جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

N° d'ordre: 54/2023

Centre des Etudes Doctorales : Sciences et Technique et Sciences Médicale

Formation Doctorale : Ressources Naturelle et Développement Durable

Discipline : ***Géologie***
Spécialité : Géosciences et Ressources Naturelles
Laboratoire : Géosciences, Environnement et Ressources Associées (GERA)

Thèse de DOCTORAT

Érosion hydrique des sols : Télédétection et Modélisation (Cas de la région de Nador, Maroc)

Préparée par :

TAHOURI Jad

Soutenue le **29/05/2023** devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Pr. Driss OUARHACHE	PES	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès	**Président**
Pr. Mustapha AKODAD	PES	Faculté Pluridisciplinaire de Nador, Université Mohamed Premier - Selouane	**Rapporteur & examinateur**
Pr. Lhoucine KARRAT	PES	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès	**Rapporteur & examinateur**
Pr. Abdelilah DEKAYIR	PES	Faculté des Sciences - Meknès	**Rapporteur & examinateur**
Pr. Abdelakder El GAROUANI	PES	Faculté des Sciences et Techniques- Fès	**Examinateur**
Pr. Abdelhamid SADIKI	PES	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès	**Directeur de thèse**

جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES
كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

Thèse De Doctorat Présentée Par : TAHOURI Jad

Formation Doctorale : RNE2D

Spécialité : Géosciences et Ressources naturelles

Laboratoire : LGERA

Titre: Érosion hydrique des sols: Télédétection et Modélisation (Cas de la région de Nador, Maroc)

Résumé

Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), province de Nador est le siège d'activité érosive intense, a fait l'objet d'évaluation du risque de l'érosion hydrique et des facteurs causaux par les directives PAP/CAR pour l'étude de la susceptibilité et le modèle RUSLE pour la quantification des pertes en sols. En plus, l'évaluation de l'effet des transformations à grande échelle de l'utilisation/ couverture des terres (LULC) sur la température de surface (LST). L'analyse multitemporelle des données satellitaires Landsat-5 TM et Landsat-8 OLI a été utilisée pour analyser la relation entre les indices de télédétection, à savoir NDVI (densité de végétation), MNDBI (Terrain urbain, bâtis et nus), MNDWI (masses d'eau) et la LST afin d'identifier et clarifier les facteurs et mécanismes responsables de la dégradation. Les résultats montrent que la distribution spatio-temporelle du paramètre géophysique LST a considérablement évolué, les valeurs moyennes de LST pour 2007 et 2017 étaient de 32,83°C et 38,04°C respectivement. Les LST minimum et maximum pour le mois de juin étant respectivement de 17,7°C à 39,8°C en 2007 et de 15,4°C et 47,6°C en 2017. Sur dix ans, la distribution des centroïdes LST sols a montré une variation spatiale apparente. Les résultats ont montré que l'action anthropique et les processus environnemental naturel ont entraîné des changements des centroïdes LST dans les positions relatives des différents types de LULC dans la région de Nador au cours de la période. De 2007 à 2017, ont enregistrant une forte régression de 25,63% pour la classe LST Très élevée et une forte augmentation de la classe LST extrême de 36,29 % respectivement. L'évolution de la distribution spatio-temporelle des centroïdes LST indique que la région de Nador semble avoir un effet de réchauffement des sols mis en évidence par la distribution apparente des valeurs moyennes de la LST en milieu urbain, périurbain et rural. La tendance générale de la distribution des températures trace un système complexe d'utilisation/ occupation des terres (LULC). En revanche, une relation significativement négative a été observée entre LST et NDVI, LST et MNDWI, et LST et DEM. La relation entre MNDBI et LST avaient une relation significativement positive. L'analyse de régression de la LST avec les indices NDVI, MNDWI, MNDBI et DEM à permet de surveiller l'environnement thermique en fonction des variations observes pour différentes types LULC.

Le diagnostic du risque de l'érosion hydrique par modélisation de la susceptibilité à l'érosion en se basant sur le modèle qualitative PAP/CAR a permis de déterminer les zones potentiellement vulnérables et la détermination des facteurs qui contrôlent en grande partie les états érosifs dans le bassin versant. L'introduction du facteur topographique (LS) au lieu de la pente montre une distribution différente, les degrés d'érodibilité diminuent et suivent les longueurs de pentes faibles. Les classes d'érodibilités élevée et très élevée ont diminué avec des pourcentages de 2.22% et 0.23% respectivement alors qu'il était de 3.75% et 0.33% pour le modèle classique PAP/CAR. L'introduction du facteur type de sol montre que plus de 72.91% des terres ont une érodibilité faible. L'érodibilité modérée présente 25.6%. Les érodibilités moyenne, forte et extrême ont diminué enregistrant des pourcentages de 1.23%, 0.21% et 0.05%. L'analyse de corrélation pour les différents états érosifs montre que 84.2% et 90.8% de la variabilité observée dans les états érosifs est expliquer par l'introduction des facteurs climatiques (a) et (b). L'introduction des types de sols et de facteur topographique (LS) expliquent 36.6% de la variabilité observée des états érosifs résultants. Cependant, le modèle classique PAP/CAR n'explique que 25.8% des variabilités étudiée.

L'introduction de facteur (LS), des types de sol et des facteurs climatiques a et b représentés par l'exposition des versants, l'érosivité des pluies (R), l'indice d'humidité (SMI) et la température de surface du sol (LST) ont montré leur fiabilité pour la caractérisation de l'érosion des sols dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Les états les plus sévères de la modélisation PAP/CAR classique ont été convertis en états intermédiaires pour le modèle modifié. Les états érosifs forts et très forts du modèle classique sont représentés de manière exhaustive, ce qui est à l'opposé de la nouvelle approche de modélisation qualitatif établie. L'approche descriptive a montré que la perte de sol se manifeste par différentes formes d'érosion avec une prédominance de l'érosion en nappe (L) affectant 78.73% des terrains. L'approche d'intégration montre que les tendances ou susceptibilités de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant sont en fonction de la dynamique des facteurs responsables et des processus d'érosion, ce qui signifie qu'au sein d'un même état érosifs, il existe un ordre de priorité des tendances.

Les résultats de la quantification des pertes en sol par le modèle empirique RUSLE montre que l'érosion enregistre une moyenne tolérée de 32,22 t/ha/an. Les minima et maxima de pertes en sol selon la transformation Box-Cox était de 6,41 et 72,53 t/ha/an. Les coefficients de détermination pour les variables facteur topographique (LS), érosivité des pluies (R), érodibilité des sols (K), conservation des sols (C) et pratiques antiérosif (P) avec les pertes en sol (Y) était respectivement 0.95, 0.752, 0.90, 0.936 et 0.97. La régression multiple indique que le modèle explique 98,41% de la variabilité des pertes en terres avec une R^2 ajusté de 98,47%. La déviation standard, les coefficients de variation, la corrélation et l'analyse en composante principale (ACP), enregistrent des résultats fiables dans presque tous les facteurs.

L'étude des processus et facteurs causaux influençant l'état des ressources indique que le risque de l'érosion hydrique ne cesse de s'imposer son poids. Ce processus environnemental rendu accéléré par l'action anthropique inquiètent de plus en plus les autorités locales et les institutions en charges, particulièrement avec l'intensification des effets d'instabilité climatique ces dernières années, qui aura sans doute des conséquences néfastes sur le climat et l'environnement. La région inspire une dégradation intense des ressources naturelles liées au risque de l'érosion hydrique et la multiplication des facteurs de risque. Les contraintes au développement socio-économique seront liées principalement à l'état des ressources fragilisées. Des dégradations sont ressenties au niveau des sols et de leur valeur foncière, de la perte de la biodiversité, de la qualité des eaux de surface et de l'infrastructure.

Mots clés: Erosion hydrique des sols, Modèles PAP/CAR et PAP/CAR modifié/ Susceptibilité, RUSEL/ Quantification des pertes en sol, Télédétection, Modélisation, Facteur causaux / Géostatistique, Température de surface du sol (LST), Développement Durable.

Title: Soil water erosion: Remote Sensing and Modeling (Case of the Nador region, Morocco)

Abstract

The Zenaga watershed (Gareb-Bouareg), province of Nador is the site of intense erosive activity and has been the subject of assessment of the risk of water erosion and causal factors by the PAP/CAR directives for the study of susceptibility and the RUSLE model for the quantification of soil losses. Additionally, assessing the effect of large-scale land use/cover (LULC) transformations on surface temperature (LST). Multi-temporal analysis of Landsat-5 TM and Landsat-8 OLI satellite data was used to analyze the relationship between remote sensing indices, namely NDVI (vegetation density), MNDBI (Urban, built and bare land), MNDWI (water bodies), and LST to identify and clarify the factors and mechanisms responsible for degradation. The results show that the spatiotemporal distribution of the geophysical parameter LST has changed considerably, the average values of LST for 2007 and 2017 were 32.83°C and 38.04°C respectively. The minimum and maximum LST for the month of June being respectively 17.7°C to 39.8°C in 2007 and 15.4°C and 47.6°C in 2017. Over ten years, the distribution of centroid LST soils showed apparent spatial variation. The results showed that anthropogenic action and natural environmental processes led to changes in LST centroids in the relative positions of different LULC types in the Nador region during the period. From 2007 to 2017, there was a sharp decline of 25.63% for the Very High LST class and a sharp increase in the Extreme LST class of 36.29% respectively. The evolution of the spatiotemporal distribution of LST centroids indicates that the Nador region seems to have a soil warming effect evidenced by the apparent distribution of mean LST values in urban, peri-urban, and rural areas. The general trend in temperature distribution traces a complex land use/land cover (LULC) system. In contrast, a significantly negative relationship was observed between LST and NDVI, LST and MNDWI, and LST and DEM. The relationship between MNDBI and LST had a significantly positive relationship. The regression analysis of the LST with the NDVI, MNDWI, MNDBI, and DEM indices makes it possible to monitor the thermal environment according to the variations observed for different LULC types.

The diagnosis of soil water erosion by modeling the susceptibility to erosion based on the qualitative PAP/CAR model made it possible to determine the potentially vulnerable areas and the determination of factors that largely control the erosive states in the watershed. The introduction of the topographic factor (LS) instead of the slope shows a different distribution, the degrees of erodibility decrease and follow the lengths of low slopes. The high and very high erodibility classes decreased with percentages of 2.22% and 0.23% respectively while it was 3.75% and 0.33% for the classic PAP/CAR model. The introduction of the soil type factor shows that more than 72.91% of land has low erodibility. Moderate erodibility presents 25.6%. Medium, high, and extreme erodibility decreased recording percentages of 1.23%, 0.21%, and 0.05%. The correlation analysis for the different erosive states shows that 84.2% and 90.8% of the variability observed in the erosive states is explained by the introduction of climatic factors (a) and (b). The introduction of soil types and topographic factors (LS) explains 36.6% of the observed variability of the resulting erosional states. However, the classic PAP/CAR model only explains 25.8% of the variabilities studied.

The introduction of factor (LS), soil types, and climatic factors a and b represented by the slopes exposure-rainfall erosivity (R), soil moisture index (SMI)- and land surface temperature (LST) have shown their reliability for the characterization of soil erosion in the Zenaga watershed (Gareb-Bouareg). The most severe states of the classic PAP/CAR modeling were converted into intermediate states for the modified model. The strong and very strong erosional states of the classical model are represented comprehensively, which is the opposite of the newly established qualitative modeling approach. The descriptive approach showed that soil loss is manifested by different forms of erosion with a predominance of sheet erosion (L) affecting 78.73% of the land. The integration approach shows that the trends or susceptibilities of water erosion at the watershed level are a function of the dynamics of the responsible factors and erosion processes, which means that within the same state erosive, there is an order of priority of trends.

The results of the quantification of soil losses by the empirical RUSLE model show that erosion records a tolerated average of 32.22 t/ha/year. The minimum and maximum soil losses according to the Box-Cox transformation were 6.41 and 72.53 t/ha/year. The coefficients of determination for the variables topographic factor (LS), rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), soil conservation (C), and anti-erosion practices (P) with soil losses (Y) were respectively 0.95, 0.75, 0.90, 0.93 and 0.97. Multiple regression indicates that the model explains 98.41% of the variability in land loss with an adjusted R^2 of 98.47%. Standard deviation, coefficients of variation, correlation, and principal component analysis (PCA), record reliable results in almost all factors.

The study of the processes and causal factors influencing the state of resources indicates that the risk of water erosion continues to impose its weight. This environmental process, accelerated by anthropogenic action, is increasingly worrying local authorities and responsible institutions, particularly with the intensification of the effects of climate instability in recent years, which will undoubtedly have harmful consequences on the climate and the environment. The region inspires intense degradation of natural resources linked to the risk of water erosion and the multiplication of risk factors. Constraints to socio-economic development will be linked mainly to the state of weakened resources. Deterioration is felt in terms of soil and its land value, loss of biodiversity, surface water quality, and infrastructure.

Keywords: Soil water erosion, PAP/RAC and Modified PAP/RAC models/ Susceptibility; RUSEL/ Quantification of soil losses; Remote Sensing, Modelling, Causal Factors / Geostatistics, Land Surface Temperature (LST), Sustainable development.

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté pour achever ce projet. Ce travail est l'aboutissement d'un long cheminement au cours duquel j'ai bénéficié de l'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes, à qui je tiens à dire profondément et sincèrement merci.

Ma sincère reconnaissance et ma vive gratitude s'adresse à mon encadrant et directeur de thèse, **Pr. Abdelhamid SADIKI** pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail. Je vous remercie pour la chance offerte de mener une thèse dans les meilleures conditions, pour l'enthousiasme et l'intérêt que vous avez manifesté à mon égard, et pour les efforts consentis que vous ayez déployé durant ces années de recherche. Je vous remercie pour la patience, surtout pour la confiance et pour votre soutien en me donnant la chance de travailler librement et d'avoir amélioré mes compétences autant que chercheur. J'espère avoir été louable de votre confiance. Je vous remercie pour les remarques et les conseils, aussi votre disponibilité. J'ai eu le grand plaisir de travailler sous votre direction, j'ai trouvé auprès de vous le conseiller et le guide qui m'a reçus en toute circonstance avec sympathie, sourire et bienveillance. Nous vous remercions pour la qualité de l'encadrement, pour la démarche pédagogique innovante structurée et ciblée. Votre compétence professionnelle incontestable et vos qualités humaines valent l'admiration et le respect de tous. Vous serez et rester pour moi l'exemple de rigueur et de droiture dans l'exercice de la profession. Veuillez, cher professeur et encadrant, trouvé dans ce travail l'expression de ma haute considération, de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

J'adresse mes sincères remerciements et ma vive reconnaissance vont au **Pr. Driss OUARHACHE** d'avoir accepté de présider le jury et de m'honorer de sa présence à ma soutenance. Je souhaite exprimer ma gratitude pour la qualité d'enseignement durant ma formation de licence et Master Spécialisé PN2D. Nous avons eu le privilège d'être parmi vos étudiants et d'apprécier vos qualités et vos valeurs. Votre sérieux, compétence et sens du devoir nous ont énormément marqués. Veuillez trouver ici l'expression de notre respectueuse considération et notre profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines. Ce travail est pour nous l'occasion de vous témoigner notre profonde gratitude.

Mes remerciements et vive gratitude à notre maitre et rapporteur de thèse **Pr. Mustapha AKOUDAD**. Vous nous faites l'honneur d'accepter avec une très grande sympathie de siéger parmi cet honorable jury. Tous mes remerciements pour le temps que vous avez consacré, à la lecture de ce travail. Que vous trouvez ici l'expression de ma gratitude et sincères remerciements pour l'aide que vous m'avez apportée dans les corrections du manuscrit et les discussions enrichissantes, pour votre encouragement. Veuillez accepter, professeur, mes expressions de gratitude et de reconnaissance.

Mes plus vifs remerciements vont à notre maitre et rapporteur de thèse, **Pr. Lhoucine KARRAT**. Nous vous sommes très reconnaissants de m'honorer en acceptant de juger ce travail. Nous vous remercions pour la qualité de l'encadrement que vous m'avez proposée durant la préparation de ma mémoire de licence « PFE ». Permettez-moi de vous exprimer notre admiration Pour vos qualités humaines et professionnelles. Nous vous prions, chère maitre, de trouver ici le témoignage de notre sincère reconnaissance, notre considération et profonde gratitude**.**

Nous remerciements vont a notre maitre et juge de thèse, **Pr. Abdelilah DEKAYIR et Pr. Abdelakder El GAROUANI.** Nous vous remercions pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu juger cette thèse. Veuillez accepter ce travail maître, en gage de notre grand respect et ma profonde reconnaissance et ma haute estime.

Mes sincères remerciements et ma vive gratitude s'adressés aux Pr. Hsiang-te Kung, Pr. Verner Carl Johnson, Pr. Fei Zhang, Pr. Ngai Weng Chan. Qu'ils soient remerciés pour la chance offerte de mener une collaboration active dans les meilleures conditions, pour leurs soutiens, encouragement et pour les discussions fructueuses.

Mes sincères remerciements s'adressent au Staff du Centre international de recherche et de formation sur l'érosion et la sédimentation, « China Water and Power Press » et « China Institute of Water Resources and Hydropower » Research. Qu'ils soient remerciés de nous avoir payé les frais de publication de notre article.

Je remercie infiniment Pr. **Lahcen GOURARI**, Chef de départements de Géologie et Pr. **Ahmed NTARMOUCHANT**, Chef de Laboratoire de Géosciences, Environnement et Ressources Associées (**GERA**) et Pr. **Mohammed DAHIR**, Ex-Chef de Laboratoire Géodynamique et Ressources Naturelles (**LGRN**), qu'ils soient remerciée pour l'aide apportée le long du projet de thèse.

Nos remerciements s'adressent à tous les membres du conseil de CED-ST de la faculté des Sciences et du Centre d' Étude Doctorales, Science et Technologie (CED, ST) de la faculté des sciences Dhar Mahraz, Fès (FSDM) spécialement: Pt. **Mohammed BENLEMLIH**, Doyen de Faculté des Sciences Dhar El Mahraz-Fès. Pr. **Mohammed EL HASSOUNI**, vice doyen chargé de la recherche scientifique et de la coopération et **e**x-directeur de CED "Sciences et Technologies". **Pr. Mohammed BELKASMI**, vice Doyen chargé des Affaires Pédagogiques et Estudiantines au sein de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz-Fès. Pr. **EL Mestafa EL HADRAMI**, directeur du pôle des études doctorales**,** Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès. Pr. Mustafa TALEB, Coordonnateur de la formation doctorale "Ressources Naturelles Environnement et Développement Durable (RNE2D)" au sein de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz-Fès.

Sans oublier là où j'ai été forgé, Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes sincères remerciements au Staff licence de la filière " Sciences de la Terre et de l'Univers (STU)" et la formation Master Spécialisé «PN2D» notamment: Pr. Lahcen GOURARI, Pr. Khadija BOUMIR, Pr. Abdesslam EL KHANCHOUFI, Pr. Hassane LACHKHEM, Pr. Hessane MOHAMMED ABDELBASET. Pr. MOUHSSINE MOHAMMED que Dieu le bénisse de sa miséricorde, Pr. MOUKADIRI ALI, Pr. BENNOUNA Azzedine, Pr. EL ARABI HASSAN Pr. Youssef DRIOUCH, Pr. Omar EL HAMZAOUI, BEN ABBOU MOHAMED, Pr. Abdellah SABAOUI, Pr. Brahim TEKIOUT, Pr. Siham ASSAOUD, Pr. Samira ADIL, Pr. Abdellah BOUSHABA, Pr. BAALI ABDENNASSER, Pr. Abdallah DRIDRI, Pr. Mostafa EL QANDIL, Pr. AHARMOUCH ABDELKRIM. Mes remerciement sont adressé aussi aux Personnel Administratif du de département de géologie, Mr. Mohamed MHENED, Mr. Fouad SLAOUI et Mr. Rachid BAHHOU.

Je tiens à remercie également Mr. Nabil BENAZZOUZ, Directeur Général de « IDAFA » et Mr. Aissa MAHBOUB, du Laboratoire de Géotechnique et de Génie Civil | S2G pour leur encouragement. Le Groupe de travail GSERmap (GSERmap WG) de la FAO-INSII-ITPS pour les discussions fructueuses en relation avec le développement des directives nationales et spécifications techniques du GSERmap et du modèle des directives PAP/CAR.

Ma profonde reconnaissance et ma profonde gratitude vont à mon maitre Pr. Saad BEN YAHYA, pour son aide et son soutien tout au long de mon parcours universitaire. J'adresse ce travail à mon ami, Dr Haytam Masrar, que Dieu le bénisse de sa miséricorde. Ce pur travail est un berceau pour votre bonne âme et pour votre famille.

Mes sincères remerciements vont au Dr. Hassane El Amrani, Mr. Rabbie El Hamzaoui, Mr. Lhoussine AARAB, Mr. Aissa MAHBOUB, Mr. Nouredine El MARZOUKI, Mr. Zakaria HMIDOUCH, Pr. Abdelkrim LOUAYA et ma collègue Dr. Hind KHALIS pour leurs soutiens et encouragements.

Dédicaces

Je dédie cette thèse de doctorat :

A mon cher papa, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour nos voir réussir.

A ma très chère maman, fleur de ma vie, ma première et durable maîtresse, à qui je dois tout ce que j'ai eu dans ma vie.

A ma chère belle-mère que Dieu le bénisse de sa miséricorde et mon beau père. Aucune dédicace aussi parfaite et douce soit-elle n'aurait exprimé toute ma reconnaissance et tout l'amour que j'ai pour vous.

Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et mon amour sincère et fidèle à ma petite famille

A ma chère épouse "Dounia" et mes amoureux enfants, mes anges "Yasmine & Abderrahmane". Ma plus grande fierté. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance, mon amour sincère et fidèle. Puisse Dieu vous garder, protéger, éclairer votre chemin et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers. Je ne cesse de construire un monde plus beau.

A mes chers frères et sœur. Les frères qui resteront toujours mes frères, amis depuis notre enfance, et à qui je réserve le grand amour. Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter. En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour me permettre d'atteindre. Cette étape de ma vie avec toute ma tendresse.

A Ma Chère Sœur Ibtissam,
A Ma Chère Sœur Awatef et ces enfants
A Mon Très Cher Frère Anass, son épouse et ces enfants
A Mon Très Cher Frère Ouassim, son épouse et son enfant

Ce travail représente le fruit de votre soutien et vos encouragements.
En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

Listes des abréviations et acronymes

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations
ITPS: Experts from the Intergovernmental Technical Group on Soils
UNCCD : Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
IPCC & GIEC: Intergovernmental Panel on Climate Change
ORMVAM : Office de la Mise en Valeur Agricole de Moulouya
PAM : Plan d'Action pour la Méditerranée
DGCONA : Direction générale de la conservation de la nature
AGL : Division de la mise en valeur des terres et des eaux
PAP/CAR : Centre d'Activités Régionales pour le Programme d'Actions Prioritaires
RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation
USLE : Universal Soil Loss Equation
UE : Union Européenne
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
GPS: Global Positioning System
GISS: Goddard Institute for Space Studies
NASA: National Administration of Space and Aeronautics
NOAA : L'administration nationale des océans et de l'atmosphère
MODIS: The National Oceanic and Atmospheric Administration
LANDSAT: Terrestrial Remote Sensing Satellite (System)
AVHRR: Very high resolution advanced radiometer
LST : Land/Soil Surface Temperature
NDVI : Indice de végétation par différence normalisée
MNDWI : Indice d'eau par différence normalisé modifié
MNDBI : Indice de construction par Différence normalisée modifiée
NDBI : Indice construit de différence normalisée
SMI : Indice d'humidité du sol
GSERmap WG: Groupe de travail sur la carte mondiale de l'érosion des sols
SRTM : Mission de topographie radar de la navette
ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
INSII : Réseau international des institutions d'information sur les sols
ITPS Groupe technique intergouvernemental sur les sols
WOCAT : Aperçu mondial des approches et technologies de conservation
WGS : Système géodésique mondial
SWRS : État des ressources mondiales en sols
WRI : Institut des ressources mondiales
MedECC : Experts méditerranéens sur le changement climatique et environnemental
UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
MedWetCaost : Projet pour la conservation des zones humides et des écosystèmes côtiers de la région méditerranéenne
ICONA : Institut national de conservation de la nature
USGS : United States Geological Survey
ORMVAM : Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Moulouya
HCEFLCD : Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification
HCP : Haut-Commissariat au Plan

RÉSUMÉ ..... **I**
ABSTRACT ..... **III**
REMERCIEMENTS ..... **V**
DÉDICACES ..... **VII**
LISTES DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES ..... **VIII**
INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**
PREMIÈRE PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODES **5**
CHAPITRE I: PROBLÉMATIQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE **6**
CHAPITRE I: PROBLÉMATIQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE **7**
I. Problématique de l'érosion hydrique des sols au niveau méditerranéen et international 7
II. Problématique de l'érosion hydrique au Maroc 12
III. Problématique et justification du choix de la région de Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) pour l'étude l'érosion hydrique 14
CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU CADRE GÉNÉRALE DE LA ZONE D'ÉTUDE ET DES FACTEURS CAUSAUX DE L'ÉROSION HYDRIQUE **16**
I. FACTEUR ANTHROPIQUE ET SOCIO-ÉCONOMIQUE **17**
II. FACTEUR CLIMATIQUE **26**
1. Les précipitations 27
1. 1 Précipitations moyennes annuelles 28
1. 2 Précipitations moyennes mensuelles 28
1. 3 Évaluation de la lame d'eau moyenne reçue dans le bassin versant 31
1. 3. 1. Méthodes des isohyètes 32
1. 3. 2. Méthodes des polygones de Thiessen 35
1. 3. 3. Estimation de la lame d'eau moyenne 37
2. Les températures 38
2. 1. Variations et tendances des températures moyennes annuelles dans le territoire de la province de Nador et le bassin versant étudiée 38
2. 2. Études des températures moyennes mensuelles 39
3. Relation température et précipitations 40
3. 1. L'indice Xérothermique de Gaussen 40
3. 2. L'indice d'aridité annuelle de Martonne et les indices mensuelles d'aridité 41
3. 3. Le quotient pluviaux-thermique d'Emberger 42
4. Étude du vent, de l'exposition des versants et du microclimat régnant au niveau de la partie nord orientale et du bassin versant Zenaga 44
III. FACTEUR GÉOLOGIQUE **48**
1. Les chaîne bético-rifaine : structure et dynamique de l'Arc de Gibraltar 48
2. Aperçue de la géologie de la chaîne du Rif 50
2. 1. Les zones internes 50
2. 2. Le domaine des flyschs maghrébins 51
2. 3. Le domaine externe 51
3. Géologie et lithologie du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), région de Nador 52
3. 1. Les formations actuelles et quaternaires 53
3. 2. Les formations pliocènes 53
3. 3. Les formations miocènes 53
3. 4. Les formations crétacées supérieures et inférieures 53
3. 5. Les formations jurassiques 55
3. 6. Les formations triasiques 55
4. Répartition des faciès lithostratigraphiques au niveau du territoire de la province de Nador 55
V. COUVERTURE VÉGÉTALE ET OCCUPATION DE SOL **56**
1. Réduction de l'énergie du ruissellement et de l'érosivité des pluies 57
2. Maintien des sols 58
3. Rôle de la végétation en faveur de la sédimentation 58
4. Dégradation de la végétation et son impact 59
5. Végétation naturelle et occupation des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 59
VI. LE CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE **67**
1. La morphologie de la province Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 67
1. 1. Le massif de Guelaia 67
1. 1. 1. Le mont volcanique du Gourougou 67

