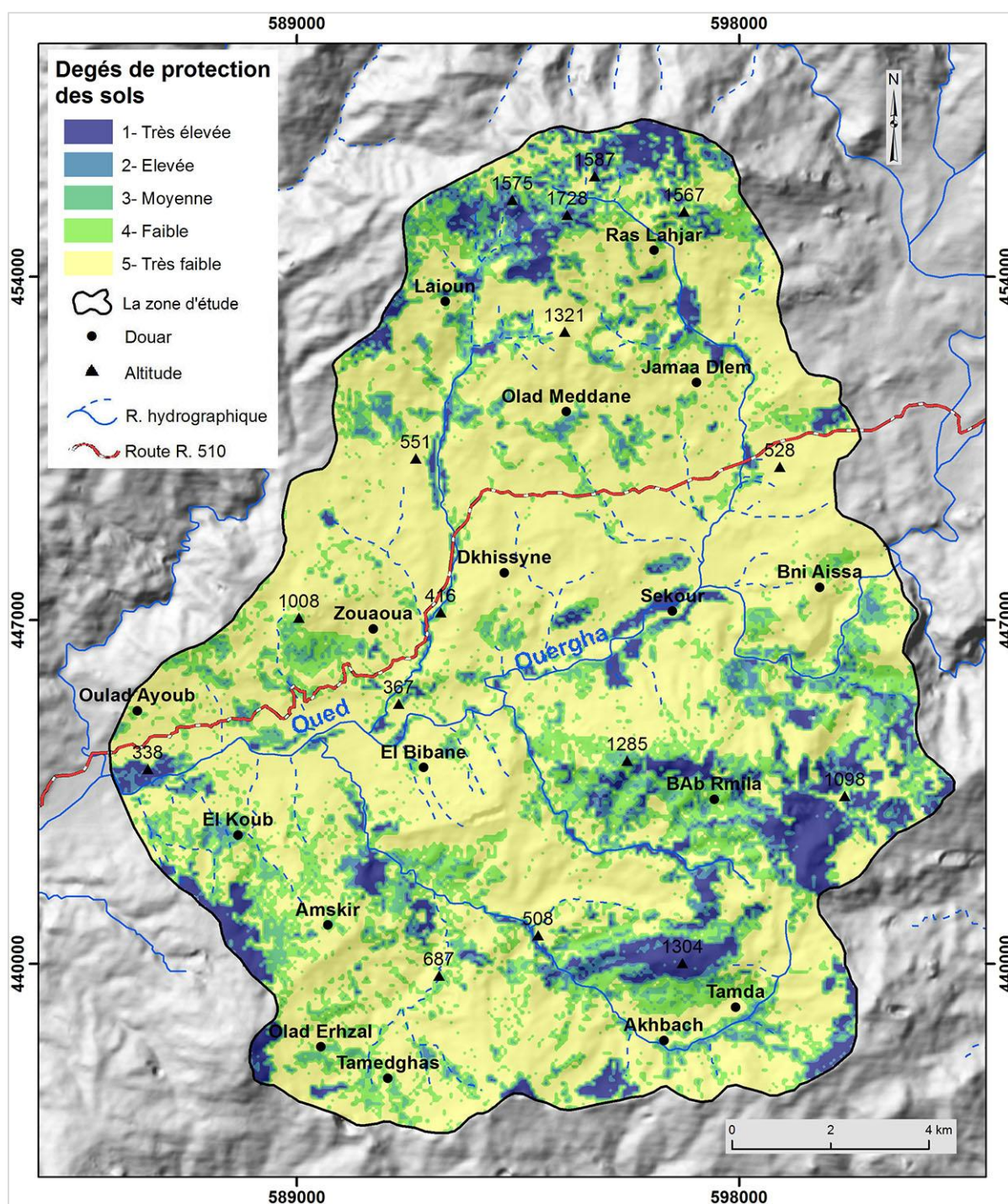


Figure 74. Carte de protection des sols

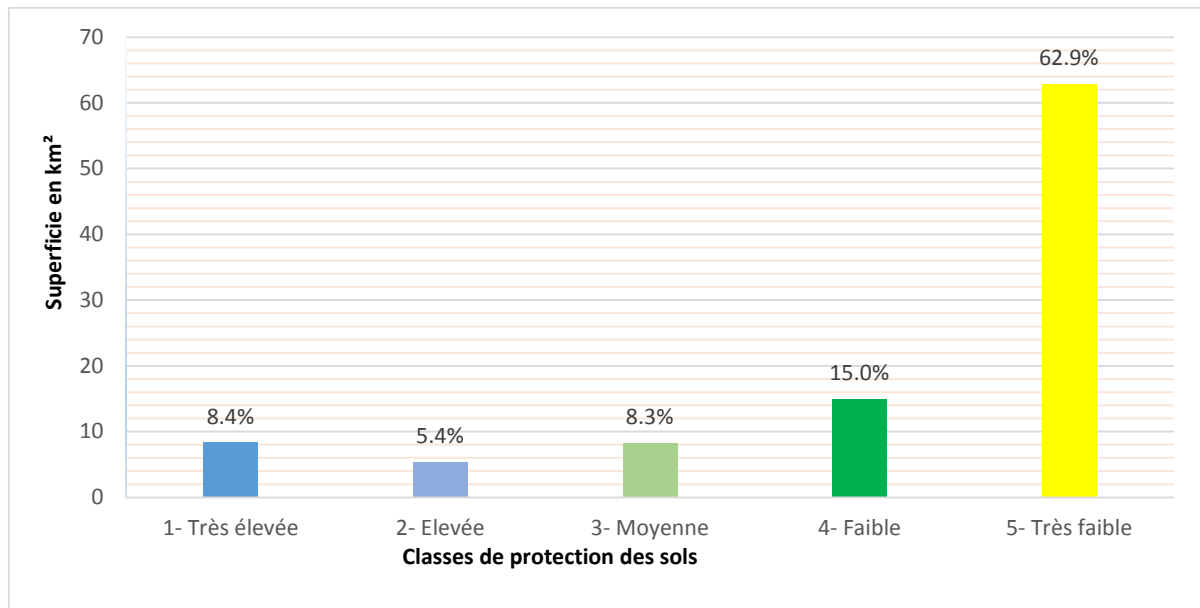


Figure 75. Classes de protection des sols en fonction de surface en %

Occupation du sol	Couvert végétal			
	1	2	3	4
1	5	5	4	4
2	5	5	4	3
3	3	2	1	1
4	4	3	2	1
5	5	4	3	2
6	5	4	3	2

Tableau 25. Matrice occupation du sol vs. Couvert végétal (PAP/CAR. 1998)

2. 2. Quantification de l'érosion hydrique par l'application du modèle EPM

Le modèle EPM de Gavrilovic a été conçu dans les années 50 par Gavrilovic pour les bassins versants d'Ex-Yougoslavie. Cette méthode est spécifique à l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans les milieux montagnards (El-Bouhali et al., 2019). Elle a été développée pour la prédiction des taux d'érosion annuels des sols d'un ensemble de types d'érosion : en nappe, en rigoles, en ravins et sapement des berges (Blinkov et Kostadinov, 2010 ; Chaaouan et al., 2013).

Le modèle EPM permet une estimation non seulement de la quantité de production et de transport de sédiments, mais également de l'intensité de l'érosion qui en résulte. Il s'agit de la détermination des zones d'érosion potentielle (Dragičević et al., 2017). L'application de cette méthode est fondée

sur la combinaison de quatre paramètres essentiels : les pentes (Ja), la résistance des formations lithologiques à l'érosion (Y), la protection des sols (Xa) et l'état érosif (Φ). Ensuite, les différents facteurs sont combinés avec la température (T) et les précipitations (H), pour produire la carte des pertes annuelles en sols ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$) (figure 78).

Depuis 1985 à ce jour, l'application de ce modèle est facilitée par le développement du SIG et de la télédétection (Gavrilovic et al., 2008). Il a été utilisé par plusieurs chercheurs dans différents pays du monde ; notamment les pays d'Europe Oriental (Yougoslavie, Slovénie, Macédoine, Croatie, îles des Balkans) (Globevnik et al., 2003). Aussi, il a été appliqué en Italie, Grèce, Iran... et au Maroc. Généralement, ces pays se caractérisent par la présence des montagnes et une topographie très accentuée.

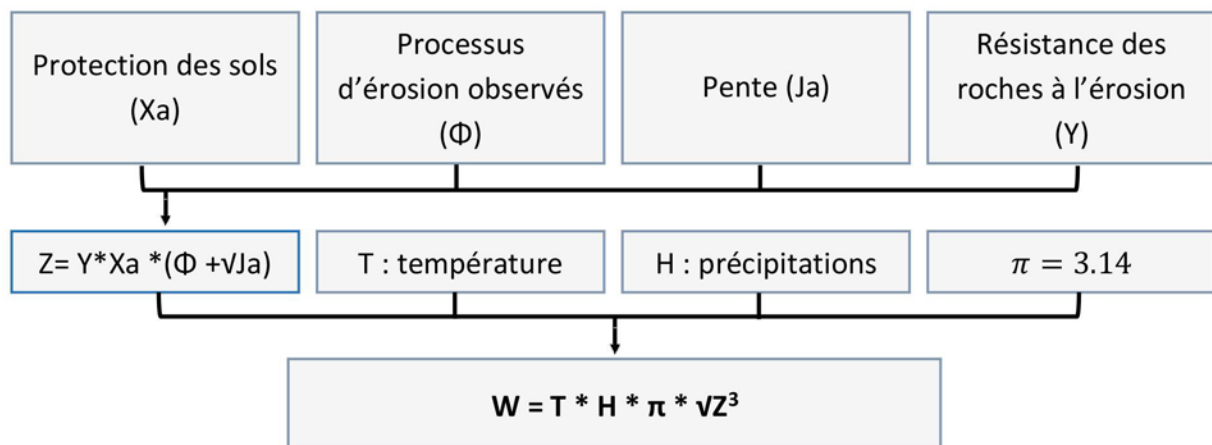


Figure 76. Schéma méthodologique du modèle EPM

L'application du modèle EPM se base sur la formule suivante :

$$W = T * H * \pi * \sqrt{Z^3}$$

Où : W : La production annuelle moyenne des sédiments ($\text{m}^3 / \text{km}^2 / \text{an}$)

T : coefficient de température, calculée comme suit :

$$T = \sqrt{\frac{t^\circ}{10} + 0.1}$$

T : température annuelle moyenne

H : moyenne annuelle des précipitations (mm/an)

Z : coefficient d'érosion calculé comme suivant :

$$Z = Y.X.(\phi + \sqrt{J})$$

Y : coefficient de la résistance des roches à l'érosion

X : coefficient d'occupation des sols

Ø : valeur de coefficient pour les processus d'érosion observés

J : pente moyenne (%)

2. 1. 7. Carte des états érosifs

La carte des états érosifs (figure 76) est le produit final de la phase prédictive, résultant de la superposition de la carte d'érodibilité et la carte de protection des sols. La superposition est réalisée sur la base de la matrice présentée dans le tableau 26.

Degré de protection des sols	Degré d'érodibilité				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	3	4
3	1	2	3	4	4
4	2	3	3	5	5
5	2	3	4	5	5

Tableau 26. Matrice de degré de protection des sols vs. Degré d'érodibilité (PAP/CAR. 1998)

D'après la carte des états érosifs, nous avons distingué trois zones avec une intensité variable de l'érosion :

- **Les zones stables** : ce sont des milieux caractérisés par une érosion faible à très faible. Ces milieux occupent une superficie limitée d'environ 18 % de l'aire d'étude (figure 77). Ce sont des milieux protégés par un couvert végétal très dense qui favorise une protection élevée des sols. Ils se caractérisent par l'existence des formations lithologiques très résistantes (calcaires) et la dominance des pentes faibles (0 à 3 %). Ces milieux sont notamment affectés par l'érosion en nappe.
- **Les zones instables** : englobent les milieux affectés par une érosion notable à élevée, occupant une superficie importante (47 %). Ces zones s'étalent sur des milieux fragiles caractérisés par des

versants pentus et mis en cultures, une lithologie imperméable (argiles, marnes, flyschs) et des sols mal protégés par le couvert végétal.

-**Les milieux critiques** : concernant les terrains affectés par toute forme d'érosion (glissement, ravins, bad-lands, sapement des berges...). Ils s'étendent sur une superficie d'environ 35 % de la zone d'étude et correspondent à des versants très raides et nus, marqués par des formations argileuses et marneuses de très faible résistance et des pratiques anthropiques mal entretenues.

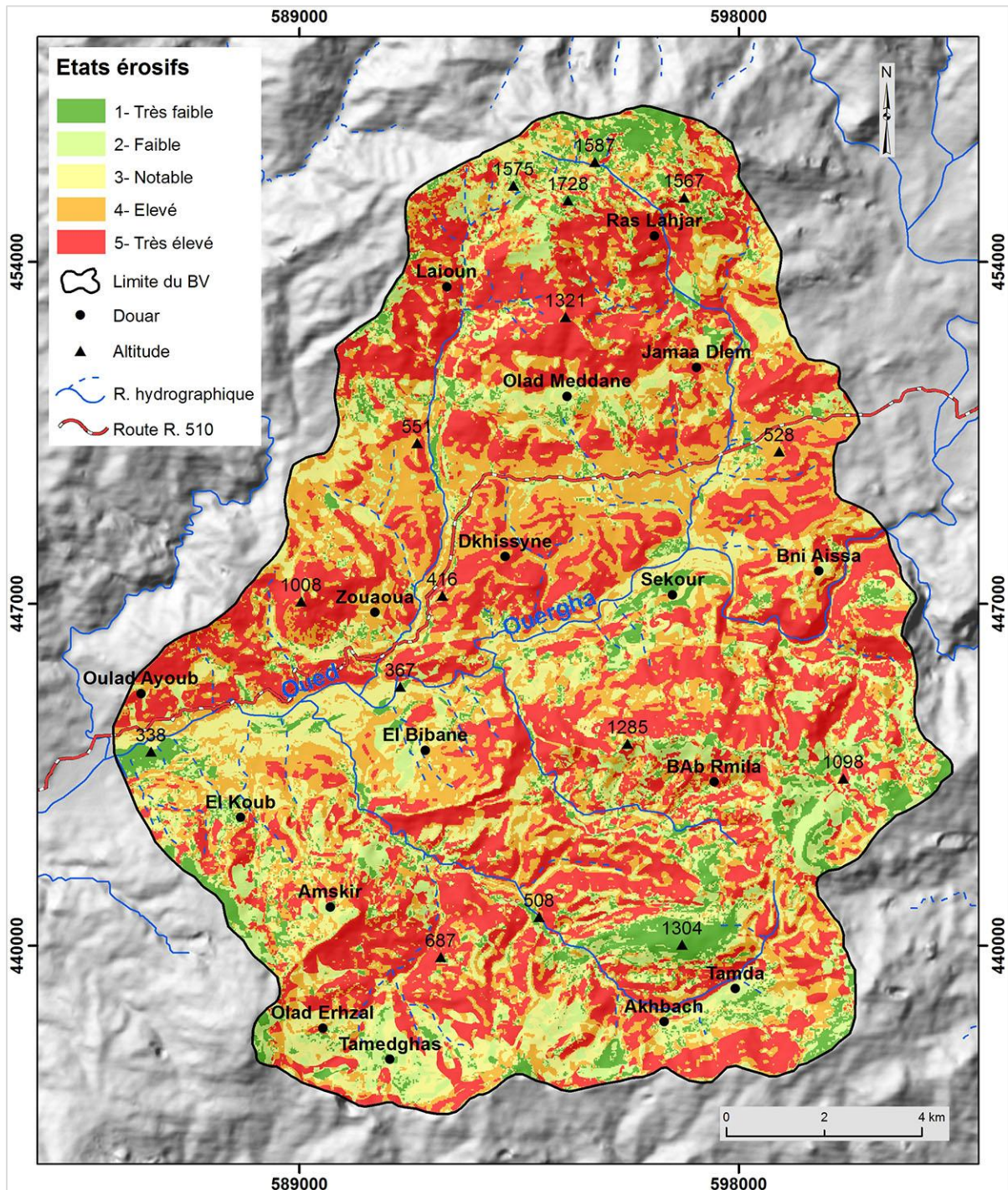


Figure 77. Répartition des classes des états érosifs selon l'approche PAP/CAR

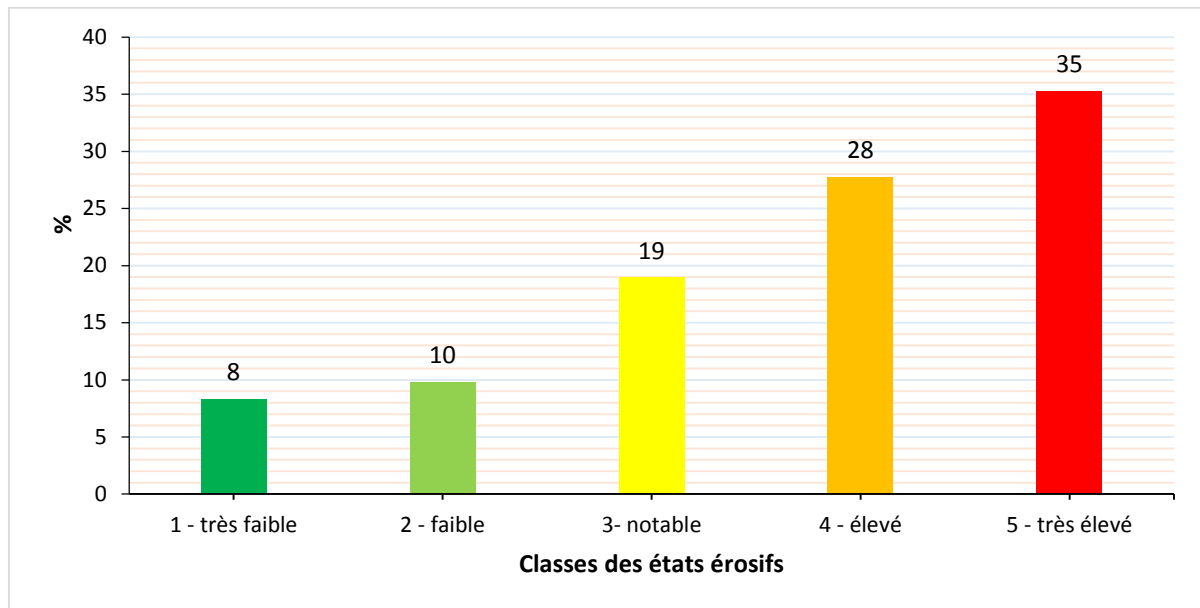


Figure 78. Répartition des classes des états érosifs selon la classification PAP/CAR

L'application de l'approche PAP/CAR (figures 76 et 77) montre que le Haut Ouergha est affecté par une forte intensité de l'érosion hydrique. Cela indique que ce milieu très fragile est favorable à la production d'une énorme quantité de sédiments.

2. 2. 1. Élaboration de la carte de sensibilité des roches à l'érosion (Y)

L'élaboration de la carte de sensibilité des roches à l'érosion a été réalisée sur la base de la carte géologique de Dhar Souk 1/50000, à partir de cette carte, nous avons déterminé la sensibilité de formations lithologiques à l'érosion.

Le Haut Ouergha est marqué par la dominance des formations lithologiques très sensibles à l'érosion (figures 79 et 80). Elles occupent une large superficie notamment dans la partie médiane (douars Dkhissyne, Zouaoua, Oulad Ayoub et le centre de Bni Oulid) et la partie sud-ouest (douars Olad Erhzal, Tamedrhas) de l'aire d'étude. Suivi par la classe à sensibilité moyenne qui couvre la partie septentrionale et des surfaces importantes dans la partie méridionale. Les terrains de faible sensibilité à l'érosion occupent des surfaces limitées réparties dans les parties nord et sud de la zone d'étude.

La dominance des formations lithologiques de forte sensibilité à l'érosion dans le secteur d'étude accentue les processus d'érosion hydrique et facilite la genèse des formes d'érosion.

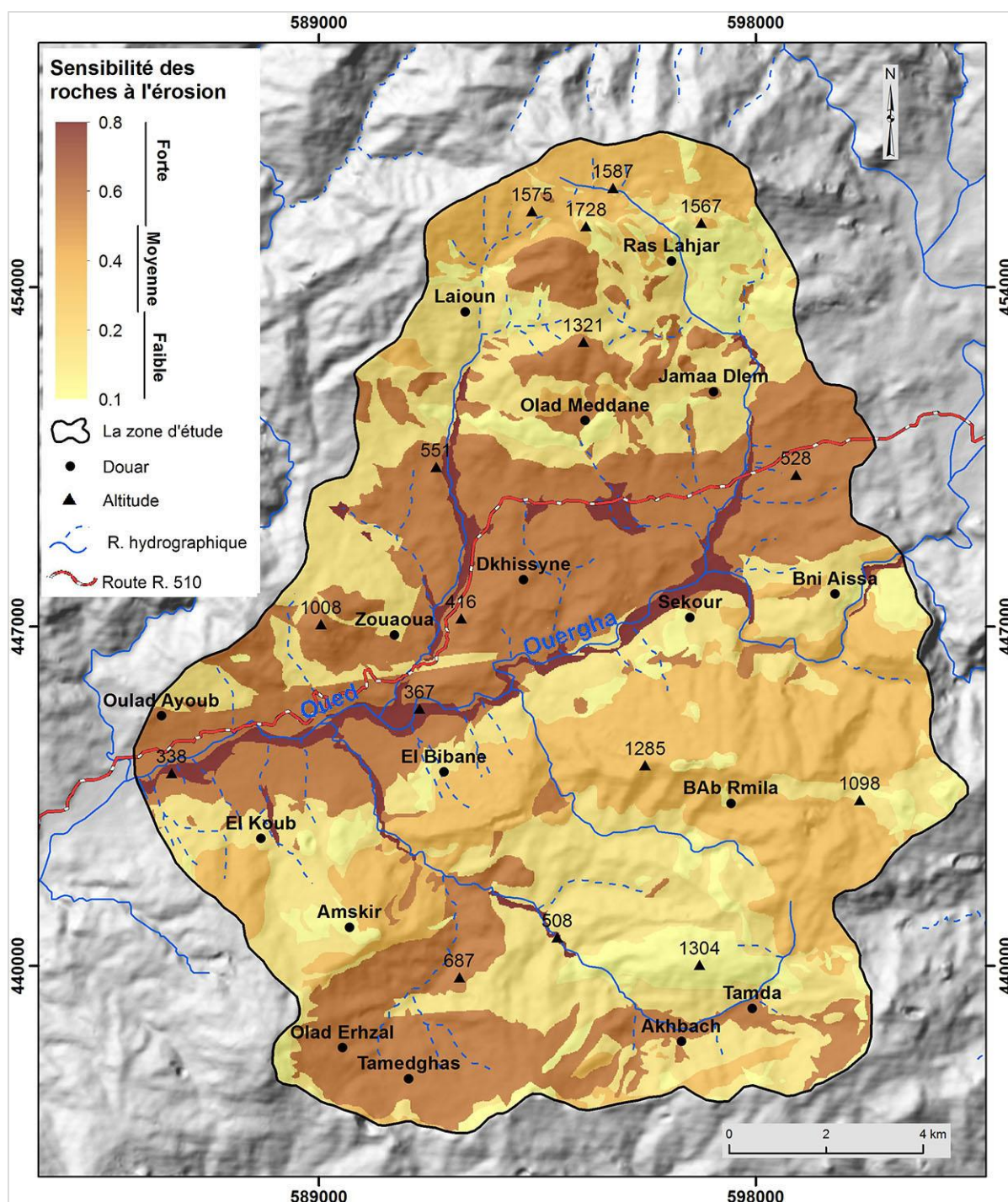


Figure 79. Sensibilité des formations lithologiques à l'érosion

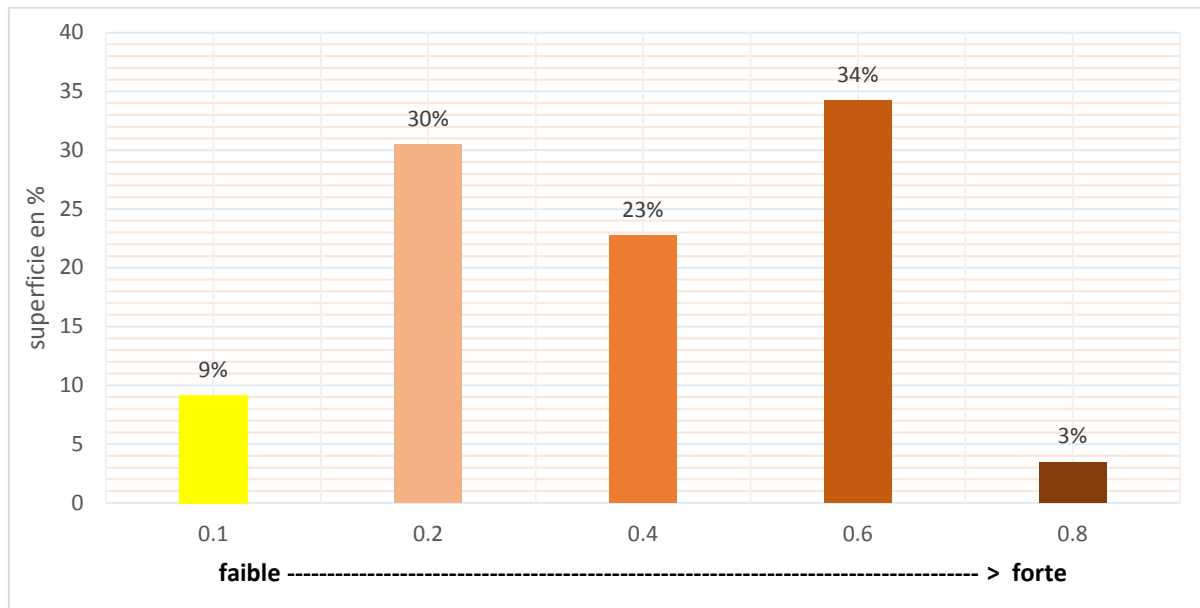


Figure 80. Sensibilité des formations lithologiques à l'érosion selon la classification de Gavrilovic
(source : carte géologique de Dhar Souk 1/50000)

2. 2. 2. Réalisation de la carte des pentes (J)

La zone d'étude est marquée par la dominance des pentes fortes à très fortes (figure 81). Les pentes moyennes sont notables dans toutes les parties de la zone d'étude, avec une superficie très importante. Tandis que les pentes faibles occupent la partie intermédiaire (la plaine alluviale d'oued Ouergha et ces affluents) et quelques parties dispersées sur l'ensemble de l'aire d'étude.

2. 2. 3. Élaboration de la carte de protection de couvert végétal (Xa)

Le rôle de la végétation dans la protection des sols contre l'érosion hydrique est mis en évidence par plusieurs études et recherches (Bou Kheir, 2001 ; Rey et al., 2004 ; Roose, 2010). Son rôle protecteur dépend de leur densité et des espèces dominantes.

L'exploitation de la carte d'occupation du sol de Haut Ouergha favorise la réalisation de la carte de protection de couvert végétal. Suivant la classification menée par Globevnik en 2003, nous avons classé les types d'occupation du sol selon leurs degrés de protection.

Les classes de protection de couvert végétal oscillent entre 0,1 dans les zones où la protection est forte et 0,9 où la protection est faible. La figure 82 indique la dominance des classes de protection moyenne à faibles qui occupent les différentes parties de la zone d'étude, par contre la classe de

protection forte occupe des surfaces limitées. Généralement se situe dans les milieux protégés par les forêts et d'arboriculture dense et à proximité des cours d'eau.

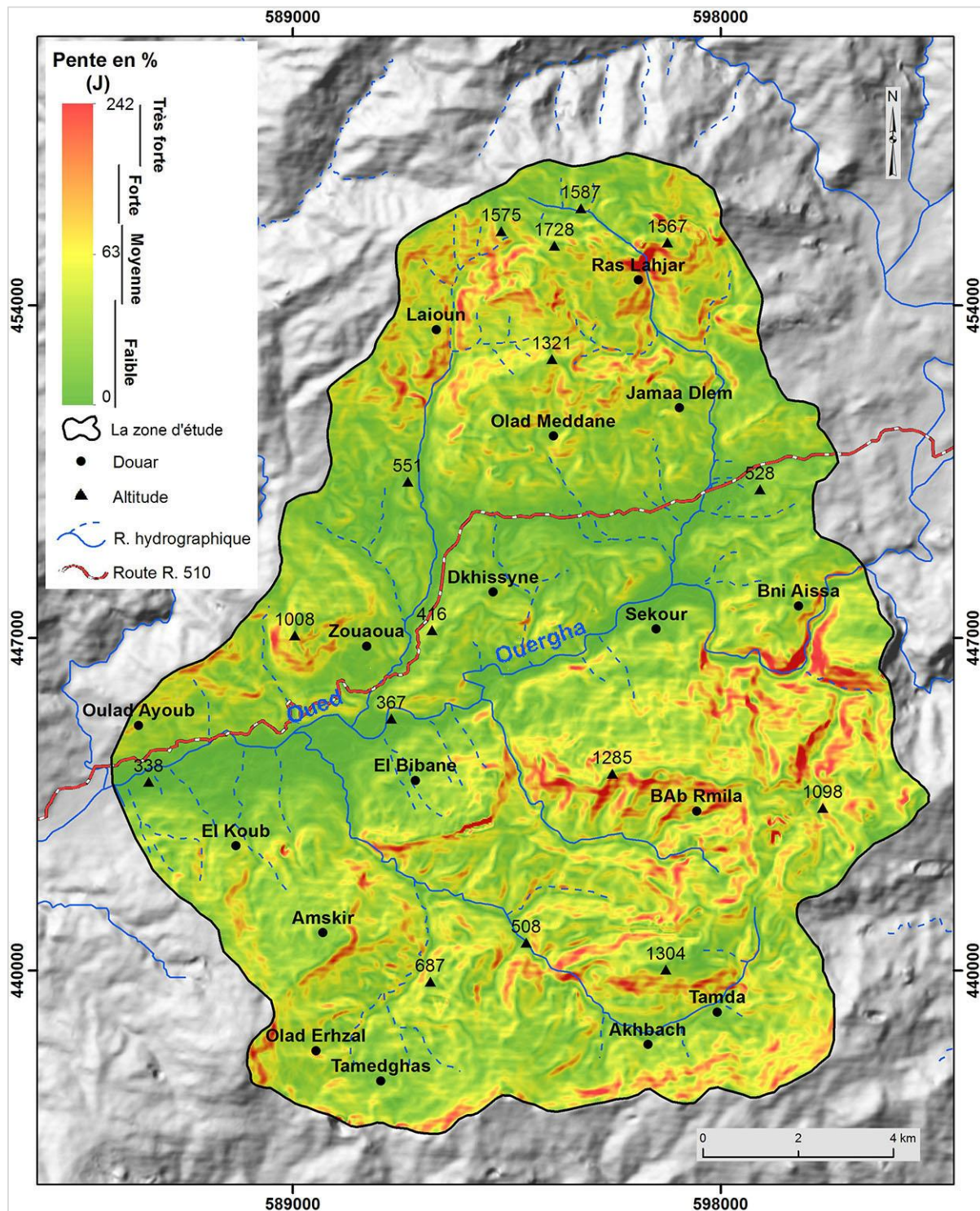


Figure 81. Carte des pentes selon la méthode « EPM » (MNT résolution 30 m)

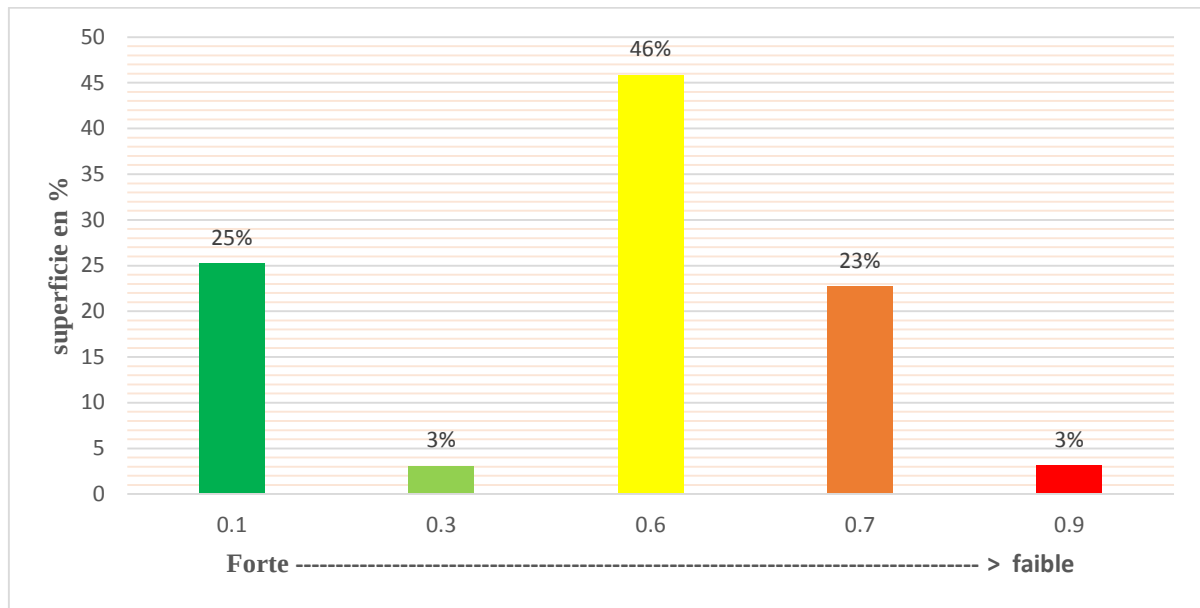


Figure 82. Classes de protection de couvert végétal selon la méthode EPM

2. 2. 4. Élaboration de la carte d'états érosifs (Φ)

Pour réaliser cette carte, nous nous sommes basés sur la phase prédictive de l'approche PAP/CAR et le travail du terrain. La répartition spatiale des états érosifs varie en fonction des agents responsables à l'érosion qui sont : le couvert végétal, la nature des formations lithologiques, la pente, le climat et l'occupation des sols. Les valeurs d'état érosif dans notre secteur d'étude (figure 84) varient entre 0,1 où l'érosion est faible et 0,9 où il est fort.

2. 2. 5. La carte d'érosion potentielle (Z)

Le coefficient d'érosion (Z) est la valeur de base pour tous les calculs EPM. Ce coefficient a été utilisé pour séparer l'intensité de l'érosion à des classes ou catégories (Gavrilovic, 1972 ; Gavrilovic, 1988 in Gavrilovic et al., 2008).

La carte d'érosion potentielle (figure 85) a été élaborée par l'intégration de plusieurs facteurs déterminants dans l'érosion hydrique dans le SIG ; la carte des pentes (J), la carte de sensibilité des formations lithologiques à l'érosion (Y), la carte de protection de couvert végétal (X) et la carte d'évolution d'érosion (Φ). Cette carte permet d'identifier les zones stables et les zones instables et de spatialiser le risque d'érosion hydrique dans la zone d'étude.

D'après la carte (figure 85) il est remarquable que les zones où la potentialité érosive moyenne forte et très forte occupent des surfaces importantes. Cela est lié aux agents responsables de

l'érosion : l'existence des formations lithologiques tendres (marnes, flyschs...), la dominance des versants pentus et le faible recouvrement du sol.

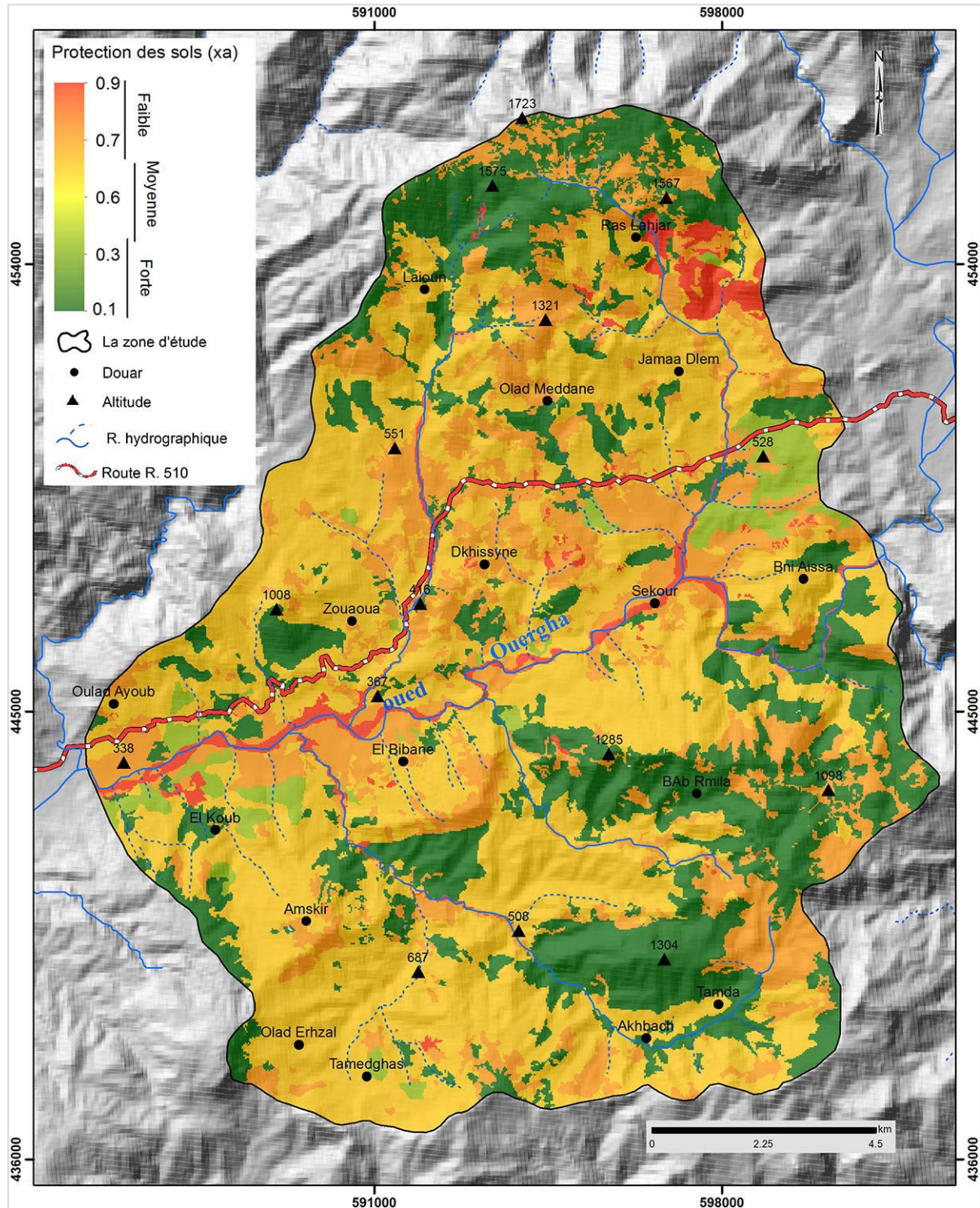


Figure 83. Carte de protection de couvert végétal selon la méthode « EPM »

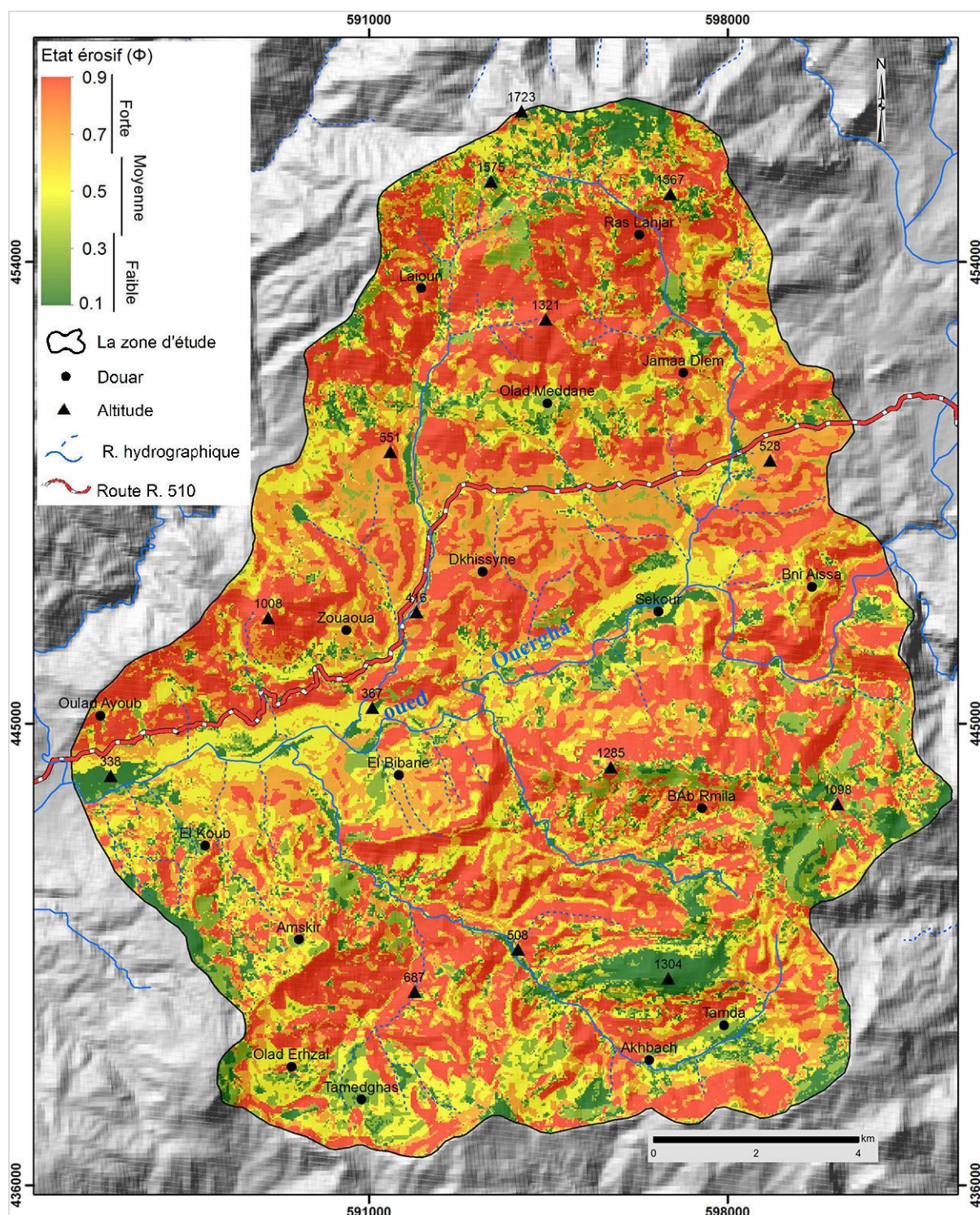


Figure 84. Carte d'états érosifs la méthode EPM

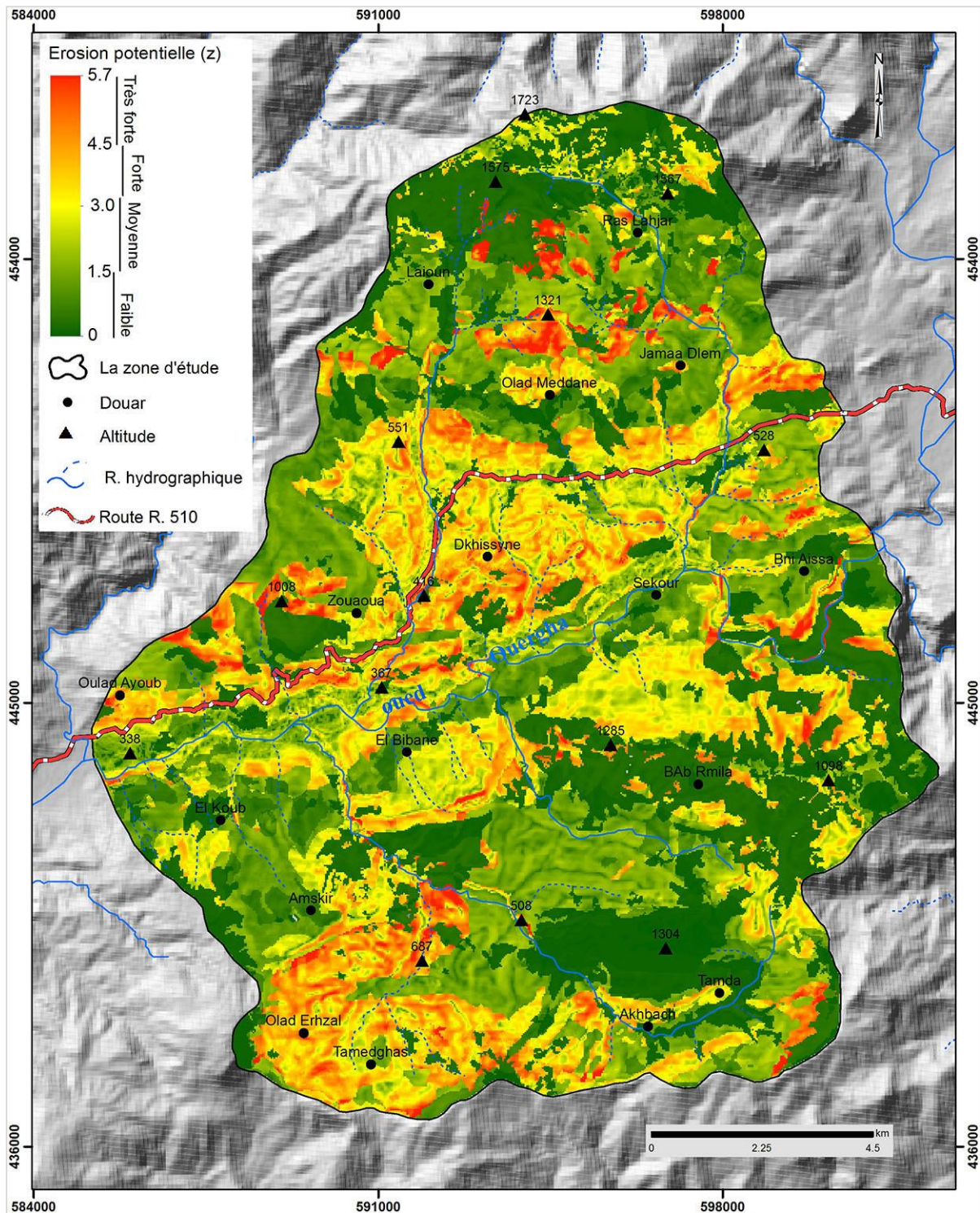


Figure 85. Carte d'érosion potentielle selon la méthode EPM

Les zones est caractérisées par une faible potentialité érosive correspondent aux parties de la zone d'étude les biens protégées par le couvert végétal et caractérisées par la dominance des formations lithologiques résistantes.

2. 2. 6. Réalisation de la carte de la température

Le modèle EPM intègre la température comme un facteur important dans l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique. Ce facteur influence la stabilité des sols, particulièrement sur les versants qui se caractérisent par une lithologie argileuse et un faible recouvrement par le couvert végétal. La température intervient directement dans la structuration des matériaux, en particulier pour le détachement des particules rocheuses et des formations superficielles.

Le coefficient de la température selon Gavrilovic est indiqué par la formule suivante :

$$T = \sqrt{\frac{t^{\circ}}{10} + 0.1}$$

Où t : la moyenne de la température.

Vu l'absence des données relatives à la température dans les stations proches de l'aire d'étude, nous avons traité plusieurs images satellites « Landsat TM » qui couvrent la période entre 1985 et 2018, afin de réaliser la carte de la température moyenne.

La figure 85 présente la répartition spatiale de la température dans la zone d'étude. Elle illustre la diminution remarquable de la température en fonction de l'altitude, ce qui explique les faibles valeurs dans la partie nord et sud-est de l'aire d'étude. D'autres facteurs interviennent dans la variation des valeurs de température dans la zone d'étude c'est l'exposition des versants ; les versants exposés vers le nord sont plus humides que les versants orientés vers le sud, donc la variation de la température implique la variété de l'intensité d'érosion.

2. 2. 7. Réalisation de la carte des précipitations

Les précipitations jouent un rôle très important dans l'évolution des processus d'érosion et l'installation des différents types d'érosion hydrique. En effet, la concentration spatio-temporelle des précipitations et leurs brutalités, provoquent une grande activité morphodynamique et contribuent à la dégradation des terres mal protégées par le couvert végétal.

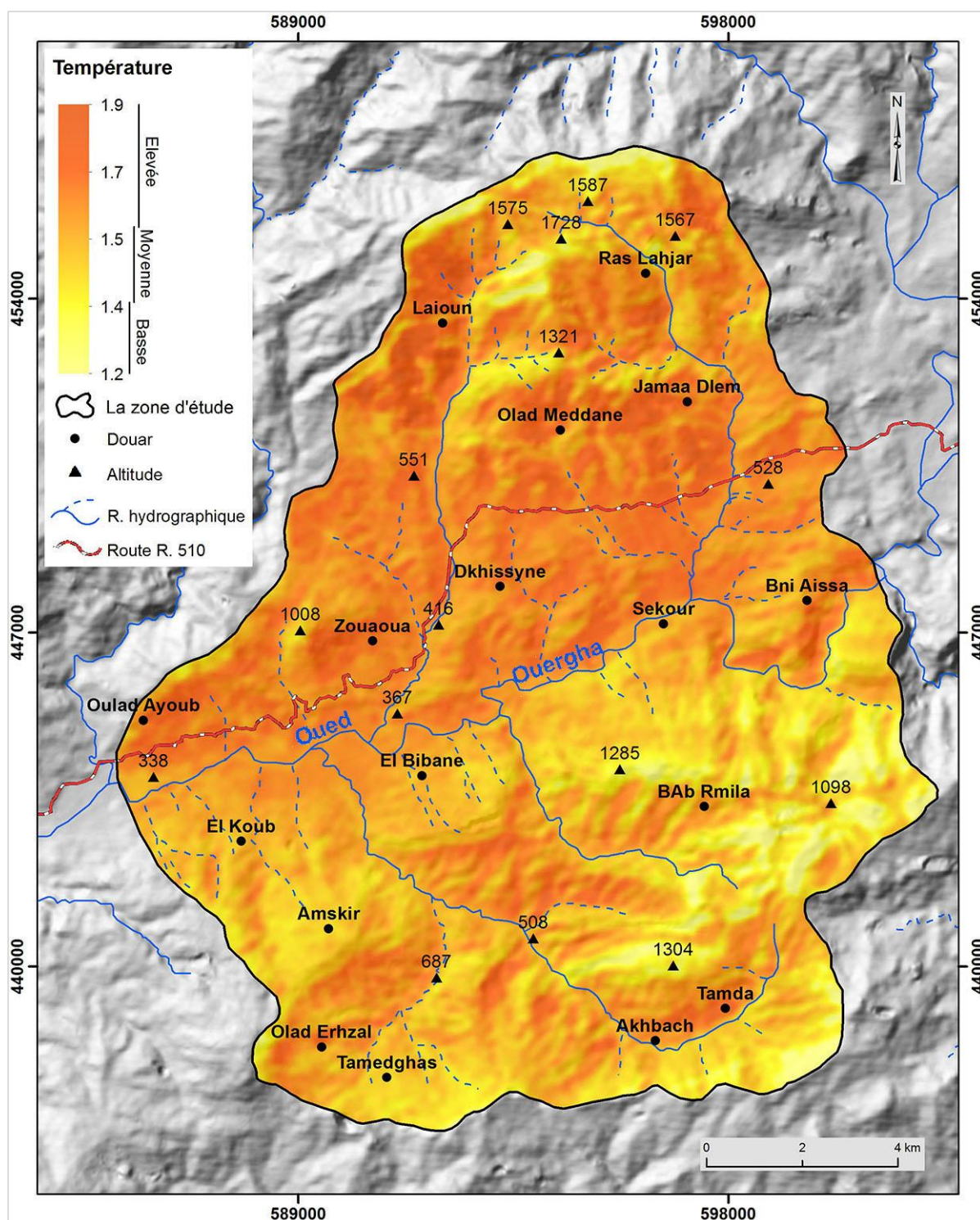


Figure 86. Carte de la température selon « EPM » (images Landsat TM4-5)

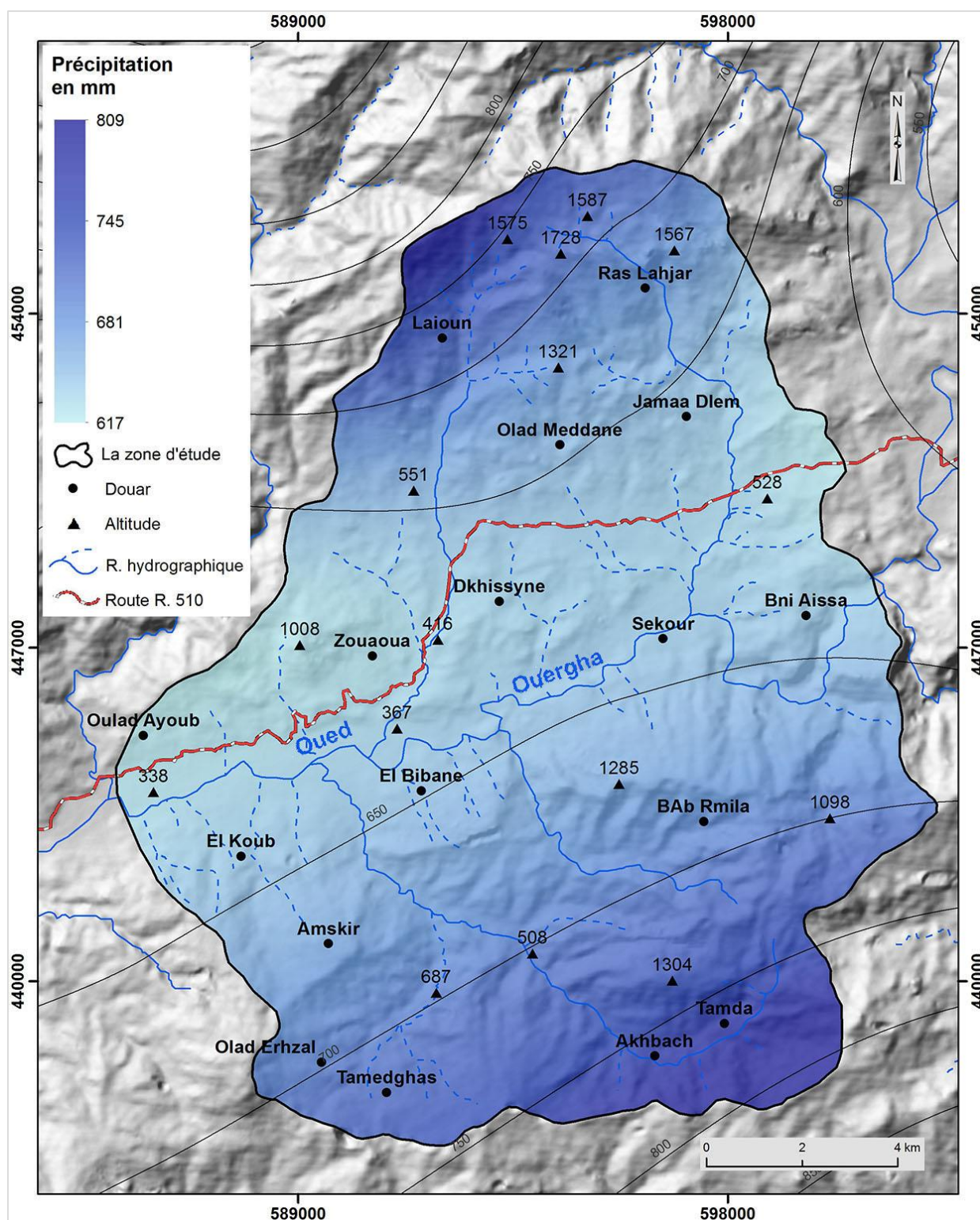


Figure 87. Carte des précipitations moyennes annuelles dans le Haut Ouergha

Nous avons utilisé les données climatiques de 7 stations qui entourent la zone d'étude pour la réalisation de la carte de la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles. La figure 86 montre que les précipitations oscillent entre 617 mm dans la partie médiane et 809 mm vers les parties les plus élevées de l'aire d'étude (parties nord et sud).

La zone d'étude est également se caractérise par des précipitations orageuses, concentrées dans le temps et dans l'espace, avec des contrastes saisonniers très marqués. Les épisodes pluvieux sont généralement brutaux et les pluies les plus importantes se concentrent en quelques jours de la saison humide, particulièrement durant l'automne (Roose et Sabir, 2002). Cette situation accélère les processus d'érosion hydrique, notamment sur les versants pentus et les terrains de faible recouvrement.

2. 2. 8. La carte des pertes en sol m³/km²/an

Le modèle EPM permet l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique. Elle englobe plusieurs paramètres, qui sont combinés, afin d'élaborer la carte des pertes annuelles en sols (figure 88). Les résultats obtenus sont divisés en six classes, selon la classification mentionnée par Zachard, en 1982 (tableau 27).

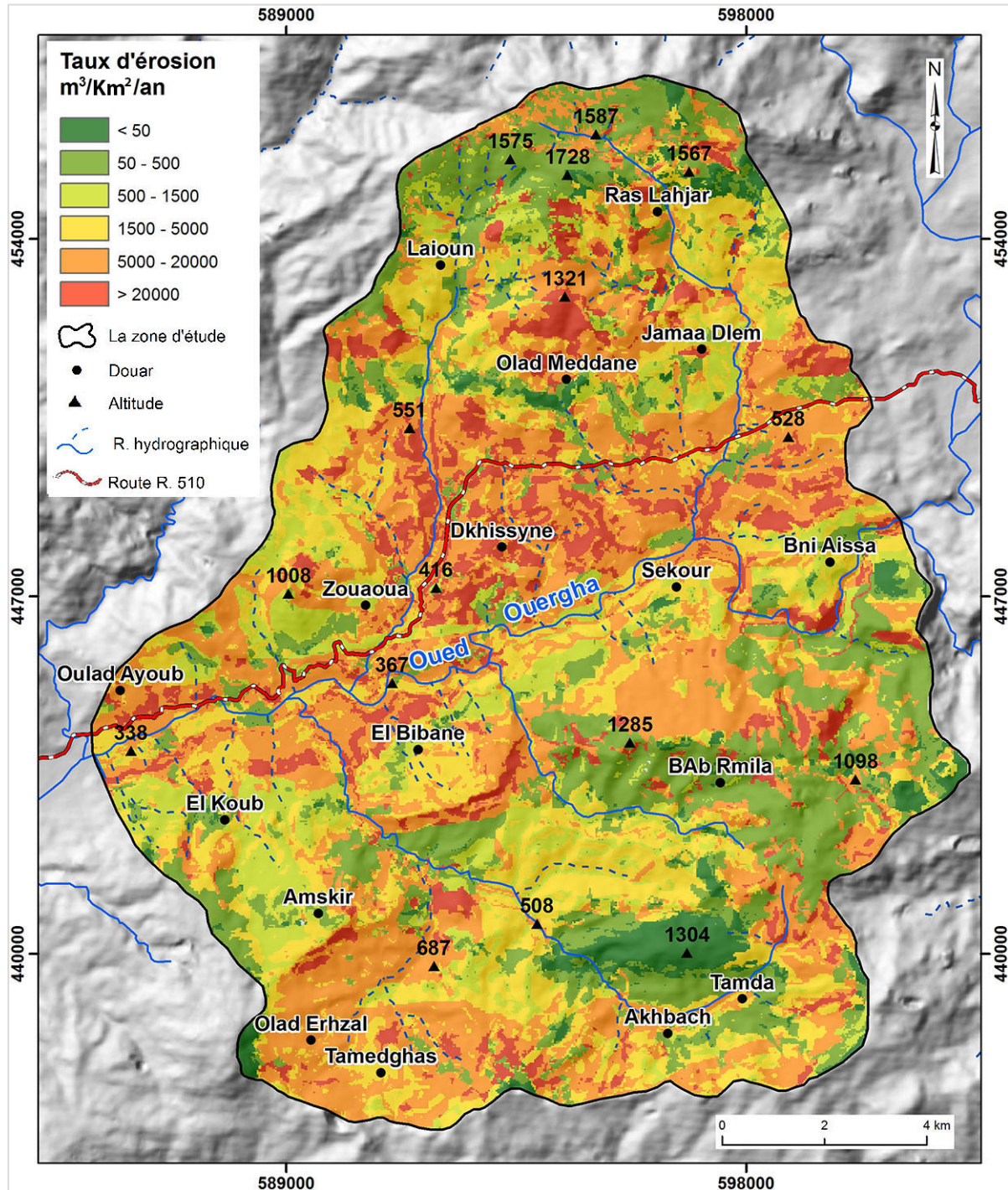
Classes	Degré d'érosion	Pertes en sol (m ³ /km ² /an)
1	Très faible	< 50
2	Faible	50 – 500
3	Modérée	500 – 1500
4	Forte	1500 – 5000
5	Très forte	5000 – 20000
6	Catastrophique	> 20000

Tableau 27. Répartition des taux d'érosion en fonction de la superficie selon la classification de Zachard (1982)

Les résultats obtenus par l'application du modèle EPM (figures 88 et 89) indiquent que le Haut Ouergha produit des quantités considérables de sédiments. En fonction des quantités de sédiments, trois grands types des milieux peuvent être distingués.

- Les milieux faiblement érodés : représentent 4 % de la superficie totale du secteur d'étude. Ce sont des zones marquées par une grande résistance des formations lithologiques (calcaires) et un

fort recouvrement des sols. Elles englobent les forêts, les zones de cultures irriguées et les milieux protégés par une arboriculture très dense.



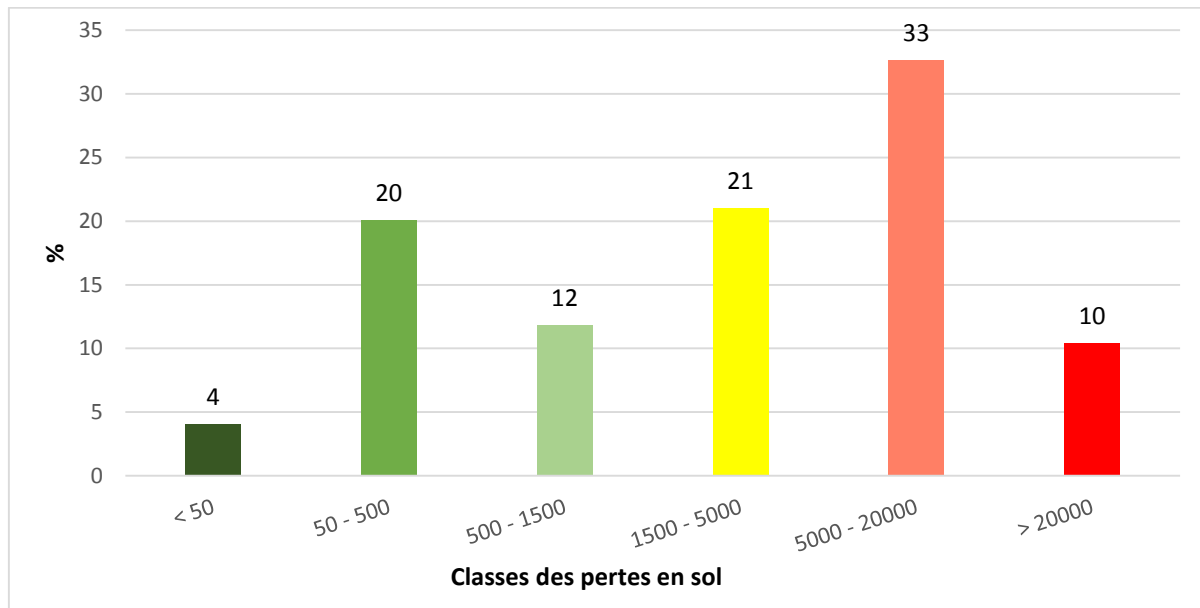


Figure 89. Répartition annuelle des pertes en sol en $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$

- Les milieux affectés par une érosion élevée à très élevée : occupent environ 54% de la superficie totale de la zone d'étude. Ces milieux produisent annuellement des quantités importantes de sédiments, variant entre 1500 et 20000 $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. La répartition spatiale de la production des sédiments montre une grande extension de ces milieux. Ils représentent des terrains de cultures sèches sur des versants accidentés, avec un faible taux de recouvrement, et des formations lithologiques de fort degré d'érodibilité.

- Des milieux affectés par une érosion catastrophique : produisent des quantités considérables de sédiments qui dépassent 20000 $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ et ils s'étalent sur 10 % de la zone d'étude, généralement se localisent dans la partie médiane, en raison de la dominance des formations marneuses (marnes grises), fortement érodable et englobent aussi les versants très raides mal protégés par le couvert végétal.

3. Corrélation entre la méthode PAP/CAR et EPM et limites d'application

3. 1. Corrélation entre la méthode PAP/CAR et EPM

La corrélation entre les facteurs d'érosion et la carte de perte en sol (EPM), montre une relation forte entre la carte d'état érosif et la carte de perte en sol (tableau 28). Cela exprime que les milieux de fortes sensibilités à l'érosion produisent des quantités considérables des matériaux. La

corrélation montre aussi que la nature des formations lithologiques et le taux de recouvrement, sont des facteurs déterminant dans l'accélération de l'érosion hydrique.

La dynamique érosive dans la zone d'étude a des conséquences néfastes. D'une part, elle affecte la qualité des sols par le transport des éléments fertiles dû à l'érosion en nappe. D'autre part, elle contribue à la réduction des surfaces agricoles par l'effet de l'érosion linéaire et la solifluxion. En effet, une grande partie de ces matériaux arrachés est transportée vers l'aval, et contribue à l'envasement du barrage El Wahda situé en aval.

	EPM	Z	Φ	Ja	Y	X	H	T
EPM	1	0.98	0.36	0.01	0.49	0.67	-0.17	0.21
Érosion potentielle (z)	0.98	1	0.41	-0.02	0.53	0.74	-0.21	0.22
Processus d'érosion observés (Φ)	0.36	0.41	1	0.34	0.08	0.25	-0.13	0.28
Pente (Ja)	0.10	-0.02	0.34	1	-0.30	-0.16	0.28	-0.26
Résistance des roches à l'érosion (Y)	0.49	0.53	0.08	-0.30	1	0.12	-0.26	0.21
Protection des sols (Xa)	0.67	0.74	0.25	-0.16	0.12	1	-0.21	0.21
Précipitations (H)	-0.17	-0.21	-0.13	0.28	-0.26	-0.21	1	-0.39
Température (T)	0.21	0.22	0.28	-0.26	0.21	0.21	-0.39	1

Tableau 28. Matrice de corrélation entre les facteurs d'érosion et les pertes en sol

3. 2. Comparaison des résultats entre le terrain et les deux méthodes (PAP/CAR et EPM)

Pour évaluer la fiabilité des résultats d'estimation qualitative et quantitative d'érosion hydrique dans le Haut Ouergha, par la méthode PAP/CAR et EPM, nous avons comparé les résultats obtenus par ces deux méthodes avec le terrain (tableau 29). Généralement, les résultats des deux méthodes sont similaires avec le terrain, mais il y a des exceptions dans certaines zones, notamment dans les terrains affectés par l'érosion en nappe. Dans le point de contrôle, la pente est très faible, et la forme d'érosion dominante est l'érosion en nappe, mais il a été estimé parmi les zones d'érosion élevée pour les deux méthodes. Cela peut être expliqué par les autres facteurs qui interviennent

dans la méthode, qui sont l'érodibilité et la protection des sols. En effet, le point de contrôle est situé dans un terrain marneux, qui est classé de forte érodibilité bien que la pente soit faible. Ainsi que le terrain est occupé par les cultures sèches, avec l'absence de l'arboriculture, donc il est classé parmi les zones de faible protection des sols.

Il existe aussi une contradiction entre les résultats d'érosion potentielle (Z) et le taux de perte en sol pour la méthode EPM concernant un point de contrôle situé dans la plaine alluviale de l'oued Ouergha, occupée par les cultures irriguées. Selon les résultats de la méthode EPM, cette zone est classée parmi les terrains de faible potentialité érosive, en revanche elle produit une quantité importante des sédiments qui oscille entre 1500 et 5000 m³/km²/an. Cela trouve son explication dans la sensibilité forte des matériaux à l'érosion et la protection faible des sols, notamment que les zones irriguées ne permettent qu'une protection temporaire des sols durant l'été, tandis que les sols restent nus durant la période pluviale face à l'agressivité des précipitations. Pour ces raisons, les zones irriguées sont classées par la méthode EPM, parmi les zones d'érosion moyenne.

Points de contrôle	Terrain	Méthode PAP/CAR	Méthode EPM	
			Érosion potentielle (Z)	Perte en sols m ³ /km ² /an
1	Bad land	Érosion élevée	Très forte	> 20000
2	Forêt	Érosion très faible	Faible	< 50
3	Ravin profond	Érosion élevée	Très forte	5000-20000
4	Zone irriguée	Érosion très faible	Faible	1500-5000
5	Érosion en nappe	Érosion élevée	Très forte	5000-20000
6	Glissement	Érosion très élevée	Très forte	> 20000
7	Érosion en rigole	Érosion élevé	Très forte	5000-20000

Tableau 29. La comparaison des résultats d'application de la méthode PAP/CAR et EPM avec le terrain

3. 3. Les limites d'application des modèles d'évaluation qualitative et quantitative d'érosion

La cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition géographique du phénomène, aussi, il fournit des informations synthétiques et systématiques sur la nature et

l'intensité du phénomène, et permet donc d'identifier les zones les plus affectées (instables) et les types d'érosion dominants. En outre, la carte devient un outil de décision et une base pour la planification et l'orientation des programmes d'aménagement. Mais la réalisation de ces cartes demande de prendre en considération les méthodes utilisées et les conditions d'utilisation afin d'atteindre des résultats acceptés et proches de la réalité.

Les méthodes d'évaluation d'érosion ont connu des critiques liées à leurs utilisations abusives. Ci-après, on va citer les principaux problèmes confrontés à l'application de la méthode PAP/CAR et EPM.

Contraintes d'application de PAP/CAR au Maroc		
L'insuffisance ou l'absence des données	Cartes géologiques	L'absence des cartes géologiques à grande échelle pose un grand problème pour appliquer cette approche, dans la plupart des cas, les chercheurs ont utilisé des cartes à petite échelle 1/50000 couvrent une partie du Rif, ou la carte du Rif 1/500000 qui est très généralisée et ne permette pas des informations détaillées concernant la lithologie.
	Cartes de répartition des sols	Comme les cartes géologiques, le problème de l'échelle existe dans les cartes de répartition des sols. Alors l'utilisation des cartes à petite échelle pose le problème de généralisation. Aussi on note l'absence des cartes détaillées, qui fournissent des informations sur les caractéristiques des sols (texture, structure...).
Méthodologique	Problème de classification des facteurs	Lors de l'application des méthodes, le problème de classification se pose, notamment dans la classification des types d'occupation des sols et d'autres facteurs qui interviennent dans la dynamique érosive.
Résultats	Problème de pertinence des résultats	Les résultats obtenus sont incapables de déterminer les coûts d'aménagement des zones instables et les techniques de la lutte antiérosive les plus adaptés aux conditions de chaque bassin.

Tableau 30. Limites d'application de l'approche PAP/CAR au Maroc

Contraintes d'application de modèle EPM au Maroc		
L'insuffisance ou l'absence des données	La température	L'application du modèle EPM dépend de la disponibilité des données nécessaires comme les précipitations et la température. Au Maroc, dans la plupart des stations météorologiques, on trouve des lacunes dans les séries climatiques qui influencent les résultats, notamment les données de la température qui sont insuffisantes. Parfois l'obtention de ce type de données auprès des services responsables pose un grand problème pour les chercheurs.
	Les précipitations	

Tableau 31. Contraintes d'application de modèle EPM au Maroc

Les problèmes d'application des directives de PAP/CAR et EPM au Maroc sont liés pour une grande partie à l'absence des données. Donc cela influence les résultats et réduit leur pertinence.

Conclusion

Les résultats obtenus par l'application des deux méthodes (EPM et PAP/CAR), suggèrent que le Haut Ouergha est un milieu fragile et très vulnérable à l'érosion hydrique. L'application de la méthode PAP/CAR montre que les zones instables couvrent la majorité de la superficie totale de la zone d'étude (environ 82%). En revanche, les zones stables s'étendent sur des surfaces limitées. L'évaluation quantitative menée par la méthode EPM montre que 64% de la zone d'étude produisent une quantité considérable de sédiments (entre 1500 et plus de 20000 m³/km²/an). Cette quantité énorme de sédiments affecte la retenue du barrage El Wahda et menace la stabilité des infrastructures.

La comparaison des résultats des deux méthodes avec le terrain, indique que les facteurs les plus déterminants dans l'érosion hydrique sont le couvert végétal et la nature des formations lithologiques. L'influence des autres paramètres toujours varie selon ces facteurs par exemple dans les pentes fortes on trouve une érosion faible par ce que le couvert végétal est dense et la lithologie résistante, tandis que dans les pentes faibles, on peut trouver une érosion forte, car les formations lithologiques sont très friables ou tendres et les sols mal protégés par la végétation.

Les résultats obtenus par l'application des deux méthodes d'évaluation qualitative et quantitative (EPM et PAP/CAR) sont toujours discutables, ils ne reflètent pas la réalité à cent pour cent, mais ils donnent une idée générale sur la sensibilité du terrain à l'érosion. Les cartes produites peuvent être un outil de décision par l'identification des zones critiques qui demandent une intervention prioritaire et rapide par des programmes de restauration et de sauvegarde.

L'érosion hydrique dans la zone d'étude constitue une source importante de dégradation des terres agricoles, des infrastructures. Elle constitue aussi un facteur déterminant dans la désertification par l'effet de la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

CHAPITRE 4

LA SENSIBILITE A LA DESERTIFICATION DANS LE HAUT OUERGHA PAR L'APPLICATION DE L'APPROCHE MEDALUS

Introduction

La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED, 1992) tenue à Rio en 1992 définit la désertification comme étant « la dégradation des sols dans les régions arides, semi-arides subhumides et sèches, par suite à divers facteurs comprenant les variations du climat et les activités humaines » (Fozooni, 2012 ; Vieira et al., 2015 ; Bouabid et al., 2016 ; Lahlaoui et al., 2017 ; Boudjemline et al., 2018 ; Eun Jung et al., 2019). Ce phénomène se produit dans le monde entier, en particulier dans les terres arides, qui couvrent environ 41 % de la surface terrestre totale de la Terre (Jafari et Bakhshandehmehr, 2016 *in* Uzuner et Dengiz, 2020).

Au Maroc la désertification affecte environ 90% de la superficie du territoire national (Ghanam, 2003). Ce phénomène s'est accéléré dans les zones où le climat est aride et les sols sont vulnérables à la dégradation (Mokhtari, 2016). Sous l'effet des changements climatiques (diminution des précipitations, succession des années sèches) qui affectent non seulement la région méditerranéenne mais le monde entier, le phénomène de désertification devient de plus en plus accéléré. Les recherches indiquent que le Maroc est parmi les pays les plus touchés par les changements climatiques, qui sont manifestés par la diminution des précipitations et l'augmentation de la température (IPCC, 2022). En effet, la désertification a des conséquences néfastes sur l'environnement, l'économie et la qualité de vie des populations (Plaiklang et al., 2020).

Le Haut Ouergha connaît une détérioration remarquable, marquée par la dégradation des sols, le recul alarmant du couvert végétal naturel et l'augmentation des pressions sur les ressources en eau. Durant ces dernières décennies, cette dégradation devient plus grave sous l'effet de la sécheresse, qui contribue à l'augmentation de la sensibilité des milieux à la désertification. Pour spatialiser ce phénomène dans l'aire d'étude, nous avons appliqué l'approche MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) qui est largement utilisée pour évaluer la sensibilité à la désertification dans les régions méditerranéennes. Cette approche intègre les paramètres les plus déterminants dans la désertification. À savoir ; les indicateurs physiques (qualité du sol), environnementaux (qualité de la végétation), climatiques (qualité du climat) et sociaux (qualité de la gestion) (Ait Lamqadem et al., 2018), afin de déterminer les zones prioritaires à

l'intervention. Dans ce chapitre les outils SIG ont été utilisés pour la superposition des facteurs clés dans la détermination de la sensibilité à la désertification.

1. Aperçu sur l'approche MEDALUS

MEDALUS est le nom d'un projet réalisé par la Commission européenne en 1999, pour évaluer la sensibilité à la désertification dans les régions méditerranéennes (Benabderrahmane et Chenchouni, 2010 ; Vieira et al., 2015). Cette approche a été largement utilisée dans plusieurs pays méditerranéens ; Portugal, Espagne, Italie, Grèce, Algérie, Maroc, Egypte et Tunisie. Elle a été appliquée dans d'autres régions du monde ; le Cap Vert, l'Iran, Brésil, Mongolie (Mokhtari, 2016).

Au Maroc, l'approche MEDALUS a été appliquée par plusieurs chercheurs dans des zones différentes. Généralement, les résultats obtenus montrent une forte sensibilité de ces milieux à la désertification. L'application de cette approche dans le bassin versant de Sous par Bouabid et al., (2010) indique que 47% du bassin est caractérisé par une sensibilité forte à critique. L'étude de Mokhtari en 2016 sur le bassin versant de la Moulouya montre que 61% du bassin est classée critique à fragile. Dans la vallée de Draa une étude menée par Ait Lamqadem., et al., (2018) indique que 50.34 % de la superficie totale représente une sensibilité forte à très forte. L'évaluation de ce phénomène dans le bassin versant d'Oued El Maleh par Lahlaoui., et al. (2017) confirme que > 50 % du bassin est marqué par une sensibilité modérée. L'étude de Boutlaka en 2019 sur le bassin d'Ouergha indique que 47 % du bassin est affecté par une sensibilité forte à très forte. Ainsi l'application de l'approche MEDALUS dans le bassin de Amzaz par Boutlaka et al., (2021) montre que 57.5 % est caractérisée par une sensibilité modérée à forte.

Selon Kosmas et al., (1999), l'application de l'approche MEDALUS est fondée sur l'identification de l'indice de sensibilité à la désertification (ISD) à partir de quatre indices de qualité (figure 90) issus du milieu et de l'action de l'homme. L'indice de sensibilité à la désertification est exprimé par la formule (1) :

$$ISD = (IQS * IQV * IQC * IQSA)^{1/4} \quad (1)$$

Ou, **ISD** : indice de sensibilité à la désertification ; **IQS** : indice de qualité des sols ; **IQV** : indice de qualité de végétation ; **IQC** : indice de qualité de climat ; **IQSA** : indice de qualité de système d'aménagement des terres.