1. 1. 2. Le Cap des Trois Fourches 68
1. 1. 3. Les Monts de Bni Bou Ifrour 68
1. 2. Les chaîne de type Atlasique (massif de Kebdana) 68
1. 3. Le bassin en forme de cuvette dans la partie centrale (bassin de Zenaga) 69
1. 3. 1. Plaines de Bou Areg et du Gareb 69
1. 3. 2. La barrière de la Sebkha Bou Areg et côte marine 70
2. Les facteurs morphométriques du bassin versant Zenaga 70
2. 1. Méthodes utilisées pour caractériser la géométrie du bassin versant 71
2. 2. Les caractéristiques du relief 72
2. 3. La morphologie et répartition des altitudes 73
2. 4. Détermination de la courbe hypsométrique 76
2. 4. 1. Altitude moyenne du bassin : rapport du volume montagneux (V) à la superficie du bassin (A). 77
2. 4. 2. Altitude médiane(ou altitude de fréquence ½) 77
2. 4. 3. Altitude la plus fréquente 78
2. 5. Temps de concentration 79
2. 6. Rectangle équivalent 79
2. 7. Indices de pente et relief 81
3. Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant Zenaga 82
3. 1. Hiérarchisation du réseau hydrographique (La topologie) 82
3. 2. Classification de Strahler (1957) 83
3. 3. Formes du réseau hydrographique 84
3. 4. Classifications descriptives du réseau hydrographique 85
3. 5. Rapport de confluence et rapport de longueur 86
3. 6. La densité du drainage 88
CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS 89
CHAPITRE III : MÉTHODES D'ÉTUDE DES SOLS ET DE L'ÉROSION HYDRIQUE AU NIVEAU DE LA PROVINCE NADOR ET DU BASSIN VERSANT ZENAGA 92
I. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION, D'IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DES SOLS 93
1 Définition des principaux caractères des sols 93
2. Essais d'identification des sols 94
2. 1. Analyse granulométrique et sédimentométrie (NF P 94-056 & -057) 94
2. 1. 1. Par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80µm 94
2. 1. 2. Par sédimentométrie pour les grains plus fins (diamètre moyen inférieur à 80µm) 94
2. 2. Limites d'Atterberg : (NF P 94-051 et NF P94-052-1) 95
2. 3. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) 95
3. Classification des sols 96
3. 1. Classification LCPC 96
3. 1. 1. Classification des sols grenus 96
3. 1. 2. Classification des sols fins (basé sur l'abaque triangulaire de Taylor) 97
3. 1. 3. Classification des sols fins (basée sur les limites d'Atterberg, 1911) 98
3. 2. Classification GTR (NF P 11 300) 99
3. 3. Classification internationale 101
II. MODÈLES D'ÉTUDE DU RISQUE DE L'EROSION 101
2. MÉTHODES D'ÉTUDE ADOPTÉES POUR L'ÉTUDE DU RISQUE DE L'ÉROSION HYDRIQUE AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT ZENAGA 103
1. Méthode d'étude de l'évolution de la température de surface des sols (LST) et d'utilisation/occupation des terres (LULC) 105
1.1 Sources de données et prétraitement 106
1. 2. Prétraitement des images 106
1. 3. Méthodologie 107
1.3.1 Changement d'utilisation /couverture des terres (LULC) pour la région de Nador 107
1.3.2 Récupération de LST 109
2. Le modèle du Centre d'activité régional du programme d'action prioritaire (PAP/CAR) 114
2. 1 Approche prédictive 114
2.2 Approche descriptive 115
2. 3 Approche de consolidation 115
3. Modélisation par le modèle de quantification de l'érosion RUSLE 116

4. Analyses géostatistique multivariée de l'érosion et des facteurs causaux 119
DEUXIÈME PARTIE: 120
- ETUDE DES SOLS ET MATÉRIAUX MOBILISABLE PAR L'ÉROSION HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT ZENAGA (GAREB-BOUAREG) 120
- ETUDE DE L'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DE LA SURFACE DES SOLS (LST) ET D'OCCUPATION/UTILISATION DES TERRES LULC) PAR LA MODÉLISATION ET LA TÉLÉDÉTECTION 120
CHAPITRE IV: ETUDE DES SOLS ET MATÉRIAUX MOBILISABLE PAR L'ÉROSION HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT ZENAGA (GAREB-BOUAREG) 121
I. LITHOLOGIE DES AFFLEUREMENTS GÉOLOGIQUES DE LA PROVINCE DE NADOR ET DU BASSIN VERSANT ZENAGA (GAREB-BOUAREG) 122
1. Répartition des faciès lithostratigraphiques au niveau du bassin versant Zenaga 122
2. Résultats des essais de laboratoire 123
2. 1. Travaux de reconnaissance 123
2. 2. Essais Réalisés 127
2. 3. Résultats des essais de laboratoire 127
2. 4. Interprétations des résultats des essais 132
- *IB1 (OC) : Site Ibouaalouten (X 714 329; Y 506 430)* 133
- *OM3: Site Wikssane (X 716 919; Y 504 788)* 133
- *EH1(IC1): Site El haddara (X 737 439; Y 496 751)* 134
- *IC2-TZ : Site Tiztoutine (X 706 865; Y 489 054)* 134
- *OM1: Site Arkmane (X 742 200; Y 503 286)* 135
- *NF1: Site Afra (X 722 590; Y 505 758)* 135
- *RA1: Sebkha de Bouareg (X 732 777; Y 501 277)* 136
- *DM1: Selouane (X 726 607; Y 494 900)* 136
- *CA1 : Sebkha de Bouareg (X 736 361; Y 500 447)* 136
- *DM2 : Gourougou (X 723 478; Y 514 518)* 137
- *NF2 : Gourougou (X 725 482; Y 513 887)* 137
- *RA2 : Paysage volcanique Tiztoutine (X 704 046; Y 485 406)* 138
- *OF2 (OM2) : Boulkhnafess (X 737 928; Y 491 335)* 138
2. 5 Profils d'altération 141
II. DESCRIPTION DES SOLS DU BASSIN VERSANT ZENAGA (GAREB-BOUAREG) 143
1. Pédologie et cartographie numérique des sols (DSM) 143
1.1 Répartition des sols en fonction des caractéristiques biogéographique et des résultats d'analyses géotechnique 143
1.1 Cartographie des sols par la méthode SCORPAN 146
1. Les sols peu évolués 151
1.1 Les sols peu évolués d'érosion (lithiques et régosolique) 151
1.2 La classe des sols peu évolués d'apport : alluviaux et colluviaux 151
2. Les sols calcimagnésiques 152
3. Les Vertisols 152
5. Les sols isohumiques 153
CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS 154
I. RÉSULTATS ET ANALYSES 157
1. Caractérisation des changements d'utilisation/couverture des terres dans la zone d'étude 157
2. Réponse des indices RS et LST 160
2.1 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI) 160
2.2 Détection des zones bâties par l'indice modifié de construction par différences normalisées (MNDBI) par la méthode BAEM 162
2.3 Indice modifié d'eau par différence normalisé (MNDWI) 164
2.4 Température de surface des terres (LST) 166
2.5 Spatialisation de la distribution LST 169
3. LST pour divers types d'utilisation/couverture des terres (LULC) 172
4. Relation entre la température de surface et NDVI-MNDBI-MNDWI-MNT 173
5. Facteurs clés des changements de température de surface terrestre (LST) 173
5. 1. Facteurs naturels 173
5. 2. Facteurs anthropiques 174
CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS 177

TROISIÈME PARTIE: MODÉLISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE 179
CHAPITRE VI: LES DIRECTIVES PAP/CAR ET LE MODÈLE PAP/CAR MODIFIÉ POUR L'ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITÉ À L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS DU BASSIN VERSANT ZENAGA 181
□ LE MODÈLE PAP/CAR CLASSIQUE 181
Introduction 181
1. Elaboration de la carte d'érodibilité des sols 183
1. 1. Carte des pentes 183
1. 2. Carte des lithofaciès 186
1. 3. Carte d'érodibilité 188
2. Elaboration de la carte de protection des sols 191
2. 1. Carte d'occupation des sols 191
2. 2. Carte de densité de couvert 193
2. 3. Carte de protection des sols 195
3. Elaboration de la carte des états érosifs prédictifs 197
II. APPROCHE DESCRIPTIVE: DESCRIPTION DES FORMES DE L'ÉROSION DU BASSIN VERSANT ZENAGA (GAREB-BOUAREG) 199
1. Études des formes et processus de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 199
1. 1. Érosion en nappes ou érosion diffuse (Sheet Food) 200
1. 2. Érosion en rigoles, en ravines et en ravins 202
1. 3. Les mouvements de masses (Glissement de terrain) 204
1. 3. 1. Les mouvements en masse lents 205
1. 3. 2. Risques des mouvements brutaux 208
□ *Les chutes de pierres et de blocs et éboulement rocheux* 209
□ *Les effondrements potentiels des cavités souterraines* 211
□ *Les coulées boueuses* 213
1. 4. Érosion par les cours d'eau 214
2. Carte des formes d'érosion 215
III. APPROCHE D'INTÉGRATION 218
1. Carte consolidée de l'érosion hydrique 218
2. Carte des tendances de l'érosion hydrique 220
CONCLUSION ET DISCUSSIONS 223
□ LE MODÈLE PAP/CAR MODIFIÉ ET FACTEURS DE RISQUE 225
□ I. RÉSULTATS ET DISCUSSION 229
1. Facteurs causaux du risque d'érosion hydrique 229
2. Élaboration de la carte d'érodibilité 232
3. Facteur climatique 235
3. États érosifs 239
4. Relations entre les facteurs causaux du risque de l'érosion hydrique et les états érosifs 242
4.1. Coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson 242
4.2. Analyse en composante principale (ACP) 244
5. Approche intégration et évaluation des tendances de l'érosion hydrique des sols (Susceptibilité à l'érosion) 247
CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS 250
I. ÉQUATION UNIVERSELLE REVISEE DE PERTES EN SOL (RUSLE) 253
1. Facteur K: L'érodibilité des sols (t.h.ha.MJ^{-1}.mm^{-1}) 253
2. Facteur R: Érosivité des pluies (MJ.mm.ha-1.h-1.an-1) 258
3. Facteur LS: Longueur (L) et d'inclinaison (S) de pente 262
4. Facteur C : Conservation des sols 265
5. Facteur P : Pratiques antiérosives et de soutien des sols 270
6. Pertes en sol dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 273
6.1. Répartition des pertes en sol par rapport à la tolérance du sol à l'érosion 273
7. Études statistiques de données issues du modèle RUSLE 276
7.1. Corrélation pour l'étude des relations entre les composantes de RUSLE 277
7.2. Influence de chaque facteur du modèle RUSLE sur les pertes de sol (Y) 280
- *Effet de l'érosivité des pluies* 280
- *Effet de l'érosivité de l'érodibilité des sols* 280
- *Effet du facteur topographique* 281
- *Effet du couvert végétal* 282

- *Effet de pratiques antiérosives* 282
7.3. Régression linéaire multiple pour l'ajustement du modèle RUSLE 283
CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS 287
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 290
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE 295
LISTES DES FIGURES 322
LISTES DES TABLEAUX 325

Introduction générale

Au cours des dernières années à l'échelle planétaire, le risque de l'érosion hydrique ne cesse de s'accroitre, il constitue un phénomène naturel, aux conséquences préoccupantes dans plusieurs régions du monde (***Roose et al.2010)***. Le risque de l'érosion hydrique est une problématique majeure, elle est reconnue être l'une des plus grandes menaces des sols avec des dommages pour la fertilité des sols et pour ses fonctions écosystémiques (***FAO et ITPS, 2015; FAO, 2019***). C'est le problème de dégradation de l'environnement le plus important dans le monde en développement (***Ananda & Herath, 2003***), les sols rendus actuellement de plus en plus dégradés par l'érosion hydrique (***Valentin et al.2005)***. L'érosion des sols et son impact sur les fonctions écosystémiques reçoivent une attention croissante de la part des scientifiques et des décideurs (***WRI, 2005, UNCCD, 2008***).

La santé du sol, ainsi que l'approvisionnement en eau, est la ressource la plus précieuse pour l'homme, car la vie humaine dépend de la générosité du sol (***Gomiero, 2016***). Les investissements dans l'agriculture suite à la crise des prix alimentaires de 2008, ont débouché sur des modes de production hautement productifs, hautement durables et qui contribuent à la réduction de la pauvreté rurale et, par conséquent, la réalisation du droit concrète à l'alimentation (***De Schutter, 2012***). Cependant, ces processus qui se basant sur l'utilisation intensive des ressources ont favorisé la dégradation des sols et ont contribué à la pauvreté (***FAO, 2020***).

Le bassin méditerranéen est un bon exemple pour illustrer ces milieux. Il représente une bonne zone géographique pour la conservation de la biodiversité (***RAMSAR & UNESCO, 1971***). Ce bassin fournit à ses communautés une multitude d'avantages: nourriture, emplois, commerce, transport et tourisme (***Santos et al.2004***), avec des écosystèmes variés et très productifs (***Durand et al.1994; Hammada et al.2004***), mais ces écosystèmes sont sous pression en raison de l'augmentation de l'activité anthropique, conséquence de la mondialisation (***Fatorić and Chelleri, 2012 ; MedECC, 2020***). Actuellement, les bassins versants méditerranéennes sont fortement dégradés par l'effet de l'érosion hydrique très prononcée, qui présente des interactions plus ou moins complexe, avec de graves conséquences et impacts que ça soit pour les ressources naturelles, l'économie ou la vie humaine.

L'érosion hydrique est un phénomène évolutif, influencé par l'action des facteurs naturels et anthropiques, tels que le climat agressif, la vulnérabilité du sol à l'érosion, la topographie escarpé, la déforestation, le surpâturage, l'augmentation des tailles de parcelles, les changements dans les pratiques de culture, l'utilisation excessive des terres et l'augmentation de la surface imperméable (***Tahouri et al.2019; FAO, 2019***). Leur jeu mixte contribue au déclenchement et à l'amplification du processus d'érosion hydrique des sols, offrant des capacités de résistance variables. À cet égard, une accélération du phénomène de ruissellement peut avoir des conséquences négatives telles que les inondations, la dégradation de la couverture végétale, la perte de la fertilité du sol et l'envasement des lacs et barrages.

La zone méditerranéenne, plus particulièrement l'Afrique du nord a été soumise aux changements climatiques tout au long de la période 1860-2005 (***Mariotti et al.2015***), les simulations prédisent une hausse moyenne des températures annuelles de plus de 2°C avec des vagues de chaleur plus intenses (***Moatti & Thiébault, 2022***). Les précipitations devraient diminuer par rapport à 1980-2005, en particulier en Espagne, au Maroc, en Tunisie et dans certaines parties de la région du Moyen-Orient, cela devrait modifier la température et la teneur en eau du sol, et par conséquent le pédoclimat (***Floret and Pontanier, 1984; Khatteli et al.2016***).

Depuis plus d'un siècle, la communauté scientifique aborde les processus d'érosion hydrique et les conditions d'apparition d'une érosion accélérée des sols et ses impacts socio-environnementaux négatifs associés (***Bennett, 1934; Smith, 1914***). L'érosion accélérée a été initiée il y a plusieurs milliers d'années dans certaines parties de la région méditerranéenne (***Butzer, 2005***). Aujourd'hui, les facteurs influençant l'érosion hydrique expriment bien la fragilité de ces milieux, qui avec les changements climatique actuelle, s'évolue graduellement vers le pire (***Sánchez-Arcilla et al.2008***). Plusieurs facteurs causaux interagissent, pour générer des conséquences drastiques dans des périodes relativement courtes (***Wischmeier and Smith, 1965; Rounsevell et al.1996 ; Bhuyan et al.2002; Flanagan et al.2007***). Les sols aujourd'hui ne sont que dans un état de détérioration, avec des stades de dégradation grave, liée particulièrement à une forte croissance socio-économique combinée à une dynamique érosive accélérée.

La maîtrise de l'érosion hydrique de surface représente alors un défi majeur sur les espaces où se localisent des enjeux socio-économiques (***Pimentel et al.1995***). L'évaluation de l'implication socio-économique et environnementale de l'érosion des sols et l'élaboration des plans de gestion pour y faire face, des données à la fois qualitatives et quantitatives sont nécessaires sur l'érosion des sols à l'échelle régionale et mondiale (***Boardman et Posen, 2006***). Ces plans de gestion doivent tenir compte des impacts de l'érosion sur site et hors site (***De Vente et al.2013***).

L'érosion hydrique affecte des régions du Maroc dont les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées, cette forme de dégradation de l'environnement, reconnue comme étant l'une des plus dangereuses, se manifeste d'une façon particulièrement intense dans les montagnes du Rif et du Prérif (***Sadiki, 2005***; ***Mesrar, 2016; Tahouri et al.2022***). A l'échelle régionale, l'érosion hydrique constitue une menace réelle pour la province de Nador, des répercussions grave sont observées à l'échelle du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), qui est en étroite liaison avec les problèmes de dégradation des ressources naturelles (sols, eau, et biodiversité). Aujourd'hui, le développement durable de la province de Nador et le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est freiné, à cause de l'état des ressources naturelles et des sols de plus en plus dégradé.

Objectifs de la thèse

L'objectif de la recherche menée par la thèse est de cerner le risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Une démarche rationaliste a été conçue, il porte sur l'adoption des méthodes et techniques qui ont apporté leurs preuves de rigueur et de fiabilité dans des régions aux conditions analogues.

Pour aborder ce sujet, de multiples questions et incertitudes ont été posées et l'idée de mener une recherche sur cette problématique, nous est apparue justifiée et bien adaptée au besoin de la province de Nador et le bassin versant Zenaga en matière d'aménagement et gestion, vu la valeur ajoutée qu'elle peut apporter.

Dans ce cadre, nous avons fixé comme objectif principal de mettre en place un diagnostic de l'état de dégradation des sols. Ce travail contribuera à comprendre et à cerner les causes de la dégradation de ce patrimoine pédologique, et sera mis à la disposition des acteurs locaux et gestionnaires des eaux et forêts dans ce territoire dans ce territoire.

Structure de la thèse

Pour traiter la problématique du risque de l'érosion hydrique des sols au niveau de la région de Nador et le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), nous avons adopté une démarche en trois principales approches:

La première approche porte sur l'étude par différentes méthodes des processus de l'érosion hydrique, la susceptibilité des différents secteurs de la région de Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) au risque, ainsi que l'état de dégradation des ressources et des sols. Cette approche a été développée et décrite suivant trois axes :

1. Étude géotechnique des matériaux mobilisable par l'érosion hydrique en se basant sur la modélisation par SIG et les analyses de sol.
2. Étude qualitative de l'érosion hydrique. Elle concerne la description des processus et formes de l'érosion ensuite sur l'évaluation et la modélisation de la susceptibilité à l'érosion en se basant sur les directives du centre d'activités régionales pour le programme d'actions prioritaires (PAP/CAR). L'étude focalisera aussi sur une adaptation et amélioration du modèle PAP/CAR suite à l'introduction de paramètres de l'érosion empruntés à d'autres modèles dont les résultats ont montré leur fiabilité.
3. Étude quantitative des pertes en sols. Elle porte sur la quantification des pertes en sols par l'application du modèle mathématique (RUSLE) au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

L'harmonie de thèse et structuré comme suit :

- La première partie comporte trois chapitres, elle sera consacrée à la présentation de la problématique de l'érosion hydrique; du cadre générale de la zone d'étude, des facteurs

causaux de l'érosion et les méthodes d'étude des sols et de l'érosion hydrique au niveau du territoire de la province Nador et du bassin versant Zenaga.

- Chapitre I détaille la problématique de l'érosion hydrique à l'échelle à l'échelle mondiale.
- Chapitre II concerne la présentation de la zone d'étude et des facteurs causaux de l'érosion (facteur anthropique et socio-économique, facteur climatique, facteur géologique, facteur couverture végétale et occupation des sols, le contexte géomorphologique).
- Chapitre III donne un aperçu sur les méthodes d'études appliquées. Il présente différentes modèles de l'érosion hydrique, ainsi que la méthodologie adoptée pour mener à bien cette étude. Dans ce chapitre nous traiterons aussi les méthodes et techniques d'évaluation de l'influence de l'évolution de l'occupation/utilisation des terres (LULC) sur les variations de la température de surface du sol (LST), considéré comme un indicateur déterminant de l'état d'humidité des sols et un facteur clés pour la surveillance de l'érosion hydrique.

-La deuxième partie comporte deux chapitres, elle sera consacrée à l'étude des sols et des matériaux mobilisable par l'érosion hydrique et de l'évolution de la température de la surface des sols (LST) et de l'occupation/ utilisation des sols. Elle est divisée en deux chapitres :

- Chapitre IV expose en détail les caractéristiques des sols, constituent les principales cibles de l'érosion hydrique. Il décrit aussi en détail la lithologie et la répartition des faciès de la province de Nador et du bassin versant Zenaga. Ce chapitre expose les résultats des analyses des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).
- Chapitre V expose les résultats d'analyse de l'évaluation par la télédétection de l'évolution de la température de surface des sols (LST), de l'occupation/ utilisation des sols (LULC) et des indices NDVI, MNDBI, MNDWI et LST au niveau de la province de Nador.

-La troisième partie est consacrée à la modélisation de la susceptibilité à l'érosion hydrique. Elle est divisée en deux chapitres :

- Chapitre VI dévoile les résultats de l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion par le modèle PAP/CAR.

- Chapitre VII présente les résultats de la quantification des sols par le modèle révisé de l'équation universelle des pertes en sol (RUSLE) au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

Première partie : Matériels et Méthodes

Chapitre I: Problématique de l'érosion hydrique

Chapitre I: Problématique de l’érosion hydrique

I. Problématique de l’érosion hydrique des sols au niveau méditerranéen et international

Le sol forme une fine couche de matériau à la surface de la terre composée de la matière minérale altérée, de la matière organique, d'air et d'eau (***FAO, 2019***). Selon ***Stolte et al. (2016)***, les sols sont les réservoirs majeurs de la biodiversité mondiale et le deuxième plus grand bidon de carbone sur terre, après les océans. Il représente un élément essentiel pour la vie humaine en soutenant la production agricole, qui fournit 95% de l'alimentation mondiale (***Borrelli et al.2020; Ferreira et al.2022***), mais en assurant et fournissant aussi des biens et des services précieux et pertinents pour les écosystèmes et le bien-être humain (***Panagos et al.2020***), tels que la production de biomasse, la filtration des contaminants, la régulation des flux et le transfert de masse et d'énergie entre les sphères (***Banwart et al.2019***).

Leurs propriétés et fonctions sont menacées par la surexploitation et la dégradation dues à une mauvaise gestion, avec des impacts sur leur productivité biologique et économique (***Mermut & Eswaran, 2001***). Actuellement, les sols fertiles sont des ressources essentielles pour soutenir l'humanité. Cependant, les effets du changement climatique et d'utilisation des terre, et la gestion incontrôlé dominée par l’action anthropique rend les sols souvent vulnérables à la dynamique de l'érosion hydrique, qui continue d'être une menace majeure des sols dans de nombreuses régions du monde (***Barbier, 1997; Sivakumar et Ndiang'Ui, 2007; Bajocco et al.2012***).

L'érosion hydrique est à l’origine de perte de la productivité des sols (***Karlen, 2005***), ce processus irréversible peut être fait en quelques minutes, en contrepartie la formation des sols nécessite des milliers d’années (***FAO, 2015***). En moyenne, un sol se forme à raison de quelques centièmes de millimètres par an, dans des conditions de maintien de biomasse optimale. Il n'est donc pas renouvelable à court et à moyen terme sans intervention humaine coûteuse. En revanche, sa dégradation peut être très rapide.

Selon ***Montanarella et al. (2015)***, l'érosion hydrique est la principale menace pour les fonctions du sol avec 40% des terres alertées. Actuellement, les sols arables ne se trouvent que dans des conditions de dégradations, où la tendance à l'érosion s'est accélérée d'une façon alarmante. Les sols arables, vivants et riches en matière organique se détachent par "Effet splash" puis se déposent. Ce processus est responsable de la projection de petites particules des sols humides (https://agclass.nal.usda.gov). Les éléments détachés peuvent être emportés et mobilisés ailleurs suite au ruissèlement. L'intensification de ce processus peut provoquer des dommages d'ampleur variable sur les infrastructures routières ou hydrauliques.

L’érosion des sols est un phénomène qui n’est pas limité, mais plus répondu pour certains endroits qui présentent des conditions favorables pour le déclenchement du processus de l'érosion hydrique. Récemment, les menaces croissantes ont poussé les sols du monde entier à la limite critique pour les services écosystémiques (***FAO, 2019; Lefèvre et al.2021***).

Dans l'Union Européenne (UE), 60 à 70% des sols sont dégradés en conséquence directe de pratiques de gestion non durables et ont perdu une capacité significative à fournir des fonctions écologiques pour diverses formes de vie (***Bertrand, 2015 ; PNUE/PAM, 2000***). Les pratiques humaines affectent les processus d'érosion naturelle et ont induit une augmentation pertinente et observable des taux d'érosion des sols à travers les paysages (***Poesen, 2018***). L'intensification des productions a largement contribué au dynamisme du secteur agricole (***Mabit et al.2002***). Pourtant, elle a conduit à l'accélération de la dégradation des ressources en eau et en sol.

L'érosion est la principale menace pesant sur les sols avec 792 800 000 de kilos d'humus érodés chaque seconde (***Tóth, 2008; Montanarella & Rusco, 2008).*** L'agence européenne pour l'environnement (***AEE***), estime que le problème affecte approximativement 17% de la surface du territoire à différents degrés, soit 26 millions d'hectares: environ 12% du sol sont menacés par l'érosion des eaux et 4% par l'érosion du vent (***Henin et Gobillot, 1950; De Ploey, 1990; Le Bissonnais et al.2002; FAO, 2010***). La surface affectée par l'érosion hydrique est estimée à 1,3 million de km² dans l'UE-27 (soit un quart des sols européens), tandis qu'un peu plus d'un cinquième des sols présentent une sensibilité à l'érosion éolienne (***BRGM, d'après Cerdan et al.2010***). Ces pertes en terre par érosion hydrique sont supérieures à 1 tonne par hectare et par an (t/ha/an), représentent environ 6 % du territoire européen pour les pertes supérieures à 5 t/ha/an et moins de 1 % pour les pertes en terre les plus sévères (plus de 20 t/ha/an).-

Selon ***Barbant (2008)***, trois (3) millions de km² de terres sont fortement dégradées par les pratiques humaines qui les ont rendus inutilisables pour l'agriculture. En effet, l'impact de l'érosion pose un problème dont la gravité varie d'une région à l'autre (***Roose, 2010***), au niveau de ces régions, des terrains fertiles sont partiellement ou totalement dégradés à cause, cédant la place à des terrains squelettiques complètement appauvris.

Actuellement, seulement 10% de terre sont cultivés, soit 1.5 millions d'hectares, sachant que 13.5 millions d'hectares de surface sont occupé dans le monde, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (***Kanwar, 1982***). On assiste à une perte considérable des terres cultivables estimé à peu près à 10 millions d'ha/an ces dernières décennies, devant cette menace, les terres cultivables seront totalement détruites après trois siècles. L'abondance des sols cultivés sur les montagnes et la pression anthropique croissante, renforcé par les nouvelles techniques de culture, surexploite les terres rapidement, est donc prévoie une érosion intense du sol (***Mesrar, 2016***).

L'érosion du sol existe également sur 95 millions d'ha de terres en Amérique. En Amérique latine, l'érosion hydrique touche 14,3% du territoire d'Amérique du Sud et 26% de l'Amérique centrale (***United Nations, 2002***).

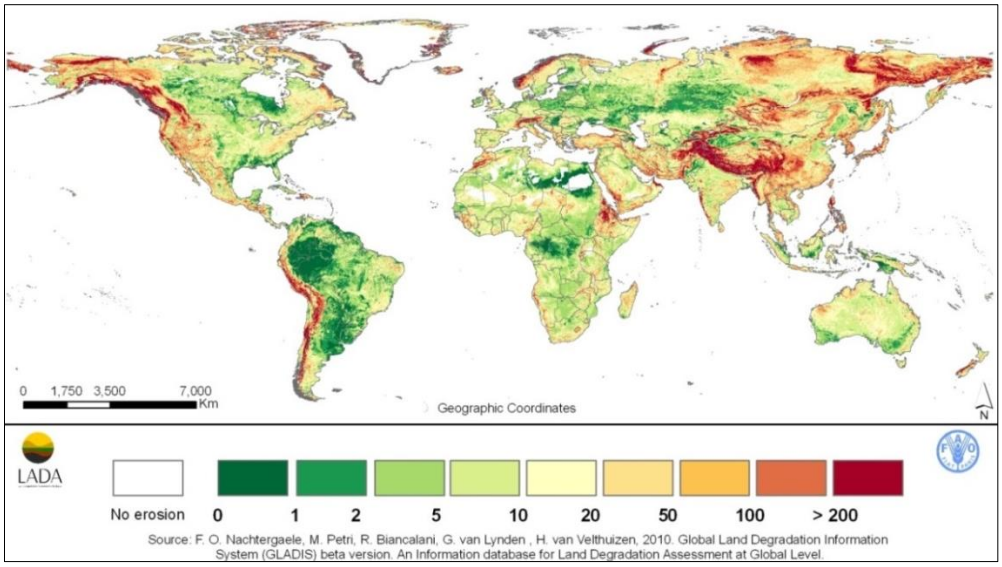


Figure 1: État de l'érosion hydrique des sols estimée en t/ha/an (***FAO, 2010***)

Par rapport à d'autres régions, la dégradation des sols touche gravement la Chine avec plus de 40% des terres arables dégradées en termes d'étendue, d'intensité, d'impacts socio-économiques et de nombre de populations affectées (***Bai et Dent 2009***). L'érosion des sols en Chine touche une superficie de 3,56 millions de km^2, soit 37 % de la superficie totale. En particulier sur le plateau de Lœss, plus de 1,6 milliard de tonnes de sédiments se dépose chaque année dans les lits des rivières en aval (***Delang, 2018***).

Avec seulement 7,2% des terres cultivées dans le monde, la Chine doit nourrir 22% de la population mondiale. La production agricole est donc un problème crucial lié à l'économie et aux moyens de subsistance des citoyens en Chine (***Deng et al.2008***). La croissance rapide de la population et l'urbanisation, l'utilisation irrationnelle des sols par l'homme et l'influence des facteurs naturels ont causé la dégradation de 5,392 millions de km² de terres, représentant environ 56,2 % de la superficie nationale totale. Parmi ces pertes, les zones de dégradation des terres résultant de l'érosion des sols, la désertification, la salinisation des sols, la dégradation des pâturages et la pollution des sols sont respectivement de 1.80, 0.334, 0.9913, 2 et 0.267 millions de km² (***Long, 2013***).