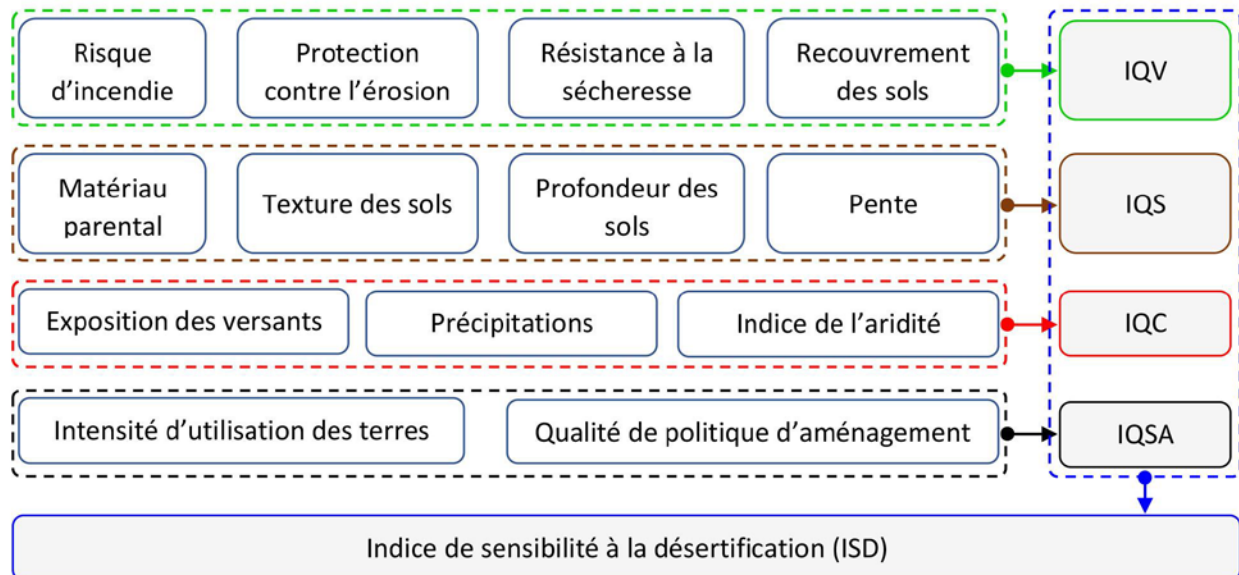


Figure 90. Schéma méthodologique de l'approche MEDALUS

Chaque indicateur de qualité est calculé à partir des paramètres classés de très élevé, élevé, moyen, faible ou très faible, et les valeurs de l'indice oscillent entre 1 (sensibilité très faible) et 2 (sensibilité très forte), (De Pina Tavares et al., 2015).

2. Application de l'approche MEDALUS

2. 1. Elaboration de la carte de l'indice de qualité de la végétation (IQV)

Le couvert végétal est un facteur déterminant dans la dégradation des terres, son effet dépend de la résilience aux perturbations climatiques et de sa capacité à protéger les sols contre l'érosion (Prăvălie et al., 2017). Ainsi que la dégradation du couvert végétal est considérée comme un indicateur de l'apparition de la désertification (Thornes, 1996 in kosmas et al., 2000).

Les principaux indicateurs de désertification liée à la végétation naturelle ou agricole existante sont : le risque d'incendie, la protection contre l'érosion, la résistance à la sécheresse et le taux de recouvrement (kosmas et al., 1999). La formule (2) permet de calculer l'indice de qualité de végétation.

$$IQV = (\text{risque d'incendie} * \text{protection contre l'érosion} * \text{résistance à la sécheresse} * \text{recouvrement})^{1/4} \quad (2)$$

2. 1. 1. Risque d'incendie

La sensibilité de la végétation au risque d'incendie est liée essentiellement à ses caractéristiques, comme la nature de la végétation, la physionomie, la composition et la structure (Trabaud, 1996). Les types de végétation ont été regroupés en quatre catégories en fonction de leur risque d'incendie (tableau 32).

Les classes	Risque d'incendie	Description	Indice
1	Faible	Terrains nus, les zones irriguées, l'arboriculture	1
2	Modéré	Cultures sèches, terrains de pâturages, mélange de culture sèche et arboriculture	1.33
3	Elevé	Matorral,	1.66
4	Très élevé	Forêts, arboriculture dense	2

Tableau 32. Les classes de risque d'incendie selon l'approche MEDALUS

La carte du risque d'incendie est élaborée sur la base de la carte d'occupation du sol, en se basant sur la densité et la sensibilité des différents types de végétation à l'incendie. Le tableau 35 présente les résultats de ce paramètre.

La figure 91 et le tableau 35 indiquent que la végétation de faible densité, les terrains de culture sèche et les terrains nus représentent un risque d'incendie faible à modéré, avec environ 65.63% de la surface totale. Les zones caractérisées par un risque d'incendie élevé sont les zones de matorrals et d'arboriculture dense, elles occupent 24% de la zone d'étude. Tandis que les zones caractérisées par un risque d'incendie très élevé occupent 10.36% de la superficie et correspondent essentiellement aux zones forestières de forte et moyenne densité.

Selon les résultats obtenus on constate que le risque d'incendie est fortement lié à la densité du couvert végétal, plus la densité est élevée, plus le risque d'incendie augmente.

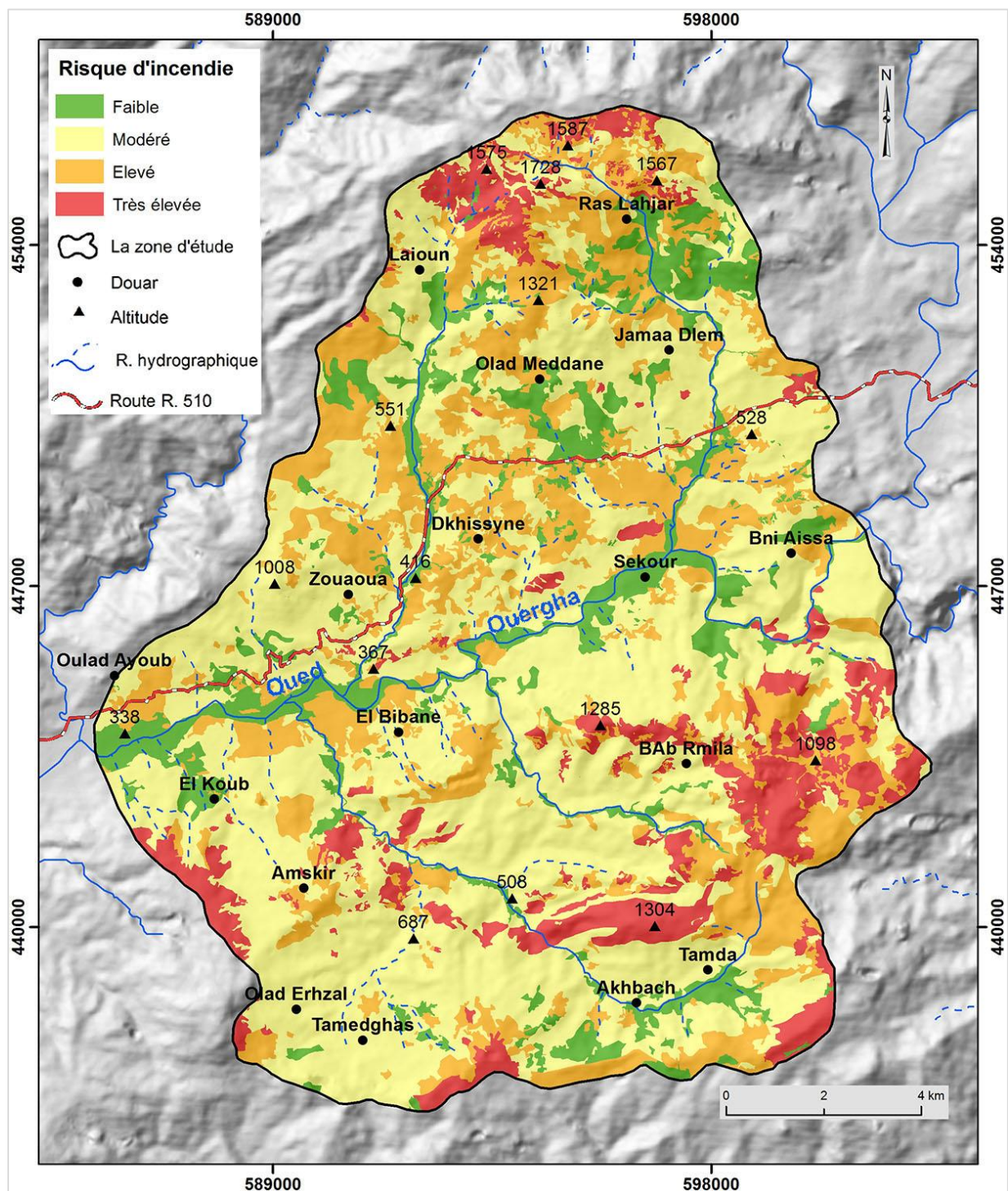


Figure 91. Risque d'incendie selon l'approche MEDALUS

Risque d'incendie	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Faible	1	26.78	11.53
Modéré	1.33	125.62	54.10
Elevé	1.66	55.73	24.00
Très élevé	2	24.07	10.36

Tableau 33. Classes du risque d'incendie dans la zone d'étude

2. 1. 2. Protection contre l'érosion

La protection des sols contre l'érosion est liée à la densité et au type de couvert végétal. Généralement, les sols couverts par des végétations denses ont un fort coefficient d'infiltration d'eau et de protection vis-à-vis de l'érosion. Par contre, les sols nus ou caractérisés par un couvert végétal clairsemé favorisent un ruissellement intense et une faible protection contre l'érosion.

Les classes	Protection contre l'érosion	Description	Indice
1	Très élevée	Forêts, arboriculture dense, zones irriguées	1
2	Élevée	Matorral, arboriculture	1.33
3	Modérée	Mélange de culture sèche et d'arboriculture	1.66
4	Faible	Cultures sèches, terrains de pâturage, Terrains nus	2

Tableau 34. Classes de protection contre l'érosion selon l'approche MEDALUS

La carte de protection contre l'érosion (figure 92) a été dérivée à partir de la carte d'occupation des sols. Les résultats obtenus (tableau 35) montrent que la végétation de faible à très faible densité et les terrains nus présentent une faible protection contre l'érosion avec 23.79 % de la surface totale.

Les zones caractérisées par une protection modérée (zones de culture sèche associée d'arboriculture moyennement dense), occupent 45.79 % de la superficie totale. Les zones forestières, les zones irriguées, le matorral et l'arboriculture dense représentent une protection élevée à très élevée contre l'érosion, cependant elles couvrent 30.42 % de l'aire d'étude. Elles sont localisées le long d'oued Ouergha et ses affluents et aux niveaux des forêts Jebel Erzinyia Tamda et la forêt Jerf.

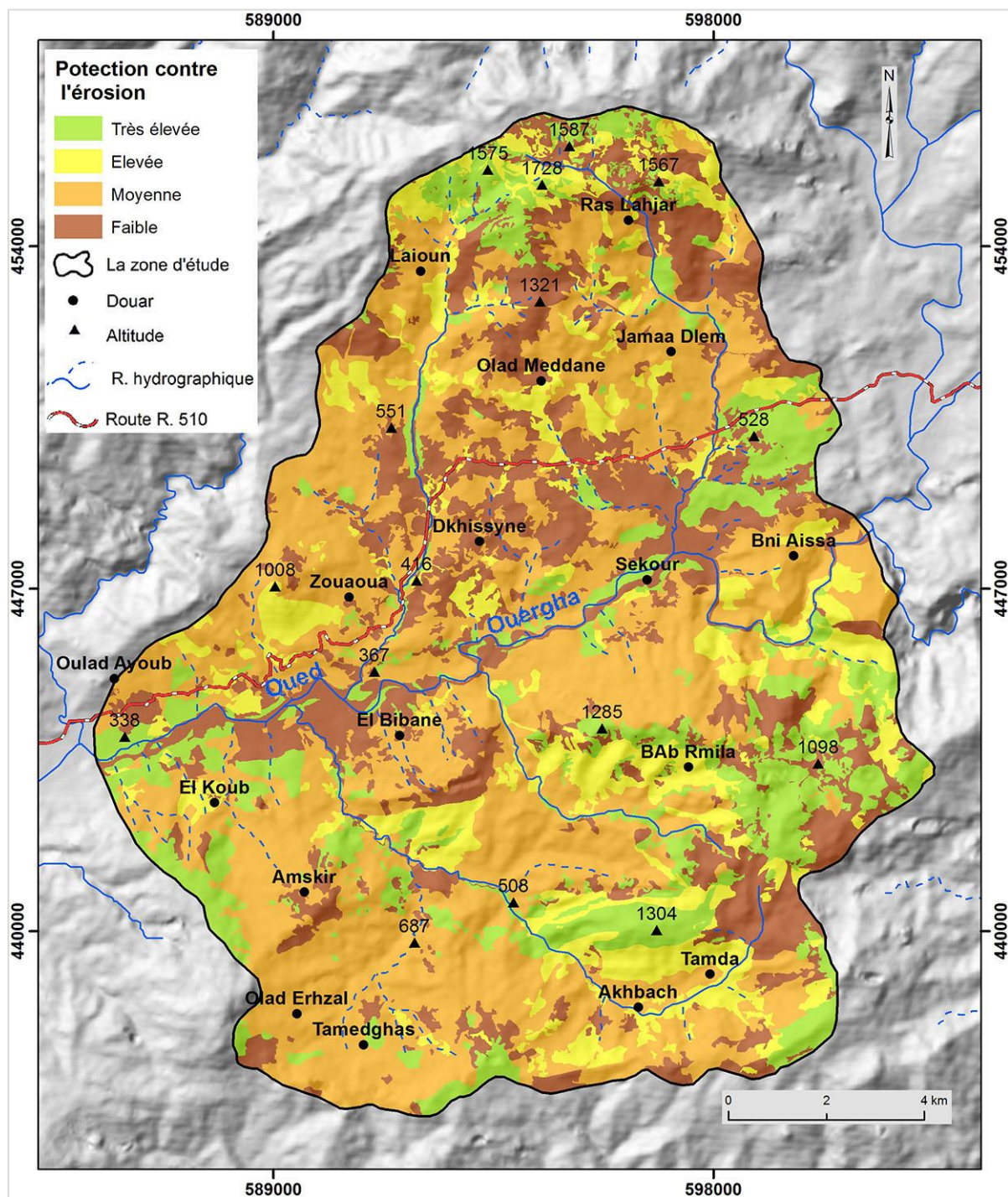


Figure 92. Carte de protection contre l'érosion selon l'approche MEDALUS

Protection contre l'érosion	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Très élevée	1	37.12	15.99
Élevée	1.33	33.51	14.43
Modérée	1.66	106.32	45.79
Faible	2	55.24	23.79

Tableau 35. Classes de protection contre l'érosion

Généralement, la zone d'étude est marquée par un couvert végétal incapable de protéger les sols contre l'érosion, ce qui provoque la dégradation des sols et augmente la sensibilité à la désertification.

2. 1. 3. Résistance à la sécheresse (RS)

Le Haut Ouergha évolue dans un contexte climatique méditerranéen caractérisé par des précipitations annuelles irrégulières, avec l'alternance des périodes climatiques sèches et humides. Ce qui influence la croissance du couvert végétal, notamment pendant les longues périodes de sécheresse.

Le degré de résistance à la sécheresse diffère selon le type de couvert végétal et la quantité d'eau nécessaire à leurs évolutions. Certains types de végétation présentent une résistance plus élevée que d'autres. Le tableau 36 présente la classification des types d'occupation des sols selon leurs degrés de résistance à la sécheresse.

Les classes	Résistance à la sécheresse	Description	Indice
1	Très élevée	Forêts, arboriculture dense, zones irriguées	1
2	Élevée	Matorral, arboriculture moyennement dense	1.33
3	Modérée	Mélange de culture sèche et d'arboriculture de faible densité	1.66
4	Faible	Cultures sèches, terrains de pâturage, Terrains nus	2

Tableau 36. Classification de la résistance à la sécheresse selon l'approche MEDALUS

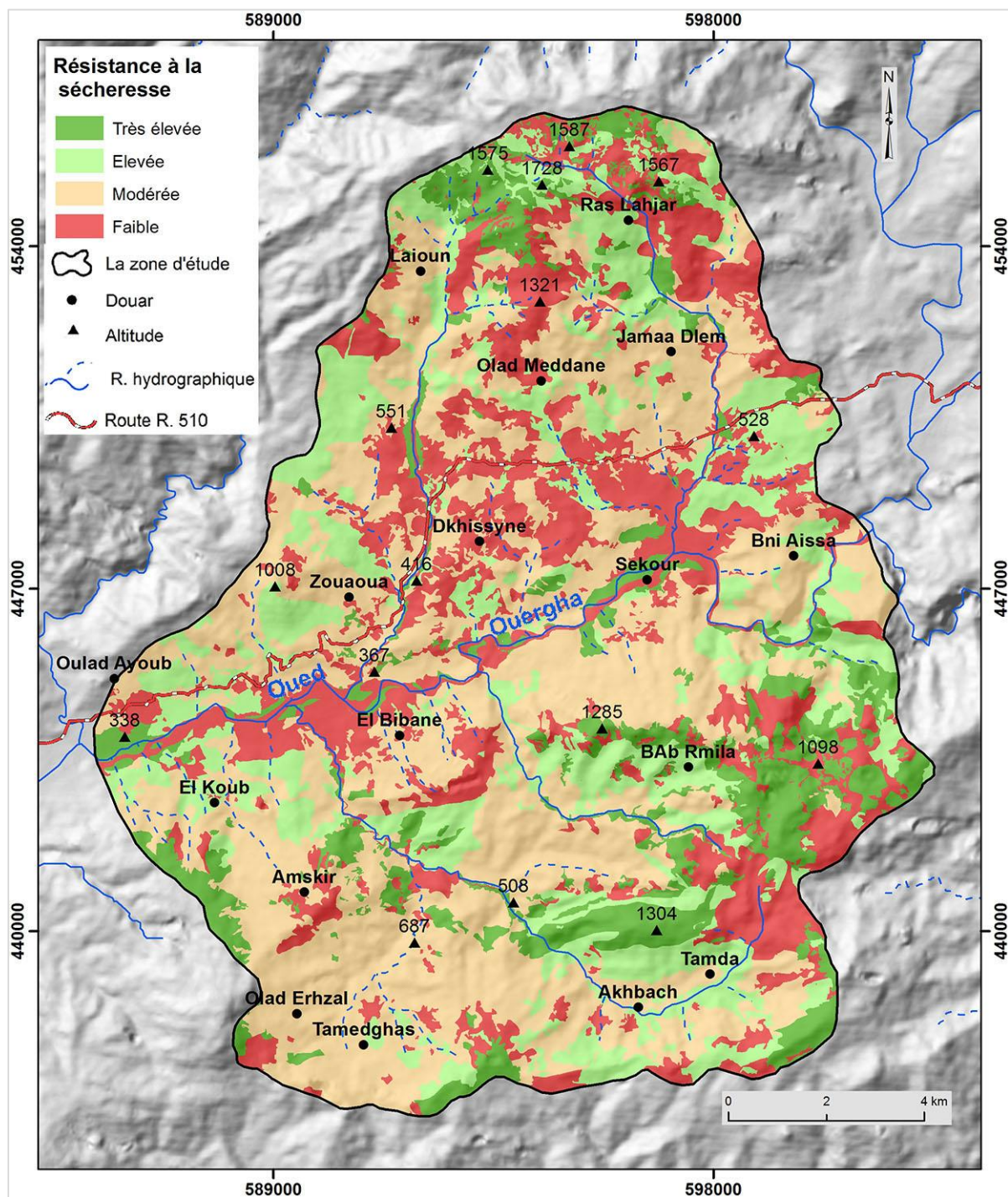


Figure 93. Carte de la résistance à la sécheresse selon l'approche MEDALUS

La carte de la résistance à la sécheresse (figure 93) est réalisée à partir de la carte d'occupation des sols et suivant la classification mentionnée dans le tableau 36. Les résultats obtenus montrent que 47.92 % de la superficie totale de la zone d'étude présentent une résistance modérée à la sécheresse (tableau 37), ce sont les terrains d'arboriculture de faible densité et les terrains de culture sèche associant par l'arboriculture (oliviers, amandiers, figuiers...). Ces types de végétation sont fortement influencés par la sécheresse. Les zones caractérisées par un couvert végétal de faible résistance à la sécheresse occupent 23.79 %, et correspondent aux terrains de culture sèche et les terrains nus.

Les zones marquées par une résistance élevée occupent 21.49 % de l'aire d'étude, elles sont occupées par le matorral et l'arboriculture moyennement dense. Les terrains d'arboriculture dense, les cultures irriguées et les forêts représentent une résistance très élevée à la sécheresse, ils s'étalent sur une superficie limitée de 12.80 % et ils occupent les zones humides et les plus élevées de l'aire d'étude.

Résistance à la sécheresse	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Très élevée	1	29.723	12.80
Elevée	1.33	49.888	21.49
Modérée	1.66	97.343	41.92
Faible	2	55.239	23.79

Tableau 37. Classes de la résistance à la sécheresse

2. 1. 4. Recouvrement des sols

Le taux de recouvrement des sols a été élaboré par le calcul de l'indice de végétation NDVI à partir des images satellites multispectrales Landsat OLI à résolution spatiale de 30 m.

Les données présentées dans le tableau 38 et la figure 94, montrent que les zones représentent un recouvrement modéré des sols, sont les plus dominantes avec 58.96% de la superficie totale. La végétation de bon recouvrement ne présente que 14.48% de l'ensemble de l'aire d'étude, elle est localisée surtout dans les zones forestières, les zones irriguées et les terrains d'arboriculture dense. Alors que les zones de culture sèche, les terrains nus et les terrains d'arboriculture clairsemée offrent un faible recouvrement des sols et occupent environ 26.56 % de la superficie totale du secteur d'étude.

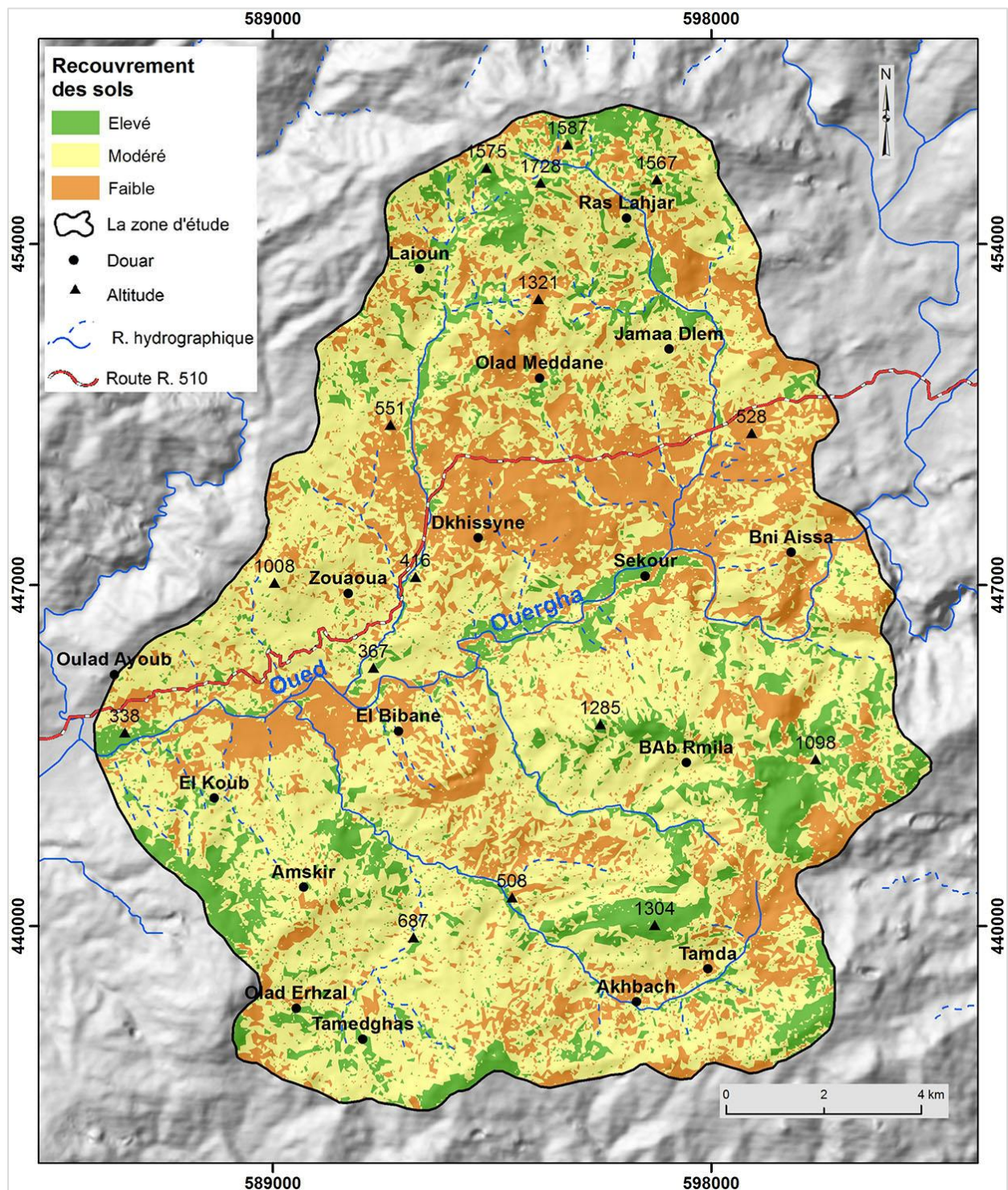


Figure 94. Taux de recouvrement des sols (image satellite OLI, 29/11/2018)

Recouvrement des sols	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Élevé	1	33.6	14.48
Modéré	1.5	136.8	58.96
Faible	2	61.6	26.56

Tableau 38. Classes de recouvrement des sols dans la zone d'étude

2.1.5. Carte de l'indice de la qualité de la végétation

La carte de l'indice de qualité de la végétation (figure 96) a été élaborée par croisement des quatre paramètres : risque d'incendie, protection contre l'érosion, résistance à la sécheresse et le recouvrement des sols. Les résultats obtenus sont regroupés selon la classification indiquée par Kosmas et al., 1999 (tableau 39).

Classes	Valeur	Qualité de végétation
1	$IQV < 1.20$	Bonne
2	$1.20 < IQV < 1.40$	Moyenne
3	$1.40 < IQV < 1.60$	Faible
4	$IQV > 1.60$	Très faible

Tableau 39. Indice de qualité de végétation selon l'approche MEDALUS

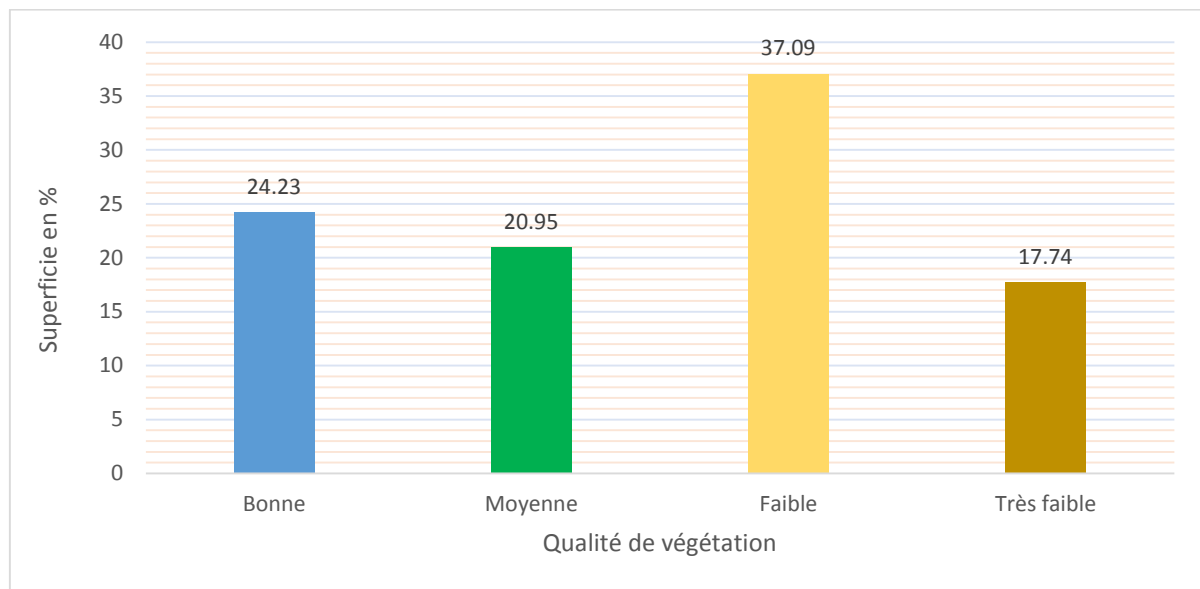


Figure 95. Répartition de l'indice de qualité de végétation dans la zone d'étude

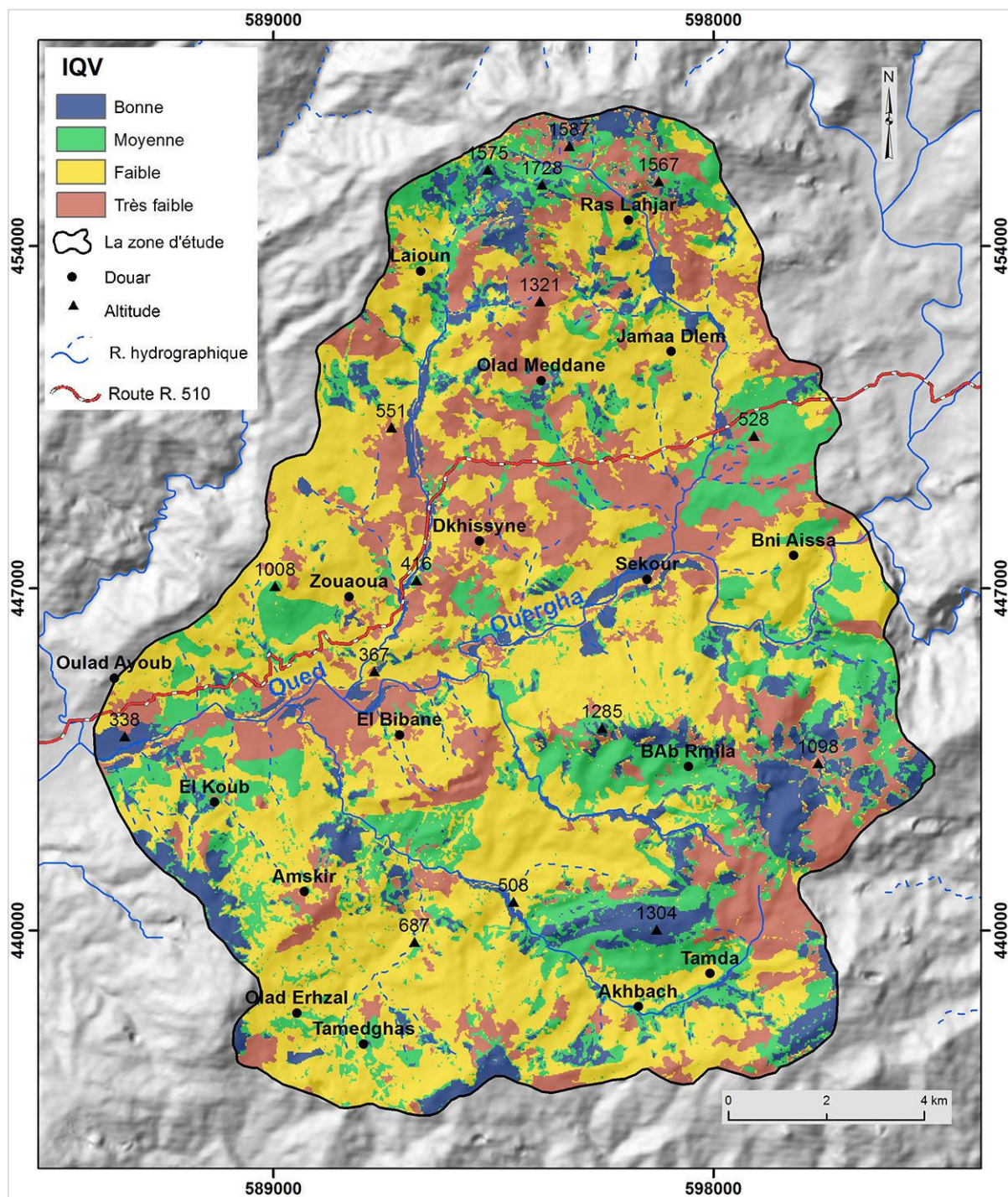


Figure 96. Indice de la qualité de la végétation

Les résultats de la superposition des facteurs (figure 95), signalent que les zones ayant une bonne qualité de végétation occupent 24.23% de la superficie (figure 94). Elles correspondent à des zones caractérisées par un couvert végétal dense (massifs forestiers, zones irriguées, arboricultures denses...), ces milieux représentent une forte protection des sols contre l'érosion et permettent un bon drainage des eaux de ruissellement et favorisent la fertilité des sols.

Les régions où la qualité de végétation est faible et très faible représentent un pourcentage important (environ 55%), ce sont les terrains des cultures sèches et les terrains nus. Le faible recouvrement des sols dans ces régions augmente le risque d'érosion et influence la qualité des sols. Ces milieux sont les plus sensibles à la désertification.

2.2. Elaboration de la carte d'indice de qualité des sols (IQS)

Le facteur sol est un élément clé dans le processus de la désertification (Lahloui et al., 2017), sa qualité dépend de la formation lithologique, la profondeur, la texture, la pente et la teneur en matière organique (Ait Lamqadem et al., 2018). Ces paramètres influencent directement la capacité de rétention de l'eau, la fertilité du sol et la résistance contre les processus d'érosion (Elnashar et al., 2022). L'indice de qualité des sols est calculé sur la base de l'équation (3):

$$\text{IQS} = (\text{texture} * \text{matériau parental} * \text{profondeur} * \text{pente})^{1/4} \quad (3)$$

2.2.1. Matériau parental

La réalisation de la carte de matériau parental demande d'abord l'identification de toutes les faciès géologiques dans le secteur d'étude, et de les reclasser en fonction de leur résistance à l'érosion. Pour cette fin nous avons adopté la classification mentionnée par l'approche MEDALUS (tableau 40).

Nous avons exploité la carte géologique de Dhar Souk 1/50000 et le tableau 42 pour réaliser la carte des matériaux parentaux. Selon les résultats obtenus, on peut distinguer trois classes des formations lithologiques (figure 97 et tableau 41) :

Les formations cohérentes : occupent environ 29.38% de la superficie totale de l'aire d'étude, elles sont localisées notamment dans la partie nord et la partie sud- est. Cette classe comporte des formations de calcaire en banc, calcaire en plaquettes et le conglomérat.

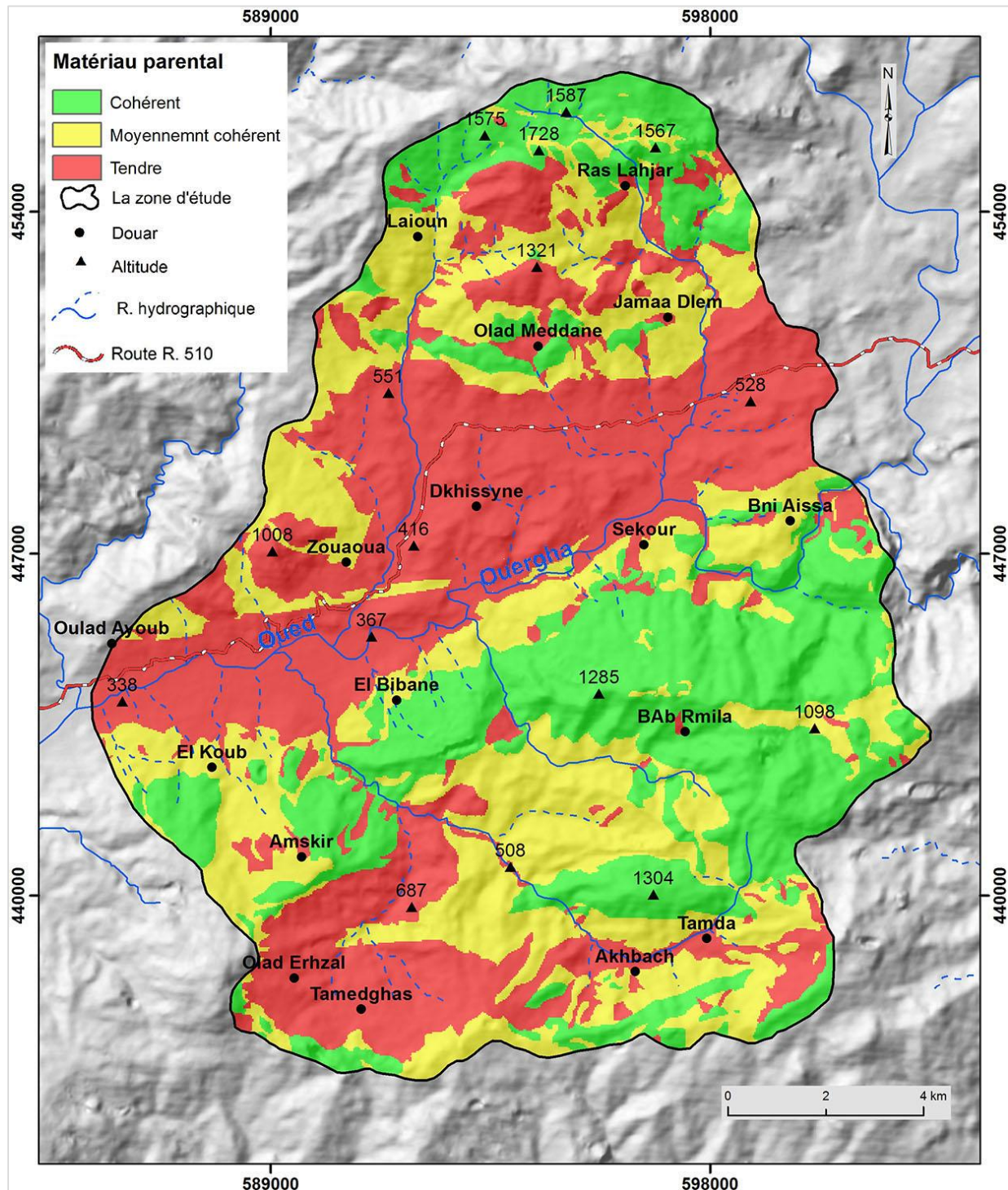


Figure 97. Érodibilité des matériaux parentaux

Classes	Description	Indice
Matériaux cohérents	Calcaire, dolomie, grès, dalle calcaire, quartzite, basalte, conglomérat ...	1
Matériaux moyennement cohérents	Marno-calcaire, grès et basalte altéré, flysch armé, croûte et encroûtement calcaires granulaires compacts...	1.5
Matériaux meubles	Argile, marne, sable, formations superficielles non ou peu encroûtées, gypse, schistes, flysch ...	2

Tableau 40. Normes de matériaux parentaux (Moukhtari, 2016)

Les formations moyennement cohérentes représentent 31.08% de l'ensemble du secteur d'étude, ce sont des formations de marno-calcaires, flyschs et le pélites noires.

Les formations tendres : sont les plus dominantes dans la zone d'étude, avec 39.54 % de la superficie, elles occupent la partie médiane et comportent notamment les formations de quaternaire (colluvions, alluvions, coulées boueuses, éboulis...) et les marnes. Ces formations friables sont très vulnérables à la dégradation.

Matériau parental	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Cohérent	1	68.20	29.38
Moyennement cohérent	1.5	72.15	31.08
Tendre	2	91.79	39.54

Tableau 41. Classes de matériau parental

2.2.2. Texture des sols

La texture des sols est liée à la taille des particules (graviers, sables, limons, argiles), qui influence la capacité des sols à la rétention de l'eau (Seghir et al., 2019). Ce paramètre est fondamental pour évaluer le risque de dégradation des sols. Les sols à texture grossière sont pauvres en matière organique, mais ils favorisent une forte infiltration, ce type des sols est plus sensible à l'érosion. Les sols à texture fine, malgré leur richesse en éléments fertilisants, sont moins perméables, ce qui entraîne une salinisation dans les zones planes et un ruissellement important sur les terrains pentus. Les sols à texture équilibrée sont assez perméables et fertiles, et présentent une résistance

élevée contre la dégradation (Salamani et al., 2012). Le tableau 42 présente les classes de la texture des sols selon l'approche MEDALUS.

Classes	Description	Indice
Équilibrée	Limon-sableux, sable-limono-argileux, limon	1
Fine	Limon-argileux, argile-limoneuse, argile sableuse	1.33
Très fine ou très limoneuse	Très argileuse, très limoneuse	1.66
Grossière à très grossière	Sable-limoneux, sable	2

Tableau 42. Norme de texture des sols selon l'approche MEDALUS

La carte de texture des sols (figure 98) est élaborée d'après la carte pédologique de Taounate 1/50000 (1994). L'analyse de cette carte montre que la zone d'étude est caractérisée par la dominance des sols à texture équilibrée (79.85%), qui sont assez résistants à la désertification. Les sols de texture grossière occupent 15.39 % de la superficie totale (tableau 43), ce type du sol est plus exposé à la sécheresse, car ils retiennent moins d'eau. Les sols à texture fine représentent 4.76 % de l'aire d'étude, ce type des sols riches en limons et argiles, est moyennement sensibles à la sécheresse, en raison de leur capacité de rétention d'eau.

Texture	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Équilibrée	1	185.34	79.85
Fine	1.33	11.04	4.76
Grossière	2	35.72	15.39

Tableau 43. Classes de texture des sols selon l'approche MEDALUS

2.2.3. Profondeur des sols

Ce paramètre est lié directement à la capacité de stockage d'eau du sol et aux réserves minérales disponibles. Il traduit la capacité du sol à développer et à maintenir un couvert végétal. Ce paramètre est également distingué selon les quatre classes dictées par l'approche MEDALUS (tableau 44).

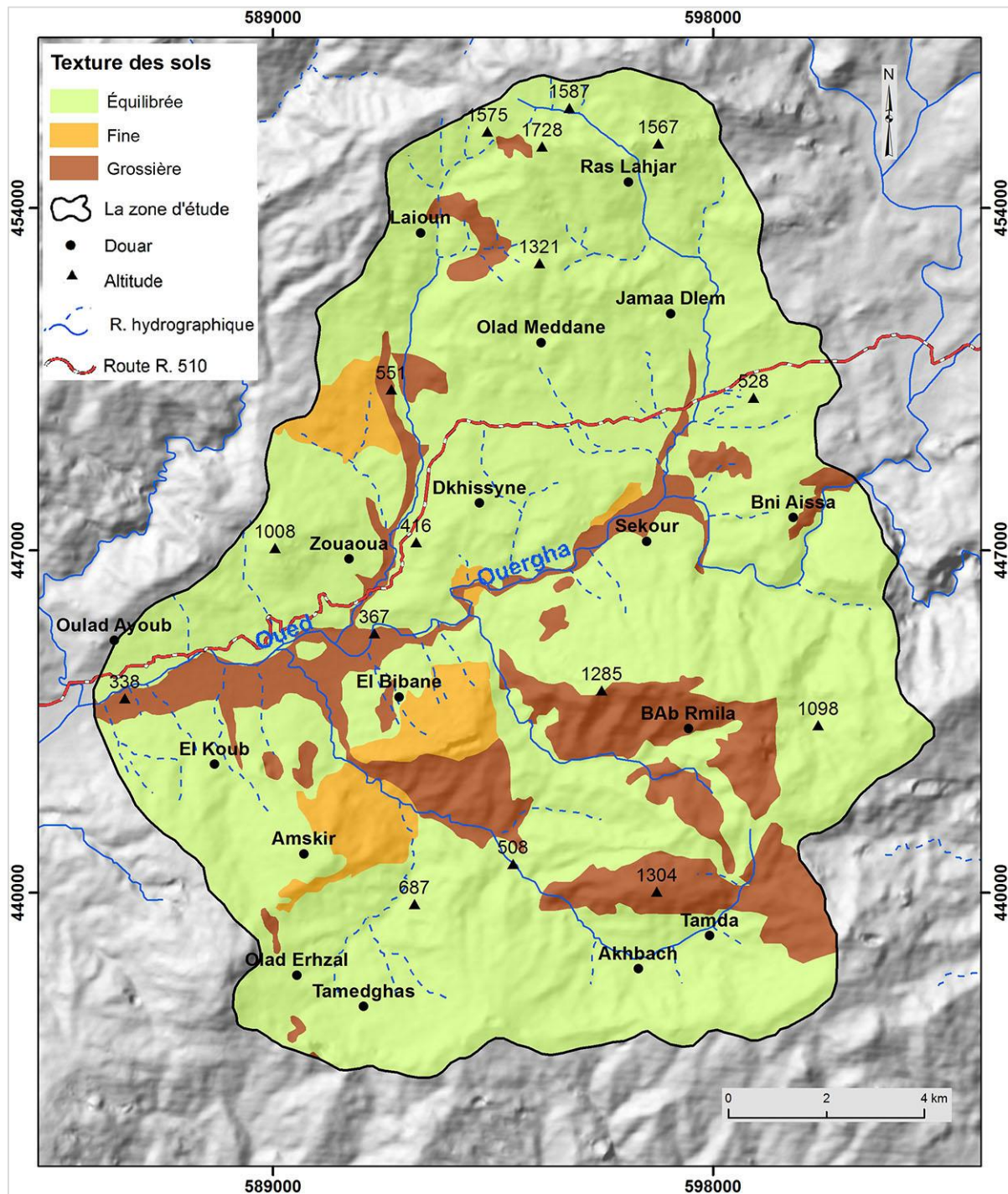


Figure 98. Texture des sols (carte pédologique de Taounate 1/50000)

Les classes	Profondeur des sols en cm	Description	Indice
1	> 75	Profond	1
2	30-75	Moyennement profond	1,33
3	15-30	Peu profond	1,66
4	< 15	Très peu profond (Squelettique)	2

Tableau 44. Normes de classification de la profondeur du sol selon l'approche MEDALUS

Profondeur des sols	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Profonds	1	58.46	25.19
Moyennement profonds	1.33	24.01	10.34
Peu profonds	1.66	22.23	9.58
Très peu profonds (Squelettique)	2	127.40	54.89

Tableau 45. Profondeur des sols dans le Haut Ouergha

Le Haut Ouergha est caractérisé par la dominance des sols peu et très peu profonds (squelettiques), qui représentent environ 64.47 % de la zone d'étude (tableau 45 et figure 99). Ce type de sols se développe sur les substrats cohérents et moyennement cohérents, et sur des terrains très pentus exposés à l'érosion hydrique. Tandis que les sols profonds recouvrent la partie médiane de la zone d'étude, qui constitue les zones d'accumulations et de sédimentations. Ce type de sol fertile est occupé par les cultures sèches et l'arboriculture (oliviers) et il couvre 25.19 % de la superficie totale. Les sols moyennement profonds représentent 10.34 % de superficie totale, et couvrent la partie sud-ouest et quelques zones dans la partie médiane de l'aire d'étude.

2.2.4. Le facteur pente

Ce paramètre joue un rôle très important dans la dégradation des milieux. « Il agit directement sur le ruissellement et la concentration des eaux qui déterminent selon leur importance la gravité de l'érosion hydrique » (Slimani et al., 2012).

La carte des pentes a été réalisée à partir d'un MNT Aster GDM à résolution spatiale de 30 m. Suivant la classification menée par Kosmas et al., (1999) présentée dans le tableau 46, quatre classes des pentes sont distinguées.

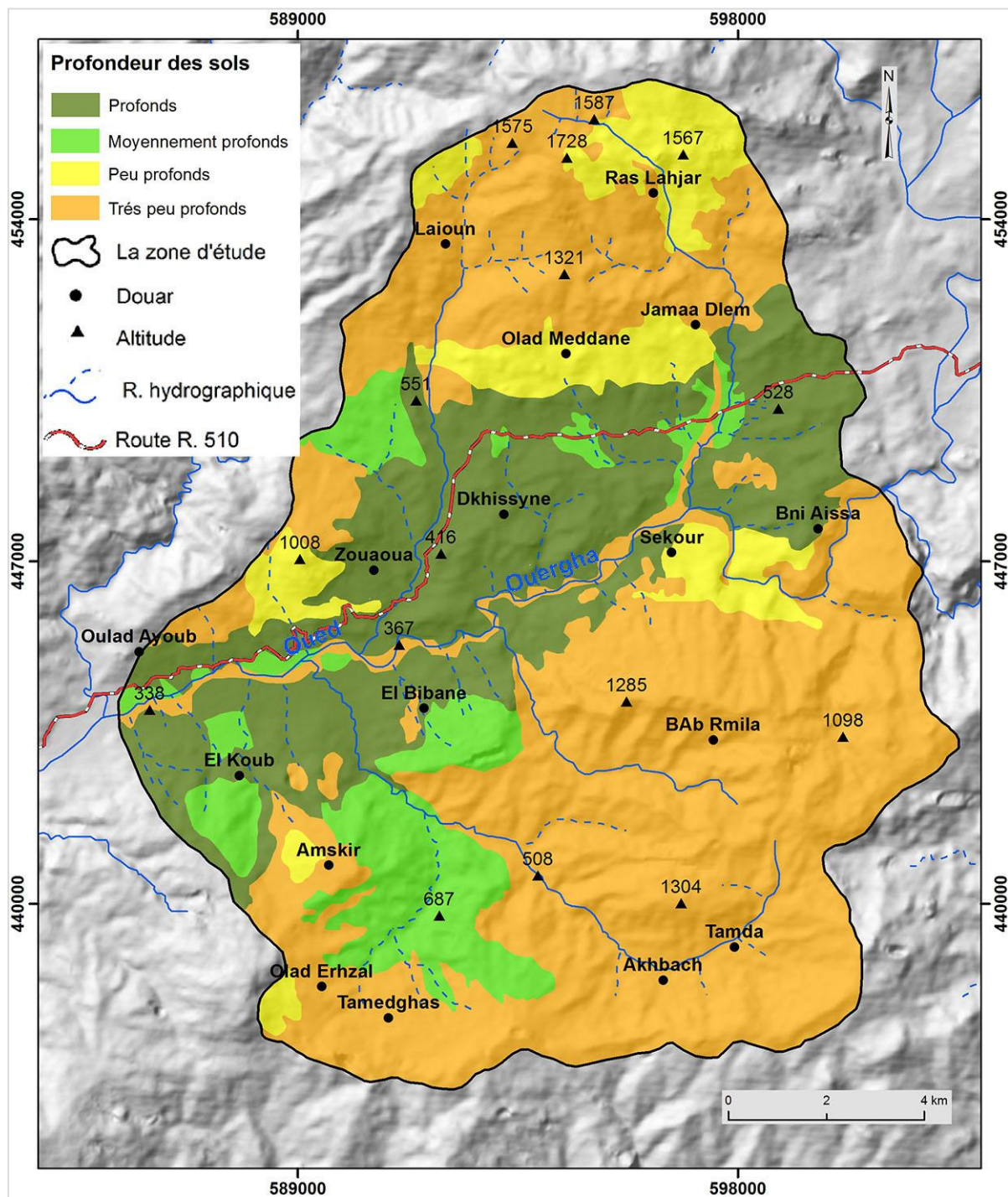


Figure 99. Profondeur des sols dans le de Haut Ouergha (carte pédologique de Taounate 1/50000)

Les classes	Description	Pente (%)	Indice
1	Très doux à plat	< 6	1
2	Doux	6 - 18	1.2
3	Ride	18 - 35	1.5
4	Très ride	> 35	2

Tableau 46. Classes et la description de pente selon L'approche MEDALUS (Kosmas et al., 1999)

La zone d'étude est marquée par la dominance des pentes fortes et très fortes qui occupent environ 49% de superficie (figure 100 et tableau 47), cela favorise une dynamique érosive très importante sur des versants dénudés. Les pentes moyennes couvrent une superficie importante d'environ 40.62%. En revanche, les pentes faibles représentent 10.35 %, elles occupent la partie médiane de l'aire d'étude (la plaine alluviale d'Ouergha et ses affluents).

Les classes de pente	Qualité de pente	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
< 6	Faible	1	24.03	10.35
6 à 18	Moyenne	1.33	94.27	40.62
18 à 35	Forte	1.66	99.75	42.98
> 35	Très forte	2	14.05	6.05

Tableau 47. Répartition des classes de pente dans la zone d'étude

2.2.5. Carte de l'indice de la qualité des sols (IQS)

L'indice de qualité des sols se base sur la combinaison de quatre paramètres : la texture, le matériau parental, la profondeur et la pente. La superposition de ces paramètres dans un SIG permet la réalisation de la carte de qualité des sols (figure 101). Les résultats obtenus sont ensuite regroupés selon la classification mentionnée par l'approche MEDALUS.

Les résultats acquis par le calcul de l'indice de qualité du sol (figures 101 et 102) ont permis de mettre en évidence la dominance des sols de qualité moyenne (41.8%) et faible (33.6%). Elles correspondent à des zones pentues, dénudées et caractérisées par des formations lithologiques tendres (flyschs, marnes...). Les sols de bonne qualité couvrent une superficie limitée (8.2%), ils se localisent dans la partie médiane du secteur d'étude sur des pentes faibles et des sols profonds. Généralement, ce sont des zones d'accumulation des sédiments arrachés par l'érosion hydrique.

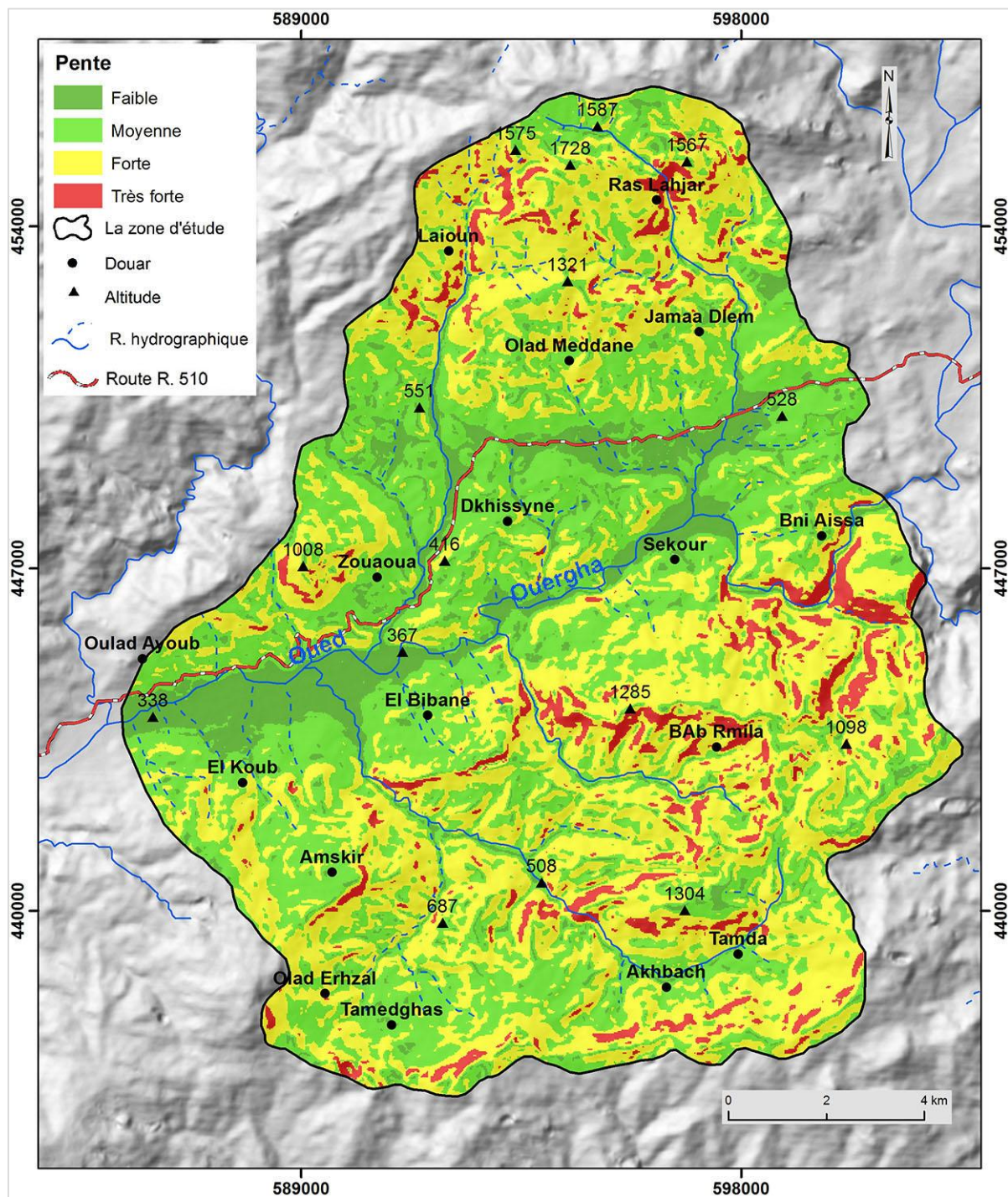


Figure 100. Répartition des pentes dans l'aire d'étude

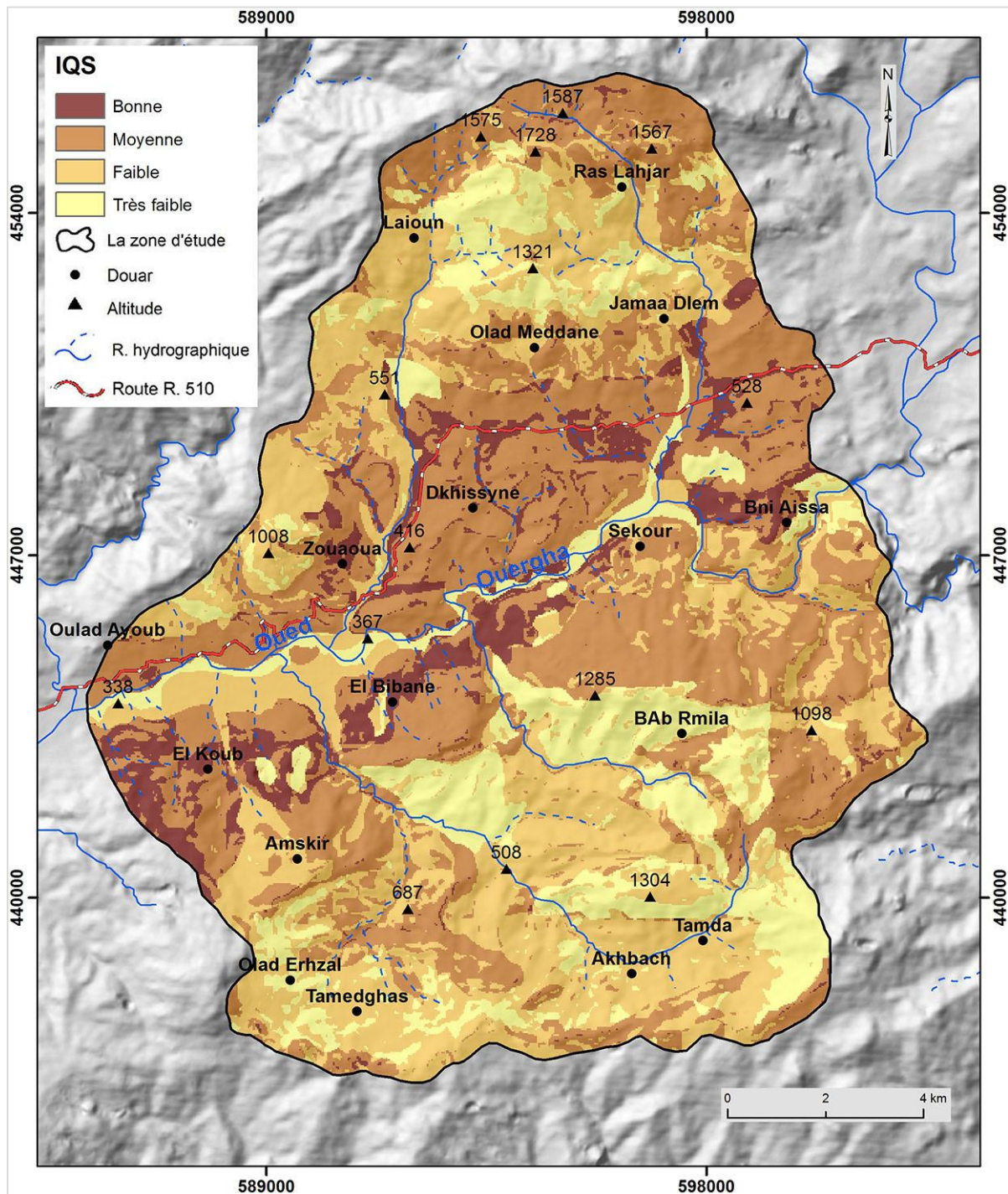


Figure 101. Indice de qualité des sols (IQS) selon l'approche MEDALUS

Classes	Valeur	Qualité des sols
1	$\text{IQS} < 1.2$	Bonne
2	$1.2 < \text{IQS} < 1.4$	Moyenne
3	$1.4 < \text{IQS} < 1.6$	Faible
4	$\text{IQS} > 1.6$	Très faible

Tableau 48. Classification de l'indice de la qualité des sols (IQS) selon l'approche MEDALUS

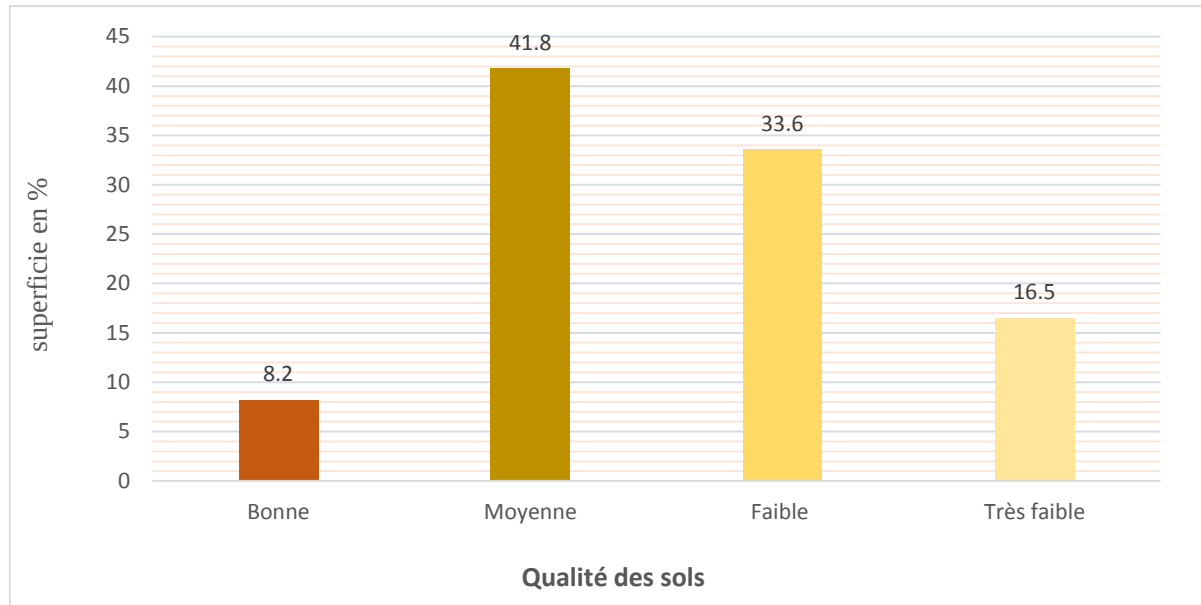


Figure 102. Indice de qualité des sols (IQS)

2.3. Elaboration de la carte d'indice de qualité de climat

L'intégration du facteur climatique dans l'approche MEDALUS est essentielle pour calculer l'indice de sensibilité à la désertification. Il permet d'évaluer la disponibilité de l'eau nécessaire pour la végétation (Plaiklang et al., 2020 ; Uzuner et Dengiz, 2020). Pour cela les trois paramètres ; aridité, pluviométrie annuelle et l'exposition des versants sont utilisés pour déterminer la qualité du climat (Giordano et al., 2003). Cet indice est obtenu par l'application de l'équation (4) :

$$\text{IQC} = (\text{indice d'aridité} * \text{précipitation} * \text{exposition des versants})^{1/3} \quad (4)$$

2.3.1. Exposition des versants

L'exposition des versants est un paramètre important dans l'explication de la répartition des précipitations, la densité du couvert végétal et l'épaisseur des sols. Les observations montrent que les versants exposés vers le nord et le nord-ouest et l'ouest sont des versants humides, ce qui

favorise l'évolution d'un couvert végétal dense et des sols plus épais. Par contre, les versants exposés vers le sud, le sud-est et le sud-ouest sont des versants ensoleillés, moins arrosés, les sols et parfois dépourvus de toute végétation, ce qui permet l'installation de toutes formes d'érosion (Sabir, 1986).

La carte d'exposition des versants a été faite à partir d'un MNT Aster GDM d'une résolution spatiale de 30 m. Le tableau ci-après (tableau 49), montre que les versants d'exposition nord-est et nord-ouest présentent environ 52.06% de la superficie. Les versants d'exposition sud-est et sud-ouest occupent 47.93% de la superficie totale, ce qui provoque une dynamique érosive importante sur les versants, notamment dans le cas d'absence du couvert végétal et l'existence des pentes fortes.

Exposition des versants	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
NE et NW	1	120.85	52.06
SE et SW	2	111.25	47.93

Tableau 49. Exposition des versants dans la zone d'étude selon l'approche MEDALUS

2.3.2. Les précipitations

Le de Haut Ouergha est caractérisé par l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations ce qui influence directement le couvert végétal et les ressources en eau. L'analyse des séries des données pluviométriques dans les stations qui se trouvent à proximité de l'aire d'étude, met en évidence la tendance du climat vers la sécheresse et la diminution des précipitations durant ces dernières années. Les données issues des stations climatiques sont utilisées pour la spatialisation et la classification des précipitations dans la zone d'étude en trois classes selon l'approche MEDALUS.

La répartition spatiale des précipitations dans le secteur d'étude (figure 104) montre une variété très nette entre ses différentes parties. En effet, la partie médiane reçoit moins de 660 mm, cela est lié aux faibles altitudes. Tandis que les parties élevées sont les plus arrosées (> 720 mm).

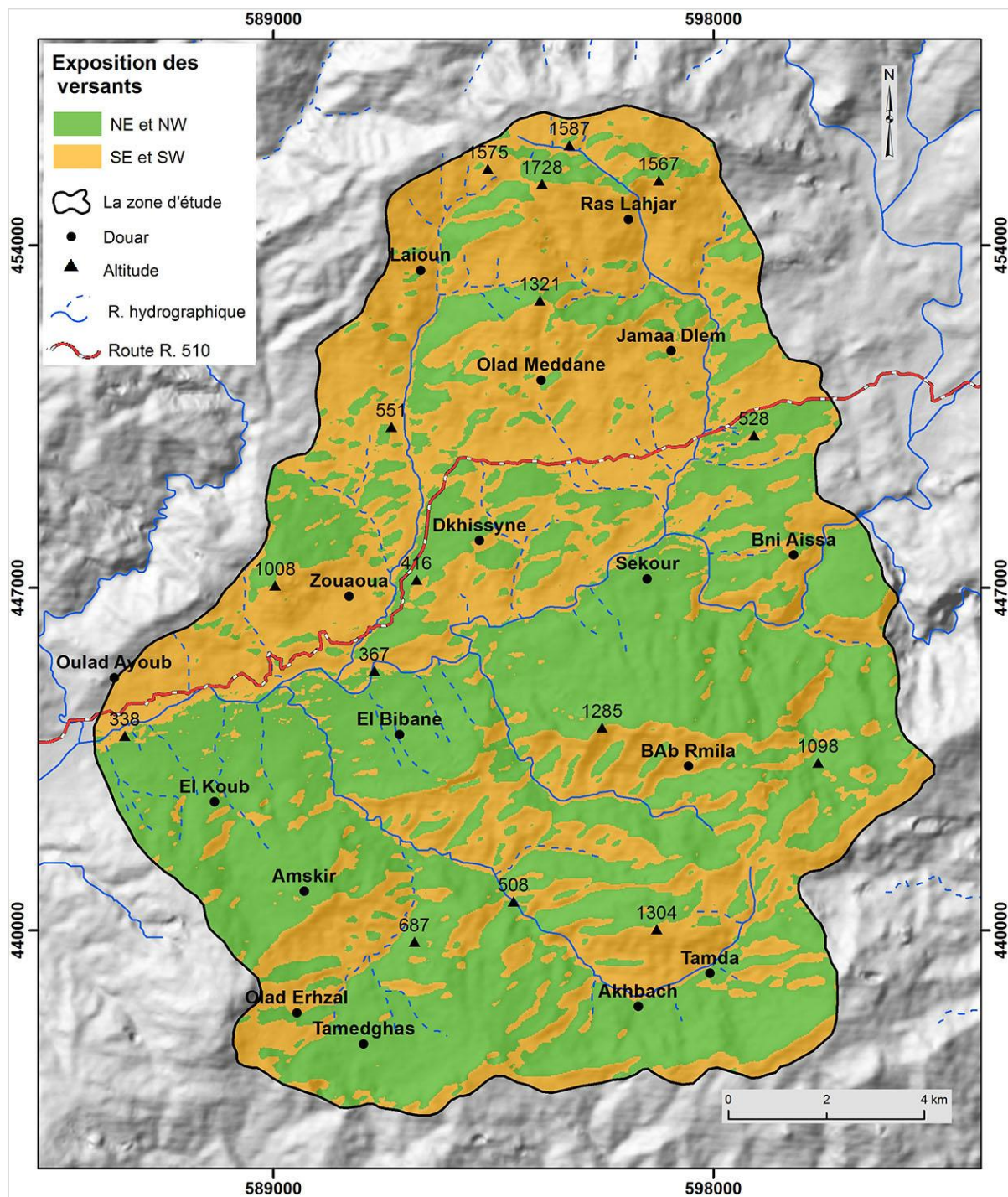


Figure 103. Exposition des versants dans la zone d'étude

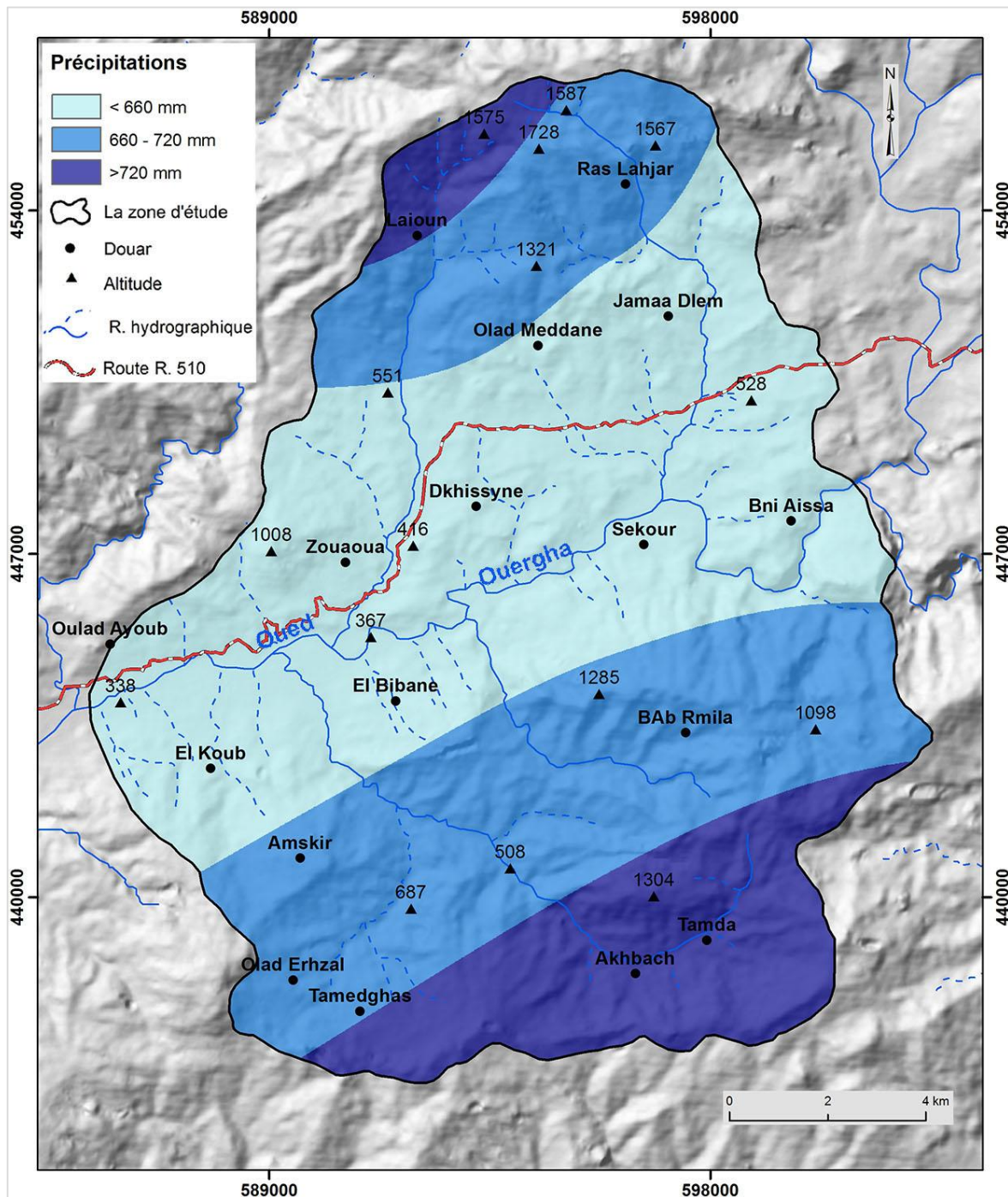


Figure 104. Répartition des précipitations moyennes annuelles dans le Haut Ouergha

Précipitations	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
> 720 mm	1	39.05	16.83
660 - 720mm	1.50	83.72	36.07
< 660 mm	2	109.32	47.10

Tableau 50. Classes des précipitations moyennes annuelles dans le Haut Ouergha

2.3.3. Indice de l'aridité

L'indice d'aridité a été élaboré sur la base de l'application de l'indice d'Emberger, qui est le plus utilisé dans les zones méditerranéennes. Cet indice prend en compte les précipitations annuelles en mm, la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud (M en °C) et la moyenne des minima de température du mois le plus froid (m en °C) (Mokhtari et al., 2013). Cet indice est exprimé par la formule suivante :

$$Q2 = \frac{2000 * P}{(M + m + 546.4) * (M - m)}$$

Où :

P : la pluviométrie annuelle en mm

M : la température maximale du mois le plus chaud en °C (Juillet)

m : la température minimale du mois le plus froid en °C (Janvier)

Le calcul de l'indice bioclimatique d'Emberger pour les stations proches de la zone d'étude, indique que l'aire d'étude appartient aux étages bioclimatiques humide et subhumide (tableau 52 et la figure 105). On note la dominance de l'étage subhumide qui occupe une superficie très importante, environ 77.93 %. Le reste de l'aire d'étude est dominé par l'étage humide, qui occupe la partie sud-est la plus arrosée et la plus élevée.

2.3.4. Carte de l'indice de qualité du climat (IQC)

Selon Kosmas et al., (1999), l'indice de qualité du climat est calculé à l'aide des paramètres qui influencent la quantité d'eau nécessaire pour les plantes, qui sont la pluviométrie, la température et l'aridité. La superposition de ces trois paramètres permet la réalisation de la carte de qualité du climat (figure 107), suivant la classification mentionnée dans le tableau 53.