Les sols propices à la production agricole ne représentent qu'environ 1,3 million de km², ce qui représente 14 % de la superficie totale des terres en Chine. L'érosion des sols au niveau des plateaux en moyenne était de 15.2 t.ha-1.an-1en 2000-2010 (***Suna et al, 2014***). En outre, plus de 50% du total des terres cultivées ont subi une dégradation des sols avec des pertes de l'ordre de 4,52 milliards de tonnes chaque année, ce qui exerce une pression supplémentaire sur les avantages économiques de la production agricole et la sécurité alimentaire.

La région méditerranéenne est considérée comme un « *point chaud* » climatique avec des manifestations très agressives en automne et en hiver (***IPCC, 2012, 2019***). Selon ***Toreti et al. (2010)***, la région au fil du temps a connu à plusieurs reprises des précipitations intenses avec de forts impacts socio-économiques et environnementaux. Cependant, le changement

climatique actuel a accentué les périodes de sécheresse qui ont touché plusieurs secteurs des pays méditerranéens (***Medejerab & Henia, 2011; Szczypta, 2012***). Ce fléau a compliqué l'approvisionnement en eau potable à partir des réserves stockées dans les réservoirs derrière les barrages. Ces changements reflètent la forte probabilité d'avoir une tendance croissante à l'aridité, qui à son tour accélère le processus d'érosion hydrique en augmentant la vulnérabilité des sols à l'érosion (***Stefanidis et Stathis, 2018 ; FAO, 2019, Zaher et al.2021; Tahouri et al.2022***). Selon la ***FAO (2010),*** les sols dans la zone méditerranéenne sont très touchés par l'érosion hydrique. 40% des terres au Maroc, 45% en Tunisie et 50% en Turquie se trouvent fortement menacé par cette forme de dégradation. Cette dernière est la résultante des pressions anthropogéniques conjuguées aux conditions climatiques.

Dans les milieux montagneux méditerranéens, la déforestation par la suppression de la végétation naturelle pour développer l'agriculture a augmenté les zones sujettes à l'érosion (***Foley et al. 2005 ; Lizaga et al.2018***). Ces types d'agroécosystèmes sensibles sont sujets à l'érosion non seulement en raison des conditions climatiques, mais aussi en raison de la forte pression anthropique exercée et de leur conversion en terres agricoles (***Romanya & Rovira, 2011 ; Bruun et al. 2015; Colazo & Buschiazzo, 2015***). Ces pratiques inadéquates ont créé des problèmes frappants, en particulier dans les régions et les zones montagneuses où il y a des terres agricoles accompagnées de conditions environnementales défavorables: hautes altitudes, pentes raides, sols peu profonds et conditions climatiques sèches avec parfois de fortes pluies. Tous ont été identifiés comme l'un des principaux facteurs de perte de sol (***MacDonald et al.2000; Martínez-Casasnovas et al.2002***) en augmentant les taux d'érosion par rapport à l'érosion par le travail du sol (***Quijano et al.2016b***).

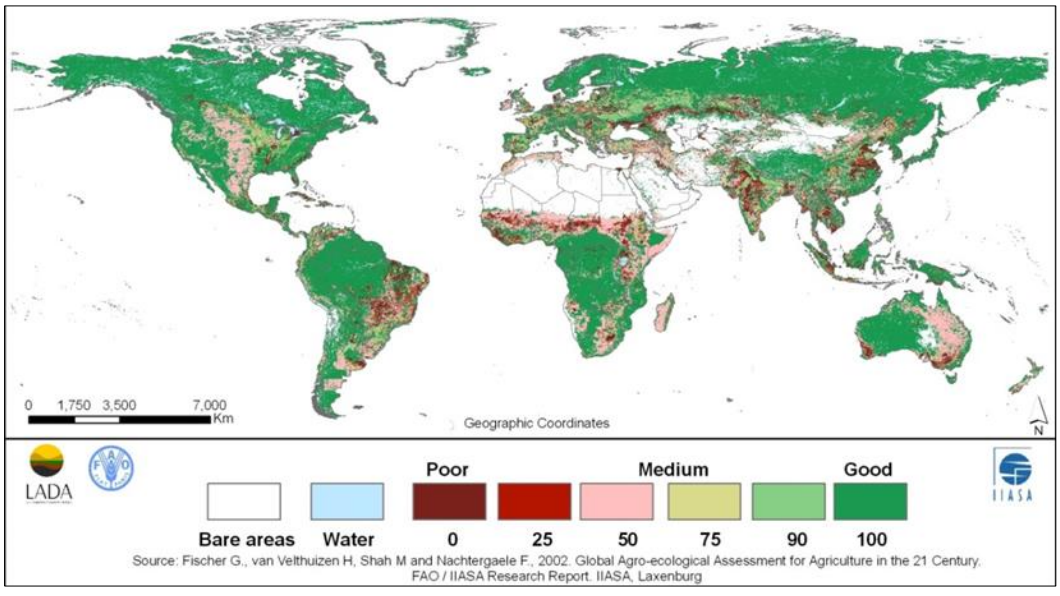


Figure 2: État de fertilité des sols pour l'utilisation actuelle des terres - Rapport GLADIS (***FAO, 2010***)

Des études faites sur la vulnérabilité à la désertification en Afrique en se basant sur les informations relatives au sol, le climat et les contraintes sur les ressources terrestres ont montré que le processus de désertification affecte environ 46% de l'Afrique (***Reich et al.2019***). Selon le Bilan de la restauration des forêts et des paysages en Afrique (***Mansourian & Berrahmouni, 2021 in FAO and AUDA-NEPAD, 2021***), 65% des terres productives sont

dégradées, avec une désertification qui affecte 45% des terres entrainera des pertes nettes de quatre millions d'hectares de forêts qui disparaissent chaque année (***Mansourian & Berrahmouni, 2021***). Ce fléau en Afrique et dans les pays de la rocade méditerranéens est le résultat d'une interaction longue et intense entre les activités humaines et le milieu naturel donnant ainsi naissance à une érosion grave dont l'évaluation de l'ampleur du phénomène est rendu difficile pour ces zones vulnérables aux effets du changement climatique.

La problématique de l'érosion et la dégradation des sols occupe une place de plus en plus importante dans la gestion des territoires à l'échelle du bassin méditerranéen. La compilation de résultats sur l'évolution de l'érosion hydrique à l'échelle nationale et même mondiale démontre un constat similaire: les changements climatiques combiné à l'action humaine ont un impact direct sur l'évolution des sols au niveau des zones côtières (***Allison et al.2009; GIEC, 2007; Lozano et al.2004; Forbes et al.2008; Neumann et al.2013***). A ces endroits, les facteurs influençant l'érosion hydrique expriment bien la fragilité du milieu, qui avec les changements climatique actuelle, s'évolue graduellement vers le pire. Ces zones sont actuellement sous pression avec perturbations naturelles et anthropiques intensifiées ont été aperçue, caractérisées notamment par les aléas de submersion et d'érosion (***Morton, 1979; Crowell, 1999; Gibeau et al.2000; Mallet & Michot, 2012; Smeeckaert et al.2013***).

Sur tous les bassins versants méditerranéen, l'intensification des productions a largement contribué au dynamisme du secteur agricole (***Mabit et al.2002***). Pourtant, elle a conduit à l'accélération de la dégradation des ressources en eau et en sol. Dans la rive sud de la méditerranée, le climat semi-aride est un facteur dominant dans la sévérité du phénomène de l'érosion hydrique. La succession de périodes sèches et humides ainsi que les variations spatio-temporelles des précipitations dans les zones montagneuses, provoquent des écoulements torrentiels (***Yahiaoui, 2012***). En effet, le processus d'érosion hydrique auquel les pays de la région méditerranéenne répondent très bien est sans doute en grande partie responsable de cette géomorphologie actuelle. Sous ces conditions climatiques, la dégradation des sols s'exprime par une diminution de la densité de la végétation, une perte de la matière organique et de la capacité de rétention, une minéralisation accrue du paysage, l'apparition d'entailles d'érosion actives et une salinisation progressive des terres irriguées.

Les changements climatiques actuels ont accentué les périodes de sécheresse qui ont touché plusieurs secteurs des pays méditerranéens (***Medejerab & Henia, 2011; Szczypta, 2012***). Ce fléau a compliqué l'approvisionnement en eau potable à partir des réserves stockées dans les réservoirs derrière les barrages. Ces changements reflètent la forte probabilité d'avoir une tendance croissante à l'aridité, qui à son tour accélère le processus d'érosion hydrique en augmentant la vulnérabilité des sols à l'érosion (***FAO, 2019, Tahouri et al. 2022***). Plusieurs facteurs causaux interagissent, pour générer des conséquences drastiques dans des périodes relativement courtes.

La faible abondance des sols cultivables sur les montagnes et la pression anthropique croissante renforcée par les nouvelles techniques de culture, surexploite les terres est donc

accélère la dégradation des sols et augmente l'intensité de l'érosion hydrique (***Mesrar, 2016; Bruun et al. 2015; Colazo & Buschiazzo, 2015; Romanya & Rovira, 2011***).

Des pertes considérables ont été recensées, la dégradation intense des forêts et du couvert de végétation naturelle par les incendies fréquents, au surpâturage et à la surexploitation des terres fertiles pour l'agriculture et l'urbanisation. Tout cela témoigne de la pression intense exercée sur ce milieu naturel provoquant une dégradation progressive des paysages naturels, et des ressources en sols en particulier.

II. Problématique de l'érosion hydrique au Maroc

L'érosion hydrique au niveau des pays du bassin méditerranéen est le résultat d'une interaction longue et intense entre les activités humaines et le milieu naturel. Le défrichement des forêts et de la végétation naturelles, les incendies fréquents, l'exploitation de terres marginales (***A. E. F. C. S, 2017***), le défoncement des croûtes calcaires et l'épierrage des sols, les précipitations irrégulière, et la prédominance d'un substrat constitué de roches tendres, de nature friable, figurent les principales causes de l'aggravation du phénomène de l'érosion hydrique qui fragilise et rend les sols plus vulnérables à l'érosion.

Les répercussions du phénomène sont négatives, constitue l'un des obstacles majeurs au développement durable (***Sadiki, 2005***). Les faits connus sur le coût de l'érosion sont soit des effets immédiats sur site de l'érosion et du ruissellement sur la production (régression du patrimoine végétal, diminution de la fertilité des sols). D'autre part et loin des zones pourvoyeuses, les problèmes et les dommages causés par l'érosion hydrique sont nombreux:

- L'ensablement des lits de cours d'eau ce qui augmente l'envergure des crues, réactive le creusement des rivières, dégrade les berges, favorise l'eutrophisation, pollue l'eau par les nutriments et les matières en suspension ;
- L'ensablement des barrages et des lacs collinaires ce qui entraine la réduction la qualité et de la quantité d'eau indispensable au développement des villes et de l'agriculture intensive.

Les conséquences de la dégradation des sols pour les populations tendent vers l'évacuation de régions entières. Ceci a amené la mise en place de conventions et projets interdisciplinaires nationaux et internationaux à savoir la convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (***UNCCD)***, signée en 1994 et ratifiée par le Maroc en 1996 ; les projets ***HYDROMED***, ***MERGUSI*** et ***CAMELEO*** financés par l'état et la Commission Européenne***; et*** le plan national de lutte contre la désertification ***(PANLCD).***

Le Maroc, pays à potentiel hydrique moyen, occupe une position clé dans le bassin méditerranéen et l'Afrique. Trois domaines structuraux du Nord au sud sont distinguer: le domaine Rifain, Atlasique, Anti-atlasique et ses confins sahariens (***Michard, 1976***). Ces milieux naturels présentent certaines fragilités, accentuées par la multiplication de plusieurs formes de dégradations : la raréfaction de la végétation pérenne, la sensibilité des sols à l'érosion, l'agressivité du climat qui se distingue par des averses brutales sur des sols parfois à

forte pente et à faible couverture végétale. Ces facteurs morpho-climatiques voient leur effet dégradant s'accentuer par le comportement de l'homme.

L'inventaire montre que les ressources naturelles ont de plus en plus du mal à se renouveler et à assurer leur pérennité (**Laouina, 2006**). Dans ces milieux, les sols sont souvent vulnérables et les horizons profonds sont mis à nu (**Mesrar, 2016**), avec des dégradations qui varient selon la résistance des sols au processus de l'érosion hydrique. Des conséquences graves sont perçues pour l'économie basée notamment sur l'agriculture qui contribue à environ 20% du PIB (***Aboulabbas et al.2005*).**

Les montagnes du Rif couvrent 6% de la superficie totale; reste un segment marocain à fort potentiel hydrique, fournissant à lui seul plus de 60% des sédiments mobilisés chaque année sur tout le territoire (***Heusch, 1970*).** Les pertes enregistrées dans le Moyen Atlas varient de 5 t/ha/an à plus de 50 t/ha/an dans le Rif (***HCEFLCD, 2013***). Des études sur les taux de sédimentation dans les réservoirs de différents bassins versants ont montré que l'érosion varie de 59 à 2000 t/ha/an dans le bassin versant de l'oued Ouergha (***A. E. F. C. S, 1999***). Une étude réalisée par ***Sadiki (2005)*** au niveau du bassin versant de l'oued Boussouab (Rif oriental, Maroc) par application de l'équation universelle des pertes en sol (USLE) a permis de déterminer que le taux d'érosion par le ruissellement en nappe estimée à 55,35 t/ha/an en moyenne, ainsi que d'établir les facteurs décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique. En ***2016, Mesrar*** a montré par utilisation du modèle empirique révisée RUSLE que l'érosion enregistre un maximum de 189.06 t.ha-1.an-1 avec une moyenne de 41.41 t.ha-1.an-1 au niveau du bassin versant Sahla. D'autre part, la simulation de l'évolution de l'érosion des sols dans un bassin versant montagneux semi-aride du Haut Atlas (***Simonneaux et al.2015***), a montré que l'érosion sur les badlands produit 350 t/ha/an. Une étude antérieure au niveau du Haut Atlas Occidental du Maroc (***Gourfi et al.2018*)** a montré que la variation du taux d'envasement permettait de mettre en évidence deux périodes de sédimentation distinctes, une ancienne (1988-1999) caractérisée par un rendement sédimentaire élevé SY (908,6 t/km^2/yr) et un autre plus jeune (1999-2016) caractérisée par un SY faible (203,9 t/km^2/yr). Des études antérieures selon le Plan National d'Aménagement des bassins versants (***P. N. A. B. V***) ont montré que la capacité totale actuellement perdue par les barrages est d'environ un milliard de m^3, soit l'équivalent de la retenue d'eau des barrages existants, correspondant à la quantité d'eau nécessaire pour irriguer 5000 à 6000 ha/an.

Dans les perspectives du changement climatique particulièrement des régions méditerranéennes, les prévisions sont de plus longues sécheresses ainsi que des événements de précipitations plus extrêmes (***Gerard et al.2009***). Cette tendance climatique aura de grave répercussion sur la persistance de la couverture végétale pour la culture comme il se produit sur les pentes de la chaîne du Rif au Maroc (***Sadiki et al.2007***).

Cette tendance à la dégradation et l'érosion des sols peut être liée à la fragilité du milieu. Les environnements marocains sont caractérisés par une faible couverture végétale avec peu de végétation pérenne. La sensibilité des sols à l'érosion et l'agressivité du climat qui se caractérise par des averses brutale sur des périodes relativement courtes et sur des sols à forte

pentes. Le Maroc qui connait un développement marqué, une croissance démographique importante qui augmente la pression sur les ressources naturelles. Une pression plus importante sur les sols par une exploitation accrue des terres surtout céréalière. Ceci appauvrit et dégrade leurs propriétés physico-chimiques, aggrave leur dégradation et diminue leur productivité. Cela a pour conséquence la détérioration de la qualité de vie des populations rurales.

III. Problématique et justification du choix de la région de Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) pour l'étude l'érosion hydrique

Le Rif fait partie de la chaine Alpine transméditerranéenne, sa géologie, morphologie et son climat sont tout à la fois souvent spectaculaire et diversifiées. Cependant, les conditions naturelles et anthropiques sont favorables à une dynamique de surface très active qui peut être à l'origine de nombreux risques naturels (érosion hydrique, mouvement de terrain, crue torrentielles…).

La région de Nador, située au Nord-Est du Maroc est une subdivision à dominance rurale qui fait partie du Rif Oriental avec Driouch et de Taourirt. Eu égard à sa position géographique, la région se caractérise par un climat méditerranéen, avec de faible précipitations et des écarts thermiques très importants. La région est caractérisée par son aridité malgré les influences marines méditerranéennes. Le paysage géographique est caractérisé par une légère dominance de montagnes sur les autres reliefs, suivie de plaines, et enfin les plateaux. Les vents les plus fréquents sont ceux de l'Ouest-Sud-Ouest en hiver et ceux de l'Est-Nord-Est en été (***Dakki, 2003***).

La densité de la population est de l'ordre de 175.5 hab. /km² soit un taux d'urbanisation de 69.4% (***HCP, 2016***). Entre 2004 et 2014, une augmentation de la population de 59583 habitants passant de 505360 hab. à 564943 hab. a été enregistrée à Nador, soit un taux d'accroissement annuel de 0.98%. Les ménages ont augmenté aussi de 25182, avec une taille moyenne des ménages de 4.5 (***RGPH, 2014***). Les projections démographiques 2014-2030 (***HCP, 2017***) prévoient un effectif à peu près 2.725.106 hab. pour la région de l'oriental, soit 6,9% de la population totale du royaume.

Les faciès lithologiques de la région Nador sont très variés avec une dominance avec une friables. Selon l'Annuaire Statistique de la Région de l'Oriental, la région dispose d'une forêt naturelle s'étendant sur une superficie de 110560 ha, soit 4,8% des forêts et nappes au niveau de la région de l'Oriental (***HCP, 2021***). L'agriculture constitue un secteur important. La superficie agricole utile est estimée à 239657 hectares, soit 32,8% des superficies utiles de la région (729776 ha), et ce au terme de la saison agricole 2014-2015. Les zones irriguées couvrent une superficie de 37.080 ha, soit 32,3% de la superficie totale des terres agricoles irriguées dans la région.

Le bassin versant Zenaga est inscrit au niveau de la région de Nador, sur une superficie de 1213.75 km², ça partie avale est ouverte sur un écosystème lagunaire "Marchica" naturel sous forme ovale avec une superficie de 115 km². Ce milieu lagunaire est séparé de la

Méditerranée par un cordon littoral dunaire fragile de 25 km de long. Le bassin versant est caractérisé par une altitude moyenne de 550 et une altitude médiane de 110 m, les parties amont du bassin montrent des crêtes montagneuses allant de 600 à 1000 m d'altitude, les pentes sont fortes et dépassent souvent 35%. Le bassin versant Zenaga est allongé avec une ligne de partage des eaux de 415.70 km², caractérisant un bassin mal drainé. Le réseau hydrographique est complexe parfois dendritiques dans des terrains imperméable et des sédiments uniformément résistants avec des pentes moyennes à forte, montrant une forte densité et une dynamique importante. Le volume d'eau tombé est estimé à 285.5×10^6 m^3. an^{-1}, permettant le développement de différentes formes et processus d'érosion que ça soit pour les terrains nus, les terres agricoles ou les surfaces bâtis.

Cette situation prédispose la région de Nador et le bassin versant Zenaga au risque de l'érosion hydrique. Ce processus naturel est rendu accéléré par les pratiques humaines. Bien qu'ils menacent de larges zones, ce phénomène n'a été que très peu étudié dans cette région et des méthodes de mesure et contrôle s'avèrent nécessaires pour assurer une bonne protection de la population et une gestion durable des ressources naturelles.

Aujourd'hui, des projets de grande envergure vont s'implanter pour faire de la région de Nador une métropole régionale, mais ce développement se trouve confronté à des contraintes liées à l'intensification et à l'accélération des processus de l'érosion hydrique. Le territoire est connaît une dégradation intense des ressources naturels liée au risque de l'érosion hydrique, qui inquiète de plus en plus les autorités locales et les institutions en charge, particulièrement avec l'intensification des effets des instabilités climatiques ces dernières années.

Le risque de dégradation et d'érosion des sols liée à l'érosion hydrique restent le risque le plus fréquent, elles perturbent les équilibres économiques et sociaux sur ce territoire. Ces phénomènes génèrent de plus en plus d'impacts néfastes sur l'organisation structurelle et le fonctionnement de ce territoire, en particulier, dernièrement avec le rythme des profondes mutations liées aux dynamiques spatiales, sociales et économiques.

Chapitre 2 : Présentation du cadre générale de la zone d'étude et des facteurs causaux de l'érosion hydrique

I. Facteur anthropique et socio-économique

La province de Nador occupent une position clés au nord-est du Maroc, elle est limitée par la méditerranée au nord, la province de Berkane à l'est, à l'ouest par la province de Driouch; au sud par la province de Guercif, et au sud-est par la province de Taourirt (***HCP, 2017***). Nador possède une façade maritime de 153 km avec une superficie d'environ 3263 km², soit 3,94% de la superficie totale de la région orientale estimé à 66 439 km². Elle s'étend du nord au sud sur environ 88 km et de l'est à l'ouest sur environ 85 km. En 1959, Nador a été érigé au rang de province par le dahir portant loi N°1-59-351 du 2 décembre 1959 relatif à l'organisation administrative du royaume. Selon le guide juridique des collectivités locales (***DGCL, 2010***), la province est composée de 23 communes dont: 7 communes urbaines et 16 communes rurales rattachées à 8 caïdats, eux-mêmes rattachés à 2 cercles (Guelaia et Louta). La ville de Nador joue le rôle du chef-lieu au niveau organisation territoriale, entourée par des villes secondaires qui reçoivent l'extension urbaine de l'agglomération.

Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est situé au niveau de la province de Nador (Figure 3), il occupe une position clé au niveau du bassin hydraulique de la Moulouya au sein de la région de l'oriental sur le versant méditerranéen du Rif avec une superficie estimée à 1213.75 km². Le bassin versant se situe entre les latitudes 34°50'N et 35°17'N et entre les longitudes 02°20'W et 03°13'W. Il possède la forme sub-triangulaire, délimitée par deux ensembles montagneux qui se rejoignent au sud-est du bassin et la lagune de Marchica: le chaînon allongé des massifs de Kebdana, culmine à 932 m (***Mahjoubi et al.2003***), et l'ensemble montagneux du massif montagneux aligné nord-sud formé par le Gourougou à 893 m et les Bni Bou Ifrour à 697 m. La partie avale du bassin est ouverte vers le nord-ouest sur la Marchica, un écosystème naturel lagunaire de 115 km² séparé de la Méditerranée par un cordon dunaire littoral fragile de 25 km de long (***Lefebvre et al.1997***).

En égard à sa position géographique, la province de Nador, au sein de laquelle est inscrit le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est caractérisée par une aridité malgré son climat méditerranéen à caractère saisonnier, principalement due à des anti-dépressions météorologiques chaudes. Les précipitations sont faibles souvent sous forme d'averses orageuses avec des écarts thermiques très importants. Les précipitations annuelles enregistrent une moyenne de 200 à 400 mm, avec un nombre moyen de jours de pluie de 50 jours (***SDAR, 2015; HCP, 2017***). Les températures minimales et maximales varient entre 5°C et 42°C. Les températures moyennes maximales sont enregistrées en été au mois de juillet (28°C à 32°C) alors que celles minimales sont enregistrées au mois de janvier (environ 5°C à 7°C). Les vents les plus fréquents sur le territoire de Nador, voir même au niveau du bassin Zenaga sont ceux de l'Ouest-Sud-Ouest en hiver et ceux de l'Est-Nord-Est en été (***Dakki et al.2003***) avec une vitesse qui varie entre 5 et 7m/s.

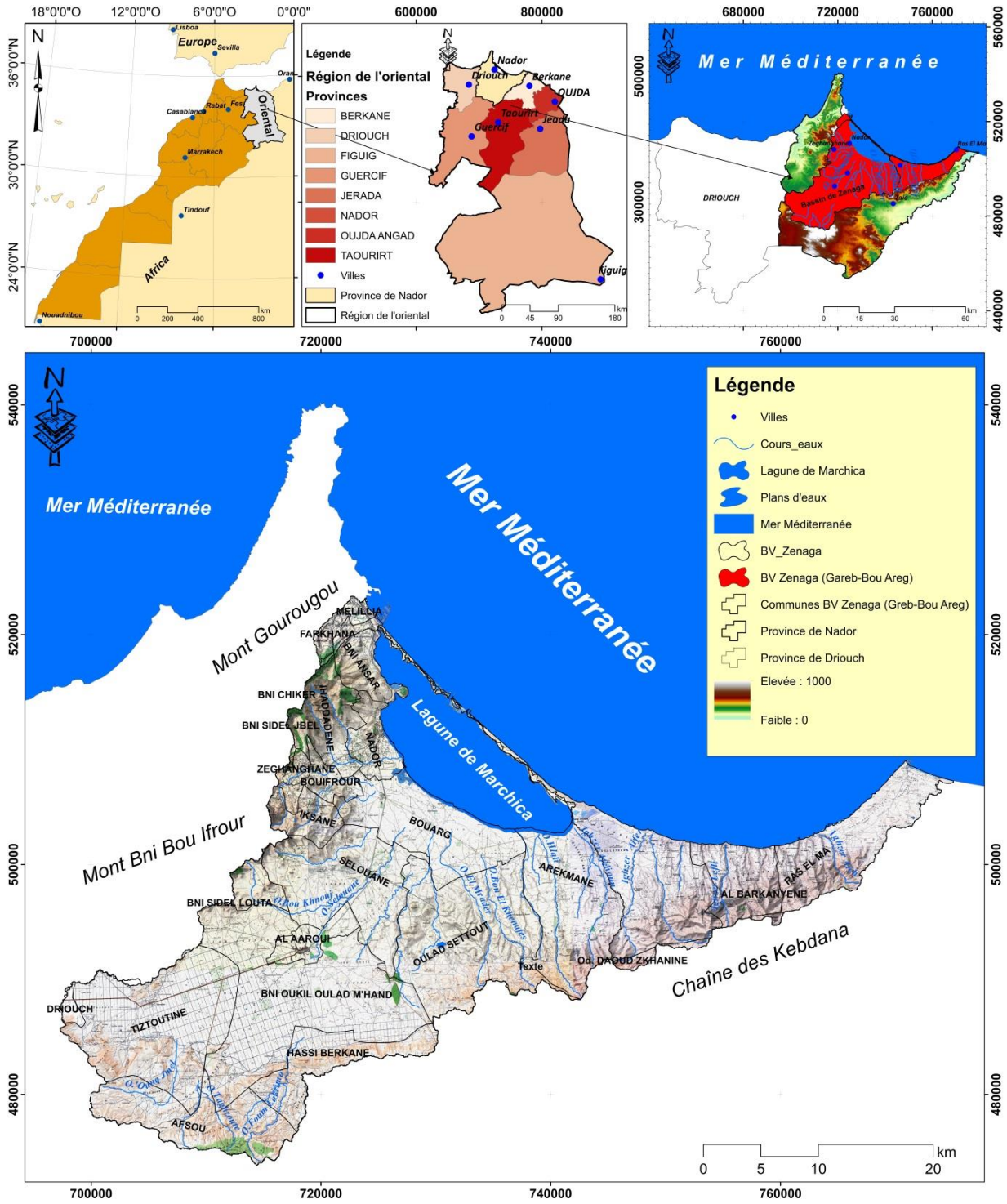


Figure 3: Situation du bassin versant Zenaga (Gareb- Bouareg) dans le contexte de la province de Nador

ses potentialités économiques, lui confère de jouer un rôle économique de premier ordre non seulement au niveau de la région, mais aussi au niveau régional et national. L'économie s'articule principalement autour de deux catégories d'activités: les activités productives qui créent la richesse suite à des actions d'exploitation et de transformation des ressources naturelles (agriculture, élevage, pêche et les mines) ; et les activités complémentaires ou d'accompagnement (activités commerciales, services marchands ou non marchands).

La région grâce à la présence des barrages permettent l'irrigation de 27000 hectares sur les principales plaines de la province (Gareb-Bouareg). La nappe de Gareb-Bouareg présente la principale nappe des ressources en eau souterraines de la province. Cette nappe s'étend sur une superficie de 570 km^2 (***ADS, 2005; Lyazidi et al.2017***). L'espace forestier regorge de richesses floristiques indéniables qui constituent une ressource naturelle de valeur écologique et écosystémique voire même financière pour la région de Nador. Ce patrimoine non renouvelable procure une importante diversité d'associations végétales en relation avec la diversité de ses habitats entre l'amont et l'aval, qui dépend des conditions climatiques, de la morphologie, de la nature du sol et de l'action anthropique. Ces facteurs sont très variables dans la province de Nador.

Les espaces forestiers sont concentrés principalement au niveau de la lagune de Marchica, du Mont de Gourougou, d'Afra et au niveau du cap des trois fourches: la forêt de Jbel Bayou entre les deux villes de Nador et Beni Nsar, la forêt du cap des trois fourches, la forêt de Tazouda sur le massif de Gourougou et la forêt d'Afra, dont la superficie s'élève à 68000 ha (***HCEFLCD, 2017***). Dans le reste du territoire, le couvert végétal naturel est carrément absent, nous ne trouvons que de l'arboriculture dense au niveau des pieds de montagnes, ainsi que quelques petits reboisements assez développés dans la plaine de Bouarg (10 km^2 sur les abords de la lagune) et (0.3 km^2) sur les versants d'Igounaf, ainsi que quelques banquettes en oliviers sur les versants du Gourougou.

L'agriculture constitue un secteur prometteur de la région de Nador. La superficie agricole utile est estimée à 239 657 hectares, soit 32,8% des superficies utiles de la région de l'oriental estimé à 729 776 ha **(*HCP, 2017***). Les zones irriguées couvrent une superficie de 37 080 ha, soit 32,3% de la superficie totale des terres agricoles irriguées dans la région orientale. Quant à l'agriculture en bour, elle s'étend sur une superficie de 96 836 ha représentant 27,5% de la superficie totale des terres agricoles bour de la région durant la saison agricole 2014-2015. La région occupe une bonne position en matière de production agricole notamment sur le plan des agrumes, des maraîchages et de l'arboriculture. La production et l'élevage des bovins sont très pratiqués dans les zones irriguées où se développent particulièrement les cultures fourragères. Dans les zones montagneuses, l'élevage des ovins et des caprins, fortement pratiqué, constitue la principale ressource complémentaire des populations.

A l'échelle du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) les sols sont de plus en plus vulnérables. La dégradation des sols causée par de nombreux facteurs, dont certains sont naturels, tandis que les activités anthropiques en causent d'autres. Les principales causes de détérioration est l'intensification des processus de l'érosion hydrique, la pollution agricole, industrielle et commerciale; l'urbanisation, au surpâturage et aux pratiques agricoles non durables ainsi qu'aux changements climatiques à long terme. Pour conséquence, ces pratiques ont conduit à l'augmentation de la quantité de matériaux perdus par les sols et qui se retrouvent dans les cours d'eau, les retenues de barrages, les lacs et les zones de sédimentation.

Actuellement, les ressources naturelles (la végétation naturelle, les sols, les ressources en eaux...) de Nador sont dans un état de dégradation important. La compréhension de la répartition spatio-temporelle des populations et de leurs activités socio-économique s'avère très intéressant dans l'établissement du diagnostic de l'érosion hydrique des sols. Le diagnostic permettra de choisir les méthodes adéquates et fiables afin de mieux conserver le patrimoine pédologique et de garantir son fonctionnement que ça soit pour les générations actuelles ou futures, et donc favoriser le développement durable de la région de Nador et des régions avoisinantes.

Tableau 1: Données de la population actualisée à l'horizon 2014

	POP94	**MEN94**	**UR94%**	**POP04**	**MEN04**	**UR04%**	**POP14**	**MEN14**	**UR14 %**
Maroc	26.073.717	4061166	51.4	29.891.708	5665264	55.1	33.848.242	7.313.806	60.3
Oriental	1.768.691	165822	55.2	2 097 820	398 630	62	2 310 392	494 530	65.4
Nador	112450	116026	1.16	126 207	100 769	1.16	564 943	125 951	70

NB : POP : Populations ; **POP94 :** Populations 1994 **; MEN94 :** Ménages 1994 **; UR94% :** Taux d'urbanisation en % **; PAP04 :** Populations 2004 **; MEN04 :** Ménages 2004 **; UR04% :** Taux d'urbanisation en 2004 (%) **; POP14 :** Populations 2014 **; MEN14 :** Ménages 2014 **; UR14% :** Taux d'urbanisation en 2014 (%)

Nador connait à l'instar de plusieurs provinces du royaume un dynamisme marqué par une croissance démographique (Tableau 1). Sa position géographique aussi bien provinciale que régionale et son développement socio-économique en fait un lieu d'attraction des populations des régions voisines surtout ceux provenue des zones rurales de la région orientale, voire même d'autres régions du Maroc.

La population a enregistré entre 2004 et 2014 une augmentation de 59 583 habitants passant de 505 360 hab. à 564 943 hab., soit un taux d'accroissement annuel de 0.98%. La taille moyenne des ménages à atteindre 4,5 avec une augmentation de 25 182 ménages au cours de la même période (***RGPH, 2014***). La population urbaine s'élève à 392 623 habitants avec une densité de de l'ordre de 175.5 hab. /km² soit un taux d'urbanisation de 70%.

Tableau 2: Projection de la population selon la préfecture et les provinces en 2014, 2020 et 2030

Province / Préfecture	**Population**			**Poids (en %)**			**T.A.A.M(%)**
	2014	**2020**	**2030**	**2014**	**2020**	**2030**	
Berkane	288705	299483	318261	12.5	12.2	11.7	0.61
Driouch	211552	192582	168837	9.2	7.8	6.2	-1.40
Figuig	138216	139631	141025	6.0	5.7	5.2	0.13
Guercif	216266	230556	263402	9.4	9.4	9.7	1.24
Jerada	108656	108918	107467	4.7	4.4	3.9	-0.07
Nador	563993	605894	677468	24.4	24.7	24.8	**1.15**
Oujda-Angad	549435	624459	756616	23.8	25.4	27.7	2.02
Taourirt	232594	251706	292030	10.1	10.3	10.7	1.43
Région	2309147	2453229	2725106	100.0	100.0	100.0	**1.04**

NB : **T.A.A.M** : Taux d'accroissement annuel moyen----- Source : ***HCP & CERED, 2017***

Par ailleurs, en comparaison avec d'autres provinces de la région de l'oriental, Nador ne cesse d'imposer son poids démographique qui a atteindre en 2014 le taux de 40% de la population régionale. Une telle augmentation peut être expliquée par l'exode rural des populations actives vers les villes d'attraction, qui présente un certain niveau de développement économique, surtout suite à la dégradation des ressources naturelles, la diminution des sources de revenus et l'augmentation de la pauvreté.

Selon les projections démographiques 2014-2030 (***HCP, 2017***), la région de l'oriental qui comptait un effectif de 2.310.392 habitants en 2014, compterait en 2030 à peu près 2.725.106 hab., soit 6,9% de la population totale du royaume (Tableau 2). Enregistrerait ainsi un taux d'accroissement démographique annuel moyen de l'ordre de 1,04%, contre 0,96% au niveau national.

Tableau 3: Caractéristique démographiques des communes du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), province de Nador (***HCP, 2017***)

COMMUNE	POP04	POP14	MEN 04	MEN 14	POP < 6 ans	6 <POP < 14 ans	15<POP<59 ans	POP>60 ans
Bni Sidel Louta	7331	6283	1475	1389	10,40	13,50	62,80	13,30
Bni Sidel Jbel	9623	8930	9623	2002	9,90	14,40	64,10	11,50
Iksane	9001	8417	1744	1870	10,20	14,40	63,70	11,70
Bouifrour	7593	6418	7593	1400	11,50	14,70	63,90	9,80
Zeghanghane	20134	34025	4242	7941	10,70	14,30	64,10	10,90
Od. Daoud	3666	3940	750	942	8,90	12,90	62,70	15,50
Tiztoutine	5979	9788	1005	1968	11,30	14,40	63,80	10,50
Al Aaroui	36021	47578	6923	10132	11,60	14,50	65,20	8,70
Hassi Berkane	8113	8762	1344	1585	12,30	15,80	62,50	9,40
Driouch	10381	14741	2078	3285	12,30	14,40	64,50	8,70
Selouane	9211	21570	1964	5025	12,20	15,10	64,40	8,30
Bni Chiker	4188	26159	3583	5619	11,30	15,60	62,30	10,80
Farkhana	10990	18232	2134	2803	13,20	16,70	59,80	10,30
Bni Ansar	31800	55556	31800	12897	11,60	14,90	65,10	8,40
Nador	124915	159590	26961	37565	10,50	13,90	66,20	9,40
Arekmane	13732	18490	2636	4180	9,70	13,80	65,00	11,40
Al Barkanyene	1619	2540	298	565	9,50	13,10	64,10	13,30
Ras El Ma	5356	7580	1031	1836	9,40	12,50	66,60	11,50

L'analyse du recensement de la population au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) montre que la population a augmenté de 178 275 habitants entre 2004 et 2014 (Tableau 3). Les communes de Nador, Bni Ansar, Al Aaroui, Bouareg et Zeghanghane, ont enregistrées les plus hautes densités, avec respectivement 159 590, 55 556, 47 578, 377 37 et 34 025 habitants en 2014, alors que les communes d'Al Barkanyene, Afsou et d'Od. Daoud Zkhanine n'ont enregistrait que de faibles densités avec 2 540, 2 932 et 3 940 habitants en 2014. On constate que les ménages les plus importantes sont ceux des communes les plus peuplées.

Tableau 4: (a) Répartition des ménages selon le type de logement occupé et le milieu (En %); (**b**) Répartition des types de logement pas commune (En%)

Type de logement	Urbain	Rural	Ensemble
Villa, niveau de villa	2.4	1.7	2.2
Appartement	8.3	0.1	6.0
Maison marocaine	85.7	62.0	78.9
Maison sommaire ou bidonville	1.5	0.9	1.3
Habitation de type rural	0.9	34.5	10.5
Autre	1.3	0.8	1.1
Total	**100.0**	**100.0**	**100.0**

Source : Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014

Commune	Villa	Appt.	Maison marocaine moderne	Hab. Sommaire	Logement rural	Autre	Taux Occupation
Bni Sidel Louta	1,2	0,4	41,7	0,4	55,3	0,9	1,3
Bni Sidel Jbel	1,1	0	35,4	0,9	61,6	0,9	1,3
Iksane	1,8	0,1	57,9	0,1	39,1	1	1,4
Bouifrour	2,4	0,7	90,7	0,2	4,8	1,1	1,5
Ihaddadene	1,3	1,4	93,3	0,5	3	0,5	1,4
Zeghanghane	1,8	4,3	91,5	0,7	1	0,5	1,2
Od. Daoud	0,3	0	12,8	0,1	86,6	0,1	1,3
Tiztoutine	1,5	1,1	67,9	0,8	28,2	0,6	1,4
Oulad Settout	0,9	0	49,5	2,3	46,6	0,7	1,7
Bni Oukil	0,3	0,1	38,3	0,4	60,3	0,7	1,4
Al Aaroui	2	6,1	89,5	1	0,7	0,7	1,3
Afsou	0,6	0,2	27,8	0	70,2	1,1	1,7
Hassi Berkane	0,1	0	24,8	0,8	73,2	1,1	1,8
Driouch	2,1	6,7	84,3	5,3	0,2	1,4	1,3
Selouane	3,9	15,8	70	3,8	2,7	3,8	1,2
Bni Chiker	1	0,1	86,7	0,1	11,4	0,7	1,3
Farkhana	1,2	0,4	31,7	5	60,6	1	1,8
Bni Ansar	2,1	12,2	81,8	1,3	1,6	0,9	1,3
Nador	2,7	10,5	83,2	1,8	0,4	1,4	1,3
Bouarg	1,8	0,1	89,9	1,6	5,6	0,9	1,5
Arekmane	1,6	0,3	54,8	0,5	42	0,8	1,3
Al Barkanyene	0	0	25,5	0	74,3	0,2	1,4
Ras El Ma	2,6	1,5	90,8	0,8	2	2,3	1,2

Source : Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014

L'analyse de la population en fonction des tranches d'âge et le sexe au niveau de Nador (Figure 4 et Tableau 3) montrent que la population la plus représentative est celle de 14-59 ans, suivie de la population jeune 6-14 ans, avec 73.1% et 25.7% respectivement. Alors que la population moins de 6 ans et qui dépassent 60 ans ne représente que 11.2% et 14% de la population totale (***HCP, 2012; RGPH, 2014***).

Généralement dans le Rif, les constructions s'installent sur les crêtes rocheuses et au niveau des zones voisinant les cours d'eaux. Les routes et les pistes suivent les grands traits

morphologique du relief, la configuration des collines, des vallées ou des cols décident souvent de la direction que peut prendre une route (***Maurer, 1959; Mesrar, 2016***).

Les données relatives au type d'habitation (***RGPH, 2014)***, indique que la majeure partie des ménages dans la province de Nador réside dans des logements de type «**Maison marocaine**», soit 78,9% (Tableau 4-a). En deuxième lieu, on trouve les ménages occupant des habitations de type rural avec 10,5%. Selon le milieu de résidence, ce sont les habitations de type «**maison marocaine**» qui prédomine dans le milieu urbain avec une part de 85,7%, suivies de type « **Appartement** » avec 8,3%. En milieu rural, on observe une tendance des ménages à substituer leur habitation du type rural par des habitations type marocain. En effet, la part de ces dernières est passée de 46,7% en 2004 à 62% en 2014, alors que les habitations rurales ont reculé d'environ 12 points pendant la même période (passant de 46,4% en 2004 à 34,5% en 2014). D'autre part, le parc de logements de la province de Nador n'est pas très ancien. En effet, près de 46% des logements ont moins de 20 ans, et 85,2% moins de 50 ans. En milieu urbain de la province, seulement 1 logement sur 10 a plus de 50 ans, alors qu'en milieu rural, 1 logement sur 4 est construit il y'a plus de 50 ans.

Selon le recensement de la population et de l'habitat de 2014 et le Haut-Commissariat au Plan (***HCP, 2017***; ***RGPH, 2014***), l'analyse des indicateurs démographique montre que le taux net d'activité au niveau de la province de Nador reste supérieur à celui de la région oriental, soit 45,7% contre 44,3%. Par contre, le taux de chômage est un peu plus avec 19% contre 21,5% respectivement. Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) présente des taux net d'activités et de chômage élevé. La commune de Zeghanghane présente un taux net d'activité très important estimé à 74,7%. Les communes de Nador et Bni Ansar arrive en second place avec un taux de 49,2%. Ces communes enregistrent des valeurs nettement supérieures au reste des communes du bassin versant.

La province de Nador affiche un taux de pauvreté inférieur à celui de la région de l'oriental, soit 2,4% contre 5,2% respectivement (Tableau 5 et Figure 4). La province de Nador se trouve dans le peloton des provinces à faible taux de pauvreté estimé à 2,37 % (2ème rang après la préfecture d'Oujda Angad). Le taux de vulnérabilité pour la province enregistre 7,69%. L'intensité de la vulnérabilité est également ressentie surtout en milieu rural de la province puisque qu'elle touche 14,4% de la population rurale contre 4,7% seulement en milieu urbain.

L'analyse des résultats (Figure 4 et Tableau 5) montrent que le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) présente un taux de vulnérabilité et de pauvreté très important. A l'exception de la commune de Ras El Ma qui présente un taux de pauvreté assez important, voir même nettement supérieur à la moyenne régionale estimé à 2,95%. Les autres communes urbaines du bassin versant sont moins touchées avec un effectif qui n'excède pas 1%. Le même constat est à faire en matière de vulnérabilité à la pauvreté tout en sachant que la commune de Ras-El-Ma demeure encore une fois la plus menacée par la pauvreté avec un taux de 12,8%. Les autres communes urbaines enregistrent des taux de vulnérabilité moins austères variant entre 2,6% et 5,27%.

Tableau 5: Taux de pauvreté et de vulnérabilité (En %) selon les communes rurales et urbaines du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), province de Nador (***HCP, 2017***)

COMMUNE	Taux de pauvreté	Taux de vulnérabilité
Bni Sidel Louta	7,82	16,05
Bni Sidel Jbel	2,08	9,01
Iksane	6,61	13,91
Bouifrour	4,65	11,89
Ihaddadene	5,56	10,27
Zeghanghane	**0,64**	**4,68**
Od. Daoud Zkhanine	4,66	13,74
Tiztoutine	8,8	18,78
Oulad Settout	9,26	20,08
Bni Oukil Oulad M'hand	**12,6**	**24,19**
Al Aaroui	**0,53**	**2,63**
Afsou	5,31	17,67
Hassi Berkane	**12,57**	**23,26**
Selouane	**0,77**	**3,44**
Bni Chiker	2,94	10,86
Farkhana	3,6	13,21
Bni Ansar	**0,77**	**3,86**
Nador	**0,79**	**5,27**
Bouarg	2,64	10,23
Arekmane	6,05	17,08
Al Barkanyene	4,03	15,48
Ras El Ma	**6,77**	**12,81**

L'examen du tableau ci-dessus montre que la pauvreté présente des disparités notoires entre les différentes communes rurales du bassin versant. Les communes les plus affectées sont Bni Oukil Oulad M'Hand et Hassi-Berkane avec un taux de 12,6% s'écartant de la moyenne régionale de 3 points (9,6%). Les communes de Bni Sidel Jbel, Bouarg et Bni Chiker accusent, quant à elles, des taux de pauvreté moins accentués ne dépassant pas 3%. S'agissant de la vulnérabilité, les zones rurales les plus menacées relèvent des communes de Bni Oukil Oulad M'Hand, Hassi-Berkane, Oulad Settout et Tiztoutine. Les communes qui comptent moins d'individus économiquement vulnérables sont Bni Sidel Jbel, Bouareg et Ihaddadene avec respectivement 9,0%, 10,23% et 10,27%.

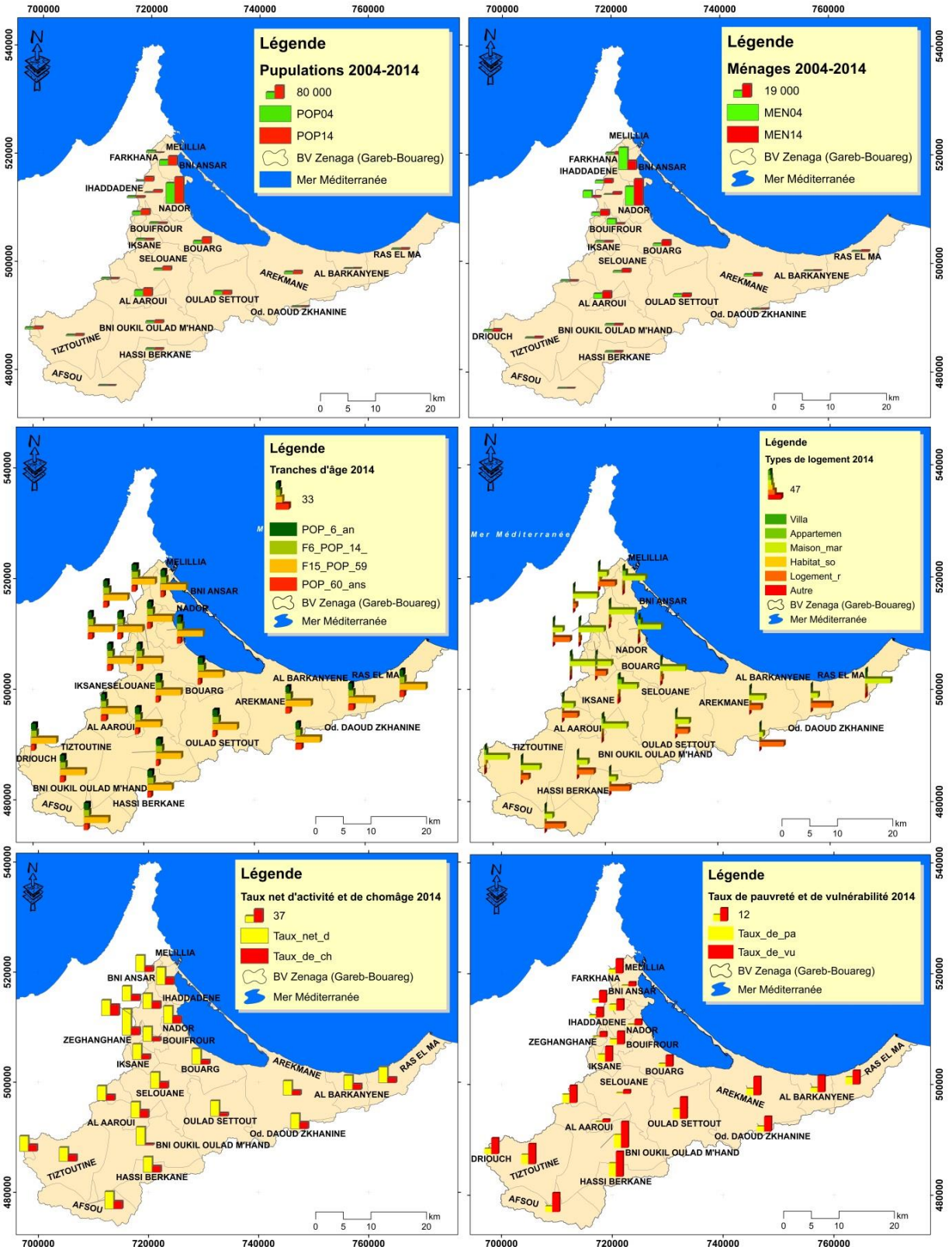


Figure 4: Présentation des indices démographiques du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

NB : BV : Bassin versant **; Taux_de_pa :** Taux de pauvreté **; Taux_net_d :** Taux net d'activité **; Taux_de_ch :** Taux de chômage **; Taux_de_vu :** Taux de vulnérabilité

II. Facteur climatique

L'étude du climat a toujours passionné l'homme puisqu'il affecte énormément les conditions de vie et induit des réponses biologiques et écologiques de la faune et de la flore à travers le monde (***Root et al.2003***). L'influence du climat s'effectue à plusieurs niveaux et domaines (ressources en eau, agriculture, sécurité alimentaire, santé, hygiène, stabilité…). Aux échelles plus locales, son influence peut être masquée par d'autres facteurs, tels que les facteurs édaphiques ou biotiques (***Pearson et Dawson, 2003***).

A la fin du XIX ème siècle, un réchauffement mondial a affecté le climat avec un réchauffement différencié entre les deux hémisphères Nord et Sud (***GIEC, 2007***). Cette évolution est liée à la baisse des cumuls pluviométriques dans les régions subtropicales de l'hémisphère Nord, observée depuis les années 70 (***Flageollet, 2012***). Aujourd'hui, un avertissement très sérieux sur les conséquences du changement climatique a été lancé selon le dernier rapport d'***IPCC (2022).*** Il prédit une menace grave et grandissante sur le bien-être humaine et la santé de la planète, avec un réchauffement planétaire de 1,5 °C (***Skea et al.2022***). Ce réchauffement provoquera l'augmentation d'événements climatiques extrêmes qui toucheront les populations avec une vulnérabilité croissante (***Gregory et al.2002; Christensen et al.2013***). Pour ces raisons, l'étude des changements climatiques incite la communauté scientifique à intensifier ses efforts afin d'identifier les changements à l'échelle globale (***WMO, 2022***).

L'identification du climat est une étape indispensable. L'illustration de sa fluctuation à travers des variables traduisant son contraste spatio-temporel est très importante. Il s'agit des précipitations, des températures, de l'exposition des versants et d'autres facteurs. L'étude de ces variables au niveau de la région de Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) permet d'expliquer les périodes d'intensité forte ou faible de précipitation, et par conséquence une faible ou forte érosion. D'autre part, de définir les indices climatiques basés sur la relation "Précipitations/Température", ce qui va permettre par la suite de déterminer l'étage bioclimatique de la zone d'étude.

Au niveau de la zone d'étude, le climat à un rapport direct avec l'éloignement par rapport aux côtes méditerranéennes et atlantique, ainsi qu'avec le contexte géographique général du Maroc. Sa position intermédiaire en tant que l'une des régions à climat méditerranéen entre les dépressions tempérées et les anticyclones subtropicaux des Açores et le climat chaud aride saharien explique que la saison froide soit humide et soumise à un temps changeant et que la saison chaude soit sèche et soumise à un temps peu variable (***Gauché, 2002; Mesrar, 2016***).

L'analyse de l'influence de la variabilité climatique sur la dynamique de l'érosion hydrique invoquent le climat comme moteur spécifique nécessitent des ensembles de données cohérents dans l'espace-temps (variables fournies, résolution spatiaux-temporelle, étendue géographique et la période couverte).

Les stations météorologiques (Nador, Melilla, Berkane, Taourirt, Dar Driouch, Melga el Ouidane) ont été choisies vues leur proximité de la zone d'étude. Pour résoudre le problème

de manques de données au niveau des stations utilisée, nous avons opté à l'utilisation de la base de données climatique "TerraClimate" (***Abatzoglou et al.2018***) qui a fait l'objet d'une validation avec un certain nombre d'observations basées sur des stations provenant de divers réseaux mondiale (Global Historical Climate Network, SNOTEL et RAWS). Les données climatiques des précipitations et températures pour la période allant de 1985 à 2017 ont été utilisées au niveau de la région de Nador.

Tableau 6: Coordonnées des stations pluviométriques

Stations	X	Y	P_i (mm)	Type de station	Période
Nador	**758039**	**503115**	**314.24**	**Pluviométrique**	**1985-2017***
Melilla	**722929**	**522206**	**329.25**	**Pluviométrique**	**1985-2017***
Berkane	791768	444159	284.16	Pluviométrique	1985-2017*
Taourirt	730681	426960	211.46	Pluviométrique	1985-2017*
Dar Driouch	692848	479377	260.95	Pluviométrique	1985-2017*
Melga El Ouidane	718382	442204	204.85	Pluviométrique	1985-2017*

NB :(*) Moyenne issue par interpolation des données manquante

Ce paragraphe sera consacré à l'étude des variables climatiques, celles qui déterminent le contraste spatio-temporel des précipitations et températures. Une analyse mensuelle et annuelle sera menée dans le but d'étudié leur distribution.

1. Les précipitations

Les précipitations sont depuis longtemps considérées comme un élément clé de l'évolution des paysages. C'est la principale entrée des principaux systèmes hydrologiques continentaux qui sont les bassins versants (***Meylan et al.2012***), qui constitue en effet le réacteur de l'érosion hydrique et un facteur clé de l'évolution des sols (***Sadiki, 2005***).

L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface (***Le Bissonnais, 1988***), du détachement de fragments de sol et de leur transfert (***Bradford et Huang, 1996***). Ces particules détachées sont par la suite transportées par les eaux de ruissellement qui les emportent et les dispersent tout au long de son parcours. Généralement les zones sous climat méditerranéen reçoivent des quantités de précipitations importantes souvent sous formes orageuses (***Gauché, 2002***).

Les courants perturbés du nord traversant la Méditerranée peuvent donner des pluies abondantes mais peu fréquents (***Gaussen et al.1959***), alors que les perturbations d'ouest ou du nord-ouest de provenance Atlantique ou du détroit de Gibraltar ne transfèrent que de faibles précipitations. Dans la région méditerranéenne, la pluviométrie moyenne annuelle est inégalement répartie au cours d'une même année et d'une année à l'autre. Les maximas pluviométriques sont enregistrés sur les massifs montagneux les plus élevés et les plus proches de la mer alors que les minimas pluviométriques sont enregistré sur les versants sous le vent de ces massifs.

Quelle que soit la forme de la précipitation (liquide ou solide), comprendre sa répartition permet de calculer la lame d'eau des précipitée sur le bassin versant. La nécessité de mettre en relation différentes méthodes à savoir la méthode des isohyètes et des polygones de Thiessen rend cette opération relativement délicate. L'utilisation de ces techniques ne va pas permettre de prendre en considération les contraintes liées aux facteurs de prédispositions telles que l'altitude, l'effet barrière exprimé par l'exposition des versants et la combinaison entre l'océanité et la continentalité (***Mesrar, 2016***).

1. 1 Précipitations moyennes annuelles

Les précipitations moyennes annuelles (P_{moy}) enregistrées au niveau de la région de Nador et le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) montrent que les apports pluviométriques annuels sont différents d'une année à une autre. L'analyse en fonction des années des précipitations sur la période allant de 1985 à 2017 (Figure 5) a permis de distinguer des valeurs maximales pour les années 2003 (454.6-512.50 mm) et 2009 (457.29-507.50mm), et des valeurs minimales pour 1998 (202-217.50 mm) et 2017 (189.50-204.50 mm). La médiane sur 32 ans et 316.20 mm respectivement. L'interpolation des données recueillies par le modèle TerraClimate au niveau des différentes stations montrent une succession d'années très sèches (217.85 mm en 1995 ; 209.75 mm en 1998 ; 197.20 mm en 2017).

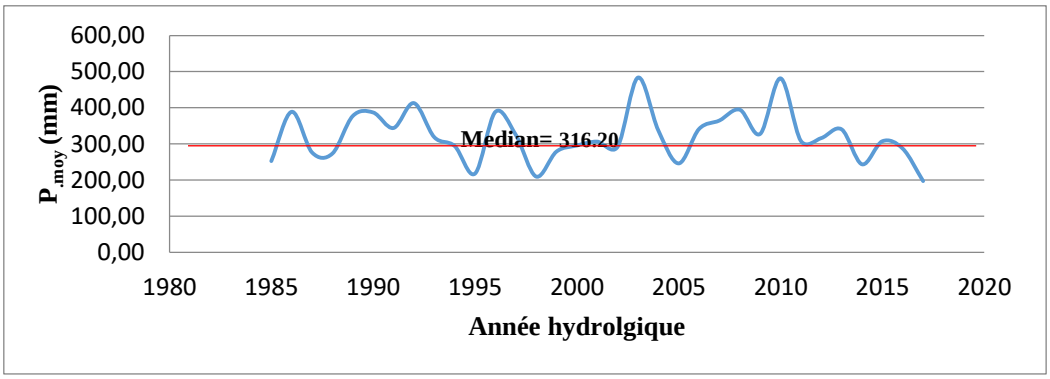


Figure 5: Courbe des pluies moyennes annuelle (1985-2017)

Le classement des précipitations annuelles par rapport à la moyenne de la série d'observation permet de détecter la fluctuation observée des précipitations entre l'humide et le sec d'une année à l'autre au niveau du territoire étudié. Si les années sèches sont celles inférieures à la moyenne, sur les 32 années étudiées, 11 années sont sèches. Alors que les années humides n'ont pas enregistré des moyennes très importantes. Ces fluctuations des précipitations rend le sol plus fragile et donc plus vulnérable à l'érosion hydrique.