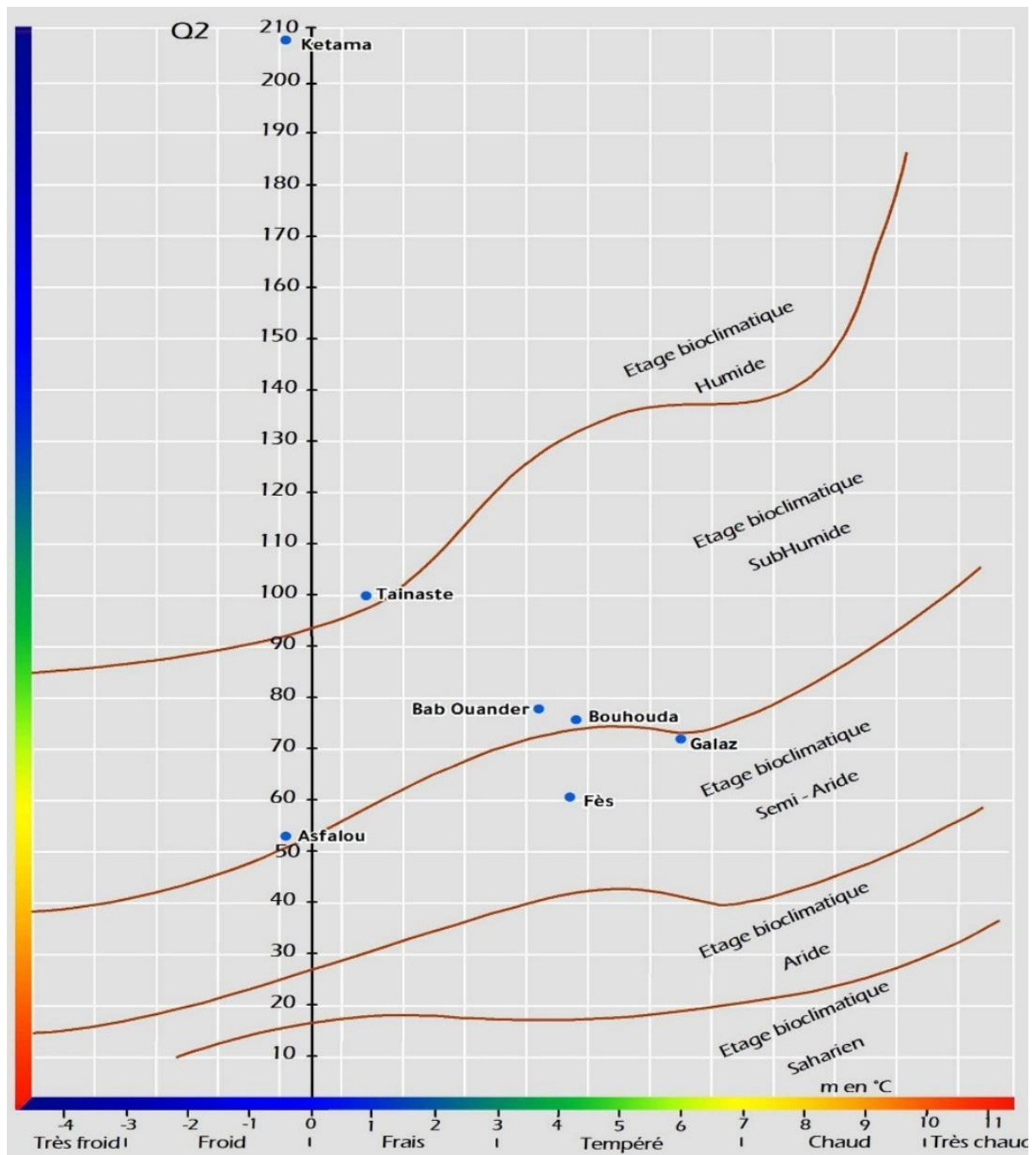


Figure 105. Climagramme pluviothermique d'Emberger pour le Haut Ouergha

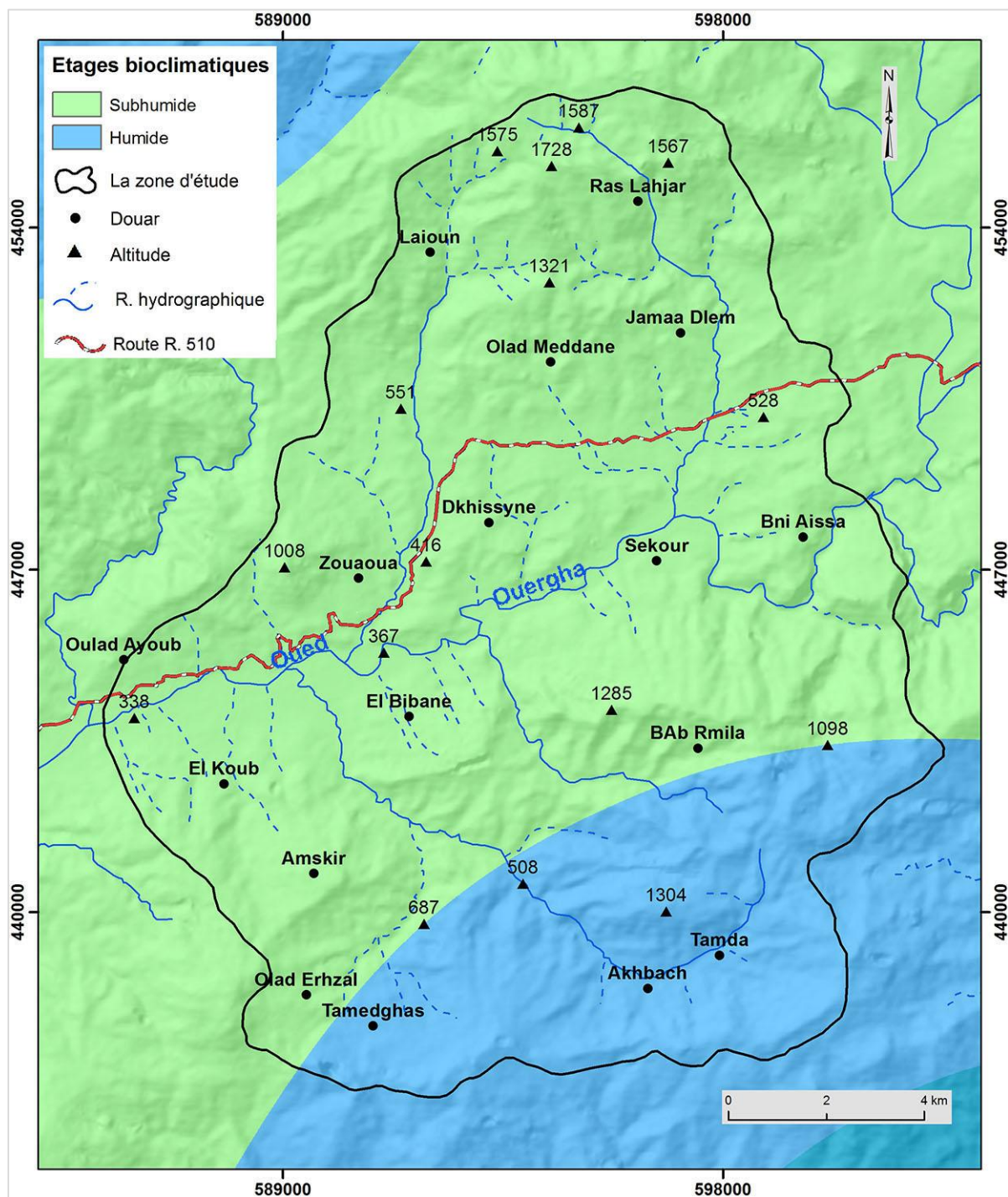


Figure 106. Étage bioclimatique selon l'indice d'Emberger

Station	M (c°)	m (c°)	P (mm)	Q
Galaz	35.7	6	629.0	72
Tainaste	31.3	0.9	879.0	99.9
Bouhouda	34.4	4.3	667.0	75.7
Asfalou	37.3	-0.4	584.0	53.1
Bab Ouander	34.6	3.7	702.5	77.8
Fès	36.2	4.2	570.0	60.7
Ketama	29.7	-0.4	1802.0	208

Tableau 51. Indice bioclimatique d'Emberger selon les stations (source : climate-data.org)

Étage bioclimatique	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Humide	1	51.23	22.07
Subhumide	1.25	180.87	77.93

Tableau 52. Étages bioclimatiques dans la zone d'étude selon l'indice d'Emberger

Classes	Valeur	Qualité du climat
1	IQC < 1	Bonne
2	1 < IQC < 1.2	Moyenne
3	1.2 < IQC < 1.5	Faible
4	IQC > 1.5	Très faible

Tableau 53. Classification de l'indice de qualité du climat (IQC) selon l'approche MEDALUS

La zone d'étude est dominée par une faible qualité du climat (47.19 %) et très faible (38.06%). Tandis que le climat de bonne et moyenne qualité ne représente qu'une superficie limitée (14.75%) (figure 108).

Le climat de bonne à moyenne qualité occupe les zones les plus élevées de l'aire d'étude qui reçoivent des quantités importantes des précipitations (> 720 mm), alors que les zones dominées par un climat de faible qualité correspondent à des versants exposés vers le sud et le sud-ouest, les moins arrosés et les plus ensoleillés.

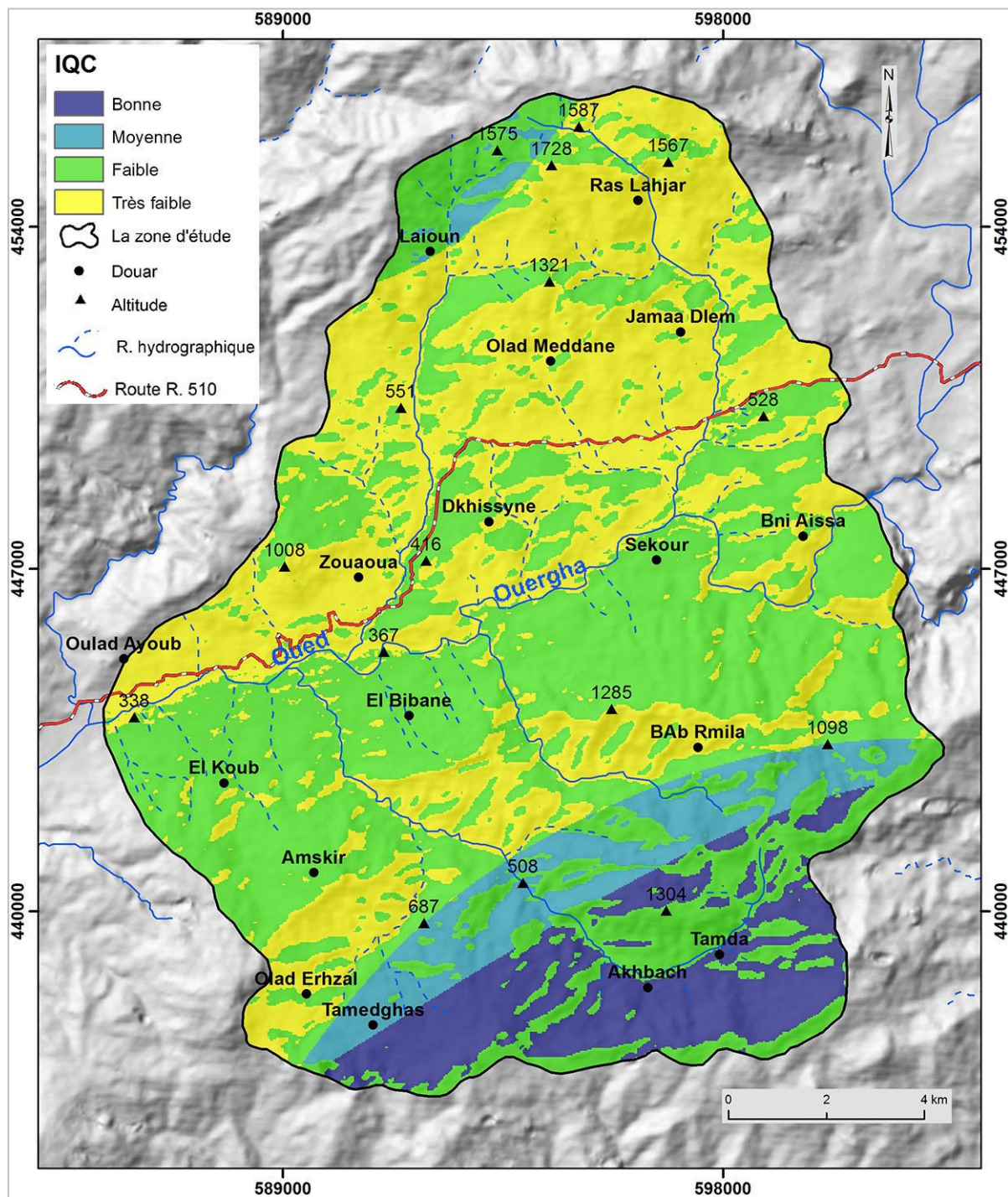


Figure 107. Indice de qualité du climat selon l'approche MEDALUS

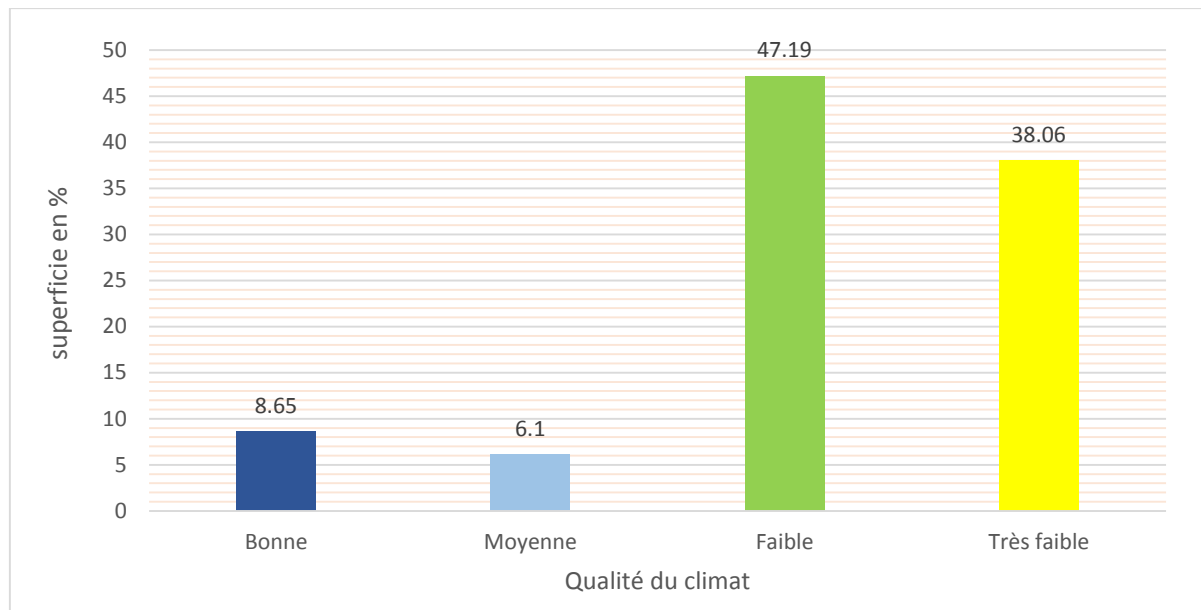


Figure 108. Indice de qualité du climat (IQC) selon l'approche MEDALUS

2.4. Elaboration de la carte d'indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA)

Cet indice prend en considération le stress produit par le facteur anthropique (Giordano et al., 2003). En effet, ce facteur influence fortement le processus de désertification, par les activités de déforestation, le surpâturage et les pratiques agricoles inadéquates (Lahloui et al., 2017). Les paramètres utilisés pour définir cet indice (formule 5) sont l'intensité d'utilisation des terres (IU) et la qualité de politique d'aménagement (PA). Les paramètres liés à cet indice sont basés sur l'exploitation de la carte d'occupation des sols et le travail de terrain.

$$\text{IQSA} = (\text{Intensité d'utilisation des terres} * \text{la qualité de politique d'aménagement})^{1/2} \quad (5)$$

2.4.1. Intensité d'utilisation des terres

L'intensité d'utilisation des terres reflète la pression anthropique sur les terres et les types d'occupation des sols existant. Borrelli et al., (2017) indiquent que les activités humaines et les types d'occupation du sol sont les principaux facteurs de la dégradation des terres. Ce paramètre est élaboré à partir de la carte d'occupation des sols et les observations sur le terrain. Nous avons classé les types d'utilisation des terres en quatre classes selon l'approche MEDALUS (tableau 54).

Les classes	Intensité d'utilisation des terres	Description	Indice
1	Très faible	Les forêts, les terrains nus et les lits des oueds	1
2	Faible	Matorral	1.33
3	Moyenne	Arboriculture, les terrains de culture sèche associés par l'arboriculture	1.66
4	Forte	Les zones irriguées, les terrains de cultures sèches, l'arboriculture dense	2

Tableau 54. Classes et description de l'intensité d'utilisation des terres selon l'approche MEDALUS

Le Haut Ouergha est dominé par une intensité d'utilisation des terres moyenne, qui représente 45.79% de la superficie (figure 109 et tableau 55), et correspond aux terres de cultures sèches associées par l'arboriculture et les terrains reboisés (oliviers, amandiers et Figuiers). La classe d'intensité forte d'utilisation des terres occupe environ 31% de la superficie totale de la zone d'étude, elle englobe les zones irriguées, les terrains de cultures sèches et l'arboriculture dense. Les terres de faible intensité d'utilisation, représentent une superficie limitée (9.30 %), ce sont les zones occupées par le matorral et les forêts clairsemées. Tandis que les terres faiblement exploitées par la population sont les forêts denses, les terrains nus et les lits des oueds, ils couvrent environ 13.71% de l'aire d'étude.

2.4.2. Qualité de politique d'aménagement

Cet indice représente l'intervention anthropique dans la zone d'étude par les programmes d'aménagement menés par l'État, et les techniques traditionnelles de gestion conservatoire des eaux et des sols réalisées par la population locale. La carte de politique d'aménagement a été réalisée sur la base de la carte d'occupation des sols et suivant la classification indiquée dans le tableau 56.

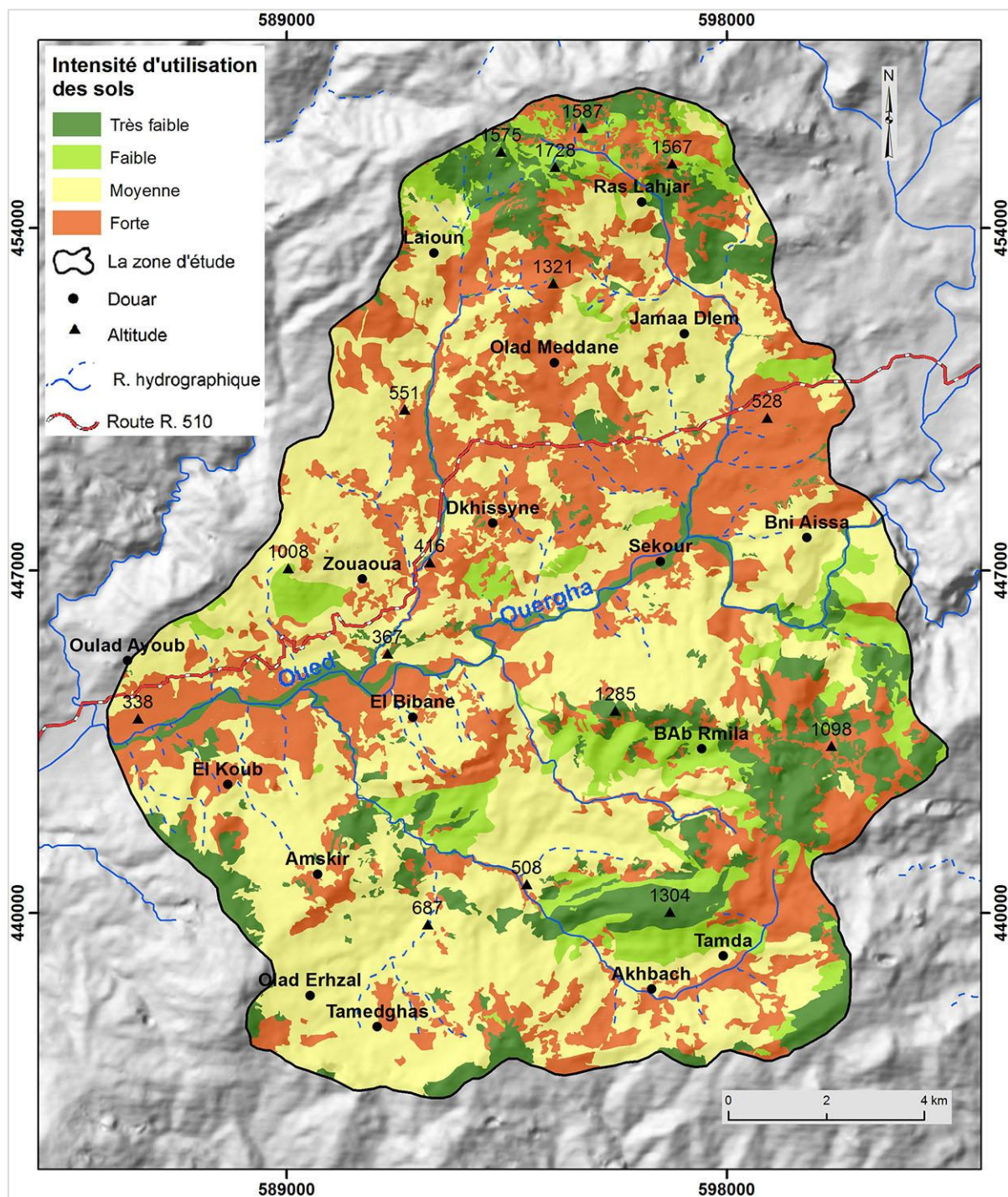


Figure 109. Intensité d'utilisation des sols dans le Haut Ouergha

Intensité d'utilisation des terres	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Très faible	1	31.84	13.71
Faible	1.33	21.60	9.30
Moyenne	1.66	106.32	45.79
Forte	2	72.43	31.19

Tableau 55. Les classes de l'intensité d'utilisation des terres

Les classes	Qualité de politique d'aménagement	Description	Indice
1	Bonne	Culture et arboriculture, arboriculture dense, les zones irriguées	1
2	Moyenne	Culture sèche, les forêts aménagées, arboriculture moyennement dense	1.5
3	Faible	Terrains nus, forêt naturelle, matorral, les lits des oueds	2

Tableau 56. Classes et description de la qualité de politique d'aménagement selon l'approche MEDALUS

Qualité de politique d'aménagement	Indice	Superficie en km ²	Superficie (%)
Bonne	1	123.02	52.98
Moyenne	1.5	56.44	24.31
Faible	2	52.73	22.71

Tableau 57. Classes de la qualité de politique d'aménagement

Les résultats obtenues (figure 110 et tableau 57) montrent que la zone d'étude est caractérisée par la dominance de bonne qualité de politique d'aménagement des terres (52.98%), ce sont notamment les terrains occupés par l'arboriculture dense (oliviers, amandiers, figuiers), les zones irriguées et les zones aménagées par des techniques traditionnelles (terrasses, cordons en pierres sèches, banquette ...). La classe de qualité moyenne présente 24.31 % de l'aire d'étude, elle correspond aux zones de cultures sèches, les forêts aménagées dans le cadre d'intervention de haut-commissariat des eaux et forêts, et les terrains d'arboriculture moyennement dense. La faible qualité de politique d'aménagement occupe environ 22.71 % de la superficie totale de la zone

d'étude, ce sont des terrains non aménagés où l'intervention humaine est faible, telles ; les terrains nus, forêt naturelle, matorral et les lits des oueds.

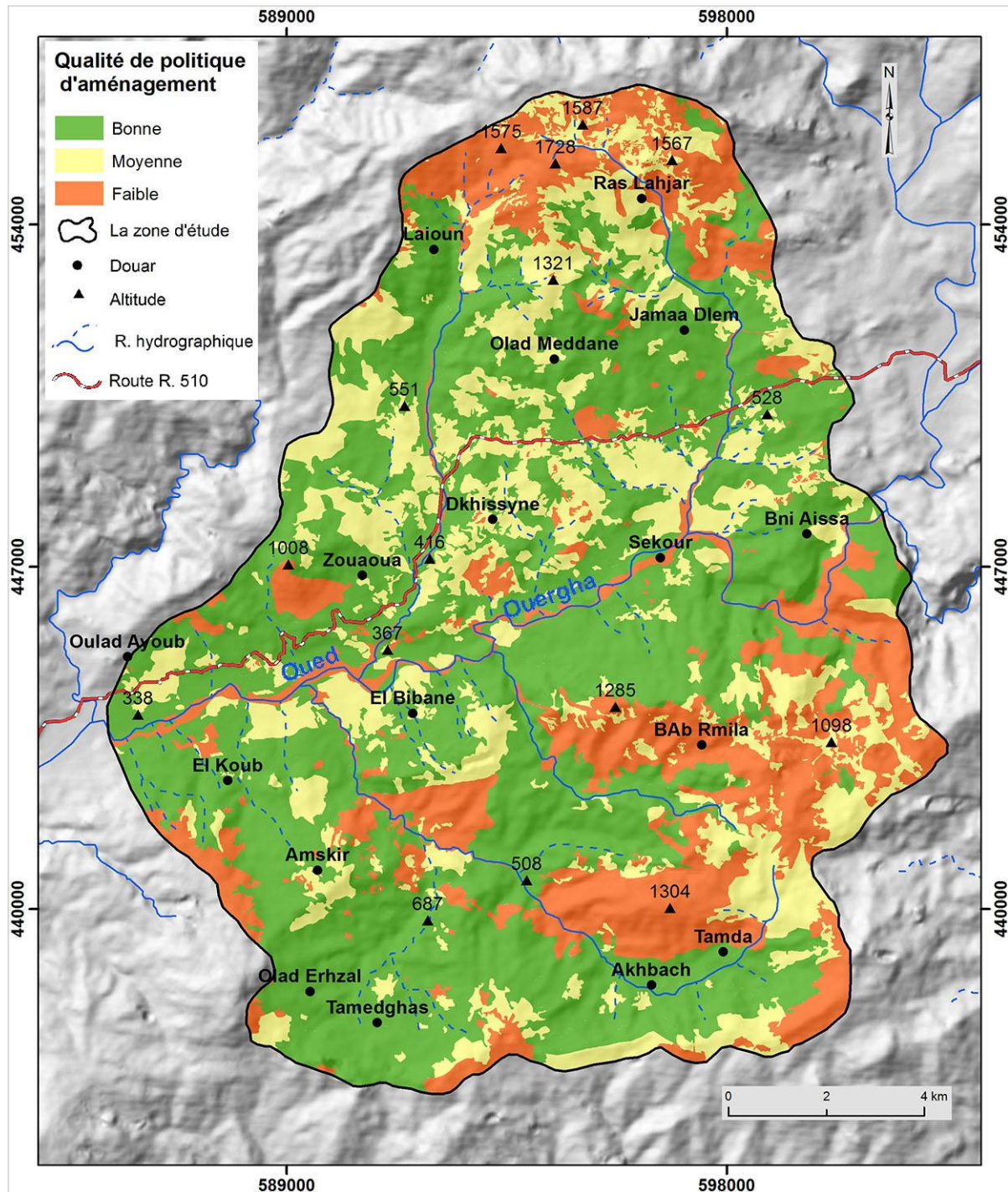


Figure 110. Qualité de politique d'aménagement

2.4.3. Carte de l'indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA)

Cet indice est le résultat du croisement de la carte d'intensité d'utilisation des terres et la carte de la qualité de politique d'aménagement. Il présente les types d'occupation des sols et l'intervention anthropique dans la zone d'étude. L'intégration de cet indice dans l'approche MEDALUS est très importante, il permet de mettre en évidence les interventions anthropiques agissent directement sur les processus de dégradation des terres par des pratiques inadéquates (défrichement, surpâturage, mise en culture des terrains pentus...), ou des pratiques de gestion et de conservation des sols (reboisement, terrasses...).

Classes	Valeur	Qualité des systèmes d'aménagement des terres
1	$\text{IQSA} < 1.3$	Bonne
2	$1.3 < \text{IQSA} < 1.6$	Moyenne
3	$\text{IQSA} > 1.6$	Faible

Tableau 58. Classes de l'indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA) selon l'approche MEDALUS

L'indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (figures 111 et 112), indique que les zones caractérisées par une bonne qualité d'aménagement sont les plus dominantes (41.95 %). Il s'agit des terrains bien protégés par le couvert végétal (les massifs forestiers, terrain d'arboriculture dense), ou des terrains aménagés et entretenus par les techniques de lutte contre l'érosion (les terrasses, les cordons en pierres sèches, le reboisement...). Les zones de faible qualité de système d'aménagement correspondent aux terrains de cultures sèches, les zones irriguées et les terrains de matorral, cette classe couvre environ 29 % de la superficie totale de l'aire d'étude.

2.5. L'indice de sensibilité à la désertification (ISD)

La carte de sensibilité à la désertification (figure 114) est dérivée par le croisement de quatre indices de qualité issus du milieu et de l'action de l'homme. L'indice de sensibilité à la désertification est exprimé par la formule (6) :

$$\text{ISD} = (\text{IQS} * \text{IQV} * \text{IQC} * \text{IQSA})^{1/4} \quad (6)$$

Où, **ISD** : indice de sensibilité à la désertification ; **IQS** : indice de qualité des sols ; **IQV** : indice de qualité de végétation ; **IQC** : indice de qualité de climat ; **IQSA** : indice de qualité de système d'aménagement des terres.

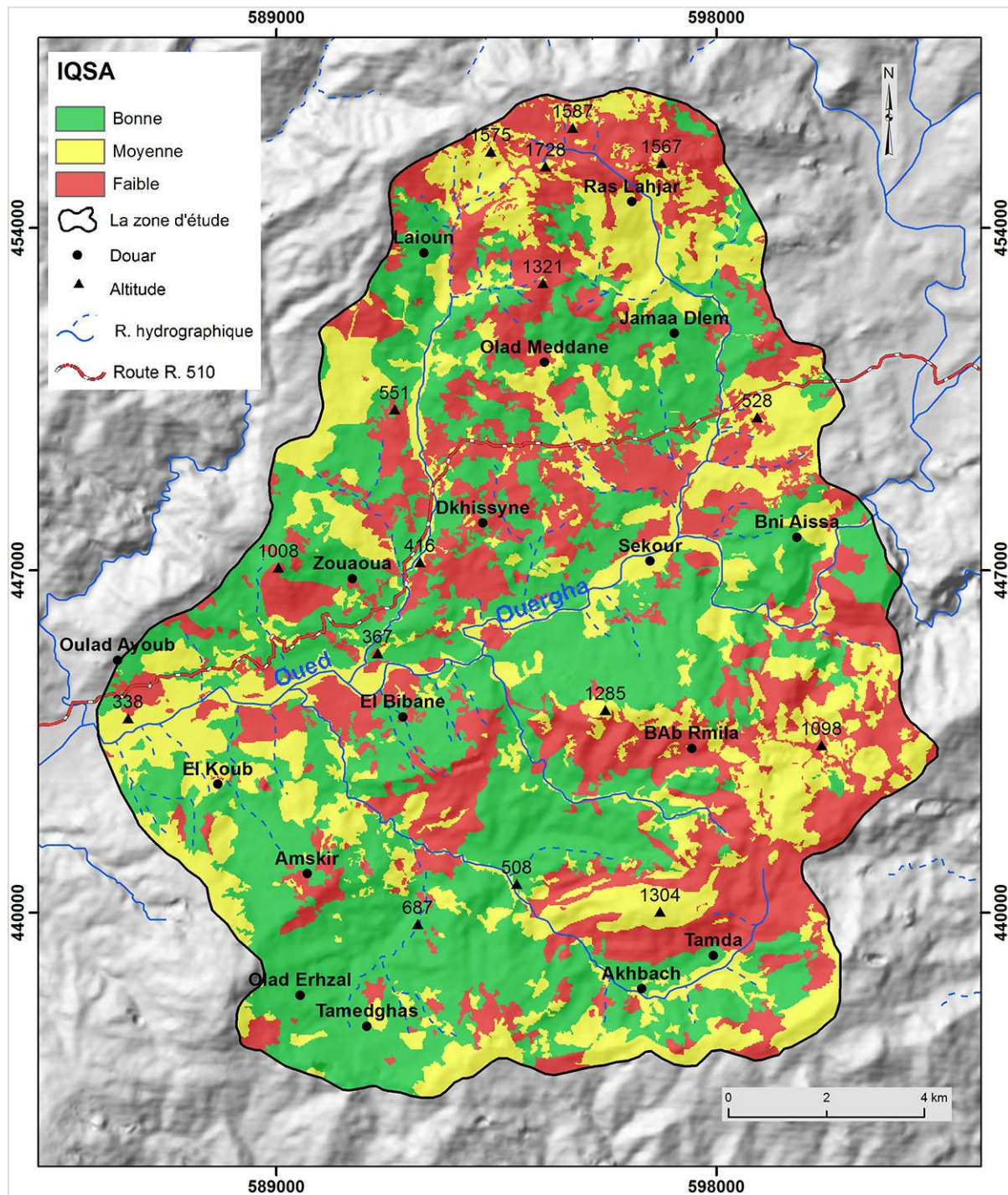


Figure 111. Indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA)

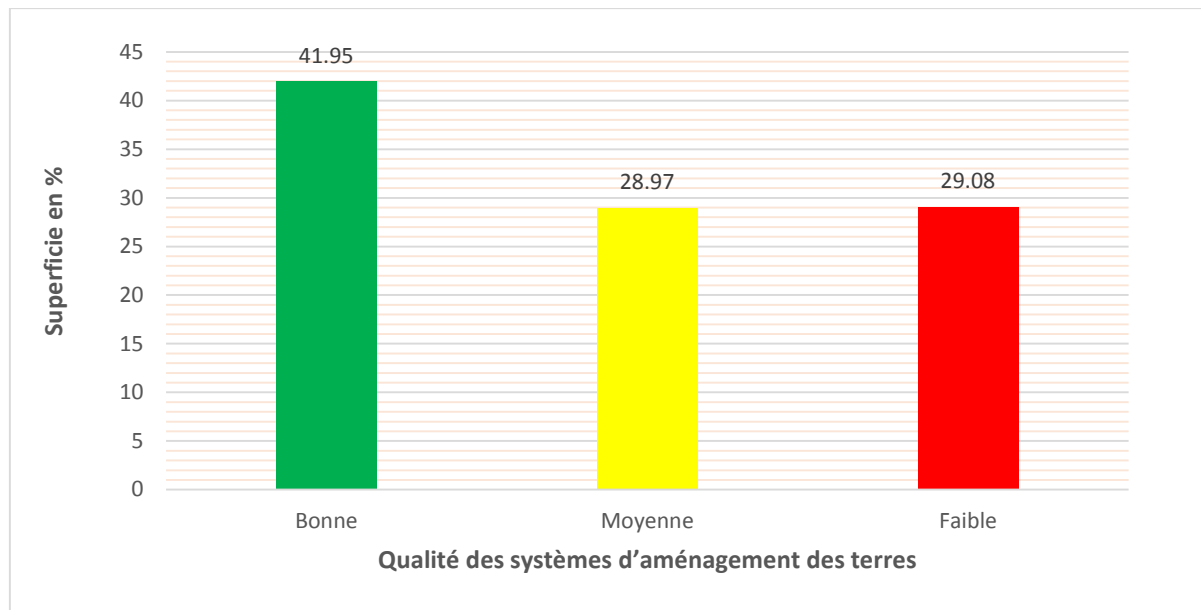


Figure 112. Indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres

La superposition des quatre couches d'information permet l'élaboration de la carte de l'indice de sensibilité à la désertification. Ensuite, nous avons classé les résultats obtenus en quatre classes (tableau 59), afin d'identifier les zones sensibles ou peu sensibles à la désertification.

L'application de l'approche MEDALUS dans le Haut Ouergha, nous a permis de spatialiser le degré de sensibilité à la désertification et d'identifier les zones les plus menacées. Les résultats obtenus (figures 113 et 114) permettent de subdiviser l'aire d'étude en quatre zones différentes au niveau de leurs degrés de sensibilité à la désertification :

Classes	Valeur	Sensibilité à la désertification
1	ISD < 1.3	Zones peu sensibles
2	1.3 < ISD < 1.4	Zones potentiellement sensibles
3	1.4 < ISD < 1.5	Zones fragiles
4	ISD > 1.5	Zones critiques

Tableau 59. Classification de l'indice de sensibilité à la désertification (ISD)

Les zones peu sensibles : ces zones occupent 6.82 % de la superficie totale, elles correspondent à des milieux caractérisés par un couvert végétal très dense (la forêt Jbel Rzinyia, forêt Tamda), et les zones marquées par un bon indice de qualité des sols et du climat (douars El Koub, Tamedghas, Akhbach).

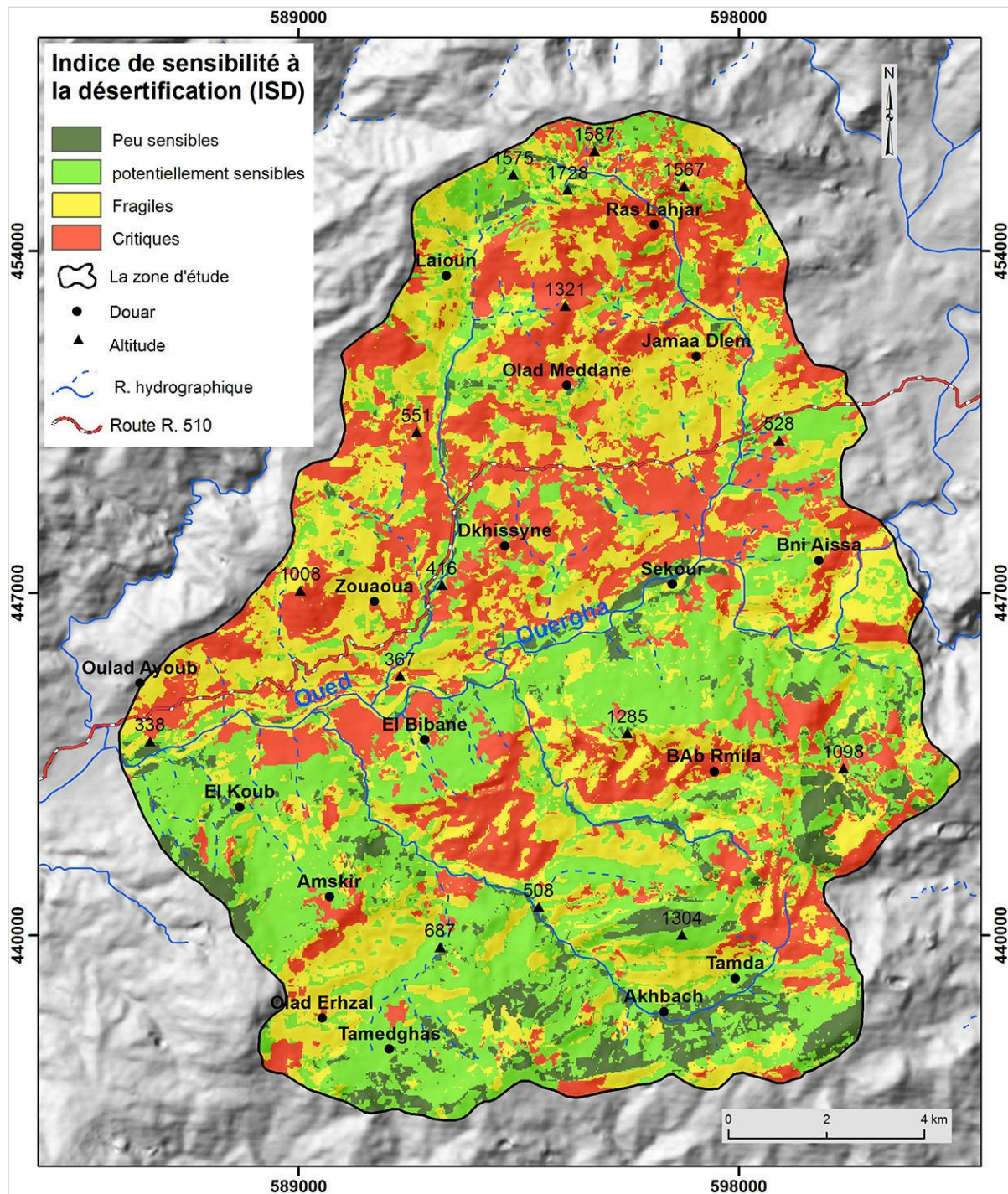


Figure 113. Indice de sensibilité à la désertification selon l'approche MEDALUS

Les zones potentiellement sensibles : représentent une sensibilité faible à la désertification, et elles occupent 34.38 % de la surface totale. Généralement, elles correspondent aux versants exposés vers le nord qui se caractérisent par un bon recouvrement des sols et un bon indice de système d'aménagement des terres.