1. 2 Précipitations moyennes mensuelles

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles sur 32 ans (Figure 6), permet de définir la répartition des pluies au cours de l'année et donc du régime pluviométrique. Les statistiques basiques des pluies moyennes mensuelles de 1985 à 2017 (Tableau 7), permet de constater que les précipitations ont la même distribution temporelle. La période arrosée commence en Septembre et dure jusqu'en Avril. Les mois de Novembre, Décembre, Janvier et Février

enregistrent les moyennes pluviométriques mensuelles les plus élevées. Le mois de Janvier enregistre des valeurs maximales sur 32 ans avec 56.37 mm. Les moyennes mensuelles minimales s'enregistrent en Juillet avec une moyenne qui ne dépasse pas 0.43mm.

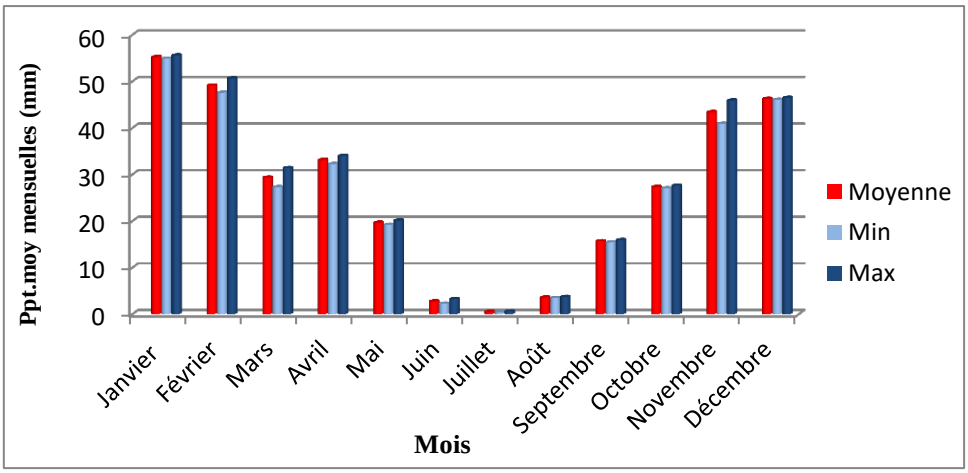


Figure 6: Précipitations moyennes mensuelles (1985-2017) ; **Min** : Précipitations minimale mensuelles; **Max** : Précipitations maximale mensuelles

L'écart type le plus élevé est enregistré au mois de janvier, le coefficient de variation varie entre 55% et 146% du mois de Janvier jusqu'au mois de Juillet (Tableau 7).

Tableau 7: Statistique basique des précipitations mensuelles

Station de Melilla 1985-2017				
Mois	**n. Obs.**	**Moy**	**Std.**	**C V**
Janvier	33.00	**58.85**	**32.62**	**55.43**
Février	33.00	**50.05**	29.34	58.62
Mars	33.00	31.38	22.24	70.88
Avril	33.00	32.65	24.95	76.41
Mai	33.00	19.59	13.46	68.70
Juin	33.00	**3.36**	**4.93**	**146.57**
Juillet	33.00	**0.74**	**1.08**	**145.89**
Août	33.00	**3.22**	**3.43**	**106.49**
Septembre	33.00	15.62	11.17	71.49
Octobre	33.00	26.71	17.55	65.68
Novembre	33.00	**42.75**	24.42	57.11
Décembre	33.00	**44.25**	27.55	62.26
Totale	396.00	27.43	17.73	82.13
Station de Nador 1985-2017				
Mois	**n. Obs.**	**Moy**	**Std.**	**C V**
Janvier	33.00	**58.21**	32.20	55.32
Février	33.00	**33.27**	19.94	59.95
Mars	33.00	32.37	23.92	73.91
Avril	33.00	**42.41**	32.94	77.69
Mai	33.00	24.49	16.97	69.28
Juin	33.00	**4.12**	**5.68**	**137.86**
Juillet	33.00	**0.62**	**0.90**	**146.17**
Août	33.00	**2.60**	**2.72**	**104.46**
Septembre	33.00	18.62	13.56	72.83
Octobre	33.00	27.58	19.13	69.37
Novembre	33.00	30.06	17.42	57.94
Décembre	33.00	**39.92**	24.05	60.25

NB : n.Obs : nombre d'observations**, Moy :** Moyenne **; Std :** Déviation Standard**, CV :** Coefficient de variation

Test d'homogénéité d'une série temporelle (Test de Pettitt et d'homogénéité normal standard «SNHT»)

Au cours des dernières décennies, plusieurs méthodes d'homogénéisation ont été développées pour corriger les ruptures artificielles dans les séries climatiques (***Beaulieu et al.2007***). Actuellement, le besoin de série de données climatiques fiable est devenu de plus en plus important dans divers domaines. Des modifications dans l'environnement immédiat d'une station, induite par exemple par l'urbanisation, la reforestation, ou l'industrialisation, suscite des changements plus graduels (***e.g. Peterson et al.1998***) et ce, en particulier sur les températures, mais aussi pour les précipitations. Dans la présente analyse, des tests statistiques ont été appliqués à savoir le test de Pettitt (***Pettitt, 1979***) et le test SNHT «*Standard Normal Homogeneity Test*» développé par ***Alexandersson (1986).***

Tableau 8: Résultat du test de Pettitt

K	**72.000**	**79.000**
t	2013	2010
p-value (bilatérale)	0.594	0.481
alpha	0.05	0.05

Le test de Pettitt (1979) est une adaptation du test de Mann-Whitney (***Mann et Whitney, 1947***) basé sur les rangs permettant d'identifier le temps auquel se produit un changement. Le test SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) a été développé par (***Alexandersson, 1986; Tuomenvirta, 2002*)** pour détecter un changement dans une série de précipitations. Ces tests non paramétriques font partie des méthodes utilisées pour l'analyse de tendances pour des données issues d'une longue série hydrométéorologique n'ayant pas une distribution gaussienne, mais plutôt des distributions souvent dissymétriques. La date de rupture correspond au maximum observé de la série. La valeur p de la statistique a été calculée en utilisant 10000 simulations Monte Carlo pour un temps passé de 0s, permet de savoir si cette rupture est statistiquement significative au seuil alpha.

Le test de Pettitt et de SNHT (Tableau 8, 9 et figure 7) montrent que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification au seuil alpha=0.05, la valeur de p permet d'accepter l'hypothèse de l'homogénéité de la série des données climatiques.

Tableau 9: Résultat du test SNHT d'Alexandersson pour l'homogénéité

T0	**3.718**	**4.325**
t	2013	2013
p-value (bilatérale)	0.475	0377
alpha	0.05	0.05

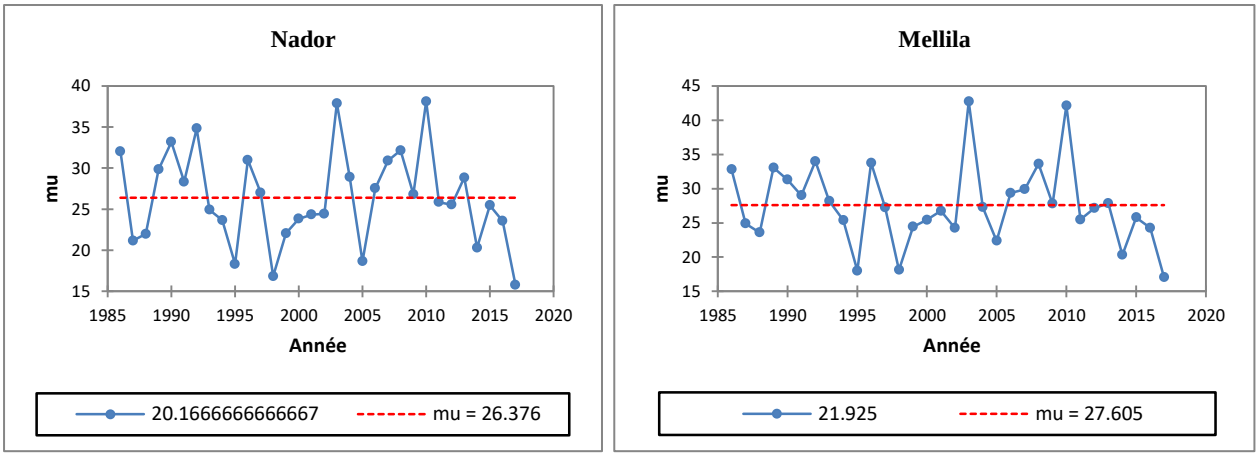


Figure 7: Résultats des tests d'homogénéité de Pettitt et SNHT d'Alexandersson pour les précipitations moyennes mensuelles des stations Nador- Melilla (1985-2017)

L'analyse de variance et d'homogénéité (Tableau 10) montrent quatre groupes. Le premier correspond aux mois (Août, Juillet er Juin), la moyenne de variance enregistré est de 0.51 à 3.58, ainsi appartient au même groupe et reçoivent des précipitations faibles. Le deuxième groupe rassemble les mois de (Septembre et Mai), avec des moyennes de variance qui ne dépassent pas 20.

Tableau 10: Homogénéité des groupes

	n.Obs	Moy	Hg. Groups			
Janvier	32	55.22				XXXX
Février	32	49.09				XXXX
Mars	32	29.33			XXX	
April	32	33.12			XXX	
Mai	32	19.65		XX		
Juin	32	2.74	X			
Juillet	32	**0.51**	X			
Août	32	**3.58**	X			
Septembre	32	15.66		XX		
Octobre	32	27.32			XXX	
Novembre	32	43.39				XXXX
Décembre	32	46.25				XXXX

NB : n.Obs : nombre d'observations**, Moy :** Moyenne des variances **; X :** Homogénéité des groupes

Les mois de (Mars, Avril et Octobre), se regroupent au sien du troisième groupement, ils enregistrent des variances élevées allant de 27.32 jusqu'à 33.12. Les variances les plus élevées sont enregistrées au niveau du quatrième groupe, il s'agit des mois de (Janvier, Février, Novembre et Décembre), avec des variances très élevés allant jusqu'à 55.22, qui reçoit des précipitations importante.

1. 3 Évaluation de la lame d'eau moyenne reçue dans le bassin versant

L'eau a toujours joué un rôle essentiel dans le développement des sociétés. Si les premiers besoins ont sans doute été l'alimentation en eau potable puis l'irrigation, d'autres utilisations sont venues s'y greffer (***Leborgne & Weisrock, 1986***). Le contrôle de l'eau pour l'agriculture est un des préalables fondamentaux au développement rurale durable des pays d'Afrique du

Nord et sub-saharienne (***FAO, 2019***). L'évaluation des ressources en eaux d'une région, la planification de leur exploitation et leur conservation, nécessitent la connaissance du régime des eaux de surface et souterraines, les réserves et les ressources. L'érosivité des pluies semble avoir une grande influence sur la présence d'une lame d'eau à la surface du sol. Sa présence avec une épaisseur plus faible sur la surface du sol favorise le détachement par la pluie, mais lorsque la lame d'eau arrive à certain hauteur, il favorise dans certains cas la désagrégation du sol et sa mobilisation. Dans d'autres cas, il se peut que la lame d'eau tombée à la surface joue un rôle protecteur du sol (***Torri et al, 1987; Proffitt et al, 1991; Paroissien et al.2010***).

L'estimation et le calcul de la lame d'eau reçue nécessite en particulier la caractérisation de la répartition des précipitations. La réalisation d'une telle opération reste relativement délicate, et requiers la combinaison de différente méthodes à savoir la méthode des Isohyètes et la méthode des polygones de Thiessen. La nécessité de la prise en considération des contraintes géographiques existantes (Altitude, topographie, exposition…) souscrira dans l'approche qui va permettre de mieux expliquer la répartition des précipitations entre les stations et avoir une moyenne plus au moins exacte.

Les méthodes proposées sont basées sur des mesures ponctuelles, pour avoir des canevas qui se rapprochent plus au moins de la réalité de la répartition des moyennes des précipitations, il faut que la densité des stations soit assez grande. Pour cela, les moyennes des mesures de plusieurs stations pluviométriques réparties sur le bassin de Moulouya était étalées sur une période allant de 1984 à 2017, disponible via la plateforme à l'**ABHM** (***Agence du bassin Hydrologique de Moulouya***), plusieurs obstacles se sont présenté, notamment le manque de données, car il y a des stations dont les données sont complètes mais d'autre non, des stations temporaires, des stations qui ont été mises en place puis délaissées. Pour cela, nous avons opté à l'utilisation des données climatique « TerraClimate » (***Abatzoglou et al.2018***).

Les données ont été pondérées par une interpolation des données des stations voisines et traitées tenant compte de leurs dimensions dans les séries statistiques. Après le calcul des moyennes des précipitations et la spatialisation des données, nous avons procédé à l'extraction des données du bassin versant Zenaga pour appliquer les méthodes des isohyètes et des polygones de Thiessen.

1. 3. 1. Méthodes des isohyètes

La méthode des isohyètes est utilisée pour estimer les précipitations moyennes sur une zone en traçant des lignes de précipitations égales en se basant sur des données topographiques et autres pour produire des estimations fiables (***Jain & Singh, 2015***). La méthode est purement géométrique, utilise un modèle graphique basé sur l'interpolation des moyennes des précipitations pour une période donnée, des stations situés à l'intérieur et aux alentours du bassin versant, supposant que la pluie en tout point est celle enregistrée au poste pluviométrique le plus proche. Les stations étant géoréférencés, la lame d'eau précipitée interannuelle est calculée pour chaque station pluviométrique sur n années d'observations

communes et les zones d'influences ont été délimité pour chaque poste pluviométrique et calculer la surface correspondante. Les courbes isohyètes sont tracées à l'aide des moyennes pluviométriques (Tableau 11) et sont calculées avec la formule suivante:

$$\boldsymbol{P_{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^{K} A_i P_i}{A_T} \text{ Avec } \boldsymbol{P_i} = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \qquad (\textit{Equation 1})$$

Tableau 11: Moyennes pluviométriques des précipitations (Méthode des Isohyètes)

Isohyètes	**A_i (km²)**	**S.C (km²)**	**P_i (mm)**	**$A_i * P_{i\ (km*mm)}$**	**V.C**	**P_{moy}**
≤255.91	185.37	185.37	127.95	23718.09	23718.09	19.54
267.71-278.33	309.76	495.13	272.52	47975.62	71693.71	69.54
288.95-300.74	432.08	927.21	294.84	93346.56	165040.27	104.95
313.13-327.29	275.84	1203.05	320.21	38043.85	203084.12	72.77
≥367.41	10.66	1213.71	347.35	56.81	203140.93	3.05
Total	1213.75		1362.87	203140.93		**269.85**

NB : $\mathbf{A_i}$: Surface entre les deux isohyètes hi et hi+1 (km²) ; **S.C** : Surface cumulée (km²) ; $\mathbf{P_i}$: Hauteur moyenne entre les deux isohyètes (mm) ; $\mathbf{A_i * P_i}$ **:** Volume entre deux isohyètes (km²*mm) ; **V.C** : Volume cumulé (km²*mm) ; $\mathbf{P_{moy}}$: Précipitation moyenne sur le bassin (mm) ; $\mathbf{A_T}$: Surface total du bassin (km²) ; **K** : nombre total des isohyètes

La carte des isohyètes (Figure 8) montre que plus en monte en altitude la quantité des précipitations augmente, ce qui marque un gradient de précipitations progressif. La répartition de la lame d'eau reçue dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) montre qu'elle est plus importante au niveau des parties élevées du bassin, notamment sur les versants Nord, Nord-Est et Sud-Ouest. En effet, les valeurs des isohyètes augmentent vers ces parties en suivant des lignes courbent qui devient resserré vers les mêmes directions. Les isohyètes deviennent parallèle au niveau de la partie basse du bassin versant.

Selon cette méthode, la lame d'eau tombée sur le bassin versant est de 269.85 mm, une quantité qui n'est pas vraiment suffisante pour déclencher l'érosion hydrique. Par contre, la combinaison de d'autres facteurs de l'érosion peut être assez efficace pour favorisé l'érosion des sols.

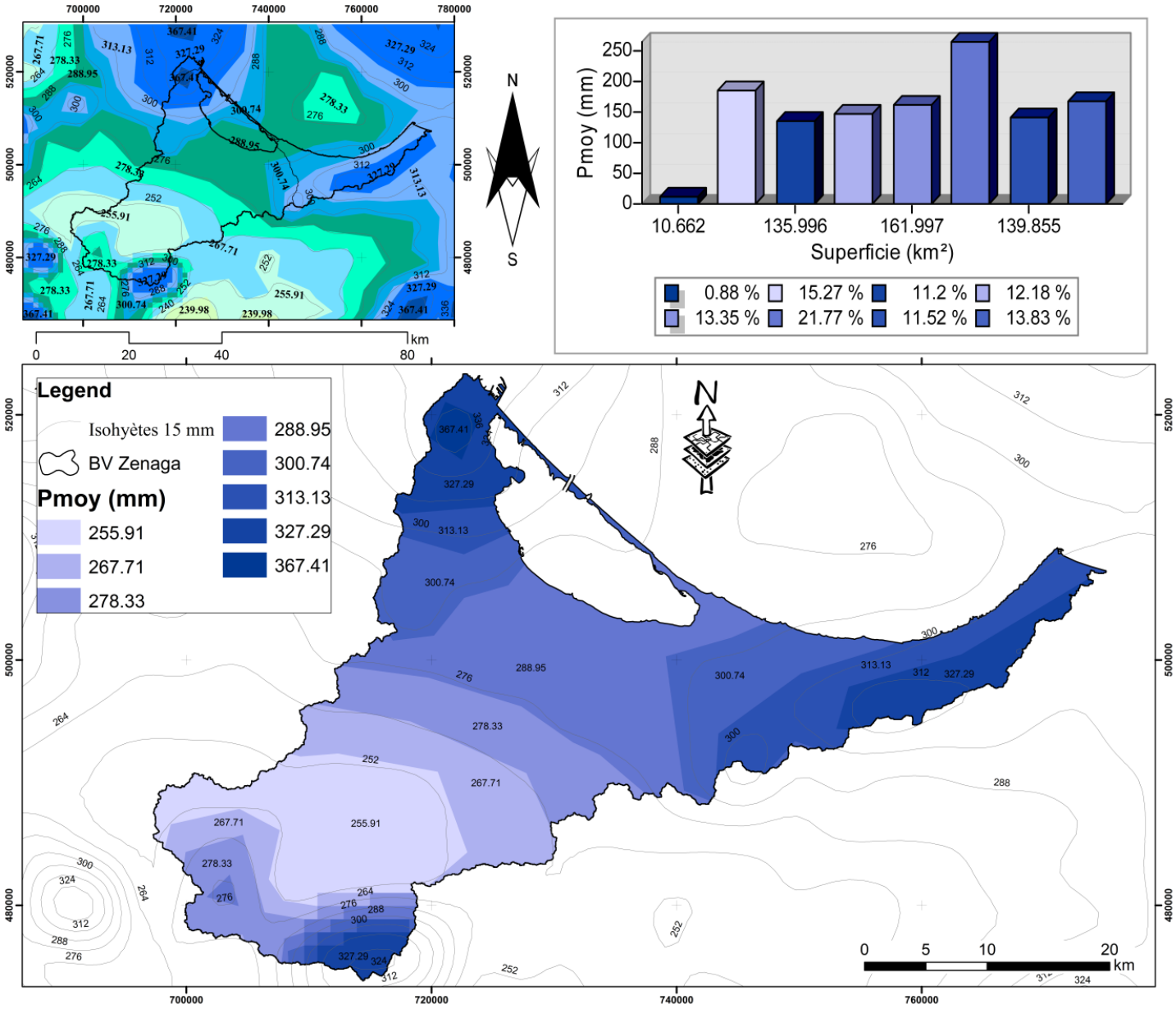


Figure 8: Carte des précipitations moyennes selon la méthode des isohyètes pour la période 1985–2017 ; $\mathbf{P}_{moy}$: Précipitation moyenne sur le bassin (mm) ; **BV** : Bassin versant

1. 3. 2. Méthodes des polygones de Thiessen

La méthode du polygone de Thiessen a joué un rôle très important en hydrologie et en météorologie (***Thiessen and Alter, 1911***), permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique, il s'agit des points situés dans le bassin ou proche. La méthode affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en %, ce qui sert par la suite pour mesurer le facteur de pondération de la valeur locale et la moyenne pondérée. Dans notre cas les stations pluviométrique générées à partir de la base de données TerraClimate ont été pris en considération.

La méthode consiste à déterminer les différentes zones d'influence par découpage géométrique du bassin sur une carte topographique géoréférencée. Une série de segments de droites reliant les stations adjacentes est tracé par la suite. Les perpendiculaires au centre de chacune des droites est élevé, qui déterminent des polygones au niveau duquel la hauteur des précipitations choisie est celle relevée à la station située à l'intérieur de celui-ci est représenté. Les côtés des polygones et/ou la ligne de partage des eaux représentent les limites de l'aire accordée à chaque station. L'aire de chaque polygone Ai est déterminée par planimétrie ou numériquement. Les précipitations moyennes pondérées "P_{moy}" pour le bassin, se calculent alors en effectuant la somme des précipitations Pi de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire Ai), le tout divisé par la surface totale A du bassin. Les précipitations moyennes sur le bassin sont calculées en appliquant l'équation 2 :

$$\mathbf{P}_{\boldsymbol{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}{AT}. \qquad \textit{Équation 2}$$

Avec :
$\mathbf{P}_{\boldsymbol{moy}}$: précipitation moyenne sur le bassin (mm) ;
$\mathbf{A_T}$: aire totale du bassin (=∑Ai) en km²,
$\mathbf{P}_{\boldsymbol{i}}$: précipitation enregistrée à la station i (mm) ;
$\mathbf{A}_{\boldsymbol{i}}$: superficie du polygone associée à la station i (km²).

Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) ne dispose pas d'un grand nombre de stations, pour cela nous avons utilisé les stations voisines proches du bassin versant (Tableau 11) pour lesquelles sont tracés les polygones de Thiessen (Figure 9). La superficie de chaque polygone sert d'élément de pondération.

Tableau 12: Stations et moyenne pluviométrique selon la méthode de Thiessen

Stations	**X**	**Y**	**P_i (mm)**	**A_i (km²)**	**A_i*P_i/A_t (P_{moy})**
Nador	758039	503115	314.23	431.51	111.71
Mellila	722929	522206	329.25	387.58	105.14
Dar Driouch	692848	479377	264.94	394.62	86.14
			Total	1213.71	**303**

***NB* : $\mathbf{P}_{\boldsymbol{i}}$**: Hauteur moyenne entre les deux isohyètes (mm) ; $\mathbf{A}_{\boldsymbol{i}}$: Surface entre les deux isohyètes hi et hi+1 (km²);
$\mathbf{A}_{\boldsymbol{i}}$ * $\mathbf{P}_{\boldsymbol{i}}$: Volume entre deux isohyètes (km²*mm)

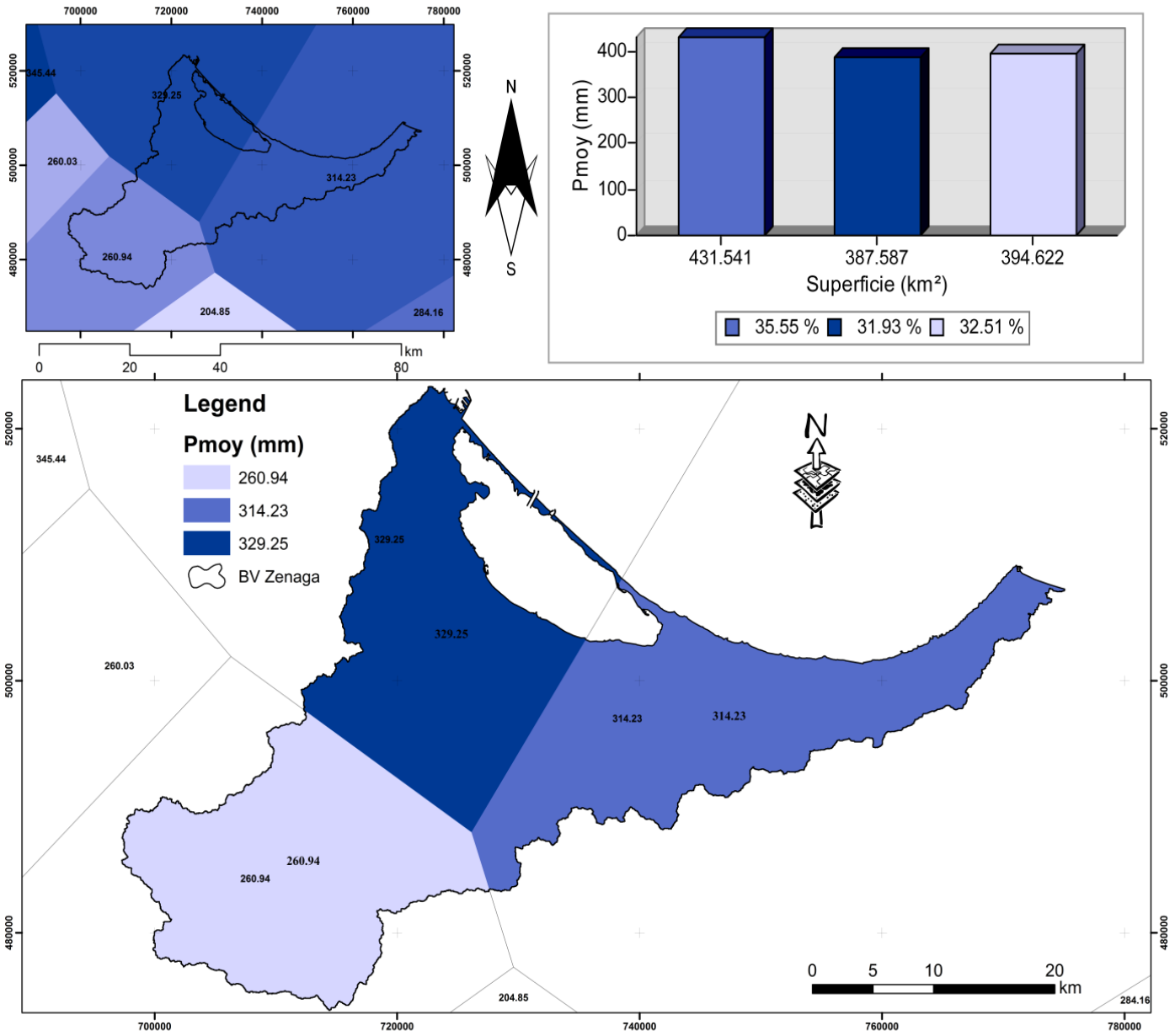


Figure 9: Carte des polygones de Thiessen ; **Pmoy**: Précipitation moyenne sur le bassin (mm) ; **BV** : Bassin versant

Les moyennes de pondération tenant compte des superficies correspondantes, enregistrent des valeurs minimales de 86.14mm à la station de Dar Driouch et maximales au niveau de la station située au niveau de la station de Nador avec une valeur de 111.71mm, suivie de celle de la station de Melilla avec 105.14 mm. La moyenne totale enregistrée sur une surface de 1213.71 km² est de 302.99 mm. Cette valeur s'avère supérieure à celle enregistrée par la méthode des isohyète, l'écart enregistré est de 11.21%.

L'analyse de cette carte des polygones de Thiessen (Figure 9) montre que les précipitations les plus fortes (>329 mm) touchent les secteurs Nord-ouest du bassin, les valeurs intermédiaire (314 mm) sont localisés dans la partie est, alors que les valeurs minimales (264 mm) intéressent surtout la partie sud-ouest du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Les valeurs moyennes apparentes sont celle de 111.7 et 105.14 mm respectivement, il s'étale sur une superficie de 431.51et 387.58 km².

1. 3. 3. Estimation de la lame d'eau moyenne

Le choix entre la méthode de Thiessen et celle des isohyètes n'est pas à discuter. La 2ème méthode est à retenir quand le réseau pluviométrique est dense. Elle est plus performante. D'autre part, la lame d'eau estimée par les deux méthodes montre des valeurs différentes avec un écart important. Dans le but d'ajuster les valeurs trouvées, une moyenne entre elle est calculée dans le tableau 13.

Tableau 13: Lame d'eau moyenne reçue au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Méthode des Isohyètes (mm)	Méthode de Thiessen (mm)	Lame d'eau moyenne (mm)
269.85	**303**	**286.42**

Le volume d'eau tombé sur le bassin versant peut être déterminé par l'équation 3 :

$$\boldsymbol{V = Pmoy \times AT} \qquad \textit{Équation 3}$$

$$= 286.42 \times 10^{-3} \times 1213.75 \times 10^{6}$$

$$\mathbf{V = 347.6 \times 10^{6}\ m^{3}.\ an^{-1}}$$

L'augmentation du ruissellement est fonction de la lame d'eau présentant à la surface du sol, mais aussi de d'autres facteurs à savoir la pente, la surface du bassin versant et la vitesse avec laquelle ruisselle l'eau. L'infiltration est réduite après saturation du sol en eau, ce qui favorise la formation du ruissellement. Si la lame d'eau est peu épaisse sur une grande surface et une pente faible, le ruissèlement fonctionne en surface avec une faible vitesse, et l'érosion est diffuse. Par contre, une lame d'eau peu épaisse sur un grand bassin avec une pente forte déclenche le ruissellement à forte vitesse favorisant l'incision du sol et une érosion de type linéaire.

Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) reçoit un volume d'eau estimé à 347.6 × 10^{6} m^{3}. an^{-1}. Le terrain à ce niveau présenter différentes formes et processus d'érosion que ça soit pour les terrains nus, les terres agricoles ou les surfaces bâtis. On assiste à une érosion de type

diffuse ou en nappe, là où la lame d'eau ruisselée détache et transporte les fines particules de sols et une érosion concentrée, là où le ruissellement se concentre formant des chenaux plus ou moins important.

2. Les températures

2. 1. Variations et tendances des températures moyennes annuelles dans le territoire de la province de Nador et le bassin versant étudiée

Plusieurs recherches sont unanimes sur la réalité du réchauffement climatique de la planète, et affirment que la situation est quasi irréversible si les mesures nécessaires ne sont pas entreprises (***Bindi et al.2018***). La région méditerranéenne n'échappe pas de cette considération, elle a été considérée autant qu'un "point chaud" climatique avec une succession d'événements très agressifs en automne et en hiver (***IPCC, 2012***). La tendance du climat à l'assèchement, observée durant les dernières décennies au Maroc, serait certainement accompagnée d'une réduction des ressources hydriques, ce qui affecterait les activités de production, la santé humaine, et les écosystèmes naturels. La ressource en eau possède une très grande acuité socioéconomique dans la région de l'orientale et notamment dans la province de Nador, puisque l'agriculture et l'élevage sont parmi les activités économiques principales de la population. La problématique environnementale est, en effet, très liée à celle de la disponibilité de la ressource en eau au niveau des bassins versants.

L'étude de la température constitue un facteur clé pour caractériser le contexte climatique d'un bassin versant. La combinaison de ce facteur aux précipitations, permet de contrôler plusieurs paramètres du cycle de l'eau surtout, les indices climatiques et l'évapotranspiration. Pour achever cette analyse, nous avons opté, comme pour les précipitations, à l'utilisation des données de température issue de la base de donnée « TerraClimate » chose qui va permettre par la suite la spatialisation de la répartition des températures au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

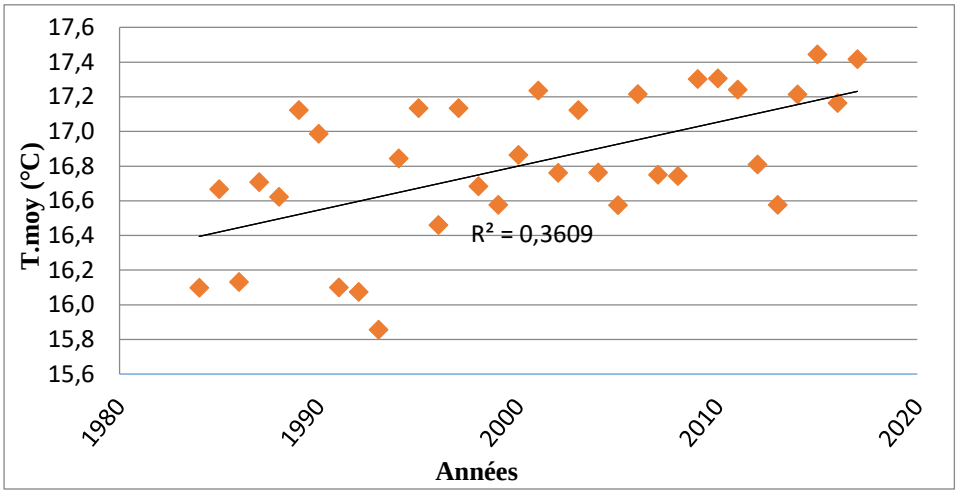


Figure 10: Températures moyennes annuelles sur le bassin versant (mm)

Les températures au sein de la province de Nador ont enregistré une grande variation durant la période étudiée (1985-2017). La température moyenne annuelle enregistrée montre une variation d'une année à l'autre. Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 15.8 °C et 18 °C selon les stations, ce qui montre une certaine régularité interannuelle.

L'analyse en fonction des années a permet de distinguer que la température croît annuellement. L'analyse de corrélation entre 1985 et 2017 montre une tendance à une succession d'années très sèches avec un coefficient de corrélation R de 0.36. L'analyse en fonction des années (Figure 10).

2. 2. Études des températures moyennes mensuelles

L'analyse des températures moyennes mensuelles sur 32 ans au niveau de la région de Nador de 1985 à 2017 (Tableau 14) a permis de définir son évolution. L'analyse des statistiques basiques des moyennes mensuelles, des maximas et minimas des températures a permis de constater que ces derniers ont la même distribution temporelle.

Tableau 14: Moyennes mensuelles des températures entre 1985 et 2017

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Moy	8,7	9,7	13	15	18,4	21,5	24,9	24,9	22,9	19,9	14,5	11,7
Min	4,2	5,2	7,8	9,9	12,8	16,1	18	18,6	15,9	12,7	8,5	6,1
Max	14,6	15,4	17,7	20,5	23,4	27,5	30,7	31	27,9	24	18,9	15,6

La température moyenne annuelle est élevée, elle peut atteindre 18°C. L'amplitude des écarts des températures moyennes maxima est de l'ordre de 5°C en hiver et dépasse 7°C en été. Les hivers sont relativement peu sévères. En décembre et janvier, sont enregistrés régulièrement quelques minima journaliers entre 4 et 6°C (exceptionnellement 0 ou 2°C).

Pendant l'été à plusieurs reprises les températures dépassent les 32°C. L'état des sols est fortement influencé par cet écart thermique qui les rend vulnérable à l'activité de l'érosion hydrique. En effet, la périodicité de saisons sèches et humides conduit à la formation des argiles gonflantes, très vulnérables et faciles à éroder (contraction et apparition des fentes de dessiccation en été, dilatation et gonflement en hiver).

Sur le littoral, les températures de l'été restent fraîches avec des maximas ne dépassant que rarement 31°C. Les hivers sont également tempérés avec des températures minimales toujours supérieures à 4°C. L'analyse de la figure 11 donne une première estimation concernant la répartition des mois chauds et des mois froids. L'amplitude thermique entre la moyenne des maxima du mois le plus chaud et celle des minima du mois le plus froid augmente du littoral vers l'intérieur, la différence entre les extrêmes saisonniers est de 28°C à Oulad Stout et de 23,6°C à Benichiker. La moyenne des minima de janvier est de 4,26°C à Oulad Stout et de 6,7ºC à Benichiker, et celle des maxima de juillet de 32,69°C et 30°C à ces endroits.

Les mois de (Décembre, Janvier, Février et Mars) constituent les mois les plus froids (saison froide), avec une moyenne minimum au mois de Janvier de 4.2 °C. Par contre les mois

de (Juin, Juillet, Août et Septembre) caractérisent la saison chaude avec une moyenne maximum au mois d'Août de 31°C.

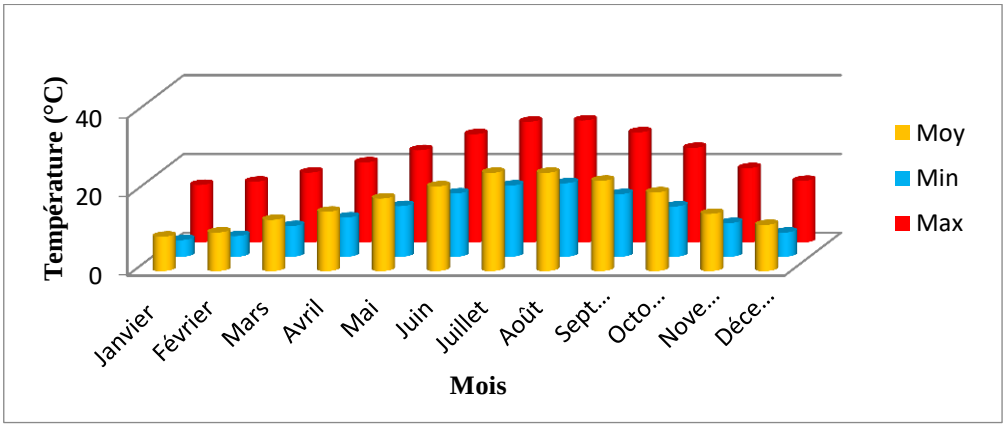


Figure 11: Régime thermique (Courbe des maxima, minima et moyenne) des températures (1985 et 2017)

Les variations temporelles des températures observées sont en relation avec les caractéristiques climatiques saisonnière de la région. Par contre les variations spatiales sont en relation avec les facteurs biogéographiques (altitude, pente, latitude, couverture végétale, sol) et l'impact humaine.

3. Relation température et précipitations

Un certain nombre d'indice qui mettent en relation la température et les précipitations sont utilisés pour la détermination du climat caractérisant une région. Afin de vérifier s'il existe une relation entre la température et les précipitations. Le calcul des indices suivants semble utile: L'indice Xérothermique de Gaussen, l'indice d'aridité de Martonne et les indices mensuels d'aridité et du quotient pluvio-thermique d'Emberger.

3. 1. L'indice Xérothermique de Gaussen

L'indice Xérothermique de Gaussen permet de distinguer les périodes sèches et humides (***Gaussen & Bagnouls, 1959).*** Une période est considérée comme sèche lorsque le total des précipitations (P en mm) est inférieur ou égale au double de la température moyenne mensuelle (T en °C), dans le cas contraire la période est considérée comme humide, par contre lorsqu'il y a une égalité entre les précipitations et le double de la température (P=2T) les besoins en eau sont satisfaisants. Cet indice est commodément figuré par le diagramme ombrothermique de Gaussen (Figure 12). Ce dernier permet de représenter sur le même graphique, les Températures et les précipitations moyennes mensuelles.

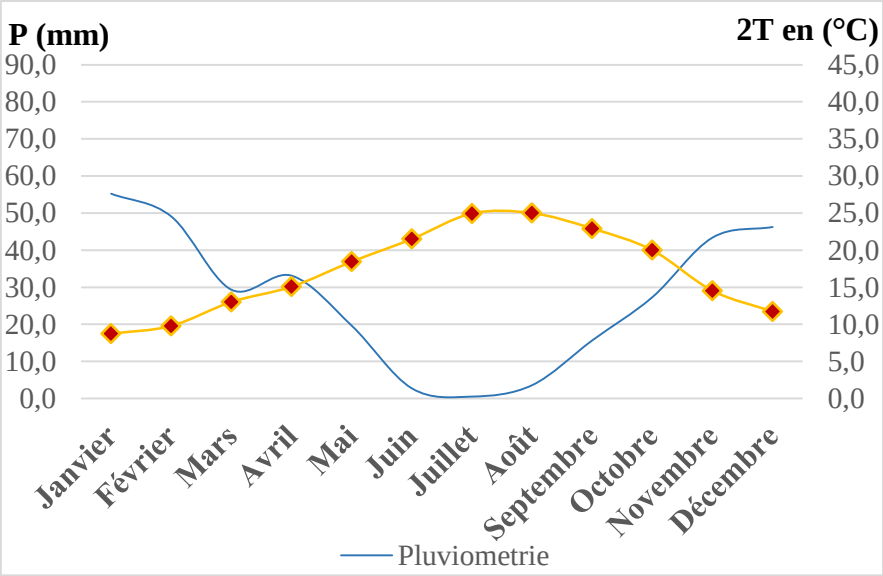


Figure 12: L'indice Xérothermique de Gaussen (1985 et 2017)

L'analyse de ce diagramme permet de définir une égalité entre la période humide et la période sèche. La première s'étend du mois d'octobre jusqu'en mai, par la suite la sécheresse prend le relais.

3. 2. L'indice d'aridité annuelle de Martonne et les indices mensuelles d'aridité

L'indice d'aridité de Martonne (Ia) est une valeur utile pour exprimer les conditions climatiques du milieu. L'indice est exprimé par la formule suivante mettant en relation la pluviométrie et la température moyenne annuelle :

$$Ia = \frac{P}{T+10} \qquad \textit{Equation 4}$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)
T : Température moyenne annuelle (°C)

Dans cette étude Ia= 11.95 : Cette valeur d'indice caractérise un climat semi-aride.

L'indice mensuel d'aridité est estimé par la formule suivante :

$$i = \frac{12 \times P}{t+10} \qquad \textit{Equation 5}$$

Avec :

P : précipitation moyenne mensuelle en mm
t : température moyenne mensuelle en °C

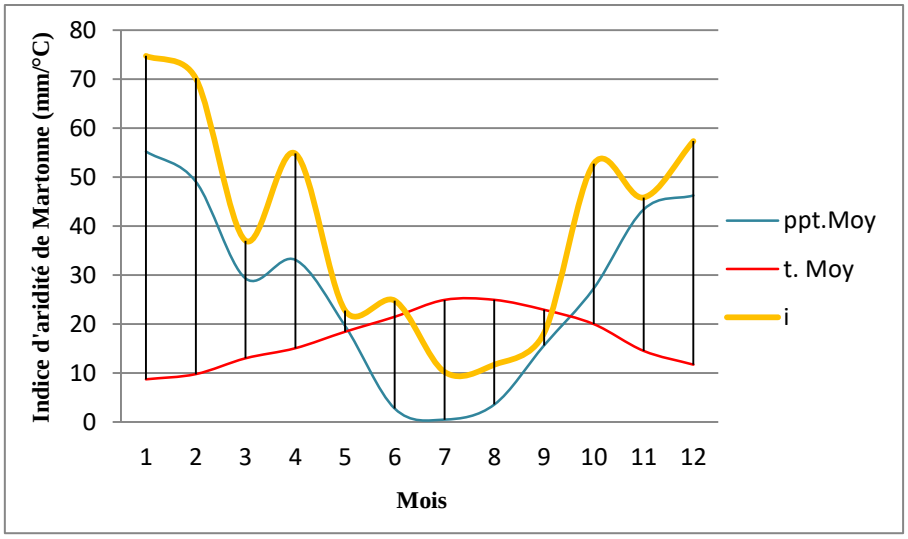


Figure 13: L'indice d'aridité de Martonne et les indices mensuels d'aridité entre 1985et 2017

NB : ppt.Moy : précipitation moyenne mensuelle en mm ; t. Moy : température moyenne mensuelle (°C) ; i : indice d'aridité de Martonne

L'analyse de l'évolution de l'indice mensuel d'aridité au niveau de la province de Nador (Figure 13) montre que les mois de juin, juillet et août jouissent d'un climat hyperaride (i< 5), les mois d'octobre, décembre, janvier et avril sont humide, par contre les autres mois se caractérisent par un régime semi-humide et hyper humide.

3. 3. Le quotient pluviaux-thermique d'Emberger

Parmi les indices bioclimatiques utilisés de façon traditionnelle en Afrique du Nord et ailleurs en Méditerranée (***Emberger, 1931; Bagnouls & Gaussen, 1957; Achhal et al.1979***) on distingue l'indice bioclimatique d'Emberger (Q). Celui-ci est une expression synthétique du climat. Il prend en compte les précipitations annuelles moyennes, 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). Cet indice est donné par la formule:

$$Q_E = \frac{2000P}{(M+m+546.4)*(M-m)} \qquad \textit{Equation 6}$$

Où :

- Q_E : Le quotient pluviométrique d'EMBERGER
- P: Pluviométrie annuelle en (mm)
- M: Température maximale du mois le plus chaud en °C (Juillet)
- m : Température minimale du mois le plus froid en °C (Janvier)

Ce quotient, particulièrement adapté aux régions méditerranéennes, traduit le rapport entre la quantité des précipitations et la moyenne des extrêmes thermiques (mois le plus chaud et le plus froid), le tout corrigé par l'amplitude thermique extrême (M-m). Emberger a remarqué que l'amplitude thermique est un facteur important de la répartition des végétations (***Mokhtari et al.2014).*** La combinaison des quotients pluvio-thermiques obtenus (Q2) et les températures minimales du mois le plus froid (m) (facteur limitant) avec les observations faites sur la répartition de végétation méditerranéenne et plus particulièrement au Maroc a

conduit Emberger à subdiviser l'aire du climagramme en zones caractéristiques par des aridités croissantes de haut en bas, ce sont les «étages bioclimatiques de végétation».

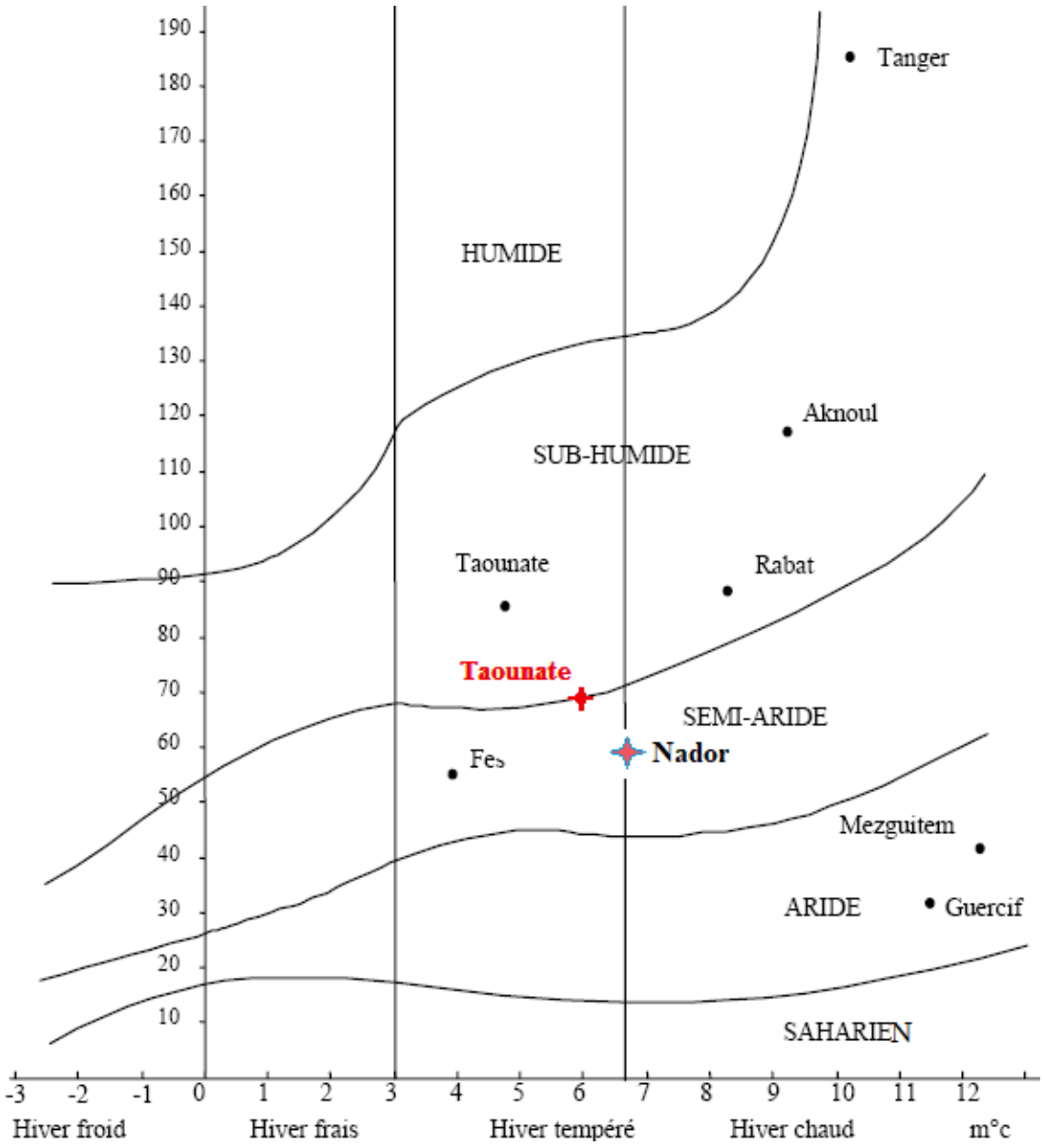


Figure 14: Situation de la province de Nador à l'intérieur du climagramme d'Emberger entre 1985 et 2017 avec de ***Mesrar (2016)*** entre 1994 et 2012 et celle de ***Sadiki (2005)*** entre 1964 et 2000

La Figure 15 montre la situation de la province de Nador dans le climagramme d'Emberger. Elle montre un quotient pluviométrique égal à 44 entre 1985 et 2017. Montrant que le climat au niveau de la province appartient l'étage semi-aride. Selon ***Mesrar (2016)*** et ***Sadiki (2005)*** le quotient pluviométrique a changé de 87 entre 1964 et 2000, à un quotient de 68.37 entre 1994 et 2012, avec une augmentation de la température de 1.3°C. Les résultats de l'étude bioclimatique (Figure 14) en comparaison avec ceux de ***Mokhtari et al. (2014)*** montrent une certaine corrélation (Figure 15), la province de Nador se trouve entre les étages aride et subhumide.

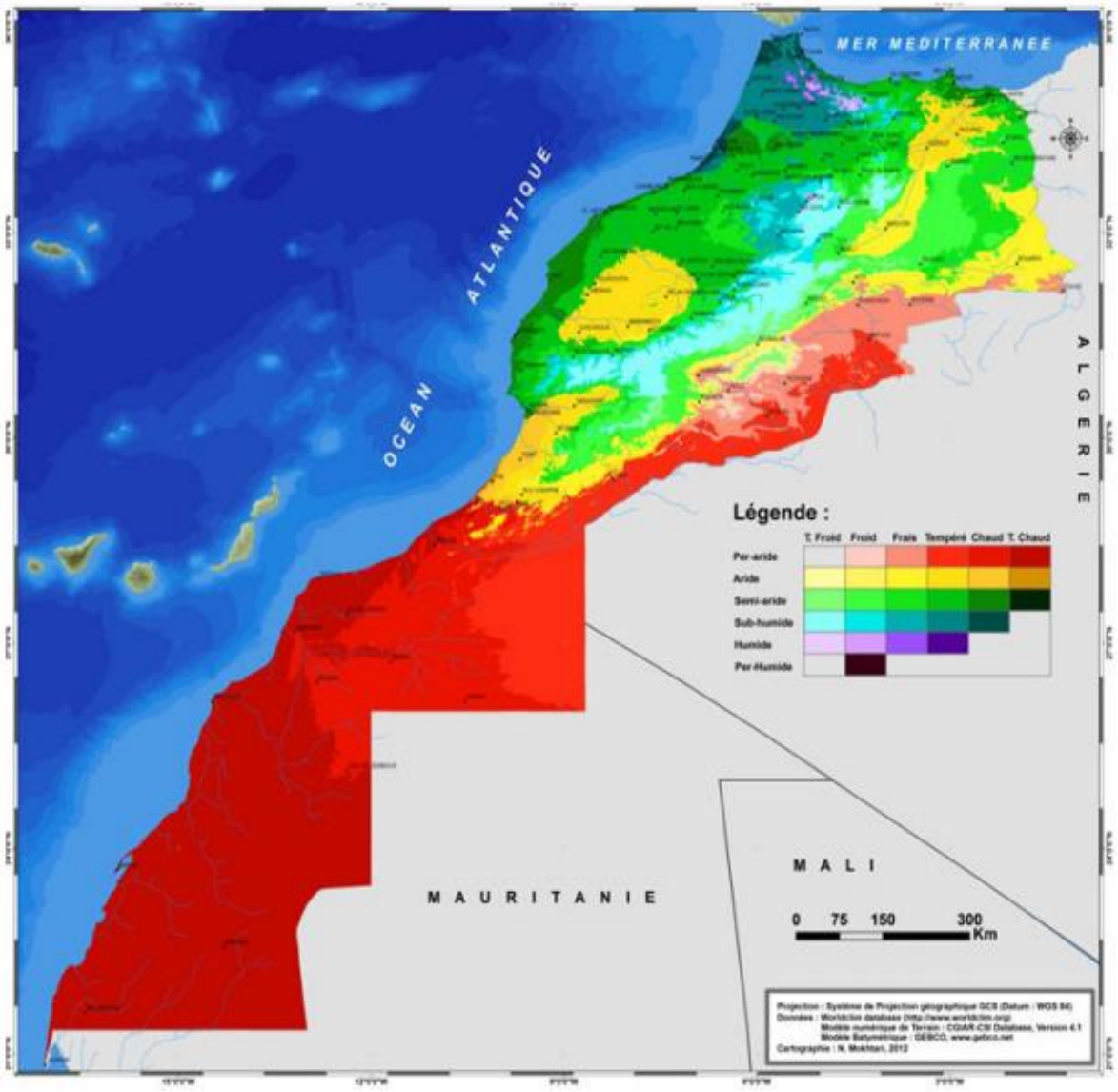


Figure 15: Carte des bioclimats selon la classification d'Emberger (***Mokhtari et al, 2014***)

4. Étude du vent, de l'exposition des versants et du microclimat régnant au niveau de la partie nord orientale et du bassin versant Zenaga

L'exposition d'un sol en pente modifie fortement le microclimat. C'est un facteur clé qui intéresse également l'écologie du paysage. L'influence de l'exposition des versants se perçoit sur plusieurs niveaux: l'humidité et le risque de gel, l'ensoleillement, la flore et la faune, et les rendements agricoles ou sylvicoles. Selon (***Daveau, 1978***), le versant au vent de l'obstacle montagneux est bien arrosé, à la différence du versant sous le vent qui est beaucoup plus sec. Une productivité importante observée sur les versants à exposition sud ou sud-ouest, malgré cela, ces versants sont plus vulnérable aux sécheresses et au processus d'érosion. Il s'avère que l'étude de l'exposition d'un versant est primordiale car elle détermine la quantité de répartition de la précipitation, la lumière qu'il va recevoir et donc le degré d'ensoleillement ou réchauffement.

Les variations des précipitations et des températures observées peuvent être causées par différents facteurs tels que l'altitude, l'orientation des reliefs et le degré de continentalité (***Sadiki. 2005 in Mesrar, 2016***). Ce phénomène métrologique a été interprété sur les versants orientaux de la chaine de Rif par l'effet de Foehn (***Laouina, 1990***). Ce phénomène se produit particulièrement à partir des altitudes comprises entre 500 et 600 mètres, engendrant de fortes précipitations sur le versant de la montagne exposé au vent et d'un vent chaud et sec sur le versant sous le vent.

Le climat régnant dans le bassin méditerranéen est en relation directe avec la position du Maroc et son ouverture sur deux façades maritimes, la mer méditerranéenne au nord et l'océan Atlantique à l'ouest. Au Rif Marocain, les versants exposés au nord et au nord-ouest reçoivent des précipitations plus abondantes que ceux exposés au sud et à l'est (***Mesrar, 2016***). En conséquence, un bouleversement, même mineure, de la circulation générale peut impacter le climat de manière conséquente (***Giorgi & Lionello, 2008***), chose qui se manifeste de manière assez claire au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) et la province de Nador (Figure 17).

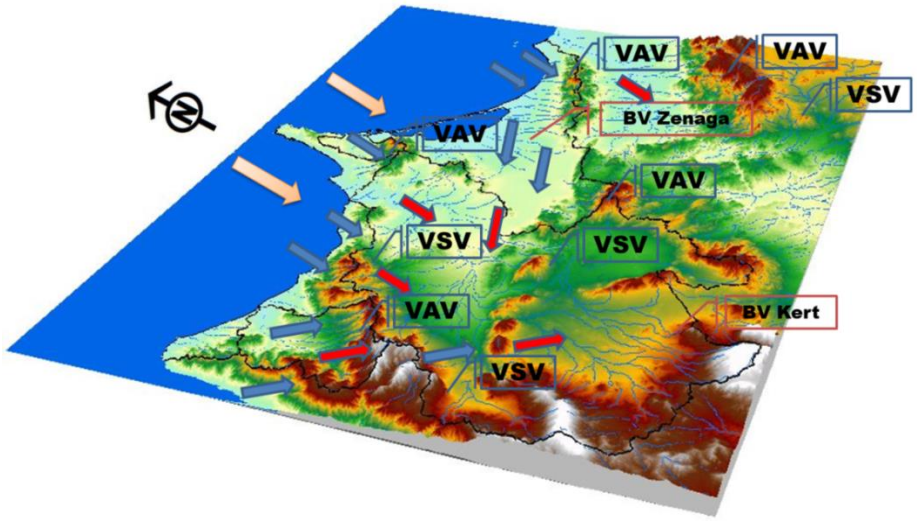


Figure 16: Contexte géoclimatique des bassins côtiers ouest et du bassin versant Zenaga selon les vents opérationnels pour les trois directions principales Ouest, Est-Nord-Est et Est

NB : VAV: Versant au vent et masse d'air chargée en eau (Flèche en bleu) ; VSV: Versant sous le vent et masse d'air sèche (Flèche en rouge)

Selon une étude réalisée par la compagne Artelia en 2010, au point 1800 m au nord-est du site du futur port NWM (Figure 18), les résultats montrent que les vents dominants proviennent de manière préférentielle du secteur nord-est (60°N-90°N) et du secteur ouest (270°N) avec 31% et 39% des occurrences. Par ailleurs, les vents supérieurs à 10 m/S représentent 14% (51 jours/an) et proviennent de deux directions principales : une autour de 70°N avec 3,7% des occurrences, et une autres de 270°N-280°N avec 7,4% des occurrences.