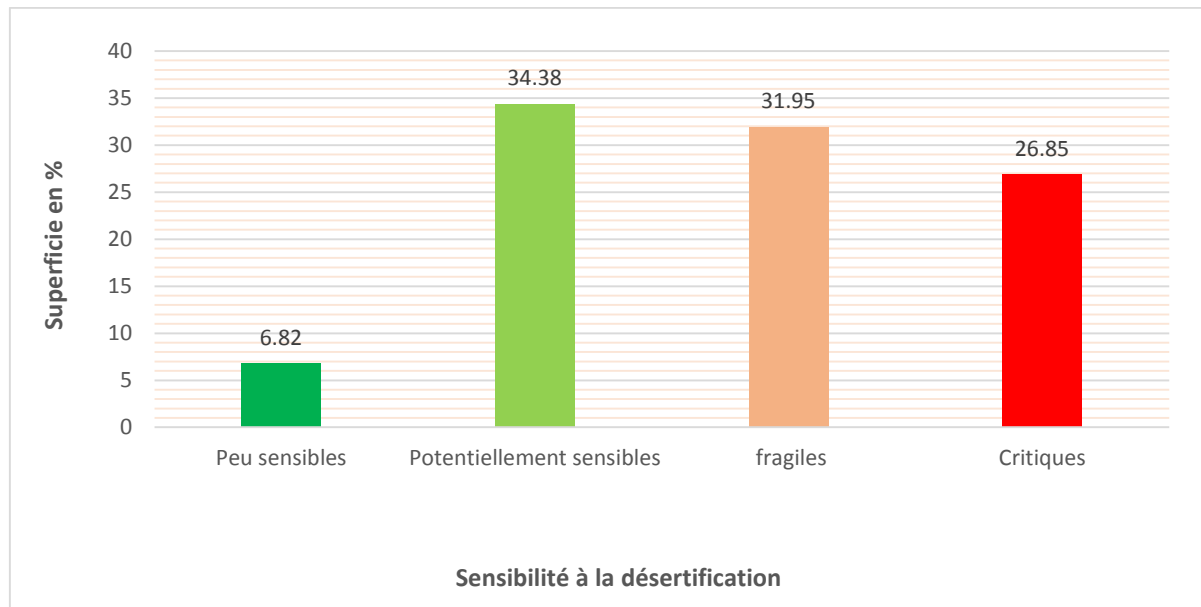


Figure 114. Classes de l'indice de sensibilité à la désertification

Les zones fragiles présentent une sensibilité forte à la désertification, en effet elles occupent 31.95 % de la zone d'étude. L'utilisation intense des terrains, la faible qualité des sols, et le faible recouvrement augmentent le risque de désertification et de dégradation de ces milieux (Zouaoua, Laïoun, Bab Rmila, Jamaa Dlem).

Les zones critiques occupent environ 26.58 % de la superficie totale et se situent particulièrement dans la partie nord de secteur d'étude (Douars Ras Lhjar, Oulad Meddane, Dkhissyne, Oued El Kasba). Ces zones correspondent à des milieux de faible qualité des sols et du climat, mal protégés par le couvert végétal et fortement exploités par l'homme. Ce type de milieux nécessite une intervention rapide par des programmes de conservation et de lutte contre la désertification.

Conclusion

La désertification est un processus majeur de dégradation des terres. Ce phénomène est lié à la conjonction des facteurs naturels et anthropiques ce qui menace la durabilité des ressources

naturelles. L'application de l'approche MEDALUS dans le haut Ouergha nous a permis de calculer l'indice de sensibilité à la désertification, par l'intégration de quatre couches de qualité y compris le sol, le climat, la végétation et le système d'aménagement (Zakerinejad, 2019). Ainsi, la superposition de ces indices à l'aide du SIG, permet la spatialisation de la sensibilité à la désertification.

Les résultats obtenus d'après l'application de l'approche MEDALUS montrent que le haut Ouergha est un milieu sensible à la dégradation. En effet, 58% de la superficie totale, est classée dans les milieux critiques et très sensibles à la désertification. Cela est lié aux caractéristiques physiques de la zone d'étude (faible qualité des sols, de végétation et du climat) et aux activités anthropiques inadéquates (surexploitation des ressources naturelles). En revanche, les zones peu sensibles à la désertification occupent une surface limitée (6.82 %). Généralement, elles correspondent à des zones bien entretenues par les techniques d'aménagement et caractérisées par une bonne qualité des sols, de climat et un couvert végétal dense.

L'évaluation et la cartographie du degré de sensibilité à la désertification dans le secteur d'étude, peut-être un outil d'aide à l'intervention par des programmes de lutte contre la désertification.

CHAPITRE 5

TECHNIQUES DE LUTTE ANTIEROSIVE DANS LE HAUT OUERGHA

Introduction

Les chapitres précédents montrent que le Haut Ouergha est inscrit dans un contexte de dégradation très intense, se traduit par la diversité des formes d'érosion, qui produisent une quantité considérable des sédiments, et la forte sensibilité à la désertification qui influence largement la durabilité des ressources naturelles.

Face à ces problèmes, les paysans depuis longtemps ont adopté plusieurs techniques de lutte antiérosive comme une forme d'adaptation aux contraintes d'un milieu difficile. Ces techniques se basent sur la gestion traditionnelle des terres à travers diverses pratiques culturelles. Il s'agit de l'aménagement des versants par les terrasses et les talus, l'épierrage, la construction, des murettes et des cordons en pierres, le traitement biologique et mécanique des ravins, le reboisement, ainsi que les techniques de stockage et de gestion des eaux. La diversité de ces techniques témoigne du savoir-faire paysan et d'une grande expérience accumulée. Parallèlement, le gouvernement a entrepris plusieurs programmes de lutte antiérosifs (LAE) et de valorisation des terres. L'objectif principal est la protection des barrages et des aménagements hydrauliques contre l'envasement (Sabir et al., 1999).

Ce chapitre est réservé à la présentation de différentes techniques de lutte antiérosive existant dans la zone d'étude et de montrer leurs rôles dans la protection des versants. La mise en évidence de ces techniques est abordée à travers des exemples dans plusieurs endroits de la zone d'étude.

1- Aperçu historique sur l'évolution des stratégies antiérosives dans le monde

Les études sur les processus d'érosion et les techniques de lutte antiérosive dans le monde ont débutées vers la fin du XIXe siècle en Allemagne et vers les années 1930 aux États-Unis et vers les années 1950 en Afrique (Roose, 2010).

L'intervention étatique dans le cadre de lutte antiérosive est développée après les grandes crises sociales dues à l'érosion. Vers les années 1850, la France a connu une grave crise d'érosion suite à la dégradation du couvert végétal en montagne. Pour faire face à cette crise, l'office national des forêts a lancé un programme d'intervention nommé restauration des terrains en montagne (RTM), fondé essentiellement sur la reconstitution du couvert végétal et la correction des torrents (Roose, 1999 ; Roose et De Noni, 2004 ; Roose, 2010). Aux Etats Unis un service de conservation de l'eau

et des sols (CES) a été créé en 1930, afin de lutter contre l'érosion éolienne catastrophique, provoquée par l'extension des cultures industrielles peu couvrantes des sols (Roose et De Noni., 2004).

La crise érosive aux Etats Unis, a été le point de départ des premières recherches dans ce sujet réalisées par Hammond Bennet en 1939, où il a traité les causes et les facteurs de l'érosion ainsi que les principales méthodes de lutte antiérosive développées aux États-Unis. Par la suite, plusieurs travaux qui s'inspirent des travaux de Bennet ont été publiés dans le monde (Tondeur, 1954 ; Hudson, 1971 ; Nahal, 1975 ; Gréco, 1978 ; Hudson, 1980 ; Heusch, 1985 ; Rochette, 1989 ; Hurn, 1995).

Dans les bassins méditerranéens, les forestiers ont développé entre les années 1940- 1980 la défense et restauration des sols (DRS), pour lutter contre l'envasement des barrages, la pénurie d'eau et la dégradation des terres et des infrastructures (Roose et De Noni., 2004).

Roose (2010) indique que depuis l'atelier de Porto Rico en 1987, les spécialistes et les chercheurs sont interrogés sur les causes de l'échec des programmes de lutte antiérosive, et ils sont résumés dans trois causes principales :

- Le manque d'une approche participative qui prend en considération les besoins des populations.
- Les techniques réalisées sont mal adaptées aux conditions écologiques et socio-économiques des sites aménagés.
- Les aménagements mécaniques (terrasses, banquettes) ne réduisent pas la dégradation des terres malgré de lourds investissements. Pour les paysans, ces aménagements ne permettent pas d'améliorer la productivité des terres, ils contribuent seulement à la réduction des surfaces cultivées.

Donc, une nouvelle stratégie a été proposée appelée « *Better land husbandry* » par les anglophones et « *Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols* » (GCES) par les francophones (Roose, 1999 ; Sabir et al., 2002 ; Roose et De Noni, 2004). Cette stratégie vise d'abord à intégrer les paysans dans les programmes de conservation des eaux et des sols, dans le cadre d'une approche participative qui prend en considération les conditions du milieu et les besoins des paysans. Ainsi

d'améliorer la productivité des terres, en réduisant le ruissellement et l'érosion sur les terres fragiles (Roose, 1999 ; Roose et al, 2010).

2- Les techniques paysannes de lutte antiérosive dans le Haut Ouergha

2.1. Les techniques traditionnelles de gestion conservatoire des sols

Selon El Abbassi (2000), les techniques traditionnelles sont l'ensemble des interventions et des pratiques exercées par les sociétés humaines, afin d'aménager l'espace et atteindre une gestion rationnelle des eaux et des sols.

La gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc par les techniques traditionnelles a fait l'objet des nombreux travaux spécifiques, dont l'objectif de faire la typologie de ces techniques traditionnelles, d'étudier leurs modes de construction, d'évaluer leurs efficacités contre l'érosion hydrique et de mettre en valeur le savoir-faire paysan (Laouina, 1995 ; Sabir et al., 1999 ; Roose, 1999 ; Bou kheir et al.,2001 ; El Abbassi, 2000 ; Sabir, 2002 ; Roose et Sabir, 2002 ;Tribak, 2002 ; Roose, 2002 ; Laouina et al., 2006 ; Al Karkouri et al., 2007 ; Sabir et al., 2010 ; Roose, 2010 ; Barathon et al., 2010).

Pour le Haut Ouergha, une étude de Mouliéras en 1899, montre que la sédentarisation très ancienne des populations favorise l'existence de certaines techniques de lutte antiérosive, notamment les terrasses et les gradins sur les pentes raides dans les tribus d'Oulad Bouslama, situés dans la partie nord de l'aire d'étude. De nos jours, ces techniques sont bien développées par les paysans et occupent des versants pentus là où se développe particulièrement la culture de cannabis. (El Bouhali et al., 2019).

Généralement, les techniques développées par les paysans dans le domaine de gestion des terres et de lutte antiérosive sont nombreuses et diversifiées.

2.1.1. Les terrasses

Les terrasses aménagées sont considérées comme des techniques de gestion conservatoire des eaux et des sols ; elles varient en dimension, en forme et en mode de construction. (Tribak et al., 2013). L'extension de cette technique est limitée dans la zone d'étude. Elles se localisent essentiellement là où les ressources en eau sont abondantes ; généralement, à proximité des cours d'eau ou de

certaines sources favorisant l'irrigation. Les missions du terrain montrent l'existence remarquable de cette technique dans le douar Oulad Bouslama, où les terrasses occupent une surface importante (photo 26), on les observe aussi à proximité des sources dans le douar Oulad Hamza, Ras Lhjar et Oulad Erhzal. Cette technique se localise également à proximité d'oued Ouergha et oued El Kasba où la culture du cannabis est fortement pratiquée.

Une étude de Roose en 1999, montre que ce type d'aménagement apparaît quand la population est dense, et la surface cultivable est rare et que le travail manuel est bon marché. Selon le mode de construction, on peut distinguer deux types des terrasses ; les terrasses soutenues par un mur en pierres sèches et des autres soutenues par un mur en terre battue. Généralement, la forme des terrasses dépend de la forme du versant sur lequel elles sont installées (Tribak, 2002).

Les cultures maraîchères sont également pratiquées sur ces terrasses irriguées. Elles comprennent les pommes de terre, les navets, les tomates, les fèves... Ce sont des cultures vivrières de faible rendement. À cela, s'ajoute le cannabis, qui a connu une extension remarquable, notamment durant ces dernières années.



Photo 26. Terrasses irriguées dans le douar Oulad Bouslama.

Le rôle antiérosif des terrasses est très connu, ce sont des aménagements de grande importance, qui permettent de contrôler le ruissellement (Naimi et Baghdad, 2002), de capter les éléments fins transportés sur les versants, d'améliorer l'infiltration et de gagner de nouvelles espaces agricoles dans des milieux accidentés (photo 27).

L'observation directe sur le terrain montre l'impact positif de cette technique sur la stabilisation des versants et la fixation des sols. On note aussi l'absence des formes d'érosion dans les espaces aménagés.



Photo 27. Versant aménagé en terrasses (douar Jamaa Dlem).

Les terrasses bours sont limitées dans l'espace. Ce sont des petites parcelles aménagées sous forme de terrasses en escalier (Al Karkouri et al., 2002), qui ne comportent aucun aménagement hydraulique, destiné à assurer l'arrosage des cultures (photo 27). Elles prennent leurs développements sur les pentes les moins raides et consacrées aux céréalicultures, aux cannabis et à l'arboriculture. Malgré que cette technique soit très limitée dans l'espace, elle permet la stabilisation des versants et la diminution de l'énergie du ruissellement.

2.1.2. Les cordons en pierres sèches

Cette technique est bien visible sur les versants très pentus, notamment la partie nord de la zone d'étude (douars Oulad Hamza, Oulad Bouslama, Ras Lhjar Olad Fatah et Lknatra). La croissance démographique et l'augmentation des besoins vivriers obligent les paysans à chercher d'autres terres cultivables. L'aménagement des versants ce n'est pas un choix pour eux, mais c'est une obligation.

Les cordons en pierres sèches sont des aménagements très anciens dans l'aire d'étude. Durant les saisons de cultures, les paysans pratiquent l'épierrage (Aderghal et al., 2006) pour améliorer la fertilité des sols et faciliter le travail de la terre. Les matériaux ramassés par l'épierrage des champs

sont alignés le long du versant, selon les courbes de niveau (photo 28). Parfois, les paysans utilisent cette technique pour délimiter leurs parcelles. La construction des cordons en pierres sur les versants pentus permet de disperser et de réduire la vitesse du ruissellement (Roose, 2002), d'améliorer la captation des eaux dans le sol (Rodríguez-Juan et al., 2015), de capter d'une quantité importante des sédiments, de fixer les sols et de faciliter les opérations culturales (Naimi et Bagdad, 2002).



Photo 28 : cordons en pierres sèches sur un versant de forte pente (douar Ras Lhjar).

Le rôle antiérosif des cordons en pierres sèches est visible quand ils sont renforcés par l'arboriculture. Les visites du terrain confirment que les versants dénudés même qu'ils sont aménagés par les cordons, ils sont affectés par l'érosion en nappe, qui transporte les éléments fins et laisse apparait sur la surface, les éléments grossiers. Tandis que les versants aménagés par des cordons renforcés par l'arboriculture, sont stables et protégés contre l'érosion hydrique.

2.1. 3. Les talus

Les talus sont des bandes étroites de terres communes qui ne sont plus cultivées. Avec le travail des parcelles de chaque côté, cette bande évolue en dénivelée de terre (Sabir et al, 1999). Chaque talus représente la délimitation d'une parcelle (photo 29), leurs hauteurs dépendent de leurs âges, plus le talus est ancien plus la hauteur est importante.

Ce type d'aménagement antiérosif a connu une extension remarquable sur les versants pentus. Il permet de réduire la longueur de la pente (Tribak, 2002) de casser la vitesse du ruissellement, de

réduire leur effet érosif et de piéger les éléments fins. Ces talus peuvent être colonisés par la végétation, chose qui renforce leur efficacité. La végétation favorise la stabilisation du talus par leur système racinaire et contribue à l'augmentation de l'infiltration.



Photo 29. Talus en terre alignés selon les courbes de niveau (douar Bab Selam).

2.1.4. Traitement des ravins

L'érosion linéaire constitue la forme d'érosion la plus remarquable dans la zone d'étude. Ce type d'érosion menace les terres agricoles, et réduit leurs superficies. Pour stabiliser l'évolution des ravins, les paysannes interviennent par deux techniques principales : la fixation mécanique par la construction des seuils en pierres sèches et la fixation biologique par la plantation des espèces végétales.

A. Traitement biologique des ravins

Les agriculteurs sont conscients de l'effet érosif des ravines sur les terres agricoles, ils s'intéressent fortement à les stabiliser par l'utilisation des moyens biologiques. Ils utilisent plusieurs types des plantes telles que les arbres fruitiers (*figuier, olivier, caroubier*), et d'autres espèces comme laurier rose, roseau, *eucalyptus* ... (photo 30).

Cette technique est efficace dans la zone d'étude, du fait qu'elle contribue à casser l'énergie du ruissellement et à limiter sa capacité de creusement. Elle permet aussi la stabilisation du fond et des berges du ravin par leur système racinaire.



Photo 30. Ravin végétalisé par différentes espèces végétales.

B. Traitement mécanique des ravins par les seuils en pierres sèches

Cette technique consiste à stabiliser le fond des ravines par la construction de quelques seuils en pierres (Tribak, 2002). Les matériaux utilisés sont essentiellement gréseux ou schisteux, de différentes tailles ramassées depuis le champ. Cette technique permet de réduire la force de ruissellement et favorise la stabilisation du ravin. Les sédiments collectés derrière les seuils constituent un milieu très fertile qui permet l'installation des végétations.

Dans la zone d'étude, le traitement mécanique des ravins est limité dans l'espace, car elle demande beaucoup du temps et de force pour la construction et un entretien fréquent notamment, après les évènements pluvieux exceptionnels.

2.1.5. Les clôtures en haies vives

Cette pratique est largement utilisée dans la zone d'étude. Les paysans plantent des arbres ou des arbustes sous forme d'une clôture, qui entoure les parcelles et les champs de culture. Cette technique joue un double rôle : d'une part elle permet la délimitation des champs, et la protection des vergers contre les animaux et d'autre part elle favorise la fixation des sols notamment sur les versants de forte pente. Les épineuses sont les espèces végétales les plus utilisées dans l'aire d'étude notamment les figuiers de barbarie (*Cactus*) et les alignements d'*agaves* (photo 31).



Photo 31. Alignements d'agaves dans le douar Jamaa Dlem.

Nous avons marqué l'extension de cette technique dans les différentes parties du bassin, notamment dans les douars Jama Dlem, Zouaoua, El Kob, Bou Rhlal.

2.1.6. La gestion de la biomasse

C'est une pratique très ancienne dans la zone d'étude. Les paysans sont trop pauvres pour acheter d'engrais minéraux, ils utilisent le fumier pour améliorer la fertilité des sols, et augmenter la productivité des terres (FAO, 1975 ; Shaxson, 1999 *in* Roose, 2010).

Le fumier des terres se fait une fois par an ou une fois tous les trois ans ou encore une fois tous les cinq ans (Al Karkouri et al., 2006). Le transport du fumier exige beaucoup d'énergie. Seuls les champs les plus proches des habitats et des axes routiers sont régulièrement fumés.

2.1.7. La gestion des résidus de culture

Les résidus de culture qui couvrent les champs après la moisson, jouent un rôle antiérosif très important, ils constituent un couvert protecteur à un moment où la culture ne peut pas encore couvrir le sol (Hudson, 1990). Ils absorbent l'énergie cinétique des gouttes de pluie et permettent la protection de la surface recouverte contre l'agressivité des précipitations en limitant les effets splash. (Regis et Roy, 1999). Ainsi que la matière organique apportée par les résidus de culture, enrichit le sol et améliore la perméabilité (Boufaroua et Karim, 2002).

Roose (2010), déclare que la biomasse disponible dans les champs cultivés n'est pas négligeable : la culture de céréales peut laisser 1 à 4 t/ha de paille, par contre les légumineuses (pois chiches,

lentilles, fèves, haricots, etc.) ne laissent au sol que peu de résidus (1 t/ha de racines et tiges), mais elles sont très riches en azote.

Malheureusement, les biens faits de cette technique sont limités par le pâturage. Les résidus de culture sont exploités pour nourrir les troupeaux, ce qui provoque la dégradation de la surface du sol par le tassement. Dès les premières pluies d'automne, on remarque l'installation des griffures et des rigoles sur ces terres dégradées.

2.1.8. Le drainage des eaux dans les parcelles cultivées

Cette technique est fortement utilisée par les fellahs de la zone d'étude. Elle consiste à creuser des canaux sur le champ pour assurer le drainage des eaux de ruissellement et d'éviter leurs concentrations. Cette technique permet de conserver les sols et les cultures contre l'érosion, d'augmenter la capacité d'infiltration et de favoriser la stabilisation des terres agricoles.

Cette technique permet de réduire les risques de ravinement dans les terres cultivées, mais elle provoque la concentration de ruissellement, ce qui accélère le drainage du versant et augmente les débits de pointe dans les vallées (Roose et Sabir, 2002).

2.1.9. L'épierrage

Une très bonne partie des terrains de la zone d'étude est couverte par des fragments rocheux, concentré par l'effet de l'érosion en nappe. Cette situation oblige les paysans à procéder à l'épierrage avant le labour des champs. Les fellahs enlèvent les grosses pierres et laissent les plus petites qui ne gênent pas le travail de la terre au contraire, ils protègent le sol contre l'agressivité des pluies et du ruissellement (Al Karkouri et al., 2002). Les roches ramassées par l'épierrage sont alignées selon les courbes de niveau sous forme des cordons et des murettes (Al Karkouri et al., 2006). Cette technique permet de gagner des surfaces de culture, même sur les fortes pentes.

2.1.10. La jachère

Elle est avant tout une méthode de gestion de la fertilité, pratiquée depuis longtemps par les paysans rifains, elle est surtout utilisée pour permettre au sol de récupérer sa fertilité après quelques années de mise en culture (Regis et Roy, 1999). Elle constitue aussi un moyen indispensable pour protéger la régénération des arbres en zone d'élevage. Les travaux réalisés par

Morsli et al., 2006 ont montré que la jachère mise en défens a réduit de deux à cinq fois l'érosion par rapport aux autres traitements (céréales, jachère pâturée et sol nu).

Ce moyen de restauration des sols est en régression dans la zone d'étude, par l'effet de la pression démographique et de l'augmentation des besoins vivriers. Ainsi que l'exploitation des terres mises en jachère pour le pâturage provoque le tassement des sols, diminue l'infiltration et déclenche le ruissellement.

Les jachères non travaillées peuvent aussi constituer un milieu de prédilection pour le ruissellement et l'installation de multiples rigoles, notamment après les premières pluies d'automne où les terrains sont dénudés et compactés avec la sécheresse estivale qui se prolonge parfois jusqu'au mois de novembre

2.1.11. Plantations des arbres fruitiers

La technique de lutte antiérosive la plus utilisée par les agriculteurs dans le Haut Ouergha ; c'est la plantation de différents types d'arbres fruitiers et parfois forestiers pour stabiliser les versants et améliorer l'infiltration des sols. L'arboriculture favorise une meilleure fixation des sols par leurs systèmes racinaires. Ainsi elle joue un rôle socioéconomique très important, car elle constitue une autre source de revenu pour les fellahs.

L'*olivier* est l'arbre qui couvre le paysage dans la partie médiane de la zone d'étude, notamment dans les douars de Dkhisseyne, Sekour, Zouaoua, El Koub, Bni Aissa et Oulad Meddane. Les figures 115 et 116 indiquent que les espaces plantés ont connu une extension importante pendant les deux dernières décennies. Leur rôle antiérosif est remarquable, il permet une bonne fixation des sols. L'analyse de la photo aérienne de 1962 montre que la partie médiane de l'aire d'étude a été affectée par l'érosion linière, en relation avec le faible recouvrement des sols. Tandis que l'image de Google Earth en 2020 indique que les formes d'érosion sont moins apparentes, cela est lié aux effets conservatoires de l'arboriculture qui fixe le sol par son système racinaire.

Les *amandiers* et *figuiers* recouvrent les versants les plus élevés de la zone d'étude (photo 32), notamment dans les douars Oulad Bou Slama, Ras Lhjar, Laioun (la partie nord de l'aire d'étude) et les douars Olad Erhzal, Tamedghas, Akhbach et Amskir (partie sud). La plantation des arbres fruitiers est généralement associée avec des aménagements tels que : les demi-lunes, les cordons

en pierres sèches et les cuvettes. Ces techniques favorisent un appoint d'eau important pour les arbres. Ainsi que les sédiments accumulés permettent la fertilisation des sols.

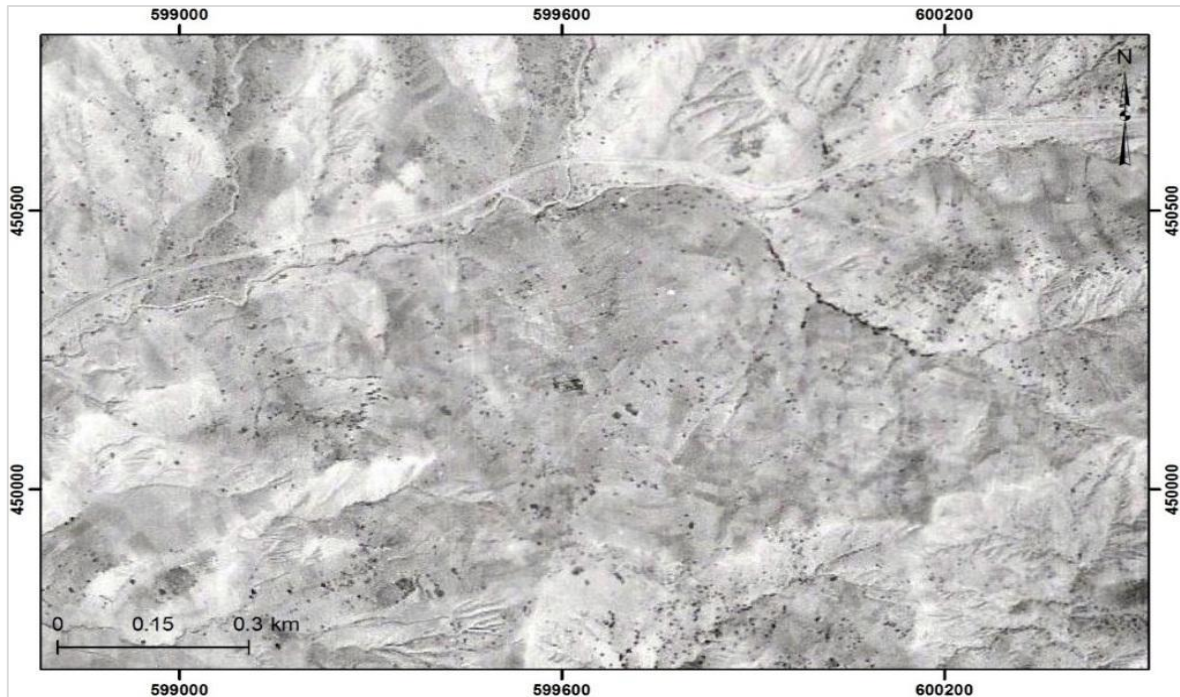


Figure 115. Situation d'Ain Echibrik en 1962 (photo aérienne 1962)

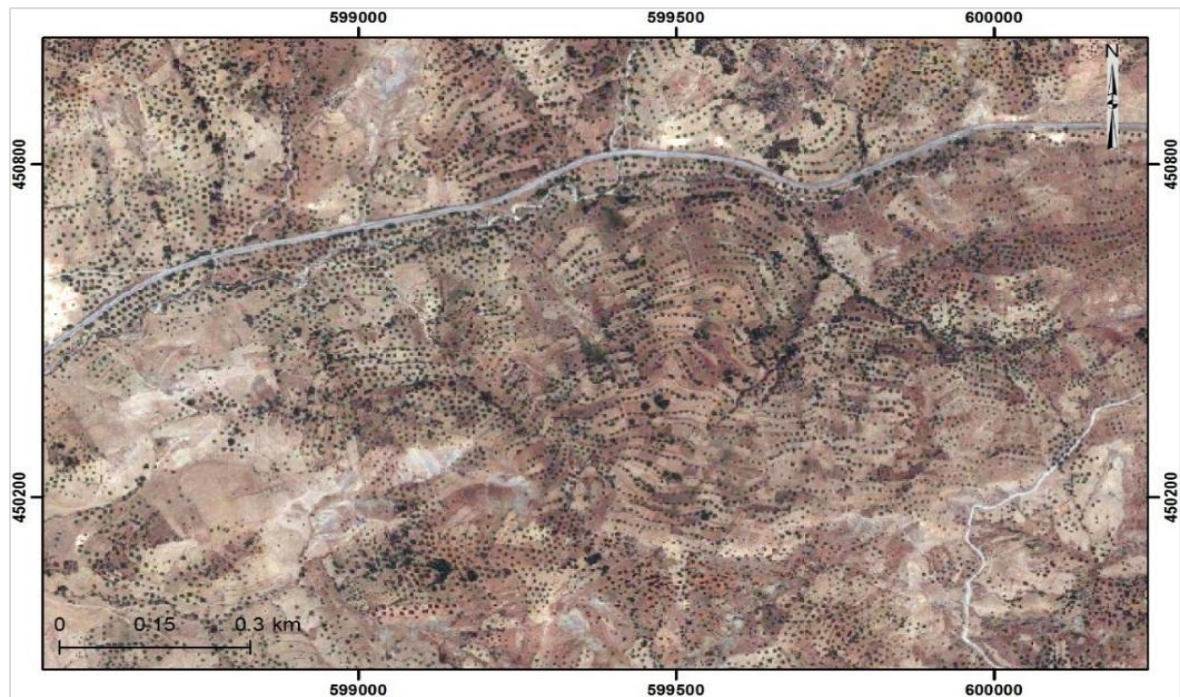


Figure 116. Situation d'Ain Echibrik en 2020 (image Google Earth 2020)



Photo 32. Amandiers renforcés par des cordons en pierres sèches (Douar Oulad Bou Slama).

2.2. Les techniques paysannes de gestion des eaux

En relation avec la faible pluviométrie et les faibles réserves hydriques naturelles, les paysans ont développé plusieurs techniques de stockage et de gestion de l'eau, dont les plus importantes sont les suivantes.

2.2.1 Mares collectant les eaux de ruissellement (madgen)

Il s'agit d'une technique très ancienne qui était très utilisée dans les aires collectives de pâturage (Al Karkouri et al, 2006 ; Sabir et al., 2010). Elle permet de stocker les eaux des sources dans des petits bassins, avant de les transférer vers les champs. La construction des madgens est une technique très ancienne dans la zone d'étude, notamment dans les douars où les ressources en eau sont disponibles. Ce sont des petits bassins construits en terre battue et renforcés par des pierres, prenant la forme d'un cercle bien arrondi (photos 33 et 34). Cette technique permet une bonne gestion des eaux, notamment durant les années sèches où la pénurie en eau atteint un stade critique. Les eaux collectées sont utilisées pour l'irrigation des parcelles d'une manière rationnelle. Les principaux inconvénients des madgens sont : l'évaporation, l'infiltration et la faible capacité de stockage (Sabir et al., 2010).

Actuellement les madgens en terre battue sont de plus en plus remplacées par celles en béton, notamment dans les douars qui pratiquent la culture de cannabis, cette dernière assure des rendements qui permettent aux paysannes de construire ces ouvrages coûteux.



Photo 33 : Madgen à douar Oulad Hamza (avril 2016).



Photo 34 : madgen à douar Jamaa Dlem (avril 2016).

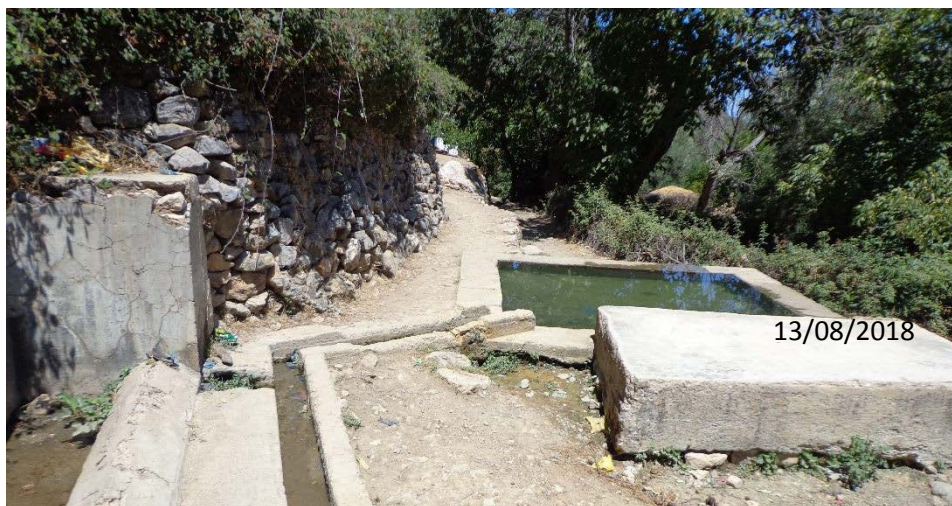


Photo 35. Bassin en béton désigné à l'irrigation (douar Olad Erhzal).

2.2.2. Les cuvettes et les demi-lunes

Cette technique consiste à creuser des bourrelets en demi-lunes autour des arbres fruitiers, notamment les oliviers (photo 36), construits par des terres tassées et renforcées par des pierres récoltées depuis le champ (El Yadari et al., 2019). Les eaux de ruissellement captées par les cuvettes en demi-lune permettent un appoint d'eau important pour les arbres plantés (Sabir, 2002). Les sédiments déposés au fond des cuvettes favorisent la fertilisation des sols. Ces aménagements

jouent un double rôle, d'une part, ils permettent de collecter les eaux et les particules fines nécessaires à la croissance des arbres, et d'autre part, ils freinent l'énergie du ruissellement sur les versants pentus. Donc c'est une technique de gestion conservatoire des eaux et des sols.



Photo 36. Cuvette en demi-lune dans le douar Jamaa Dlem.

Cette technique est très utilisée dans la zone d'étude, notamment sur les versants de pente modérée et forte et sur les terrains où les pierres sont abondantes.

2.3. Perspective d'évolution des techniques traditionnelles de GCES

Les techniques traditionnelles de conservation des sols et de la gestion des eaux sont multiples et variées dans la zone d'étude, elles ont été mises en place en plusieurs périodes, et se sont diversifiées et améliorées en fonction des conditions socioéconomiques des populations locales. D'après le travail du terrain et l'observation du milieu, nous constatons que :

- + La zone d'étude a connu des évolutions socio-économiques très importantes, en raison de l'exode rural qui atteint des chiffres importants. L'ouverture sur le monde urbain contribue à un changement des mentalités, les jeunes sont moins attachés à la terre et par conséquent l'absence de nouvelles initiatives d'aménagement, la plupart des versants sont anciennement aménagés.
- + Jadis, l'aménagement des terres cultivables par les terrasses, les cordons en pierres sèches, les seuils... sont faits dans un cadre collectif nommé (touiza), les paysans travaillent tous ensemble. Aujourd'hui les paysans travaillent individuellement, ils sont moins intéressés à l'aménagement

des terres notamment que la construction de ces techniques demande une main-d'œuvre importante et des moyens financiers, techniques et matériels.

+ Seules les terrasses qui se trouvent à proximité des douars sont entretenues, car elles garantissent un espace cultivable pour pratiquer le cannabis-culture, ce dernier favorise des revenus importants. Ces terrasses se trouvent dans un bon état par rapport aux autres situés loin des douars et sur des versants pentus.

3. Les techniques introduites par l'État

Conscient des graves problèmes d'érosion générés dans les zones agricoles marginales, l'État a entrepris plusieurs projets visant à réduire ces contraintes dans le Haut Ouergha, à travers des techniques et des programmes plus coûteux que les pratiques menées par les paysans.

3.1. Projet de développement économique rural du Rif occidental DERRO

Ce projet est le plus ancien dans la zone d'étude (1966), il vise à transformer les systèmes de production agricole fondés sur la céréaliculture et l'élevage, en système dominé par l'arboriculture fruitière et l'élevage à base de cultures fourragères. Cette transformation est indispensable pour lutter contre l'érosion, qui constitue un vrai danger pour l'activité agricole dans la région (Plan D'aménagement Anti-Erosif du bassin versant de l'oued Ouergha en amont du barrage Al Wahda 1995).

Au début du projet DERRO, la plupart des périmètres de défense et restauration du sol (DRS) et les plantations ont été quasiment abandonnées. Ils ont été considérés par les agriculteurs comme une perte de leur propriété sur les terres et les surfaces des banquettes comme une réduction de la surface labourable. En outre, la mise en défense des terres reboisées, pour une longue durée (6 ans) a été considérée comme une réduction de la surface de pâturage après la récolte des céréales (Sabir et Boudeur, 1999).

À partir des années 80, la demande est devenue pressante sur les plants d'olivier distribués gratuitement. Les paysans ont commencé à s'occuper de plus en plus des plantations qu'ils effectuent eux-mêmes (Sabir et Boudeur, 1999).

Généralement, le projet DERRO na pas connu une réussite très importante dans la zone d'étude, pour plusieurs raisons :

- le projet DERRO, a accordé une attention très importante aux plantations des arbres fruitiers, notamment les oliviers, sans prendre en considération les attentes des populations.
- la standardisation des choix techniques au niveau de la réalisation conduit dans la plupart des cas à l'échec des aménagements.
- le projet n'arrive pas à améliorer les conditions de vie des populations et la diminution de l'exode rural.

3.2. Programme de développement intégré (PDI)

« Le programme repose sur une approche intégrée incluant les cultures alternatives, le désenclavement, la protection des ressources naturelles ou encore des infrastructures et équipements sociaux et sanitaires. Il est réalisé dans un cadre conventionnel double faisant appel au niveau central à une convention cadre et au niveau des provinces à des conventions spécifiques relatives à l'exécution des projets au à leur niveau » (PDI 2009-2011). Pour le Haut Ouergha les communes concernées par le PDI 2009-2011 sont : la commune de Fennassa Bab El Hait, Bni Ounjel Taфраout, Tamedite et la commune Bni Oulid (tableau 60).

Taounate (24 CR)	Fennassa Bab El Hait	Sidi El Mokhfi	Khalfa	Tamedite
Rhafsai	Ain Médiouna	El Bibane	Galaz	Oudka
Ourdzagh	Bni Ounjel Taфраout	Bouhouda	Tafrant	Kissane
Timezgana	Sidi Haj M'Hamed	Beni Oulid	Tabouda	Zrizer
Bouadel	Sidi Yahya Bni Zeroual	Mezraoua	Ratba	Rghioua

Tableau 60. Les communes concernées par le PDI dans la province de Taounate (PDI 2009-2011)

3.3. La correction biologique

Dans le cadre de la lutte contre l'érosion hydrique, le haut-commissariat des eaux et forêts intervient par des programmes de reboisement des forêts. Dans la zone d'étude des périmètres sont reboisés par le *Pin d'Alep* (forêt Jerf et la forêt Dhar Soualah), les objectifs principaux d'intervention sont, la lutte contre la dégradation des sols et la stabilisation des ravins. La comparaison entre la photo aérienne et l'image de Google Earth (figure 117 et 118) de deux

périodes différentes (1962–2020) montre le rôle le plus important de boisement dans la lutte antiérosive.

Le reboisement des forêts a permis la fixation des sols et la stabilisation des ravins, mais le défrichement catastrophique des arbres de *pin d'Alep*, dû aux interventions incontrôlées des populations, contribue à la dégradation du couvert végétal et limite leur rôle antiérosif.