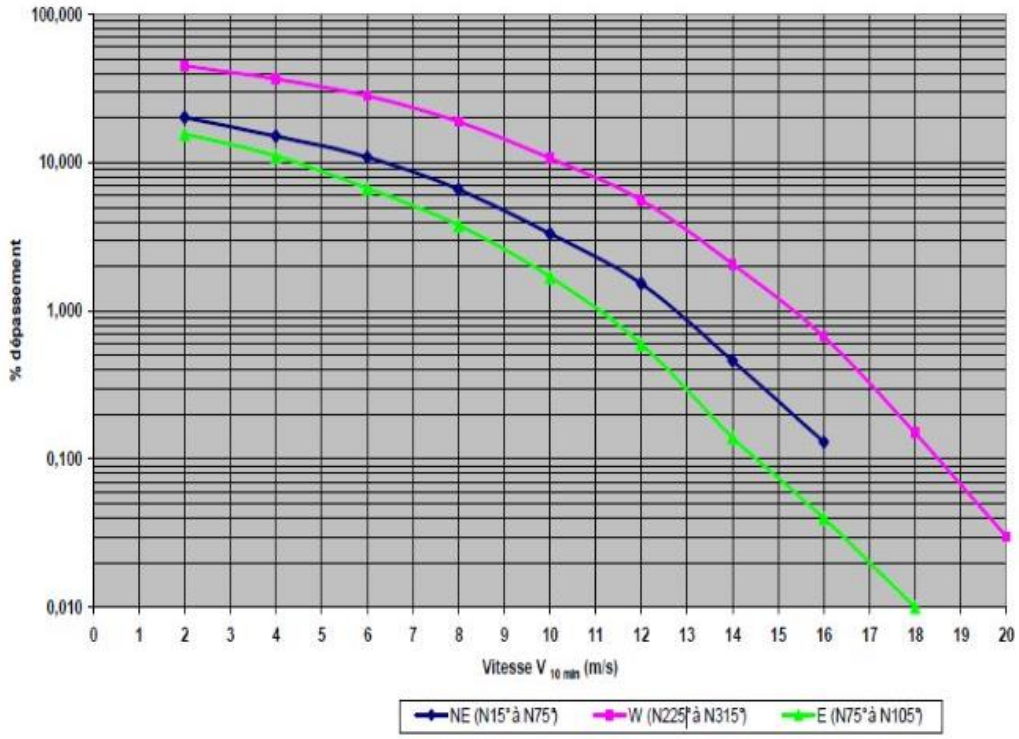


Figure 17: Distribution statistique des vents opérationnels pour les trois directions principales d'Ouest, Est-Nord-Est et Est «NWM » (source : mesures satellitaires ARGOSS)

Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) occupe une position complexe de point de vue climatique. Sa limite nord-ouest (Oued Kert) et sud-est (bassin de l'oued Moulouya) correspond à des lignes de partage des eaux, il constitue du coté méditerranéenne un versant sous le vent qui subit des perturbations assez importante. L'effet de la continentalité est assez posé du coté atlantique, le bassin versant représente un versant sous le vent, rien que dans le contexte des bassins côtiers ouest, mais aussi pour la plupart des bassins constituant le grand bassin versant de la Moulouya.

Les masses d'air de provenance ouest s'assèchent après leur descente sur les versants atlantiques du Rif. Par contre les masses d'air de direction Est-Nord-Est et de l'Est s'arrose à leur descente sur les versants méditerranéens. La plus part des perturbations d'ouest qui donnent des précipitations importantes sur la façade ouest du Rif ne donnent que de maigres pluies sur le versant exposé à l'est (***Mesrar, 2016***). La même logique s'applique sur les versants des bassins côtiers ouest et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), on remarque que les perturbations qui donne des précipitations importantes sont celles qui se produisent sur la façade ouest atlantique et sur la façade est méditerranéenne.

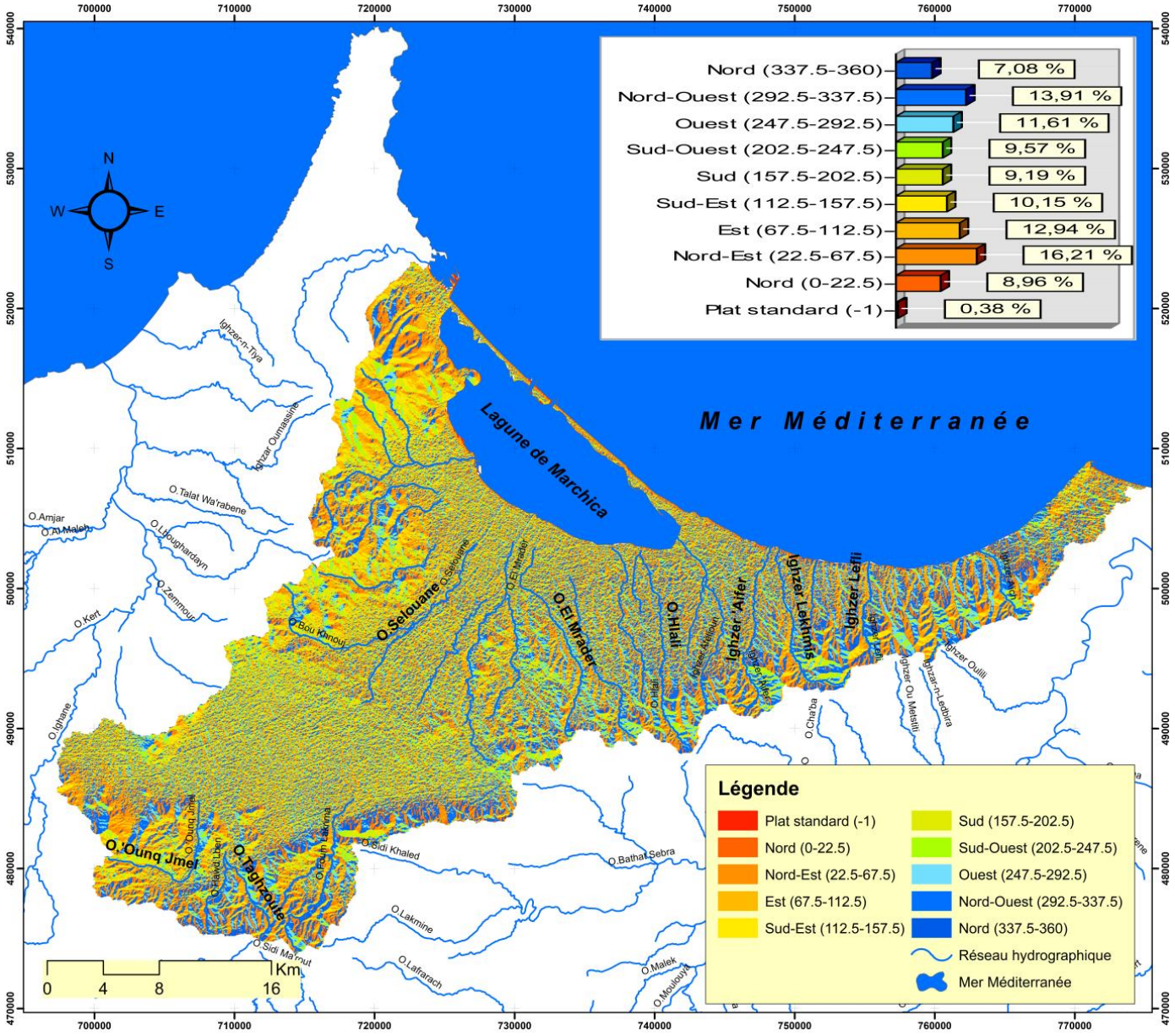


Figure 18: Carte d'exposition des versants

Selon les résultats obtenus à partir des cartes des isohyètes et des polygones de Thiessen (Figure 8 et 9). Nous constatons que plus en monte en altitude la quantité des précipitations augmente, ce qui marque un gradient de précipitations progressif au niveau des parties plus élevées, notamment sur les versants **Nord-Ouest, Nord-est, Est et Sud-ouest** du bassin versant Zenaga (Gareb- Bouareg). La partie la plus arrosée est celle située au nord-ouest et sud-ouest, il s'agit bien de versants exposés au vent. Autrement, peut s'ajouter peut être l'effet de la présence de la lagune de Marchica, car les masses d'air qui arrivent du nord et du nord-ouest se chargent en eau avant d'arriver à la partie sud et sud-est. La répartition des différentes classes (Figure 19) montre que les versants exposés au nord-est, nord-ouest, à l'est, à l'ouest et au sud-est enregistrent les valeurs les plus élevées, avec des pourcentages de 16.21%, 13.91%, 12.94%, 11.61 et 10.15% respectivement, il s'agit des versants perçu comme étant les plus arrosés. Les versants censés recevoir moins de précipitation (Nord) ne dépassent pas 7.08%. Les versants sud-ouest, sud et nord, modérément arrosés, représentent un pourcentage de 9.57%, 9.19% et 8.86% respectivement.

III. Facteur géologique

La nature du substrat, le faciès lithologique et les produits d'altération qu'ils génèrent jouent un rôle déterminant dans la dynamique des écoulements. Ils contrôlent selon leur nature l'intensité des processus de l'érosion hydrique. La compréhension de certaines propriétés des formations lithologiques qui renseignent sur le degré d'érodibilité des affleurements géologiques (texture, structure, etc) est ainsi essentielle. En effet, pour comprendre le volume d'eau tombé et gouverné vers les zones de dépôt dite réceptrices. En effet, la perméabilité des formations lithologiques contrôlent la densité du drainage et du ruissellement qui sera en effet fort ou faible selon les conditions d'infiltration des eaux superficielles.

Cette partie détaillera le contexte géologique régional et sera focalisé sur les principales caractéristiques géomorphologiques du domaine d'étude auquel il est utile de donner un aperçu rapide et précis. D'autres apports comme la présentation des cartes, des tableaux et des diagrammes se sont également avérés utiles pour achever cette description.

1. Les chaîne bético-rifaine : structure et dynamique de l'Arc de Gibraltar

Les chaînes bético-rifaines, représentent le tronçon le plus occidental de la chaîne Alpine de la Méditerranée occidentale (***Andrieux at al.1971***). Elle dessine un arc à concavité vers l'Est dont le cœur est occupé par le bassin d'Alboran (***Durand-Delga, 2006***). L'arc est composé de deux chaînes: les Bétiques au Nord et le Rif au Sud se rejoignant au niveau du détroit de Gibraltar dont la formation à commencer durant l'oligocène suite à des processus de subduction de la plaque Ibérique au nord et la plaque africain au sud (***Dercourt et al.1986; Dewey et al.1989; Chalouan & Michard, 2004***). Dans ce contexte géodynamique de convergence, des bassins sédimentaires épais ont été mise en place en mer Alboran (***Comas et al.1999 ; Michard et al.2006***) et tout au long de ces marges depuis l'âge Miocène supérieur. La plaque méso-méditerranéenne d'Alboran s'est individualisée suite à la dislocation de la Pangée et la réorganisation des plaques lithosphériques au début du Trias. Une évolution

récente s'ajoute depuis le Miocène, guidée par la migration de l'arc vers l'ouest et l'ouverture du domaine d'Alboran à son cœur (***Lacombe & Jolivet, 2005***). Il en résulte un édifice arqué très resserré fait de nappes et d'écailles chevauchantes vers leurs avant-pays respectifs (***Michard et al.2002***).

Classiquement, l'arc de Gibraltar est décomposé en trois grands domaines : la plaque européenne, le domaine d'Alboran constitué d'une croûte continentale amincie (***Jolivet et al. 2008*)** et la plaque africaine. Structuralement, on distingue deux grands ensembles structuraux séparés par un chevauchement majeur : ***Les bandes internes*** : constituées de formations correspond au socle hercynien du domaine d'Alboran charriés sur les marges Africaines (***Sebtides***) et Ibérique (***Alpujarrides*)** et de leur couverture sédimentaire (***Ghomarides*** dans le Rif et ***Malaguides*** dans les Bétiques) ; ***Les bandes externes*** : zones peu ou pas métamorphiques correspond à la couverture de ces mêmes marges affectées par de nombreux chevauchements à vergence nord dans les Bétique et sud dans le Rif.

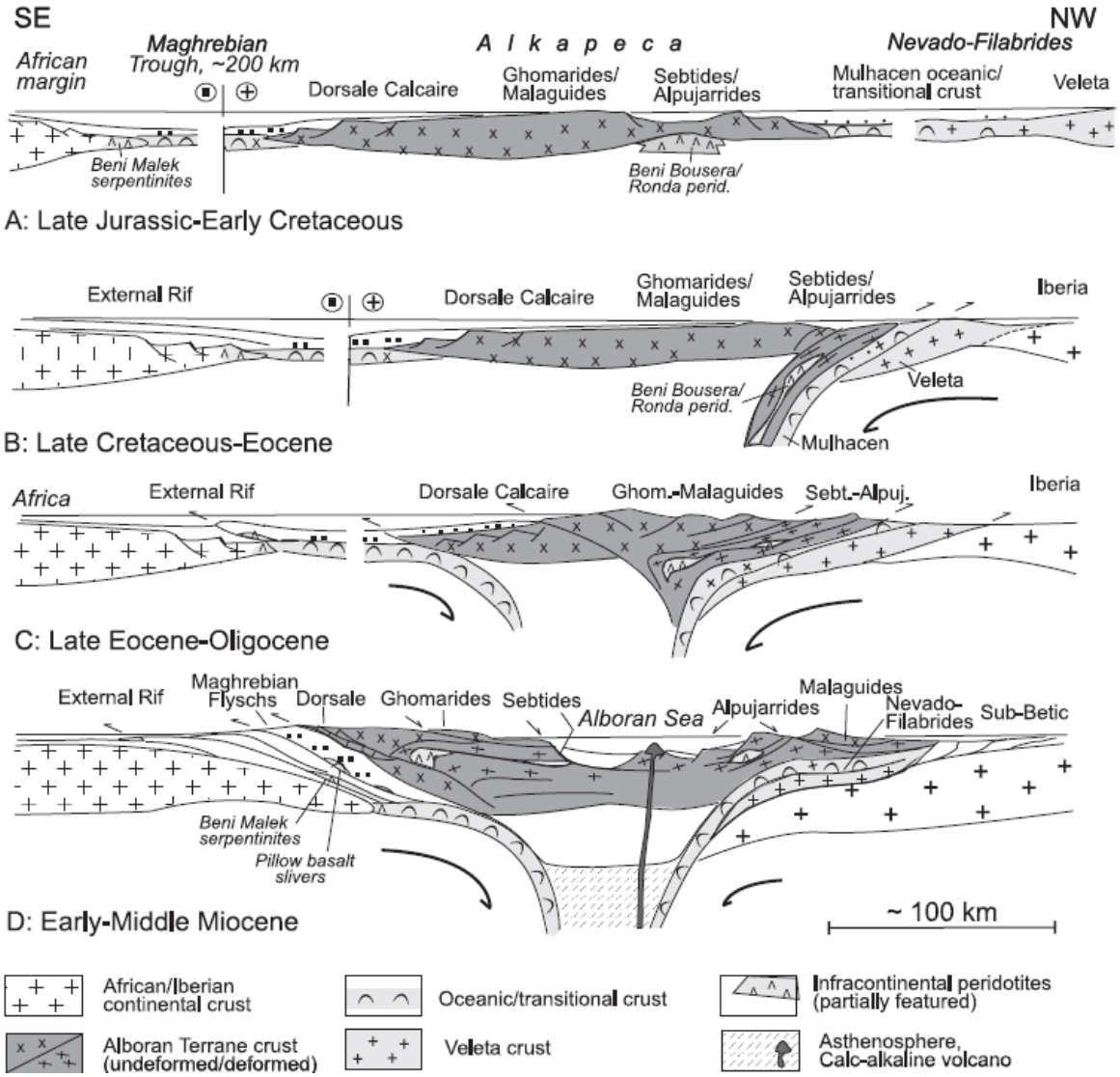


Figure 19: Modèle d'évolution géodynamique de l'arc de Gibraltar du Jurassique supérieur au Miocène moyen (***Michard et al.2002***)

2. Aperçue de la géologie de la chaîne du Rif

Géologiquement la chaîne rifaine correspond à un empilement de nappes caractérisé par des déversements divergents vers l'extérieur (***Andrieux, 1971***). Elle occupe une position clé dans le système orogénique de la ceinture alpine à l'extrémité occidentale de la chaîne alpine périméditerranéenne dont l'histoire s'étend du Trias au Miocène supérieur. Le Rif constitue la branche méridionale de l'Arc Bético-Rifo-Tellien, ou il se prolonge au Nord par la chaîne Bétique et à l'Est par la chaîne Tellienne avec lequel elle forme les maghrébides, puis la chaîne Calabro-Sicilienne (***Durand-Delga, 1980***). D'autre part, il forme le flanc sud de l'Arc de Gibraltar, à la partie nord des Cordillère Bétique (***Michard et al, 2008***). De ces faits la topographie et très accidenté. Ces divers zones, actuellement éparpillés, correspondent avant à une seule et même entité paléogéographique. A ce jour, le Rif est une chaîne de montagne marquée par une érosion accrue et par un contexte tectonique toujours actif.

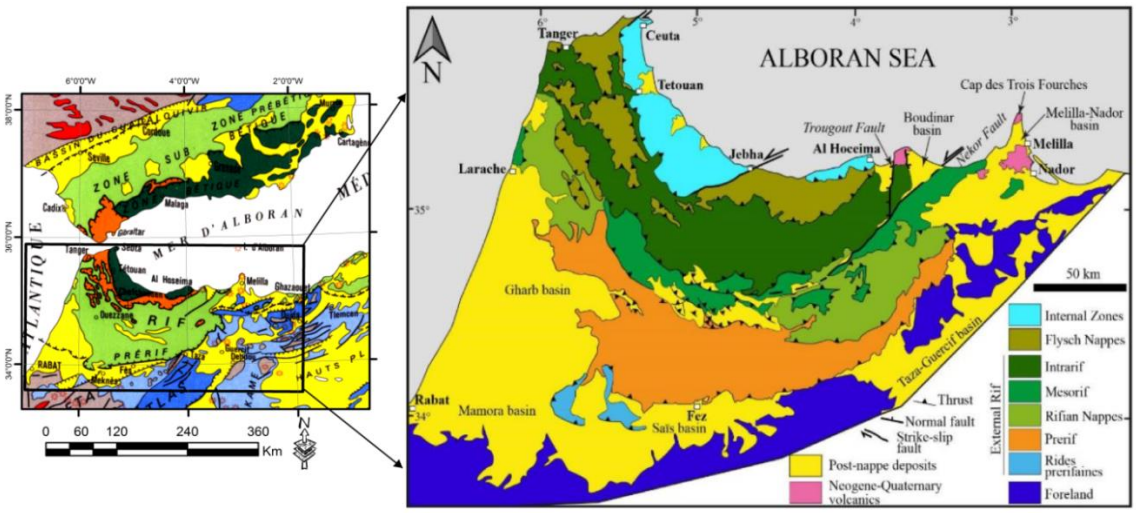


Figure 21: Carte structurale de la chaîne du Rif représentant les grands domaines structuraux et localisation des bassins post-nappent (Carte tectonique de l'Afrique : UNESCO 1968). Carte tectonique du domaine Rifain modifiée d'après ***Suter (1980)*** et ***Jolivet et al. (2003)***

Dans le Rif comme dans les chaînes homologues d'Europe et des Maghreb, trois grands domaines structuraux sont distingués du Nord au Sud et de l'intérieur vers l'extérieur : les ***zones internes*** (Domaine d'Alboran), chevauchent les ***nappes de flyschs*** elles-mêmes charriées sur les ***zones externes***. Ces derniers chevauchent à leurs tours un socle paléozoïque, pré-structuré durant l'orogenèse hercynienne (avant pays).

2. 1. Les zones internes

Les zones internes du Rif (*Dorsale calcaire, Nappes Ghomarides paléozoïques et unités Sebtides métamorphiques*) font partie d'un terrain Alboran qui se poursuit au-delà du détroit de Gibraltar dans les Cordillères bétiques (*Malaguides paléozoïques, Alpujarrides métamorphiques*). Ces zones qui forment le socle varisque de la mer d'Alboran sont communes aux deux chaînes (***Frizon de Lamotte et al.1991***). Elles sont constituées d'un empilement de nappes où deux grands ensembles litholo-structuraux sont distingués :

- Les unités inférieures «**Sebtides**» ou ***complexe des Sebtides*** : formé un empilement de nappes de protolithes ante-alpins et les unités supérieures «**Ghomaride**s» ou « ***complexe Ghomarides*** » auquel est associé la dorsale calcaire (***Didon et al.1973***).

- La **dorsale calcaire :** unité de transition entre les zones internes et le domaine des flyschs, rattachée au domaine d'Alboran (***Michard et al. 2002 ; Chalouan et al.2008***). Elle correspond à des reliques de ce qu'était la marge passive sud de la Téthys (***Michard et al.2006***). Ces unités sont en contact avec le domaine des flyschs par l'intermédiaire des unités prédorsaliennes (***Olivier, 1984***). La nomination «**Dorsale calcaire**» est due essentiellement au constituant principal, le faciès carbonatés «**Calcaire**» d'âge triasique Néogène (***Fallot, 1937***) ou d'âge jurassico-crétacé (***Sadiki, 2005***). L'association structurale de cette dernière avec le domaine d'Alboran tend à l'interpréter comme une couverture méso-cénozoïque d'une séquence paléozoïque (***Didon et al.1973, Michard et al.2008***). L'articulation entre le domaine externe et interne montre un dispositif structural particulier: Les Ghomarides et la dorsale calcaire sont verticialisés et reposent sur les unités externes (***Favre, 1995***).

2. 2. Le domaine des flyschs maghrébins

Le complexe des nappes maghrébides correspondent au deuxième grand domaine structural de l'orogenèse Bético-Rifain qui s'est formé dans l'océan liguro-maghrébin connecté à l'Atlantique et aux océans Alpin du jurassique au Paléogène. L'unité des flyschs maghrébins est structuralement comprise entre les unités externes et internes des paléo-marges téthysiennes. La convergence a provoqué l'empilement des nappes des flyschs à l'Oligocène supérieur-Miocène inférieur. Ces nappes se situent sous les zones internes et recouvrent les zones externes. Ils sont d'origine océaniques et marque une zone de suture sous Alboran (***Michard et al.2008***).

2. 3. Le domaine externe

Domaine très capricieux, issue de la paléomarge téthysienne du continent Africain (***Crespo-Blanc et Frizon de Lamotte, 2006***). Constituent le dernier grand domaine structural charrié sur l'avant-pays. A l'inverse des zones internes et du domaine des flyschs maghrébins, les unités du domaine externe ne présentent pas de continuité stratigraphique ou structurale Africaine lors de la collision entre le domaine d'Alboran et la marge Africaine du Burdigalien jusqu'à la fin du Miocène (***Flinch et al.1996)***. Trois zones structurales sont distinguées au sein des unités externes rifaines ***(Suter, 1980; Chalouan et al.2008)*** du nord au sud et du haut au bas de la pile stratigraphique d'âge Cénozoïque *:* ***les unités intrarifaines***; ***les unités mésorifaines*** *et* ***les unités prérifaines***. Ces nappes sont constituées de sédiments datés du Trias au Néogène, autochtones, para-autochtones et/ou allochtones, de la paléomarge continentale Africaine de la Téthys (***Favre, 1995***). Les unités du domaine externe sont souvent non métamorphiques, à l'exception de l'unité de Ketama (Intrarif profond) et celles de la partie Nord du Temsamane qui présentant des conditions métamorphiques du faciès schiste vert (***Azdimousa et al.2007; Negro et al.2007***).

Les unités profondes para-autochtones plus au mois détachées de leurs unités d'origine, des nappes superficielles, ainsi que des unités décollées ou glissées, issue de l'une des unités enracinées considérées depuis longtemps (***Ait Brahim, 1991***), comme un empilement de nappe de charriage à vergence Sud. Les nappes des flyschs situées entre les zones internes au Nord et les unités intrarifaines de Ketama- Tanger au Sud (***Suter, 1980***), la nappe de Senhadja (***Hottinger et Suter, 1962***); Nappe d'Ouazzane et la nappe de Temsamane, Aknoul et Bouhaddoud. Les structures développées au jurassique subirent une inversion tectonique dès le crétacé, où les failles normales jurassiques ont joué en chevauchement, ensuite elles sont reprises en décrochements NE-SW et NW-SE. Deux grands failles de direction ENE à NE se distingue dans cette zone, à savoir la faille de Jebha, au sud des zones internes et au Nord du Rif, et la faille de Nekor dans le Rif oriental. Le domaine externe est recoupé par deux accidents sénestres majeurs, dont celle de Nekor, de direction NE/SW et la faille d'Al Hoceima, de direction ENE/WSW.

3. Géologie et lithologie du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), région de Nador

La région de Nador ou est inscrit le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est située sur la bordure orientale de la chaîne Rifaine. A ce niveau, les différents domaines du Rif ne sont que partiellement représentée dans le Rif oriental. On ne trouve que quelques unités du domaine externe. Le bassin de Zenaga est un bassin subsident molassique Néogène post-nappe, constitue un corridor qui sépare le Rif oriental de son avant-pays. Une grande partie du bassin est recouverte par des terrains récents (Plio-Quaternaire). L'évolution géologique du bassin semble être le résultat de la flexure lithosphérique sous la charge due à l'épaississement crustal dans la zone de collision entre les deux plaques d'Afrique et d'Alboran (***Yahyaoui et al. 1997).***

Les plaines constituant le bassin versant Zenaga sont séparées, de part et d'autre par des plateaux Plio-villafranchiens. Ces derniers reposent sur les formations volcaniques de Béni Bou Ifrour et de Laglab constitué essentiellement de granodiortites calco-alcalins (***Hernandez & Bellon, 1985)***. Le bassin versant est entouré par un encadrement montagneux à reliefs importants : les chaines du Gareb (Jurassico-Crétacé), de Ziata (Miocène) et des Kebdana (Jurassique) au Sud et à l'Est. A l'ouest les monts de Beni Bou Ifrour (Jurassico-Crétacé) et de Tistoutine sépare le bassin versant Zenaga du bassin versant de l'Oued Kert par un large col. Le chaînon des Kebdana montrent des lambeaux de nappes d'affinité rifaine. Ces éléments de nappe ont été rattachés à la nappe de Senhaja (***Hervouêt et Luca, 1980 ; Marcais et Suter, 1996***). Des unités chaotiques du bassin de Zenaga (Gareb-Bouareg) sont autochtones sur la bordure nord-occidentale des Kebdana (***De Luca, 1984***).

Quatre domaines structuraux caractérisent la zone d'étude. Ainsi le bassin Zenaga est limitée de son côté NW par le massif volcanique du Gourougou avec des événements volcaniques qui s'étalent du Messinien au Plio-Quaternaire (***Morel, 1985***), de son côté W-SW par le massif de Beni-Bou-Ifrour constitue le socle du volcanisme du Gourougou avec une histoire qui s'étend du Jurassique au Crétacé (***El Bakkali, 1995***), et au SE par le massif de

Kebdana constitué par une série allant du Jurassique au Mio-Pliocène (***Paquet, 1970***). Ces formations constituent l'arrière-pays qui alimente le bassin en matériel sédimentaire.

3. 1. Les formations actuelles et quaternaires

Les faciès lithologiques associés aux dépôts actuels et quaternaires figurent essentiellement sous forme d'alluvions, d'éboulis, de dépôts de dayas, de sebkhas, de limons et terrasses limoneuse du Quaternaire récent, de dunes vives du Quaternaire récent et actuel (Rharbien), de formation marine et dunaire consolidées du Quaternaire moyen et actuel et des regs et surfaces encroutées, de conglomérats, cailloutis et couche rouges du Villafranchien et de Basaltes ankaratrites du Quaternaire. Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) la plus grande surface est occupée par des faciès lithologiques meubles et des roches friables.

3. 2. Les formations pliocènes

Ces formations sont allongées selon une direction Nord-Sud au niveau du bassin versant en allant d'Isekajene à Azzouzate. Les faciès lithologiques associés figurent essentiellement sous forme de marnes et conglomérats, des sables, des colonies coralliennes et diatomites. Ses formations concordent sur le Miocène supérieur et moulées sur les structures anciennes, avant d'être à leur tour plissées par des mouvements tardifs de faible importance.

3. 3. Les formations miocènes

La stratigraphie du Néogène post-nappes du bassin Melilla-Nador a fait l'objet de nombreuse publications (***Fallot, 1937; Guillemin & Houzay, 1982; Benson et al.1991***). Le Néogène à ce niveau montre un découpage en îlots et bassins sur les marges desquels se développent des plateformes carbonatés. Son évolution se fait une plate-forme carbonatée de type progradant-agradant (***Rouchy & Martin, 1992).*** Au niveau du bassin versant on trouve que les affleurements du Miocène Supérieur (Tortonien) qualifié de post-nappe. Ces formations sont concordantes sur le Miocène inférieur. La série correspond à des coulée volcaniques (trachytes, andésites..), des brèches, des dépôts transgressive érodé, marno-calcairo-gréseuse avec des grès chenalisé et encroûtements. Le reste est occupé par un faciès continental. Le Miocène inférieur, qualifié d'anti-nappe, correspond à des faciès des marnes bleues, sables et bancs gréso-calcaires à bioclastes.