Photo 37. Forêt Jerf en 2021

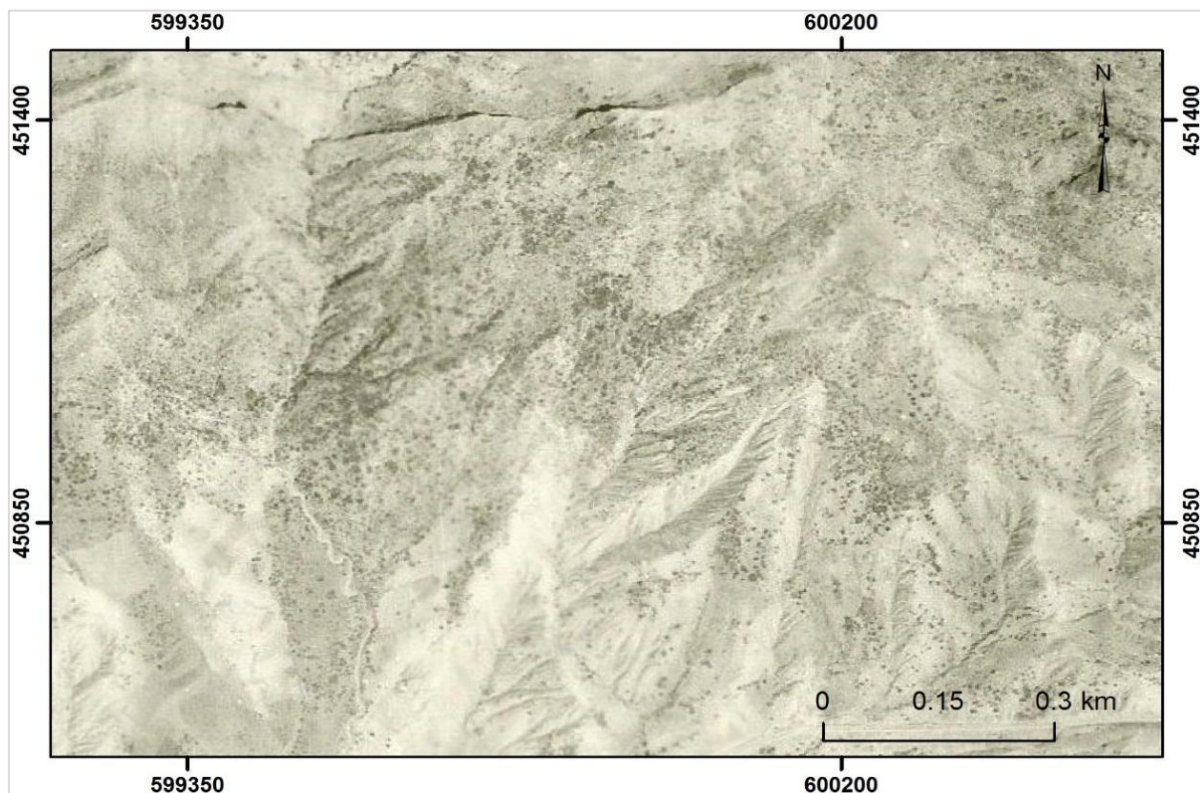


Figure 117. Situation de Jerf en 1962 avant le reboisement (photo aérienne 1962)

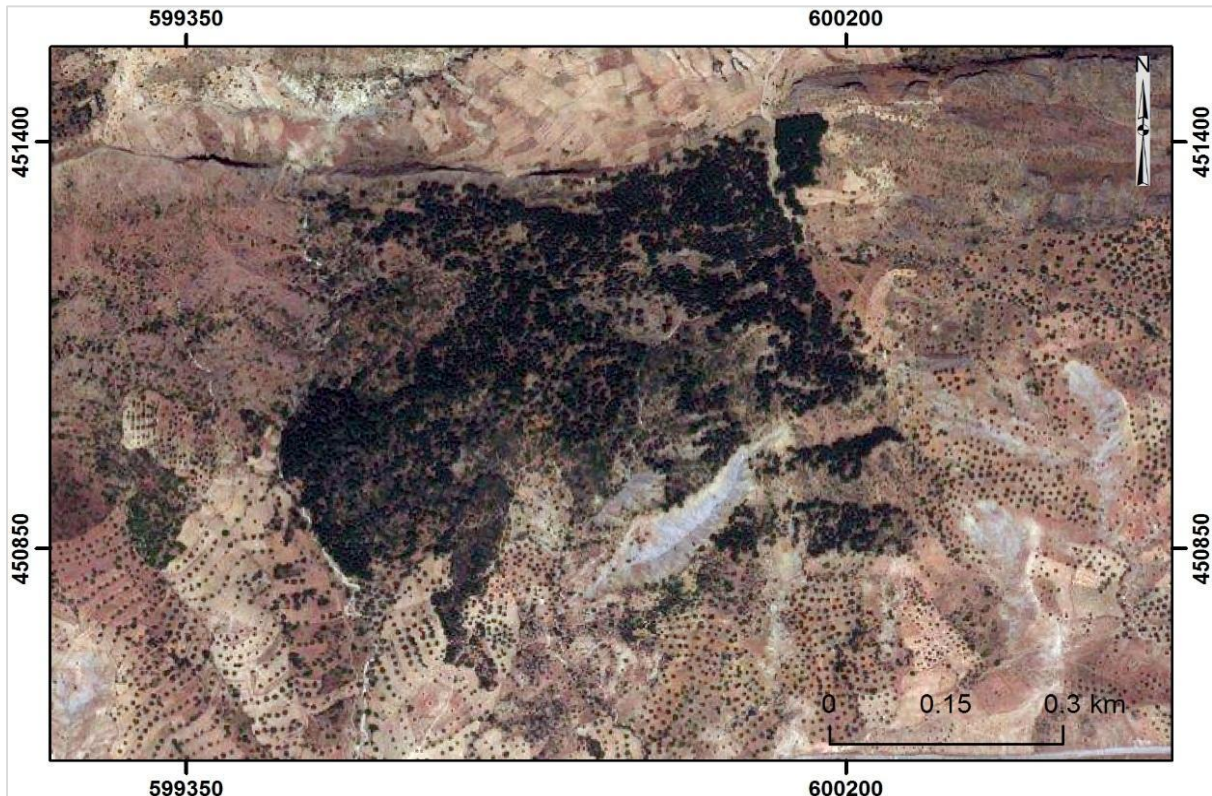


Figure 118. Situation de la forêt Jerf en 2020 après le reboisement (image Google Earth 2020)

3.4. Les seuils en gabion

Ce type d'aménagement est le plus utilisé dans la zone d'étude, l'ouvrage est construit par la superposition des pierres plates ou des galets disposés dans un panier de grillage métallique, habituellement utilisés le long des routes affectées par des glissements (photo 38).

Ce type d'aménagement est très important en matière de lutte antiérosive, il permet de stabiliser les versants et de protéger les infrastructures. L'installation de ce type d'aménagement nécessite une étude préalable des conditions du milieu.



Photos 38. Seuils en gabions dans le cadre d'aménagement de la route régionale 510

Conclusion

Le diagnostic du milieu montre une grande diversité des techniques traditionnelles réalisées par les fellahs de la zone d'étude. Cette diversité témoigne d'une prise de conscience ancienne vis-à-vis de la rareté des ressources et du risque qu'elles encourrent d'une part, et d'une richesse dans le savoir-faire paysan d'autre part.

Les observations de terrain montrent que les techniques traditionnelles ne sont pas suffisantes ; le développement de l'érosion est plus rapide que le rythme des aménagements individuels. Ces techniques sont dispersées dans l'espace et à effets réduits, même s'ils sont nombreux. Elles sont parfois totalement détruites ou abandonnées à cause de l'exode rural, la sécheresse et la croissance démographique.

Les interventions étatiques restent en deçà des objectifs pour lesquelles elles ont été destinées. Les observations du milieu montrent l'échec de certaines techniques comme les banquettes le gabionnage ... cela est justifié par l'inadaptation de ces techniques avec les conditions du milieu et les choix des populations.

La lutte antiérosive exige, donc, une approche participative qui prend en considération les besoins des populations et les conditions physiques et socio-économiques du milieu. Cette stratégie nécessite une meilleure connaissance des milieux et des facteurs qui régissent leur dégradation. Elle exige de trouver d'autres sources de revenus, pouvant améliorer les conditions de vie des populations. Aussi il faut respecter le savoir-faire paysan et le replacer à sa juste valeur, en soutenant et en améliorant les techniques traditionnelles en matière de gestion conservatoire des eaux et des sols.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le Haut Ouergha a subi au cours des dernières décennies une dynamique remarquable de ses milieux naturels sous l'effet de la conjugaison des facteurs naturels et anthropiques. Ce milieu est caractérisé par une topographie accidentée avec des altitudes très importantes qui dépassent 1500 m. Le contexte géologique est marqué par la dominance des formations lithologiques imperméables, fragiles et fortement érodables (marnes, flyschs) sur des versants pentus.

Le Haut Ouergha évolue dans un contexte climatique méditerranéen semi-aride, caractérisé par une irrégularité et une concentration spatiotemporelle des précipitations durant la période humide (d'octobre à avril). Les précipitations orageuses se coïncident avec des sols mal protégés par le couvert végétal, tassés et dégradés après une longue période estivale. Cette situation favorise le déclenchement du ruissellement qui peut donner les formes élémentaires de l'érosion. L'analyse des données climatiques a montré que la zone d'étude a enregistré à partir des années 80 une diminution remarquable des précipitations et une augmentation de la température. Il s'agit de la tendance du climat vers une sécheresse très sévère. L'accumulation du déficit pluviométrique a fortement influencé les ressources en eau, le couvert végétal et amplifie la sensibilité des milieux à l'érosion hydrique et à la désertification. En outre, la forte densité des populations a engendré une pression continue sur les milieux (défrichement, surpâturage, la mise en culture des terrains en fortes pentes, l'extension de la cannabiculture) et a accéléré l'ampleur de la fragilité et de la dégradation des terres.

Les observations sur terrain montrent une nette variation des formes de l'érosion qui ruinent les terrains nus et les versants pentus. Généralement, la zone d'étude est dominée par l'érosion linéaire (rigoles, griffes et ravinements), qui affecte les terrains imperméables et les versants pentus mal protégés par le couvert végétal. L'érosion en nappe est développée partout, elle affecte principalement la fertilité des sols. Tandis que les mouvements de masse sont plus fréquents sur les versants caractérisés par une lithologie hétérogène d'expositions Ouest.

Le suivi des ravins montre une variation très nette d'un ravin à l'autre. En effet, le rythme de leurs évolutions est variable selon le type d'occupation des sols, les conditions lithologiques et topographiques des sites de mesure. Dans le terrain, nous avons distingué quatre types de ravins

avec une dynamique différente : le recul de la tête du ravin, l'élargissement du ravin par le sapement de ses berges, le colmatage total par les glissements et les ravins stables.

L'application des méthodes d'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha suggère que cette partie du Rif Central est très vulnérable à la dégradation. L'application de la méthode PAP/CAR montre que les zones instables couvrent la majorité de la superficie totale de la zone d'étude (environ 82 %). En revanche, les zones stables s'étendent sur des surfaces limitées. L'évaluation quantitative menée par la méthode EPM permet de mettre en évidence que 64 % de la zone d'étude produit une quantité considérable de sédiments. La comparaison entre le terrain et les résultats menés par la modélisation indique une forte corrélation, mais il existe certaines différences, cela est lié à l'application des méthodes et le manque de certaine couche de donnée. Les conséquences de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha résident dans la dégradation des terres agricoles par la diminution de la fertilité des sols et la réduction des espaces cultivés, l'accélération du taux d'envasement du barrage El Wahda et la détérioration des infrastructures routières. Ainsi, l'érosion hydrique est considérée comme une cause majeure de la désertification.

Similaire à l'érosion, la désertification constitue une autre forme de dégradation des terres dans la zone d'étude. L'application de l'approche MEDALUS dans le Haut Ouergha permet d'évaluer la sensibilité des milieux à la désertification. Les résultats obtenus indiquent que cette partie du Maroc constitue un milieu vulnérable et fortement exposé au risque de désertification. En effet, 58 % de la superficie totale de la zone d'étude est classée dans les milieux critiques et très sensibles. Cela est justifié par la succession des années sèches qui provoquent la diminution du débit des sources et des oueds, le recul alarmant du couvert végétal naturel, la dominance des sols peu profonds, l'augmentation de la pression des activités anthropiques sur les ressources en eau pour assurer l'irrigation du cannabis.

Face à la dégradation des milieux dans la zone d'étude, des aménagements étatiques et paysans ont été réalisés, afin d'assurer une bonne gestion des ressources. Les observations de terrain montrent que les techniques traditionnelles jouent un rôle important à la stabilité et la fixation des versants même qu'elles sont limitées dans l'espace ; en effet, les terrains aménagés sont moins affectés par les formes d'érosion que d'autres non aménagés et mises en culture. La fiabilité et l'efficacité de ces techniques sont plus importantes dans le cas où les aménagements mécaniques

(terrasses, cordons...) sont renforcés par des aménagements biologiques (clôture en haie vive, plantation...). Généralement, ces aménagements traditionnels sont insuffisants et leur effet antiérosif est limité dans l'espace. Ainsi que les transformations socio-économiques affectent la durabilité de ces techniques : l'absence des nouvelles initiatives d'aménagement, l'exode rural, la succession des années sèches et le changement des styles de vie sont des éléments qui réduisent l'extension spatiale de ces aménagements.

Les aménagements étatiques dans le Haut Ouergha restent limités et d'un effet réduit, certaines interventions sont échouées à cause de l'inadaptation de ces techniques aux conditions physiques du milieu et l'absence de l'approche participative.

La dégradation accélérée des milieux naturels dans le Haut Ouergha nécessite l'intervention par des programmes de gestion afin d'assurer la durabilité des ressources naturelles. Ainsi que l'intervention par des programmes de développement socio-économique semble très importante pour améliorer les conditions de vie des populations et démunir l'exode rural et la pression sur les ressources.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- Acharki S., El Qorchi F., Arjdal Y., Amharref M. Bernoussi A, Ben Aissa H. (2022).** Soil erosion assessment in Northwestern Morocco. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 25, 100663.
- Achim, F-L. (2019).** The dynamics of the ravination processes in Sălătrucel-Olt river basin. *RISCURI ȘI CATASTROFE*, NR. XVIII, vol. 24, NR. 1/2019.
- Aderghal M., Watffeh, A., Al Karkouri, J., Tailassan, M., Nafaa R. (2006).** Les techniques de GCES dans un système agro-sylvo-pastoral du plateau central du Maroc. Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. Actes de la session VII organisée par le Réseau E-GCES de l'AUF au sein de la conférence ISCO de Marrakech (Maroc). 223 – 232.
- Afsahi K., Khalid M. (2014).** Cannabis dans le Rif central (Maroc). *Revue indisciplinaire de sciences sociales*. Espace temps.net. 1-18.
- Ait Lamqadem A., Pradhan B., Saber H., Rahimi A. (2018).** Desertification sensitivity analysis using MEDALUS model and GIS: A case study of the Oases of Middle Draa Valley, Morocco. *Sensors* 18, 2230 ; doi :10.3390/s18072230.
- Aiello A., Adamo M, Canora F. (2015).** Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy. *Catena* 131, 174–185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.003>.
- Al Karkouri J. (2017).** Les milieux montagneux marocains à l'épreuve du changement climatique (cas de la montagne rifaine). *Hespéris-Tamuda* LII (1). Pp 237-267.
- Al Karkouri J., Laouina A., Watfeh A., Aderghal M. (2002).** Techniques de conservation de l'eau et des sols dans une zone semi-aride méditerranéenne du Rif central Vallée de Béni Boufrah. *Bulletin réseau érosion* N°21. 56-85.
- Al Karkouri J., Laouina A., Watfeh A., Aderghal M. (2006).** Gestion conservatoire des eaux et es sols dans le bassin versant de Beni Boufrah (rif central, Maroc). Actes de la session VII

- organisée par le Réseau E-GCES de l'AUF au sein de la conférence ISCO de Marrakech (Maroc). 233-239.
- Ali A., Lebel T., Amani A. (2008).** Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Revue Sécheresse* vol. 19, n° 4. 227-235
- Ayt Ougougdal H., Khebiza M-Y., Messouli M., Bounoua L., karmaoui A. (2020).** Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: A case study of the Ourika watershed, Morocco. *Scientific African* 10. E 00646.
- Barathon J-J., El abbassi H., Lechevalier C. (2010).** Gestion des sols et de l'eau dans le Massif d'Ifni, Anti-Atlas occidental. *Norois. Environnement-Aménagement-Société*, n° 214. 101-111.
- Belasri A., Lakhouili A. (2016).** Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8. 98-107.
- Belzard A. (1999).** La stabilisation de lavaka dans la région du lac Alaotra Madagascar. *Bulletin réseau érosion* N° 19. 229-341
- Benabderrahmane C-M., Chenchouni H. (2010).** Assessing Environmental Sensitivity Areas to Desertification in Eastern Algeria using Mediterranean Desertification and Land Use "MEDALUS" Model. *Int. J. of Sustainable Water & Environmental Systems* 1 (1).
- Benabid A. (1984).** Les écosystèmes forestiers préforestiers et présteppiques du Maroc : diversité, répartition biogéographique et problèmes posés par leur aménagement. MEDECOS, quatrième conférence internationale sur les écosystèmes méditerranéens Perth 13- 17 août 1984, Australie cf. T. VI, n° 2. 324-330.
- Blinkov I., Kostadinov S. (2010).** Applicability of various erosion risk assessment methods for engineering purposes, BALWOIS 2010 - Ohrid, Republic of Macedonia - 25, 29 May 2010
- Borrelli P., Robinson D-A., Fleischer L-R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., et al. (2017).** An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communication* 8 (1), 1–13. Doi :10.1038/s41467-017-02142-7.

- Bou Kheir R., Girard M.-Cl., Khawlie M., Abadallah C. (2001).** Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens. Etude et gestion des sols, volume 8,4. 231 – 245.
- Bouabid R., Rouchdi M., Badraoui M., Diab A., Louafi S. (2010).** Assessment of Land Desertification Based on the MEDALUS Approach and Elaboration of an Action Plan: The Case Study of the Souss River Basin, Morocco. In: Zdruli, P., Pagliai, M., Kapur, S., Faz Cano, A. (eds) Land Degradation and Desertification: Assessment, Mitigation and Remediation. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8657-0_10
- Boudjemline F., Semar A. (2018).** Assessment and mapping of desertification sensitivity with MEDALUS model and GIS – Case study: basin of Hodna, Algeria. Journal of water and land development n°. 36 (I–III): 17–26.
- Boufaroua M., Yemna K. (2002).** Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans les zones arides et semi-arides de la Tunisie. Bulletin réseau érosion 21, 94-104.
- Boukrim S., Lahrach L., Midaoui A., Benjelloun F., Benabdelhadi M., Hamid Lahrach H et Chaouni A. (2016).** Cartographie de l'érosion qualitative des sols du bassin versant de l'Aoudour (Rif-Maroc), European Scientific Journal edition vol.12, No.11. 295-311.
- Cerdan O., Govers G., Le Bissonnais Y., Van Oost K., Poesen J., Saby N., et al. (2010).** Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. Geomorphology 122. 167–177.
- 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, n° 203. 19-25.
- Chen H., El Garouani A., Laurence A. (2008).** Modelling soil erosion and deposition within a Mediterranean mountainous environment utilizing remote sensing and GIS – Wadi Tlata, Morocco. Geographica Helvetica Jg. 63 2008/Heft 1. 36-47.

- Chouvy P-A. (2018).** Du kif au haschich : évolution de l'industrie du cannabis au Maroc. Bulletin de l'Association de géographes français. 308-321.
<https://journals.openedition.org/bagf/3337>.
- Conoscenti C., Angileri S., Cappadonia C., Rotigliano E., Agnesi V., Märker M. (2014).** Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology* 204. 399–41.
- Damnati B., Ibrahimi S., Benhardouze O., Radakovitch O et Moukhchane M. (2010).** Quantification de l'érosion par le ¹³⁷Cs et le ²¹⁰Pb en excès : cas d'une parcelle au niveau du bassin versant du barrage Nakhla (Région de Tétouan, Nord-ouest du Maroc). *Africa Geoscience Review*, Vol. 17, No. 3. 215-223.
- De Pina Tavares J., Baptista I., Ferreira A-J-D., Amiotte-Suchet P., Coelho C., Gomes S., et al. (2015).** Assessment and mapping the sensitive areas to desertification in an insular Sahelian mountain region. Case study of the Ribeira Seca Watershed, Santiago Island, Cabo Verde. *Catena* 128. 214–223.
- Deng Q., Qin F., Zhang B., Wang H., Luo M., Shu C., Liu H., Liu G. (2015).** Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology* 228. 703–713.
- Dragičević N., Karleuša B., Ožanić N. (2017).** Erosion Potential Method (Gavrilović Method) Sensitivity Analysis. *Soil & Water Res.*, 12, 2017 (1). 51–59.
- El Abbassi H. (2000).** Le savoir-faire des populations locales et gestion des eaux et des sols dans une moyenne montagne méditerranéenne semi-aride, Rif orientale (Maroc). *Bulletin réseau érosion* N° 21. 399-427.
- El Fellah Idrissi B., Cherai B., Hinaje S., Mehdi K. (2017).** La variabilité climatique et son influence sur les ressources en eau dans la partie septentrionale du Moyen Atlas marocain : cas des causses de Sefrou et de l'Anoceur. *Larhyss Journal*. 155 -179.

- El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abahrour M. (2008).** Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au nord-est du Maroc. *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 3. 193-201.
- El Garouani A., Merzouk A., Jabrane R et Boussema R. (2003),** Cartographie de l'érosion des sols dans le bassin versant de l'oued Jemaa (Pré-rif, Maroc). *Géomaghreb* 1, 39-46.
- El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abahrour M. (2007).** Apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc). *Acte des JSIRAUF*, Hanoi, 6-9 novembre 2007.
- El Garouani A., Merzouk A., Ozer O. (2003).** Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003)*. IAHS Publ. no. 278. 380-386.
- El Jazouli A., Barakat A., Khellouk R., Rais J., El Baghdadi M. (2019).** Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 13. 361–37
- El Ouazani Echa-Chahdi Kh., Amyay M., El-Bouhali A. (2019).** La gestion collective des sources dans la commune de Bouhouda – cas de la source El Manbaa (Rif central, Maroc). *Actes du colloque international, les sources d'eau dans le bassin méditerranéen, hydrologie, valorisation et sauvegarde*. 174-182.
- El Ouazani Ech-Chahdi Kh., El-Bouhali A., Amyay M. (2020).** La cartographie et la caractérisation de la sensibilité à la désertification dans le bassin versant du Haut Ouergha (Rif Central - Maroc) par l'approche MEDALUS, *Geomaghreb* 16. 1-13.
- El Ouazani Ech-Chahdi Kh., El-Bouhali A., Amyay M. (2021).** Étude diachronique et quantification de la dynamique d'occupation du sol dans le bassin versant du Haut Ouergha (rif central- Maroc). *Actes du colloque International sur la dynamique de l'environnement et*

les risques naturels en milieux méditerranéens. Publications de FLSH, Université Mohamed Ier, Oujda. 227-232.

El Ouazani Ech-Chahdi Kh., El-Bouhali A., Amyay M. (2021). Evaluation et zonage de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Haut Ouergha (Rif Central -Maroc) par l'application des méthodes PAP/CAR et EPM. In ressources et développement territorial dans les zones arides et semi-arides : contraintes de fragilité et enjeux de gouvernance. Pub, FLS Ibn Zohr, Agadir. 42 - 51.

El Yadari H., Chikhaoui M., Naimi M., Sabir M., Raclot D. (2019). Techniques de conservation des eaux et des sols au Maroc : aperçu et perspectives. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. (2019) 7 (2). 343-355.

El-Bouhali A., Lebaut S., Amyay M., El Ouazani Ech-Chahdi Kh., Gille E., Cotonnec A. (2021). L'impact combiné des déficits pluviométriques cumulés et de l'extension des cultures irriguées sur les ressources en eau dans la dépression de Guigou (Moyen Atlas - Maroc). Actes du colloque international, changement climatique, potentialités territoriales et justice environnementale. Fès. 283–299.

El-Bouhali A., Amyay M., El Ouazani Ech-Chahdi Kh. (2019). Le rôle des sources dans la concentration des populations dans la collectivité territoriale de Beni Ounjel Tafraoute (Taounate-Maroc). Actes du colloque international, les sources d'eau dans le bassin méditerranéen, hydrologie, valorisation et sauvegarde. P. 183-193.

El-Bouhali A., Amyay M., El Ouazani Ech-Chahdi Kh. (2019). La cartographie du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Rif central-Maroc) à l'aide du modèle « EPM ». Geomaghreb 13, n°1. 15 - 24.

El-Bouhali A., Amyay M., El Ouazani Ech-Chahdi Kh. (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. Actes du colloque Climat, Eau et Société. 53 - 58.

Elnashar A., Zeng H., Wu B., Gebremicael T-G., Marie K. (2022). Assessment of environmentally sensitive areas to desertification in the Blue Nile Basin driven by the

- MEDALUS-GEE framework. Science of the Total Environment 815. 152925.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152925>
- Eun Jung, L., Dongfan P., Cholho S., Jiwon K., Chul-Hee L., Eunji K., Jooyeon, M., et al. (2019).** Assessing environmentally sensitive land to desertification using MEDALUS method in Mongolia. Forest science and technology.
<https://doi.org/10.1080/21580103.2019.1667880>.
- Flageollet J-C. (1988).** Les mouvements de terrain et leur prévention, édit. Masson. 251 p.
- Fozooni L., Fakhireh A., Ektesasi M-R. (2012).** Assessment of desertification using of modify MEDALUS model in Sistan plain (The east of IRAN). Elixir Geoscience 47. 8950-8955.
- Frankl A., Poesen J., Haile M., Deckers J., Nyssen J. (2013).** Quantifying long-term changes in gully networks and volumes in dryland environments: The case of Northern Ethiopia. Revu Geomorphology 201. 254-263.
- Gartet A. (2010).** Mouvement de terrain et risque environnementaux dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays ...aménagement, gestion et prévention. 232 p.
- Gartet A., EL-Meftahy M. (2016).** Cartographie et évaluation de l'érosion hydrique au bassin versant de l'Oued Islane (Nord-Est de Taounate, Maroc) par la méthode PAP/CAR et du SIG. 3ème Edition du Colloque International des utilisateurs du SIG. Oujda 22-23 Novembre 2016. 126-131.
- Gavrilovic Z., Stefanovic M., Milovanovic I., Cotric J., Milojevic M. (2008).** Torrent Classification – Base of Rational Management of Erosive Regions, Series: Earth and Environmental Science 4, IOP Publishing Ltd.
- Ghanam M. (2003).** La désertification au Maroc – Quelle stratégie de lutte ? 2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco.
- Giordano L., Giordano F., Grauso S., Iannetta M., Sciortino M., Rossi L., Bonati G. (2003).** Identification of areas sensitive to desertification in Sicily region. ENEA, Rome, Italy. 1-16

- Globevnik L., Holjevic D., Petkovsek G., Rubinic J. (2003).** Applicability of the Gavrilovic method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques, IAHS Publ. n°. 279. 224-233.
- Grovel R. (1996).** La préservation des forêts du Rif Centro-occidental : un enjeu de développement de la montagne rifaine. *Revue de géographie alpine*, tome 84, n°4. 75-94.
- Heusch B (1970).** L'érosion du Pre-Rif une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré.rif Occidental. Extrait du rapport 1970 - Tome 12 de la Station de Recherche. Forestière de Rabat.
- Hili A., El Khalki Y., Reddad H., Gart J., Abahrour M. (2020).** Comparaison des résultats de l'approche PAP/CAR et le modèle USLE dans la cartographie et l'estimation qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amlil, (Périf - Maroc). *Papeles de Geografía*, 66. 138-150.
- Hong Ch., Xueyong Z., Yongqiu W., Chunlai Z., Qihong Z., Zhangyan J. (2007).** Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China. *Soil & Tillage Research* 94. 4-14.
- Hubert P., Carbonnel J-P., Chaouche A. (1989).** Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application a des séries de précipitations et de débits de l 'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol* 10, 349-367.
- Hudson N.W. (1990)** - Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Rome, Bull. Pédol. FAO, 57. 182 p.
- Iaaich H., Moussadek R., Baghdad B., Mrabet R., Douaik A., Derradji A., Bouabdli A. (2016).** Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province –Northern Morocco, *International Soil and Water Conservation Research* 4 (3). 159-167, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.07.001>.
- Ionita I., Fullen M-A., Zgłobicki W., Poesen J. (2015).** Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Nat Hazards* 79: S1-S5. DOI 10.1007/s11069-015-1935-z.

- IPCC. (2022).** Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report (IPCC AR6 WG III) of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Karamesouti M., Detsis V., Kounalaki A., Vasiliou P., Salvati L., Kosmas C. (2015).** Land-use and land degradation processes affecting soil resources: Evidence from a traditional Mediterranean cropland (Greece). *Catena* 132. 45–55.
- Khali Issa L., Ben Hamman Lech-Hab K., Raissouni A et El Arrim A. (2016).** Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental), *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (8) 2778-2795.
- Kimaro D-N., Poesen J., Msanya B.M., Deckers J-A. (2008).** Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: interrill and rill erosion. *Catena* 75, pp 38–44.
- Koirala P., Thakuri S., Joshi S., Chauhan R. (2019).** Estimation of soil erosion in Nepal using a RUSLE modeling and geospatial tool. *Geosciences* 9, no. 4: 147. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040147>.
- Kosmas C., Danalatos N-G., Gerontidis S. (2000).** The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. *Catena* 40. 3–17.
- Kosmas C., Kirkby M-J., Geeson N. (1999).** MEDALUS Project: Mediterranean Desertification and Land Use. Manual on KEY INDICATORS of Desertification and Mapping Environmentally Sensitive Areas; Publication of European Union: Brussels, Belgium, ISBN 9282863492.
- Lahlaoi H., Rhinane H., Hilali A., Lahssini S., Moukrim S. (2017).** Desertification Assessment Using MEDALUS Model in Watershed Oued El Maleh, Morocco. *Geosciences* 7, no. 3: 50. <https://doi.org/10.3390/geosciences7030050>.
- Lakhili F., Chaaouan J., Qadem Z., Benabdelhadi M., Lahrach A (2021).** Estimation de l'érosion des sols basée sur le SIG à l'aide de la méthode EPM dans le bassin versant de Beht. *EWASH & TI Journal*, 2021 Volume 5 Issue 2. 588-596.

- Lamb P.-J. (1982).** Persistence of Subsaharian drought. *Nature* 299 (8). 46 47. <https://doi.org/10.1038/299046a0>.
- Li Z., Zhang Y., Zhu Q., He Y., Yao W. (2015).** Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* 228. 462–469.
- Mastas H. (2008).** Estimation de l'érosion potentielle par la méthode PAP/CAR et Quantification de l'érosion hydrique par l'équation universelle de pertes en sol (USLE) intégrée dans un SIG dans le bassin versant du barrage Sahla, Rif central, Maroc.
- Maurer G. (1968).** Les montagnes du rif central étude géomorphologique thèse pour le doctorat. 499 p.
- Mesrar H. (2010).** Application des directives du PAP/CAR et des outils SIG pour l'évaluation de l'érosion hydrique et la définition des facteurs causaux dans la partie aval du bassin versant de l'Oued Amzaz. Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Fès, 115 p
- Mesrar H., Sadiki A., Faleh A. (2012).** Automatisation de la procédure de modélisation des directives PAP/CAR, par utilisation de l'utilitaire « PAP/CAR Tools » et du SIG, pour l'évaluation des tendances et des facteurs causaux de l'érosion hydrique, cas du bassin versant de l'Oued Sahla. *International Conference of GIS-Users*. 421-424.
- Mesrar H., Sadiki A., Faleh A., Chaaouan J. (2013).** Automatisation de la procédure de modélisation des directives PAP/CAR, par utilisation de l'utilitaire "PAP/CAR Tools" et du SIG, pour l'évaluation des tendances et des facteurs causaux de l'érosion hydrique, Cas du bassin versant de l'Oued Sahla. ResearchGate.
- Mesrar H., Sadiki A., Navas A., Faleh A., Quijan L., Chaaouan J. (2014).** Modélisation de l'érosion hydrique et étude des facteurs causaux « cas de l'oued Sahla, Maroc ». Colloque sur le Système National d'Information d'Eau – NWIS'14 Proceeding Of SAWIS - ISSN : 2351-9096 - N °01.
- Michard A. (1976).** Eléments De Géologie Marocaine, Notes Et Memoires Du Service Geologique N° 252, Editions Du Service Geologique Du Maroc Rabat.

- Mokhtari N. (2016).** Etude de la dynamique de la désertification dans le bassin versant de la Moulouya en intégrant les données issues de la télédétection et les données socio-économiques. Thèse de doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Université de Liège – Gembloux AGRO-BIO TECH. 326 p.
- Mokhtari N., Mrabet R., Lebailly P., Bock L. (2013).** Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* (2014) 2 (1). 50-66.
- Morel A. (2002).** Stratégies des sociétés face aux problèmes d'érosion, en milieux montagnards méditerranéens. *Bull. Réseau Érosion*, 21. 21- 32.
- Morsli B., Halitim A., Mazour M. (2006).** Érosion et effet des techniques culturales sur les versants semi-arides de l'Algérie cas des monts de Beni Chougrane. Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. Actes de la session VII organisée par le Réseau E-GCES de l'AUF au sein de la conférence ISCO de Marrakech (Maroc), du 14 au 19 mai 2006. 199-203.
- Moukhchane M. (2002).** Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin versant du Nakhla (Rif Occidental, Maroc). *Bulletin du RESEAU EROSION* 21. 255-266.
- Mouliéras A. (1899).** Le Maroc inconnu étude géographique et sociologique, deuxième partie : exploration des DJBALA (Maroc septentrional). Editions Augusting Challamel. Paris. 814 p
- Naimi M., Bagdad B. (2002).** Aménagements traditionnels dans une vallée du Haut Atlas occidental. *Bull. Réseau Érosion*, 21. 82-93.
- Naimi M., Tayaa M., Ouzizi S., Choukr-Ilah R, Kerby M. (2002).** Estimation du ravinement dans le bassin versant du Nakhla, Rif occidental, Maroc. *Bull. Réseau Érosion*, 21. 232-243.
- Nejjari A. (2002).** La sécheresse, l'Eau et l'Homme dans le bassin versant du Haut Sebou (Moyen Atlas Septentrional - Maroc). Thèse de Doctorat en géographie, Université de Metz, 304 p.

- Nejjari A., Gille E., Francois D. (2000).** Les longues chroniques pluviométriques et la caractérisation de la sécheresse récente au Nord du Moyen Atlas (Maroc). *Mosella*, T.XXV, n° 3-4. 37-53.
- Noufé D., Lidon B., Mahé G., Servat E., Yao T-B., Zueli K-B., Chaléard J-L. (2011).** Variabilité climatique et production de maïs en culture pluviale dans l'est Ivoirien. *Hydrological Sciences Journal*, 56 :1. 152-167.
- Ouallali A., Moukhchane M., Aassoumi H., Berrad F et Ibrahim 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. 77-88.
- Ouallali A., Spalevic V., Aassoumi H., Moukhchane M et Berrad F. (2016).** The Assessment of the Soil Erosion Intensity and Runoff in the River basin of Arbaa Ayacha, Western Rif. Morocco, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 6, Issue 11. 111-118.
- Panagos P., Ballabio C., Meusburger K., Spinoni J., Alewell C., Borrelli P. (2017).** Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology* 548. 251–262.
- PAP/CAR. (1998).** Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO. 1998. p : xii - 72.
- Parveen R., Kumar U. (2012).** Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. *Journal of Geographic Information System*, 4. Pp. 588-596.
- Perrin G., Rapinel S., Hubert-Moy b L., Bioret F. (2020).** Bioclimatic dataset of Metropolitan France under current conditions derived from the WorldClim model. *Data in Brief*, 105815. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105815>.

- Pique A. (1994).** Géologie du Maroc : les domaines régionaux et leur évolution structurale, Imprimerie El Maarif Al Jadida – Rabat.
- Pique A. (1994).** Géologie du Maroc ; les domaines régionaux et leur évolution structurale (éd. Pumag.
- Plaiklang S., Sutthivanich I., Sritarapipat, T., Panurak K., Ogawa S., Charungthanakij S., Maneewan U., Thongrueang N. (2020).** Desertification assessment using MEDALUS model in Upper LamchiengkraI watershed, Thailand. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B3-2020, XXIV ISPRS Congress.
- Plan d'Aménagement Antiérosif du Bassin Versant de l'Oued Ouergha en amont du barrage al Wahda. 1ère phase. (1995).** Analyse de la situation actuelle, rapport de synthèse.
- Plan d'Aménagement Antiérosif du Bassin Versant de l'Oued Ouergha en amont du barrage al Wahda. 2ème phase. (1995).** Programme des interventions, rapport principal.
- PNUE., PAM., PAP. (2005)** Application des Directives CAR/PAP pour la formulation d'un programme de gestion de contrôle de l'érosion et de la désertification Cas du bassin versant de Beni Boufrah, Maroc.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C. (2003).** Gully erosion and environmental change: importance and research needs. CATENA 50. 91–133.
- Prăvălie, R., Patriche, C., Săvulescu, I., Sîrodoev, I., Bandoc, G., and Sfîcă, L., 2020.** Spatial assessment of land sensitivity to degradation across Romania. A quantitative approach based on the modified MEDALUS methodology. Catena 187,104407.
- Programme de développement intégrer des provinces de Taounate, Alhoceima, Chefchaouen, Tetouan et Larache 2009-2011.**

- Qadem A. (2015).** Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc). Thèse de Doctorat. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah et université de Lorraine, 358 p.
- Raïssouni A., Khali Issa L., Amrani L., Moussadek R., Maatouk M. et El Arrim A. (2012).** Evaluation de l'aléa d'érosion hydrique au niveau du bassin versant de l'oued Mgaz Es-Sebt (Rif Nord occidental, Maroc). International Conference of GIS-Users, Taza GIS-Days, May 23-24. 643-645.
- Raïssouni A., Khali Issa L., Moussadek R., Mrabet R., El Arrim A. (2011).** Érosion hydrique et transferts des matières vers les zones côtières méditerranéennes. Cas du bassin de l'oued Khmiss (Rif nord occidental. Maroc). Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime edition 2, Tanger, Maroc. 379-384.
- Rebai H., Raclot D., Ben Ouezdou H. (2013).** Efficacité des aménagements de lutte contre le ravinement : cas du bassin versant d'El Hnach (Tunisie). Hydrological Sciences Journal, 58 :7, 1532-1541, DOI : 10.1080/02626667.2013.824087.
- Rey F. Ballais J-L. Marre A., Rovéra G. (2004).** Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. C. R. Geoscience 336. 991–998.
- Rodríguez-Juan J-E., Sbaï A., El Harradji A. (2015).** Techniques de conservation des eaux et des sols au niveau du bassin versant de Mestferki (Chaîne de Jerada, Nord-Est du Maroc). Scientific Association for Water Information Systems Journal of SAWIS, ISSN: 2351-9096 Volume – 2015 - N° 01.
- Roose E. (1999).** Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive. Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols : (GCES). Bulletin réseau érosion 19. 11-25.
- Roose E. (2010).** La dégradation des terres et l'érosion des sols. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. Editions institut de recherche pour le développement (IRD) Marseille.

- Roose E. (1994).** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bull. Pédol. de la FAO, n°70. 420 p.
- Roose E. (2002).** Banquettes mécaniques et techniques traditionnelles de GCES en zone semi-aride de Tunisie. Bull. Réseau Érosion, 21. 130-154
- Roose E., De Noni G. (2004).** La Gestion Conservatoire de l'Eau et de la fertilité des Sols (GCES), une stratégie nouvelle pour faire face à un double défi du 21ème siècle : la pression démographique et l'environnement rurale. Bull. Réseau Érosion, 23. 10-27.
- Roose E., Sabir M. (2002).** Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans le bassin méditerranéen : classification en vue d'un usage renouvelé. Bull. Réseau Érosion, 21 : 33-44.
- Roose E., Sabir M., Laouina A. (2010).** Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc, Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. Ed, institut de recherche pour le développement (IRD), Marseille. 355p.
- Sabir M. (1986).** L'érosion hydrique et sa quantification. Mémoire de DEA, ressource en eau et aménagement. Université de Paris XI département d'hydrologie et de géochimie isotopique. Institut Français de recherche scientifique pour le développement en coopération.
- Sabir M. (2002).** Quelques techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosive dans le bassin versant de Sidi Driss, Haut Atlas Central, Maroc. Bull. Réseau Érosion, 21. 224-231.
- Sabir M., Boudeur B. (1999).** Evaluation de l'efficacité physique et socioéconomique de la DRS fruitière sur versants marneux du pré-rif, commune d'Oulad Daoud, Maroc. Bulletin réseau érosion N° 19. 297-310.
- Sabir M., Maddi M., Naouri A., Barthès B., Roose E. (2002).** Runoff and erosion risks indicators on the main soils of the Mediterranean mountains of occidental Rif (Morocco). Proceedings of the ISCO XII. 370–375.

- Sabir M., Roose E., Al Karkouri J. (2010).** Les techniques traditionnelles de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc, Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. Ed, institut de recherche pour le développement (IRD). 355p.
- Sabir M., Roose E., Al Karkouri J. (2010).** Les techniques traditionnelles de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. IRD éditions, institut de recherche pour le développement.
- Sabir M., Roose E., Machouri N., Naouri A. (2002)** Gestion paysanne des ressources naturelles dans deux terroirs des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). Bull. Réseau Érosion, 21. 414-428.
- Sabir M., Roose E., Merzouk A., Nouri A. (1999).** Techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosive dans deux terroirs du Rif occidental (Maroc). Bulletin réseau érosion N° 19. Volume 1. 456-471.
- Sadiki A. (2005).** Estimation de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Maroc nord oriental : Application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope ^{137}Cs et de la susceptibilité magnétique, Thèse de doctorat, Université Mohammed Premier faculté des sciences Oujda. 287p.
- Sadiki A., Faleh A., Zêzere J-L., Mastas H. (2009).** Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif central Maroc, cahiers géographique-n° 6. 59. 70.
- Sadiki A., Mesrar H., Faleh A et Chaaouan J. (2012).** Modélisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique : cas du bassin versant de l'oued Larbaa, Maroc. Papeles de Geografía, 55-56, pp. 179-188.
- Seghir A., Mazoz L., Janati Idrissi A. (2019).** Cartographie des sols dans la zone méridionale de la plaine de tafrata (Maroc) et évaluation de leur sensibilité à la désertification. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. 7 (2). 371-378.

- Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F., Achab M., Tahiri A., EL Hadi H. (2017).** Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation à partir de modèles empiriques dans le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre, 2017, n° 39. 87-101.
- Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F., Tahiri A., El Hadi H. (2014),** Evaluation et Quantification de l'Erosion et la Sédimentation à Partir des Modèles RUSLE, MUSLE et Déposition Intégrés dans un SIG. Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc), European Journal of Scientific Research, Vol. 125 No 2. 157-178
- Tahiri M., Tabyaoui M., Tahiri A., El Hadi H., El Hammichi F et Achab M. (2016).** Modelling Soil Erosion and Sedimentation in the Oued Haricha Sub-Basin (Tahaddart Watershed, Western Rif, Morocco): Risk Assessment. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2016, 4, 107-119
- Tahouri J., Abdelhamid Sadiki A., Karrat L., Carl Johnson V., weng Chan N., Zhang Fei Z., Te Kung H. (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. 254-272.
- Torri D., Colica A., Rockwell D. (1994).** Preliminary study of the erosion mechanisms in biancana badland (Tuscany, Italy). CATENA, 23. 281–294.
- Trabaud L. (1996).** Effects of fire frequency on plant communities and landscape pattern in the Massif des Aspres (Southern France). Landscape Ecology, 11. 215-224.
- Tribak A. (1998).** Fonctionnement actuel d'une ravine d'érosion dans une zone de marnes miocènes (région de Tarmast, Prérif oriental, Maroc) Modèle d'évolution et distribution saisonnière des processus. Revue de Géographie Alpine. 86.3. 37-46.
- Tribak A. (2000).** L'érosion hydrique en moyenne montagne du Prérif oriental (Maroc) ; Etude des agents et des processus d'érosion dans une zone de marnes tertiaires. Thèse Doctorat d'état, Univ. Choib Doukali, El Jadida, Maroc. 350 p.

- Tribak A. (2002).** Stratégies et techniques de lutte antiérosive dans les montagnes du Pré rif Oriental (Maroc). Bulletin réseau érosion 21. 45-55.
- Tribak A. (2006).** Genèse et évolution de glissement complexes dans les séries marneuses pré-rifaines : cas du bassin de l'oued Tarmast (Maroc), revue Géomaghreb, n°3. 13-22.
- Tribak A., Arari K., Abahrour M., El Garouani A., Amhani Z. (2015).** Quantitative assessment of the hydric erosion and the deposition in a marly catchment of the eastern Rif (Case of Wadi Tarmast - Morocco), Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series Tome 15 Issues 2. 101-111.
- Tribak A., El Garouani A., Abahrour M. (2009).** Evaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du Pré'Rif oriental (Maroc) : cas du sous-bassin de l'oued Tlata. Revue sécheresse 2009 ; 20 (4). 333-7.
- Tribak A., El Garouani A., Abahrour M. (2012).** L'érosion hydrique dans les séries marneuses tertiaires du Pré-rif Oriental : agents, processus et évaluation quantitative. Revu. Mar. Sci. Agron. Vét. (2012) 1. 47-52.
- UNEP. (1994).** United Nations conventions to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa, Geneva, Switzerland.
- Uzuner Ç., Dengiz O. (2020).** Desertification risk assessment in Turkey based on environmentally sensitive areas. Ecological Indicators 114 (2020) 106295. 1 -12.
- Vieira R-M-S-P., Tomasella J., Alvalá R-C-S., Sestini M-F., Affonso A-G., Rodriguez D-A., et al. (2015).** Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. Solid Earth, (6). 347-360.
- Zachard D. (1982).** Soil Erosion, developments in soil science 10, Elsevier science Publishins Company. 547 p.
- Zahnoun, A et Al Karkouri, J., 2020.** Estimation & Cartography the Water Erosion by Integration STN G BHBBBBBHBBHBof the Gavrilovic "EPM" Model using a GIS in the Mediterranean

Watershed: Oued Tleta (Western Rif, Morocco). European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X / 1450-202X Vol. 155 No 3.265 -278.

Zakerinejad R., Masoudi M. (2019). Quantitative mapping of desertification risk using the modified MEDALUS model: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. AUC Geographica 54(2). 232–239. <https://doi.org/10.14712/23361980.2019.20>.

Zouagui A., Benmansour M., Amenzou N., Nouira A., Sabir M., Benjelloun H., Marah H., Benkadam A. (2012). Application de la technique de ^{137}Cs à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Moulay Bouchta, Rif occidental, Maroc. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. (2012) 1. 53-5.

أبهرو محمد (2009). إسهام التقييم الكمي للتعرية المائية بمقدمة الريف الشرقي) نموذج حوض واد الثلاثاء)، أطروحة لنيل الدكتوراه في الجغرافية، كلية الآداب والعلوم الإنسانية سايس-فاس، 291ص.

بوطلاق محمد (2019). الهشاشة البيئية بحوض ورغة وتزايد حدة الأخطار الطبيعية في ظل التقلبات المناخية، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه في الجغرافيا الطبيعية، جامعة سيدي محمد بن عبد الله، كلية الآداب والعلوم الإنسانية سايس - فاس، مختبر الدراسات الجيوبئية والتهئية، 421 ص.

بوطلاق محمد، بنبراهيم يوسف، شعوان جمال ويزمي زطايط محمد (2021). خطر الجفاف ومؤشرات الهشاشة الطبيعية بحوض أمزاز وفق تطبيق مقارنة (MEDALUS) (الريف الأوسط). Revue Espace Géographique. DOI: <https://doi.org/10.34874/IMIST.PRSM/EGSM/26407>. et Société Marocaine n° 49. 177-169.

شعوان جمال، (2015). توظيف الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في دراسة التعرية المائية بالريف الأوسط حوض أمزاز-أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه في الجغرافية، كلية الآداب والعلوم الإنسانية سايس-فاس.

شعوان جمال، فالح علي، الصديقي عبد الحميد ومسرار هيثم (2013). توظيف الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية في التقييم الكمي للتعرية المائية بحوض واد أمزاز (الريف الأوسط) من خلال نموذج جافريلوفيك، مجلة جغرافية المغرب، مجلد 28 عدد 1-2. 91-73.

ضايف حسن وأمياي محمد (2008). الحمولة البشرية جنوب الريف الأوسط، الخصائص والتطور، مجلة جغرافية المغرب عدد ، 1-2 منشورات الجمعية الوطنية للجغرافيين المغاربة كلية الآداب والعلوم الإنسانية الرباط.

فالح علي (2004). التقييم النوعي والكمي والنمذجة المبالية للتعرية المائية بحوض أكنول ومركات (مقدمة الريف الشرقي والأوسط)، أطروحة لنيل دكتوراه الدولة، كلية الآداب والعلوم الإنسانية وجدة.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

Liste des figures

Figure 1 . Situation de la zone d'étude	20
Figure 2. Les unités structurales.....	22
Figure 3. Coupe géologique de la partie nord de la zone d'étude de direction nord sud-est (carte géologique de Dhar Souk 1/50000)	23
Figure 4. Les formations lithologiques de la zone d'étude (carte géologique Dhar Souk 1/50000)	24
Figure 5. Répartition des formations lithologiques dans le Haut Ouergha	25
Figure 6. Les formations pédologiques de la zone d'étude (la carte pédologique de Taounate 1/50000, en 1994)	27
Figure 7. Répartition des types des sols en fonction de la superficie.....	28
Figure 8. Répartition des tranches d'altitude dans le Haut Ouergha (MNT 30 m).....	29
Figure 9. Profile topographique dans la partie nord de la zone d'étude.....	30
Figure 10. Profile topographique dans la partie médiane de la zone d'étude	30
Figure 11. Profile topographique dans la partie sud de la zone d'étude	30
Figure 12. Répartition des classes de pente en fonction de la superficie en % dans la zone d'étude	31
Figure 13. Répartition des classes de pente dans la zone d'étude (MNT résolution 30 m)	32
Figure 14. Répartition d'exposition des versants dans le Haut Ouergha	33
Figure 15. Répartition de l'exposition des versants dans la zone d'étude (MNT à résolution de 30 m).....	34
Figure 16. Réseaux hydrographiques de la zone d'étude.....	36
Figure 17. Répartition des précipitations moyennes annuelles dans la zone d'étude.....	38
Figure 18. Variation des précipitations annuelles entre 1957 et 2018 la station de Bab Ouender (ABHS).....	39
Figure 19. Écart à la moyenne des précipitations annuelles entre 1957 et 2018 pour la station Bab Ouender.....	40

Figure 20. Variation saisonnière des précipitations (station Bab Ouender 1957-2018)	41
Figure 21. Variation des précipitations saisonnières d'une année à l'autre dans la station Bab Ouender (1957 – 2018)	41
Figure 22. Moyennes mensuelles des précipitations (station Bab Ouender 1957-2018).....	42
Figure 23. Indice pluviométrique de la station Bab Ouender.....	43
Figure 24. CUSUM de la station de Bab Ouender.....	44
Figure 25. Température moyenne (WorldClim Database Version 2.1, 1970-2000).....	47
Figure 26. Température maximale en °C (WorldClim Database Version 2.1, 1970-2000)	48
Figure 27. Température minimale en °C (WorldClim Database Version 2.1, 1970-2000).....	49
Figure 28. Température saisonnière dans la zone d'étude (WorldClim, 1970-2000)	50
Figure 29. Répartition des habitats par densité des noyaux.....	52
Figure 30. Répartition des habitats dans le Haut Ouergha (images Google Earth 2018)	53
Figure 31. Nombre des populations par douars selon le recensement de 1994 (HCP).....	54
Figure 32. Nombre des populations par douars selon le recensement de 2004	55
Figure 33. Nombre des populations par douars selon le recensement de 2014	56
Figure 34. Taux de croissance annuel moyen (TAAM) des populations (recensements 1994, 2004 et 2014).....	57
Figure 35. Types d'occupation du sol dans le Haut Ouergha (images Google Earth 2018).....	58
Figure 36. Répartition des types d'occupation du sol.....	59
Figure 37. La dynamique de la forêt jbel Erzinyia entre 1985 et 2018	61
Figure 38. Occupation du sol en 1985 (image satellite Landsat 5, 04/12/1985)	61
Figure 39. Occupation du sol en 2000 (image satellite Landsat 5,13/12/2000)	62
Figure 40. Occupation du sol en 2018 (image satellite Landsat 8, 15/12/2018)	62
Figure 41. L'extension des zones irriguées dans la plaine d'Ouergha en 1985 (image satellite Landsat 5, 14/08/1985)	64
Figure 42. L'extension des zones irriguées dans la plaine d'Ouergha en 2000 (image satellite Landsat 5, 07/08/2000)	65

Figure 43. L'extension des zones irriguées dans la plaine d'Ouergha en 2018 (image satellite Landsat 8, 09/08/2018)	65
Figure 44. Répartition des formes d'érosion dans la zone d'étude	70
Figure 45. Spatialisation des formes d'érosion dans le secteur d'étude	71
Figure 46. Répartition de l'érosion en nappe selon le type d'occupation des sols	73
Figure 47. Répartition de l'érosion en nappe selon les formations lithologiques	73
Figure 48. Répartition de l'érosion en nappe selon les classes de pentes	74
Figure 49. Répartition de l'érosion en rigole selon les types d'occupation des sols	75
Figure 50. Répartition de l'érosion en rigole selon les classes de pente	76
Figure 51. Répartition de l'érosion en rigole et griffe selon les formations lithologiques	77
Figure 52. Répartition de l'érosion en ravin selon l'occupation des sols	78
Figure 53. Répartition de l'érosion en ravin selon les formations lithologiques	78
Figure 54. Répartition de l'érosion en ravin selon la pente	79
Figure 55. Ravinement généralisé (bad lands) dans la zone d'étude (image Google Earth + travail du terrain)	80
Figure 56. Répartition des bad lands selon les formations lithologiques	80
Figure 57. Répartition des bad lands selon la pente	81
Figure 58. Répartition des bad lands selon l'occupation des sols	81
Figure 59. Répartition des glissements selon les formations lithologiques	83
Figure 60. Répartition des glissements selon l'occupation des sols	83
Figure 61. Répartition des glissements selon les classes de pente	83
Figure 62. Les glissements au niveau de Douar Jamaa Delem (El-Bouhali, 2016)	84
Figure 63. Schéma méthodologique de la méthode PAP/CAR	116
Figure 64. Répartition des pentes dans le Haut Ouergha selon la classification de PAP/CAR (MNT, ASTER GDEM résolution 30 m)	118
Figure 65. Répartition des classes de pentes en fonction de la superficie en %	119
Figure 66. Répartition des classes de lithofaciès en fonction de la superficie en %	119

Figure 67. Carte des lithofaciès selon la classification de PAP/CAR (carte géologique de Dhar Souk 1/50000).....	120
Figure 68. Carte d'érodibilité selon la classification de PAP/CAR	122
Figure 69. Répartition des classes d'érodibilité en fonction de la superficie en %	123
Figure 70. Carte d'occupation des sols selon la classification de PAP/CAR.....	124
Figure 71. Répartition des classes d'occupation des sols en fonction de la superficie %.....	125
Figure 72. Carte de taux de recouvrement selon la classification de PAP/CAR (image satellite Landsat 8 le 29/11/2018).....	126
Figure 73. Taux de recouvrement en fonction de la superficie en %	127
Figure 74. Carte de protection des sols.....	128
Figure 75. Classes de protection des sols en fonction de surface en %.....	129
Figure 78. Schéma méthodologique du modèle EPM	130
Figure 76. Répartition des classes des états érosifs selon l'approche PAP/CAR.....	132
Figure 77. Répartition des classes des états érosifs selon la classification PAP/CAR	133
Figure 79. Sensibilité des formations lithologiques à l'érosion.....	134
Figure 80. Sensibilité des formations lithologiques à l'érosion selon la classification de Gavrilovic (source : carte géologique de Dhar Souk 1/50000)	135
Figure 81. Carte des pentes selon la méthode « EPM » (MNT résolution 30 m).....	136
Figure 82. Classes de protection de couvert végétal selon la méthode EPM.....	137
Figure 83. Carte de protection de couvert végétal selon la méthode « EPM ».....	138
Figure 84. Carte d'états érosifs la méthode EPM.....	139
Figure 85. Carte d'érosion potentielle selon la méthode EPM.....	140
Figure 86. Carte de la température selon « EPM » (images Landsat TM4-5)	142
Figure 87. Carte des précipitations moyennes annuelles dans le Haut Ouergha.....	143
Figure 88. Carte des pertes en sol ($m^3/km^2/an$) selon le modèle EPM	145
Figure 89. Répartition annuelle des pertes en sol en $m^3/km^2/an$	146
Figure 90. Schéma méthodologique de l'approche MEDALUS.....	155

Figure 91. Risque d'incendie selon l'approche MEDALUS	157
Figure 92. Carte de protection contre l'érosion selon l'approche MEDALUS.....	159
Figure 93. Carte de la résistance à la sécheresse selon l'approche MEDALUS.....	161
Figure 94. Taux de recouvrement des sols (image satellite OLI, 29/11/2018).....	163
Figure 95. Répartition de l'indice de qualité de végétation dans la zone d'étude	164
Figure 96. Indice de la qualité de la végétation	165
Figure 97. Érodibilité des matériaux parentaux.....	167
Figure 98. Texture des sols (carte pédologique de Taounate 1/50000)	170
Figure 99. Profondeur des sols dans le de Haut Ouergha (carte pédologique de Taounate 1/50000)	172
Figure 100. Répartition des pentes dans l'aire d'étude.....	174
Figure 101. Indice de qualité des sols (IQS) selon l'approche MEDALUS	175
Figure 102. Indice de qualité des sols (IQS).....	176
Figure 103. Exposition des versants dans la zone d'étude	178
Figure 104. Répartition des précipitations moyennes annuelles dans le Haut Ouergha	179
Figure 105. Climagramme pluviothermique d'Emberger pour le Haut Ouergha	181
Figure 106. Étage bioclimatique selon l'indice d'Emberger	182
Figure 107. Indice de qualité du climat selon l'approche MEDALUS.....	184
Figure 108. Indice de qualité du climat (IQC) selon l'approche MEDALUS.....	185
Figure 109. Intensité d'utilisation des sols dans le Haut Ouergha.....	187
Figure 110. Qualité de politique d'aménagement	189
Figure 111. Indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA).....	191
Figure 112. Indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres	192
Figure 114. Indice de sensibilité à la désertification selon l'approche MEDALUS	193
Figure 113. Classes de l'indice de sensibilité à la désertification	194
Figure 115. Situation d'Ain Echibrik en 1962 (photo aérienne 1962).....	208
Figure 116. Situation d'Ain Echibrik en 2020 (image Google Earth 2020)	208

Figure 117. Situation de Jerf en 1962 avant le reboisement (photo aérienne 1962).....	214
Figure 118. Situation de la forêt Jerf en 2020 après le reboisement (image Google Earth 2020)	215

Liste des tableaux

Tableau 1. Données climatiques disponibles dans les stations qui entourent le Haut Ouergha ...	39
Tableau 2. Résultats de la segmentation d'Hubert des précipitations annuelles de la station de Bab Ouender (1957-2017)	45
Tableau 3. Caractéristiques morphologiques du ravin de Khandak Zeyaten	90
Tableau 4. Évolution de la profondeur des rives du ravin de Khandak Zeyaten entre 2018 et 2021	91
Tableau 5. Caractéristiques morphologiques du ravin de Jeref	91
Tableau 6. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Jeref entre 2018 et 2021	92
Tableau 7. Caractéristiques morphologiques du ravin d'Ain Chibrik.....	94
Tableau 8. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin d'Ain Chibrik entre 2018 et 2021	94
Tableau 9. Caractéristiques morphologiques du ravin d'Ech-Chetba	95
Tableau 10. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin d'Ech-Chetba entre 2018 et 2021	96
Tableau 11. Caractéristiques morphologiques du ravin de Redem	97
Tableau 12. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Redem entre 2018 et 2021	97
Tableau 13. Caractéristiques morphologiques du ravin de Bab Selam.....	98
Tableau 14. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Bab Selam entre 2019 et 2021	99
Tableau 15. Évolution de la profondeur des deux rives du ravin de Dahir entre 2019 et 2021	100
Tableau 16. Caractéristiques morphologiques du ravin Dahir	100
Tableau 17. Caractéristiques morphologiques du ravin d'oued Derdar.....	102
Tableau 18. Caractéristiques morphologiques du ravin de Koudiya Louza	103
Tableau 19. Résultats de l'évaluation quantitative de l'érosion dans les bassins Rifains de 1995 à 2016	114

Tableau 20. Résultats de l'évaluation qualitative de l'érosion dans les bassins Rifains de 2003 à 2016.....	114
Tableau 21. Classes de pentes selon (PAP/CAR 1998)	117
Tableau 22. Classes de lithofaciès (PAP/CAR 1998)	119
Tableau 23. Matrice de superposition de la carte des pentes et la carte de Lithofaciès (PAP/CAR. 1998).....	121
Tableau 24. Classes d'occupation du sol (PAP/CAR. 1998)	125
Tableau 25. Matrice occupation du sol vs. Couvert végétal (PAP/CAR. 1998)	129
Tableau 26. Matrice de degré de protection des sols vs. Degré d'érodibilité (PAP/CAR. 1998)	131
Tableau 27. Répartition des taux d'érosion en fonction de la superficie selon la classification de Zachard (1982).....	144
Tableau 28. Matrice de corrélation entre les facteurs d'érosion et les pertes en sol.....	147
Tableau 29. La comparaison des résultats d'application de la méthode PAP/CAR et EPM avec le terrain	148
Tableau 30. Limites d'application de l'approche PAP/CAR au Maroc.....	149
Tableau 31. Contraintes d'application de modèle EPM au Maroc.....	150
Tableau 32. Les classes de risque d'incendie selon l'approche MEDALUS.....	156
Tableau 33. Classes du risque d'incendie dans la zone d'étude	158
Tableau 34. Classes de protection contre l'érosion selon l'approche MEDALUS.....	158
Tableau 35. Classes de protection contre l'érosion.....	160
Tableau 36. Classification de la résistance à la sécheresse selon l'approche MEDALUS.....	160
Tableau 37. Classes de la résistance à la sécheresse	162
Tableau 38. Classes de recouvrement des sols dans la zone d'étude.....	164
Tableau 39. Indice de qualité de végétation selon l'approche MEDALUS	164
Tableau 40. Normes de matériaux parentaux (Moukhtari, 2016).....	168
Tableau 41. Classes de matériau parental	168
Tableau 42. Norme de texture des sols selon l'approche MEDALUS	169

Tableau 43. Classes de texture des sols selon l'approche MEDALUS.....	169
Tableau 44. Normes de classification de la profondeur du sol selon l'approche MEDALUS	171
Tableau 45. Profondeur des sols dans le Haut Ouergha.....	171
Tableau 46. Classes et la description de pente selon L'approche MEDALUS (Kosmas et al., 1999)	173
Tableau 47. Répartition des classes de pente dans la zone d'étude.....	173
Tableau 48. Classification de l'indice de la qualité des sols (IQS) selon l'approche MEDALUS .	176
Tableau 49. Exposition des versants dans la zone d'étude selon l'approche MEDALUS	177
Tableau 50. Classes des précipitations moyennes annuelles dans le Haut Ouergha	180
Tableau 51. Indice bioclimatique d'Emberger selon les stations (source : climate-data.org).....	183
Tableau 52. Étages bioclimatiques dans la zone d'étude selon l'indice d'Emberger	183
Tableau 53. Classification de l'indice de qualité du climat (IQC) selon l'approche MEDALUS..	183
Tableau 54. Classes et description de l'intensité d'utilisation des terres selon l'approche MEDALUS	186
Tableau 55. Les classes de l'intensité d'utilisation des terres.....	188
Tableau 56. Classes et description de la qualité de politique d'aménagement selon l'approche MEDALUS.....	188
Tableau 57. Classes de la qualité de politique d'aménagement	188
Tableau 58. Classes de l'indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA) selon l'approche MEDALUS.....	190
Tableau 59. Classification de l'indice de sensibilité à la désertification (ISD).....	192
Tableau 60. Les communes concernées par le PDI dans la province de Taounate (PDI 2009-2011)	213

Liste des photos

Photos 1 et 2. Mesure des ravins sur le terrain	14
Photo 3. La différence entre les versants d'exposition nord et sud de la zone d'étude	33
Photo 4. Défrichement de la forêt de jbel Erzinyia, situation 2019	62
Photo 5. Extension de la cannabiculture dans la plaine alluviale d'oued Ouergha	63
Photos 6 et 7. L'utilisation des motopompes en gaze à l'irrigation du cannabis	65
Photo 8. Érosion en nappe et formation de croûte de la battance sous l'effet des gouttes de pluie	72
Photo 9. Érosion en griffes	75
Photo 10. Sapement de la rive droite d'oued Ouergha	81
Photo 11. Sapement de la rive droite d'oued Boumlal	81
Photos 12 et 13. Coulée de boue sur les marnes grises (douar Jamaa Dlem	84
Photo 14. Glissement pelliculaire dans la partie médiane de la zone d'étude	85
Photo 15. Eboulement de gravité dans la partie sud au niveau du douar Tamedghas	86
Photo 16. Phénomène de suffosion en bas du ravin de Khandak Zeyaten	88
Photos 17. Ravin de Khandak Zeyaten. (a) situation du ravin en 2018 (b) situation du ravin en 2021.....	89
Photo 18. Situation de ravin Jeref en deux périodes de mesures : a (2018) et b (2021)	91
Photo 19. Ravin d'Ain Chibrik. (a) Situation du ravin en 2018. (b) situation du ravin en 2021.....	92
Photo 20. Ravin Ech-Chetba. (a) situation du ravin en 2018. (b) situation du ravin en 2021.....	94
Photos 21. Ravin de Redem. (a) situation du ravin en 2018. (b) situation du ravin en 2021.....	95

Photo 22. Ravin de Bab Selam. (a) situation du ravin en 2019. (b) situation du ravin en 2021	97
Photo 23. Ravin de Dahir. (a) situation du ravin en 2019. (b) situation du ravin en 2021	99
Photo 24. Ravin d'oued Derdar. (a) situation du ravin en 2019. (b) colmatage total du ravin en 2021 par un glissement boueux	100
Photo 25. Ravin de Koudiya Louza en 13 mars 2021	102
Photo 26. Terrasses irriguées dans le douar Oulad Bouslama	199
Photo 27. Versant aménagé en terrasses (douar Jamaa Dlem)	200
Photo 28. cordons en pierres sèches sur un versant de forte pente (douar Ras Lhjar).....	201
Photo 29. Talus en terre alignés selon les courbes de niveau (douar Bab Selam)	202
Photo 30. Ravin végétalisé par différentes espèces végétales	203
Photo 31. Alignements d'agaves dans le douar Jamaa Dlem	204
Photo 32. Amandiers renforcés par des cordons en pierres sèches (Douar Oulad Bou Slama)....	208
Photo 33 : Madgen à douar Oulad Hamza (avril 2016)	209
Photo 34 : madgen à douar Jamaa Dlem (avril 2016)	209
Photo 35. Bassin en béton désigné à l'irrigation (douar Olad Erhza)	209
Photo 36. Cuvette en demi-lune dans le douar Jamaa Dlem	210
Photo 37. Forêt Jerf en 2021	213
Photos 38. Seuils en gabions dans le cadre d'aménagement de la route régionale 510.....	214

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Dédicace.....	1
Remerciement	2
Abréviations	3
Résumé.....	5
Abstract.....	6
ملخص.....	7
Introduction générale.....	9
1. Structure de la thèse.....	10
2. Problématique	11
3. Les objectifs.....	12
4. Méthodologie.....	13
4. 1. Bibliographie et collecte des données	13
4. 2. Le travail du terrain	14
4. 3. Traitement des données.....	15
CHAPITRE 1	18
CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA DYNAMIQUE DES MILIEUX DANS LE HAUT OUERGHA.....	18
Introduction.....	19
1. la zone d'étude	19
2. Contexte physique de la zone d'étude	20
2.1. Contexte géologique.....	20
2.1.1. Contexte structural de la zone d'étude	20
2.1.2. Les formations lithologiques.....	23

2.2. Les sols	25
2.3. Les caractéristiques topographiques	28
2.3.1. Unités topographiques.....	28
2.3.2. Les pentes	31
2.3. 3. Exposition des versants	32
2.4. Caractéristiques hydrologiques.....	35
2.5. Cadre climatique.....	35
2.5.1. Précipitations	36
2.5.1.1. La répartition spatiale des précipitations	37
2.5.1.2. Variation annuelle des précipitations	37
2.5.1.3. Précipitation saisonnière.....	40
2.5.1.4. Variation mensuelle des précipitations.....	42
2.5.1.5. Tendances climatiques.....	42
A. L'indice pluviométrique de Nicholson.....	42
B. Méthode du CUSUM.....	44
2.5.2. La température.....	45
2.5.2.1. Spatialisation de la température annuelle.....	46
2.5. 2.2. Variation saisonnière de la température	46
3- Facteur anthropique	50
3.1. Densité humaine et croissance démographique.....	51
3.2. Occupation du sol.....	57
3.3. La dynamique d'occupation des sols dans la zone d'étude	60
3.3.1. La dynamique des forêts.....	60

3.3.2. La dynamique des surfaces irriguées dans la plaine alluviale de l'oued Ouergha.....	63
Conclusion	66
CHAPITRE 2	68
SUIVI ET SPATIALISATION DE LA DYNAMIQUE DES VERSANTS DANS LE HAUT OUERGHA...	68
Introduction.....	69
I- La spatialisation des formes d'érosion dans le Haut Ouergha	69
1. L'érosion en nappe est le stade initial de l'érosion hydrique	72
2. L'érosion linéaire (Rill Erosion).....	74
2-1 Érosion en rigoles et griffes.....	75
2.2. Érosion en ravine	77
3. ravinement généralisé (Bad land)	79
4. Érosion par sapement des berges.....	81
5. Les glissements	82
5. 1. Les glissements rotationnels.....	84
5.2. Glissements boueux (muldslides)	85
5.3. Les glissements pelliculaires	85
6. Les éboulis de gravité.....	86
II- l'évolution de la dynamique des ravins dans le Haut Ouergha : mesure et processus	87
1. Dynamique des ravins par l'érosion régressive (recule de tête du ravin)	88
2. Dynamique des ravins par un affouillement des berges	91
2.1. Site de mesure forêt Jeref.....	91
2. 2. Site de mesure d'Ain Chibrik	93
2. 3. Site de mesure de Ech-Chetba	94

2. 4. Site de mesure de Redem	96
2. 5. Site de mesure de Bab Salam.....	98
2. 6. Site de mesure du ravin de Dahir.....	99
3. Dynamique des ravins par colmatage total.....	101
3. 1. Site de mesure : Ravin localisé sur la rive droite d'oued Dardar	101
4. Les ravins stables.....	102
4. 1. Site de mesure : Koudiya Louza	102
Conclusion	104
CHAPITRE 3	106
ÉVALUATION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE HAUT OUERGHA.....	106
Introduction.....	107
1. Aperçu historique sur les études de quantification de l'érosion hydrique au Maroc	108
Résultats d'évaluation qualitative et quantitative d'érosion hydrique dans les bassins rifains....	109
2. Évaluation qualitative de l'érosion hydrique dans le Haut Ouergha par l'application des méthodes PAP/CAR et EPM.....	115
2. 1. Estimation de l'érosion hydrique par la méthode PAP/CAR	115
2. 1.1. Réalisation de la carte des pentes.....	116
2. 1. 2. Élaboration de la carte des lithofaciès.....	117
2. 1. 3. Réalisation de la carte d'érodibilité.....	121
2. 1. 4. Réalisation de la carte d'occupation des sols.....	123
2. 1. 5. Réalisation de la carte de densité de recouvrement	125
2. 1. 6. Réalisation de la carte de protection des sols.....	127

2. 2. Quantification de l'érosion hydrique par l'application du modèle EPM.....	129
2. 1. 7. Carte des états érosifs.....	131
2. 2. 1. Élaboration de la carte de sensibilité des roches à l'érosion (Y)	133
2. 2. 2. Réalisation de la carte des pentes (J)	135
2. 2. 3. Élaboration de la carte de protection de couvert végétal (Xa)	135
2. 2. 4. Élaboration de la carte d'états érosifs (Φ).....	137
2. 2. 5. La carte d'érosion potentielle (Z)	137
2. 2. 6. Réalisation de la carte de la température.....	141
2. 2. 7. Réalisation de la carte des précipitations.....	141
2. 2. 8. La carte des pertes en sol m ³ /km ² /an.....	144
3. Corrélation entre la méthode PAP/CAR et EPM et limites d'application.....	146
3. 1. Corrélation entre la méthode PAP/CAR et EPM.....	146
3. 2. Comparaison des résultats entre le terrain et les deux méthodes (PAP/CAR et EPM)	147
3. 3. Les limites d'application des modèles d'évaluation qualitative et quantitative d'érosion ...	148
Conclusion	150
CHAPITRE 4	152
LA SENSIBILITE A LA DESERTIFICATION DANS LE HAUT OUERGHA PAR L'APPLICATION DE L'APPROCHE MEDALUS.....	152
Introduction.....	153
1. Aperçu sur l'approche MEDALUS	154
2. Application de l'approche MEDALUS	155
2. 1. Elaboration de la carte de l'indice de qualité de la végétation (IQV).....	155
2. 1. 1. Risque d'incendie	156

2. 1. 2. Protection contre l'érosion	158
2. 1. 3. Résistance à la sécheresse (RS).....	160
2. 1. 4. Recouvrement des sols	162
2.1.5. Carte de l'indice de la qualité de la végétation	164
2.2. Elaboration de la carte d'indice de qualité des sols (IQS).....	166
2.2.1. Matériau parental.....	166
2.2.2. Texture des sols	168
2.2.3. Profondeur des sols	169
2.2.4. Le facteur pente.....	171
2.2.5. Carte de l'indice de la qualité des sols (IQS).....	173
2.3. Elaboration de la carte d'indice de qualité de climat	176
2.3.1. Exposition des versants	176
2.3.2. Les précipitations	177
2.3.3. Indice de l'aridité	180
2.3.4. Carte de l'indice de qualité du climat (IQC)	180
2.4. Elaboration de la carte d'indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA).....	185
2.4.1. Intensité d'utilisation des terres.....	185
2.4.2. Qualité de politique d'aménagement	186
2.4.3. Carte de l'indice de qualité des systèmes d'aménagement des terres (IQSA)	190
2.5. L'indice de sensibilité à la désertification (ISD).....	190
Conclusion	194
CHAPITRE 5	196
TECHNIQUES DE LUTTE ANTIEROSIVE DANS LE HAUT OUERGHA.....	196

Introduction.....	197
1- Aperçu historique sur l'évolution des stratégies antiérosives dans le monde	197
2- Les techniques paysannes de lutte antiérosive dans le Haut Ouergha	199
2.1. Les techniques traditionnelles de gestion conservatoire des sols.....	199
2.1.1. Les terrasses	199
2.1.2. Les cordons en pierres sèches.....	201
2.1. 3. Les talus	202
2.1.4. Traitement des ravins	203
A. Traitement biologique des ravins.....	203
B. Traitement mécanique des ravins par les seuils en pierres sèches.....	204
2.1.5. Les clôtures en haies vives	204
2.1.6. La gestion de la biomasse.....	205
2.1.7. La gestion des résidus de culture	205
2.1.8. Le drainage des eaux dans les parcelles cultivées	206
2.1.9. L'épierrage.....	206
2.1.10. La jachère	206
2.1.11. Plantations des arbres fruitiers	207
2.2. Les techniques paysannes de gestion des eaux	209
2.2.1 Mares collectant les eaux de ruissellement (madgen)	209
2.2.2. Les cuvettes et les demi-lunes	210
2.3. Perspective d'évolution des techniques traditionnelles de GCS.....	211
3. Les techniques introduites par l'État.....	212
3.1. Projet de développement économique rural du Rif occidental DERRO	212

3.2. Programme de développement intégré (PDI)	213
3.3. La correction biologique.....	213
3.4. Les seuils en gabion.....	215
Conclusion	216
Conclusion générale	218
Bibliographie.....	222
Liste des figures	243
Liste des tableaux	249
Liste des photos.....	252
Table des matières.....	255



Résumé

Les études axées sur le Rif montrent que cette partie du Maroc a subi au cours des dernières décennies une dynamique remarquable de ses milieux, sous l'effet de la combinaison des facteurs d'ordre naturel et anthropique. Cette dynamique a conduit à l'amplification du risque de l'érosion hydrique qui est une cause majeure de la désertification. Les conséquences de la production des quantités considérables de sédiments par l'érosion et de l'avancement continu de la désertification résident dans la dégradation des terres et des infrastructures.

Par sa situation dans le Rif, la zone d'étude est caractérisée par une dynamique importante des milieux. L'analyse des facteurs qui interviennent dans cette dynamique indique que la zone d'étude se situe dans un contexte environnemental très fragile. À cela, s'ajoutent les interventions anthropiques inadéquates. La fragilité des milieux se traduit par la variété des formes de l'érosion et l'augmentation de la sensibilité à la désertification. Le suivi de la dynamique des ravins montre une variation très nette au niveau du rythme d'évolution et les processus intervenants, selon le type d'occupation des sols et selon les conditions lithologiques et topographiques.

L'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique par l'application des deux méthodes (EPM et PAP/CAR) montre que la zone d'étude est très vulnérable à l'érosion hydrique avec une dominance remarquable des milieux instables qui couvrent plus de 82 % selon la méthode PAP/CAR. Ainsi, le modèle EPM indique que 64 % de la zone d'étude produit une quantité considérable de sédiments. En outre l'application de l'approche MEDALUS nous a permis de mettre en évidence que 58% de la superficie totale de la zone d'étude est classée dans les milieux critiques et très sensibles à la désertification.

Pour lutter contre les différentes formes de dégradation des terres dans le Haut Ouergha, des interventions étatiques et paysannes ont été réalisées. Les observations sur terrain montrent que ces interventions sont insuffisantes ce qui exige une approche participative qui prend en considération les besoins des populations et les conditions physiques et socio-économiques du milieu.

Mots clés : le Haut Ouergha, dynamique, érosion hydrique, sensibilité à la désertification, dégradation des milieux, aménagement.