3. 4. Les formations crétacées supérieures et inférieures

Le Crétacé supérieur affleurent à Oulad Bou'Azza au niveau de la partie extrême NW de la zone médiane du bassin, constitué de flysch et schistes marneux à Inocérames avec des faisceaux calcaires à Ammonites et Bélemnites et d'un faciès continental marno-calcaire (Figure 22). Le Crétacé inférieur affleure selon une bande dans l'ensemble de la partie SE-NW et toute à fait dans la partie NW du bassin versant El Gareb montre une série schisto-gréseuses, schisto-gréseuses remanié et des grès à Orbitolines.

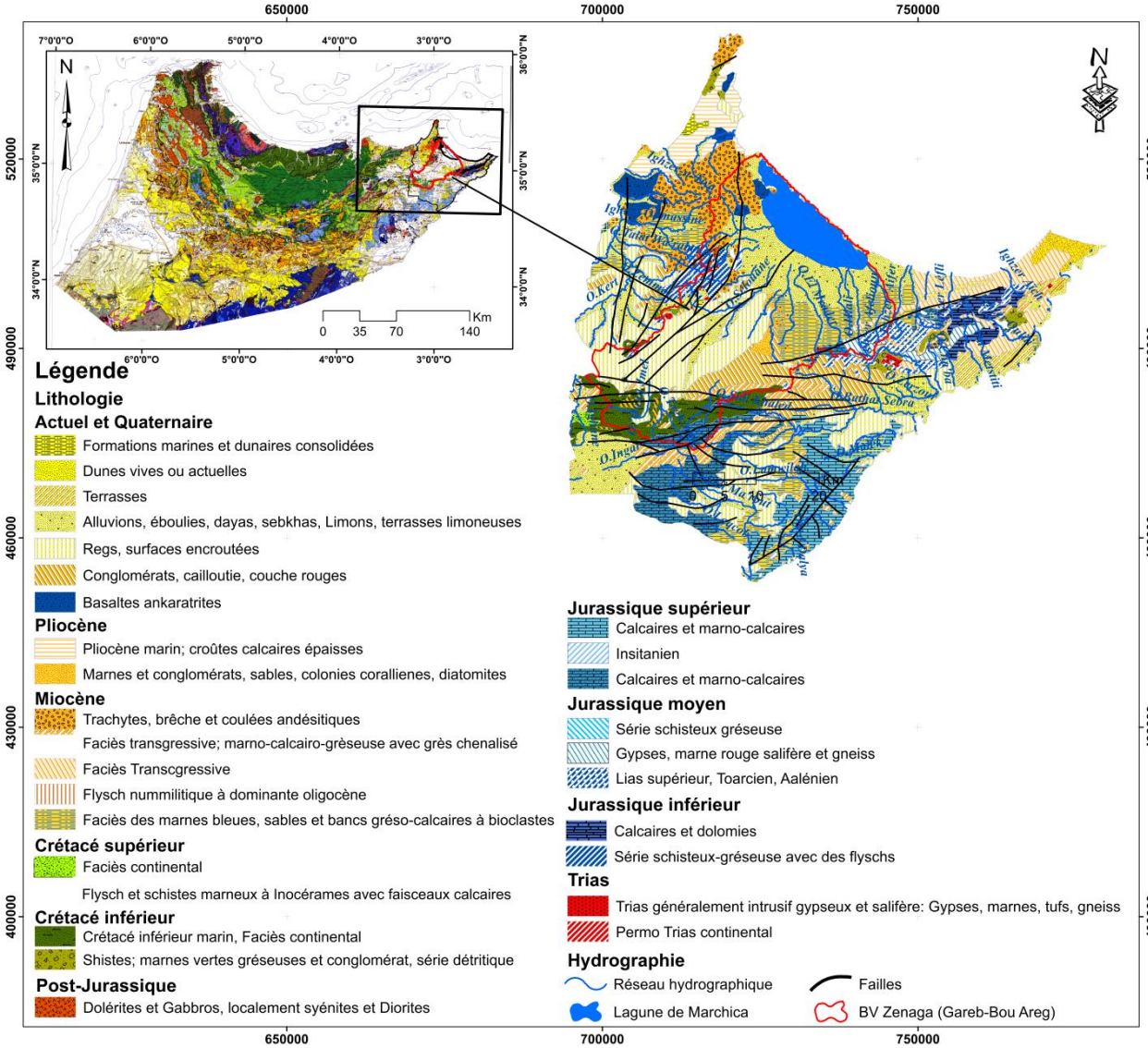


Figure 22: Cadre géologique du territoire de la province de Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) dans la carte géologique du Maroc -Carte géologique de la chaine Rifain (***Suter, 1980***)

3. 5. Les formations jurassiques

Le Jurassique est constitué en grande partie par le Jurassique supérieur représenté par les Calcaires et marno-calcaires, des calcaires et dolomites du Toarcien et d'Aalénien. Une faible surface correspond à un affleurement de jurassique moyen représenté de gypses, marnes rouge salifère et gneiss. Le jurassique inférieur est constituée par une série schisto-gréseuse avec des flyschs et des séries schisteux, des marnes vertes gréseuses et conglomérats.

3. 6. Les formations triasiques

Les affleurements triasiques du bassin versant Zenaga, se localisent selon une ceinture qui s'aligne des zones amont aux zones avales. Composé d'un Trias généralement intrusif gypseux et salifère avec des marnes, par endroits des ophites, tufs et des gneiss. Les faciès triasiques témoignent d'un contexte dynamique d'extension continentale. La limite entre le jurassique inférieur et les dépôts triasiques marque une série transgressive.

4. Répartition des faciès lithostratigraphiques au niveau du territoire de la province de Nador

Au niveau de la province de Nador l'ensemble de formations lithologiques est étalées sur 10 système et sous-systèmes (Tableau 15). Les plus abondants sont des formations superficielles comme les éboulis, les dépôts de dayas, de sebkhas, les alluvions actuelles et les terrasses limoneuses du Quaternaire récent, avec 19.6%. Les regs et surfaces encroutées du Quaternaire moyen et ancien occupent aussi 19.6%. Les conglomérats, cailloutis et les couche rouges du Villafranchien (Quaternaire ancien) ne présente que 9.09%. Les dépôts actuels et quaternaires occupent 53.75 % de la superficie de la province de Nador.

Les affleurements du Miocène occupent 22.64 % de la superficie du territoire étudiée. Les faciès des marnes bleues, sables et bancs gréso-calcaires à bioblastes Tortonien présentent 7.31% avec un pourcentage du total des âges estimés à 32.28%. Les faciès des trachytes, brèche et coulées andésitiques ; des marno-calcairo-gréseuse avec grès chenalisé et encroutements et les faciès transgressives enregistrent respectivement 5.7%, 5.53% et 3.74%.

Les dépôts du jurassique occupent 13.59 % du la superficie total. Les faciès du jurassique supérieur représenté par les calcaires et marno-calcaire ne présentent que 3.56%. Les faciès les moins représentés sont attribués au Trias. Il s'agit d'un Trias généralement intrusif gypseux et salifère : Gypses, marnes, tufs, gneiss avec des pourcentages qui ne dépassent pas 1.32%.

Tableau 15: Répartition des faciès lithostratigraphiques au niveau du territoire de la province de Nador

Age	% du total	Lithologie	% du total	% faciès par âge
Actuel et Quaternaire	53.75	Formations marines et dunaires consolidées ;	0.31	0.57
		Dunes vives ou actuelles ;	0.91	1.69
		Terrasses ;	0.86	1.6
		Alluvions, éboulis, dayas, sebkhas, Limons, terrasses limoneuses ;	21.39	39.79
		Regs, surfaces encroutées ;	19.6	36.46
		Conglomérats, cailloutie, couche rouges ;	9.09	16.91
		Basaltes ankaratrites	1.59	2.95
Pliocène	1.86	Pliocène marin; croûtes calcaires épaisses ;	1.61	86.55
		Marnes et conglomérats, sables, colonies coralliennes, diatomites	0.25	13.44
Miocène	22.64	Trachytes, brèche et coulées andésitiques ;	5.7	25.17
		Faciès transgressive; marno-calcairo-gréseuse avec grès chenalisé, encroutements ;	5.53	24.42
		Faciès Transgressive ;	3.74	16.51
		Flysch nummulitique à dominante oligocène ;	0.36	1.59
		Faciès des marnes bleues, sables et bancs gréso-calcaires à bioblastes.	7.31	32.28
Crétacé supérieur	2.56	Faciès continental ;	0.24	9.37
		Flysch et schistes marneux à Inocérâmes avec faisceaux calcaires à Ammonites et Bélemnites.	2.32	90.62
Crétacé inférieur	4.61	Crétacé inférieur marin, Faciès continental.	3.92	85.03
		Schistes; marnes vertes gréseuses et conglomérat, série	0.69	14.96
Post-jurassique	0.09	Dolérites et Gabbros, localement syénites et Diorites.	0.09	100
Jurassique supérieur	7.17	Calcaires et marno-calcaires (a) ;	3.56	49.65
		Insitanien ;	0.05	0.69
		Calcaires et marno-calcaires (b).	3.56	49.65
Jurassique moyen	2.52	Série schisto-gréseuse ;	0.31	12.30
		Gypses, marne rouge salifère et gneiss ;	0.61	24.20
		Lias supérieur, Toarcien, Aalénien.	1.6	63.49
Jurassique inférieur	3.9	Calcaires et dolomies ;	1.05	26.92
		Série schisto-gréseuse avec des flyschs.	2.85	73.07
Trias	1.32	Trias généralement intrusif gypseux et salifère : Gypses, marnes, tufs, gneiss.	0.57	43.18
		Permo-Trias continental	0.32	24.24

V. Couverture végétale et occupation de sol

L'érosion hydrique de surface constitue un phénomène naturel, aux conséquences préoccupantes dans beaucoup de régions du monde (***Poesen et al.2003***). Sa maitrise représente un défi majeur sur les espaces où se localisent des enjeux socio-économiques (***Pimentel et al.1995***). Il est généralement admis que la végétation peut constituer un moyen de lutte antiérosive efficace contre le phénomène de l'érosion des sols. Il existe ainsi une grande quantité de références à ce sujet dans la littérature scientifique. Il est donc apparu

intéressant de faire le point sur les connaissances quant au rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique dans diverses conditions de climat et à différentes échelles spatiales.

La taille, le type, et la densité du couvert végétal déterminent le degré de protection que peut conférer ce facteur au sol. La végétation peut intervenir contre l'érosion hydrique de surface de différentes manières: Elle dissipe l'énergie de l'impact des gouttes de pluie par leur interception avec ses parties aériennes. Elle peut empêcher l'ablation du sol en ralentissant l'écoulement du ruissellement. Elle fixe les particules du sol par sa partie racinaires. Il maintient ainsi une bonne porosité à la surface du sol. Elle peut favoriser la sédimentation, en retenant les sédiments érodés plus à l'amont grâce à des processus de piégeage et de rétention. Elle contribue à l'enrichissement du sol en matière organique ce qui permet sa structuration et l'augmentation de sa résistance à l'érosion (***Fournier, 1969***).

1. Réduction de l'énergie du ruissellement et de l'érosivité des pluies

La végétation permet de réduire l'énergie de l'érosion pluviale en jouant un rôle d'interception des gouttes de pluie, grâce aux parties aériennes des plantes. Cette interception est fonction de la densité de la surface foliaire (***Cosandey et al.2000***) et de la structure du couvert végétal (***Zordia, 1977***). En forêt, les précipitations inférieures à 2 mm en 24 h sont presque entièrement interceptées; au-delà, l'interception diminue lorsque l'intensité de la pluie augmente, selon une fonction logarithmique. Pour une même essence, l'interception augmente avec la densité et la surface terrière (***Giordano, 1994***). Par son couvert, la végétation joue ainsi un rôle de protection mécanique: elle permet de diminuer l'énergie cinétique des gouttes de pluie et de réduire l'effet des splash (***Geddes & Dunkerley, 1999; Sadiki et al. 2012***) surtout grâce aux litières et buissons, dont le rôle est plus important que celui de la canopée aérienne. Elle peut aussi lutter contre le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau au sol (***Cerdan, 1999***).

Dunne et al. (1991) indiquent que le taux d'infiltration des eaux de ruissellement pour un sol dépend de la surface drainée à l'amont. Une partie de l'eau infiltrée peut ensuite être restituée sous forme de ruissellement hypodermique, mais avec un certain retard (***Poncet, 1995***). La régulation hydrologique jouée par la végétation a ainsi pour effet de diminuer la quantité, la concentration et le débit du ruissellement (***Combes et al.1994 ; Lavabre & Andreassian, 2000***). ***Giordano (1994)*** rapporte qu'entre des terrains nus et une forêt, le ruissellement diminue et le temps d'écoulement de la pluie augmente jusqu'à 500 fois. ***Richard et Mathys (1999)***, en faisant la comparaison entre un bassin versant dénudé et un bassin versant végétalisé, on observe une augmentation du seuil minimal de pluie pour obtenir un ruissellement et, de ce fait, une réduction de la fréquence des crues. Les points de crues sont retardés d'au moins une demi-heure et réduites dans un rapport de 5 à 10. Le tarissement est également plus lent.

Combes et al. (1994) expliquent que, par rapport à des terrains dénudés, la forêt peut réduire d'au moins 80% la pointe de crue et d'au moins 50% le volume ruisselé rapidement.

Elle peut tripler la rétention initiale avant le début d'un écoulement. Elle peut multiplier par cinq la capacité maximale d'infiltration pendant une crue. Il existe, cependant, des seuils d'efficacité en ce qui concerne l'hydrologie : l'influence de la forêt est moindre pour les événements pluvieux longs ou abondants (***Zordia, 1977***). En effet, une fois le sol saturé, la forêt ne joue qu'un rôle réduit dans le ruissellement. ***McIvor et al. (1995)*** ont ainsi observé que, pour des pluies de plus de 100 mm en 24 h avec une intensité supérieure à 45 $mm.h^{-1}$, la végétation ne jouait pas un grand rôle dans la réduction du ruissellement. De plus, le rôle de la végétation est à pondérer selon la saison : en hiver en zone tempérée, et sous des espèces à feuilles caduques, son action est nettement ralentie (***Poncet, 1995***).

2. Maintien des sols

La végétation sont de puissants ingénieurs des écosystèmes, s'étendant à la fois en surface et sous le sol, et sont essentielles au maintien de multiples fonctions des écosystèmes (***Bardgett et al.2014 ; Freschet et al.2021***). Elle est généralement utilisée dans les programmes de restauration écologique pour réduire l'impact grave des processus d'érosion des sols (***Gray et Leiser, 1982, Morgan, 2008***).

Les végétaux permettent, en effet, d'améliorer la cohésion des sols et donc de renforcer leurs propriétés mécaniques (***O'Loughlin & Xinbao, 1986***). Cet effet de renforcement des sols grâce aux systèmes racinaires a également été mis en évidence sur les berges végétalisées des cours d'eau (***Abernethy & Rutherfurd, 2000***). La végétation peut aussi jouer un rôle de régulation thermique : elle permet d'atténuer les écarts quotidiens de températures, réduisant ainsi les effets de la gélifraction (***Rovéra et al.1999***). La végétation recouvrant les berges des cours d'eau peut également jouer le rôle de régulation thermique (***Stott, 1997***). A ces endroits, les températures du sol sont supérieures de près de 4°c pour des berges végétalisées par rapport à des berges dénudées.

Dans les zones agricoles, le ruissellement lié à de fortes précipitations entraîne le départ des sols par érosion de façon spectaculaire en creusant de profondes ravines ou plus discrètement en emportant les éléments fertiles du sol. L'érosion provoque des dégâts aux terres agricoles mais a aussi entraîné une dégradation de la qualité des eaux et le déplacement de sédiments qui forment les coulées boueuses. La sensibilité des sols à l'érosion hydrique dépend principalement de la dégradation de sa structure superficielle sous l'action des pluies (appelée battance) et de la stabilité et de la cohésion de ses constituants, c'est- à-dire de leur résistance au cisaillement et de leur facilité à être mobilisé par le ruissellement.

3. Rôle de la végétation en faveur de la sédimentation

La végétation peut exercer un effet favorable sur la sédimentation des particules, grâce à des processus de piégeage et de rétention d'une partie des sédiments érodés à l'intérieur d'un bassin versant. ***Lee et al. (1998)*** ont montré qu'il existe un effet de filtration des écoulements au travers de la végétation. Ces écoulements déposent les sédiments par suite de la réduction de leur énergie de transport. Bien que ***Beuselinck et al. (2000)*** aient montré que la végétation est davantage susceptible de piéger les sédiments fins. D'autres études (***Meyer et al.1995***) ont

montré que les sédiments grossiers pouvaient également être piégés par des obstacles végétaux. Des dépôts ont ainsi été observés à l'amont de barrières végétales, sur des pentes plus fortes que celles sans végétation (***Bochet et al.2000***).

4. Dégradation de la végétation et son impact

La déforestation agricole est un problème environnemental local et mondial (***Foley et al.2005***). Dans les milieux montagneux méditerranéens, la suppression de la végétation naturelle pour développer l'agriculture a augmenté les zones sujettes à l'érosion (***Lizaga et al.2018***). Ces types d'agroécosystèmes sensibles sont sujets à l'érosion non seulement en raison des conditions climatiques, mais aussi en raison de la forte pression anthropique exercée et de leur conversion en terres agricoles (***Bruun et al.2015***). Ces pratiques inadéquates ont créé des problèmes frappants, en particulier dans les régions et les zones montagneuses où il y a des terres agricoles accompagnées de conditions environnementales défavorables : hautes altitudes, pentes raides, sols peu profonds et conditions climatiques sèches avec parfois de fortes pluies. Tous ont été identifiés comme l'un des principaux facteurs de perte de sol (***Martınez-Casasnovas et al.2002***) en augmentant les taux d'érosion par rapport à l'érosion par le travail du sol (***Quijano et al.2016b***).

5. Végétation naturelle et occupation des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Sur la côte marocaine méditerranéenne, la végétation est sans doute la plus spectaculaire. Au niveau de la province de Nador et du bassin versant Zenaga, le couvert végétal naturel présente un formidable patrimoine dont les potentialités sont enrichies par la valeur des richesses biologiques que recèle ces aires protégés et SIBE. La *lagune de Marchica* est classée en site d'Intérêt Biologique et Ecologique (***AEFCS, 1996***). Le *Cap des trois fourches*, le *mont du Gourougou*, les *Monts de Beni Bou Ifrour*, le *massif de Kebdana* et le *Cap de l'eau* sont classés en site Ramsar (***El Agbani et al.2004; Cherkaoui et al.2015; Gaget et al.2020***). L'inventaire de la végétation au niveau de ce territoire à fait l'objet de nombreux travaux de recherche, qui ont intéressé tous les composantes de l'écosystème (***Carlier, 1971; Brethes et al.1978; Brunel, 1985; Guelorget, 1994; Benhoussa & al. 2003b)***. L'étude de la végétation a été abordée dans un diagnostic récent (***Dakki & al. 2003 ; Haloui et al.2003b***) réalisé dans le cadre du projet ***MedWetCaost*** relatif à la "*Conservation des écosystèmes des zones humides et côtiers de la région méditerranéenne*".

L'utilisation des images de télédétection sont avérée extrêmement utiles pour comprendre l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol (***El Garouani & Aharik, 2021***). Cette opération est une étape primordiale pour la caractérisation de l'évolution spatio-temporelle du processus de l'érosion hydrique des sols. ***El Garouani et al. (2010)***, explique que la cartographie des classes d'occupation du sol se base sur un algorithme de classification supervisée nécessitant la définition de la taille et du nombre d'échantillons d'apprentissage.

Dans notre étude, la carte d'occupation des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) à été réalisées en se basant sur une image du produit de données Landsat 8 OLI de niveau 1

pour l'année 2017, qui a été prise en période d'été. La classification de l'occupation des sols a été achevé en se basant sur l'algorithme du maximum de vraisemblance de la classification supervisée (Support Vector Machine: SVMs). L'opération a été réalisée suite à une sélection attentive d'échantillons de pixels, basée sur la variation spectrale de chaque classe de la couverture des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). La méthode de classification utilisée consiste à associer à chaque pixel de l'image à une classe d'occupation des sols en se basant sur le principe de l'apprentissage automatique pour délimitation des régions d'intérêts (ROI) à la base des compositions colorées de l'image Landsat OLI-8. Pour chaque classe d'occupation des sols, 20 sites d'apprentissage ont été choisie. La cartographie de l'occupation des sols et les opérations de correction d'images a été menée via les outils SIG (ArcGIS, Global Mapper) et la télédétection (ENVI).

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), la couverture végétale est assez diversifiée, conditionnée par l'action du climat, la morphologie du terrain, la nature des sols et par l'action anthropique. Ces facteurs sont très variables, ce qui fait que le bassin versant présente une importante diversité d'associations végétales en relation avec la diversité de ses habitats entre l'amont et l'aval.

L'analyse cartographique (Figure 23) nous à permet de constater que le zones forestières avec un peuplement assez dense est constituée essentiellement par des forêts et matorrals, représentant 5.92%, les reboisements (feuillus et résineux) avec 5.03% de la superficie total. Ces formations ne dépassent pas 11% de la superficie totale du bassin versant. Ils sont situés surtout au niveau des parties amont de l'encadrement montagneux du bassin versant. Les terrains de parcours et forêts dégradé, occupent 59.38%, il s'agit d'un mélange de petites plantes isolées dispersées plantes très clairsemés (arbustes, touffes d'herbe, pâturages…) dans un paysage présentant du sol nu ou des roches exposés. Le reste du territoire est dépourvu de tapis végétal permanent sauf quelques arbustes dispersés ou des matorrals éparpillées.

Les zones amont du bassin versant sont couvertes par deux massifs forestiers célèbres et bien développée. Il s'agit de la forêt du Cap des trois fourches, du mont du Gourougou, les Monts de Beni Bou Ifrour et d'Afra et le massif de Kebdana dont la superficie a été estimé à 68000 ha (***HCEFLCD, 2003***). Composée essentiellement de six formations végétales: les steppes d'alfa, le thuya, le matorral, le genévrier, le pin et les reboisements. Dans le reste du territoire, le couvert végétal naturel est quasi absent; nous ne trouvons que des terrains de parcours avec une couverture modérée à clairsemée de buissons, d'arbustes et de touffes l'arboriculture dense au niveau des pieds de montagnes, ainsi que quelques petits reboisements assez développés dans la plaine de Bouareg (10 km² sur les abords de la lagune) et (0.3 km²) sur les versants d'Igounaf, ainsi que quelques banquettes en oliviers dans les versants de Gourougou.

L'occupation de sol du bassin versant est caractérisée par des potentialités énormes. En effet, la valeur agricole des terres et les moyens de production utilisés participent au développement de diverses types de productions agricoles. Au niveau du bassin versant

Zenaga (Gareb-Bouareg), des cultures variées se sont développée grâce aux types d'aménagement hydro-agricole moderne.

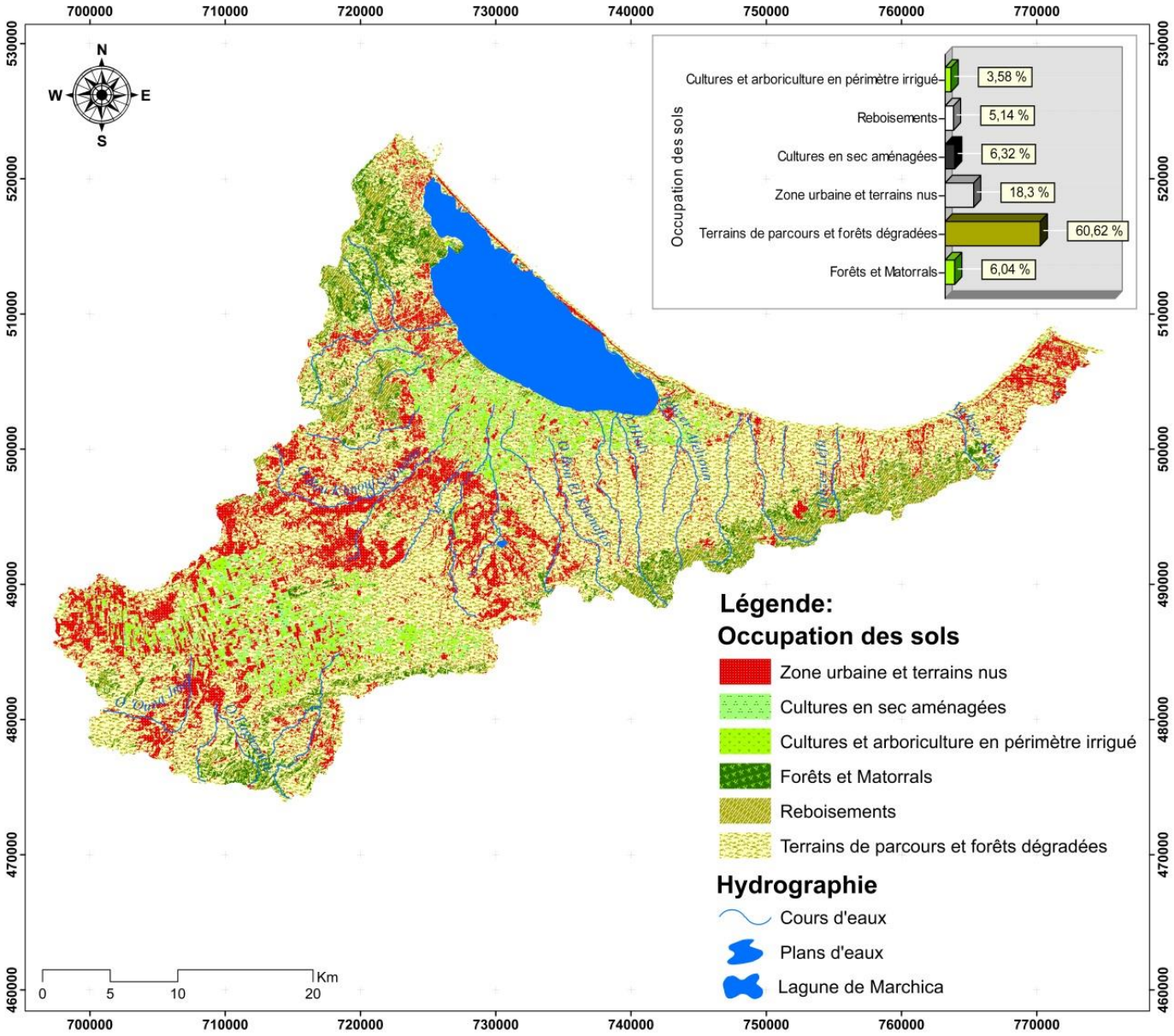


Figure 20: Carte d'occupation des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Les cultures en sec « Bour » et les cultures associé à l'arboriculture en périmètre irrigué occupent 36.46%%, ils sont surtout localisés dans la partie aval et médiane du bassin (Figure 24). Les cultures dominantes sont les céréales (Blé, maïs, orge, soja…) avec des légumineuses (fèves, lentilles, pois, orbe) et des jachères de terres structurées. Des maraîchages irrigués (pomme de terre, oignon, tomate, melon, carotte...) ont été développée sur les versants aménagés en terrasses.

Le bassin versant occupe une bonne position en matière de production agricole notamment sur le plan des agrumes, des maraîchages, des olives et des produits de l'élevage d'ovins (***Direction Régionale de l'Agriculture d'Oujda, 2015***). L'arboriculture fruitière est très développée avec des plantations fruitières au niveau des périmètres irriguée, représentée essentiellement par l'olivier, vignobles et les agrumes superficie totale des plantations. Ces derniers sont boisés totalement en irrigué sur une superficie de 2507 ha et produisent 40036 tonnes d'oranges et de clémentines (***Compagne agricole de Nador, 2014-2015***).

L'élevage constitue une source importante dans le développement des populations de la zone d'étude, mais les parcours sont toujours dégradés vu la pression exercée. Les bovins sont surtout développés dans les zones de grande culture et dans les douars irrigués, les équidés sont présent pratiquement dans toutes les exploitations et servent pour le transport. Cela favorise le tassement des sols et par conséquence une mauvaise gestion du cheptel peut rendre le sol mal protégé.

Les visites et prospection de terrain menées au niveau du territoire de la province de Nador et du bassin versant Zenaga ont permis de localiser un certain nombre d'espèces végétales et aussi de définir avec précision l'ensemble des groupements végétaux du bassin, surtout au niveau du porteur de la lagune de Marchica, les massifs montagneux, à savoir le Cap des trois fourches, le mont du Gourougou, les Monts de Beni Bou Ifrour et d'Afra et le massif de Kebdana. Néanmoins. Au niveau du bassin versant, la végétation naturelle se présente sous forme d'une association d'espèces peu développés et généralement espacées. Elle comporte une variété importante d'espèces végétales naturelles. La liste provisoire que nous donnons ci-après concerne des unités identifiées sans ambiguïté. Il s'agit des groupements ou formations les plus représentatives au niveau de ce territoire :

- *Pinus halepensis*, *Eucalyptus gonphocephala*, *Eucalyptus camaldulensis* (***MedWetCoast, 2006)***

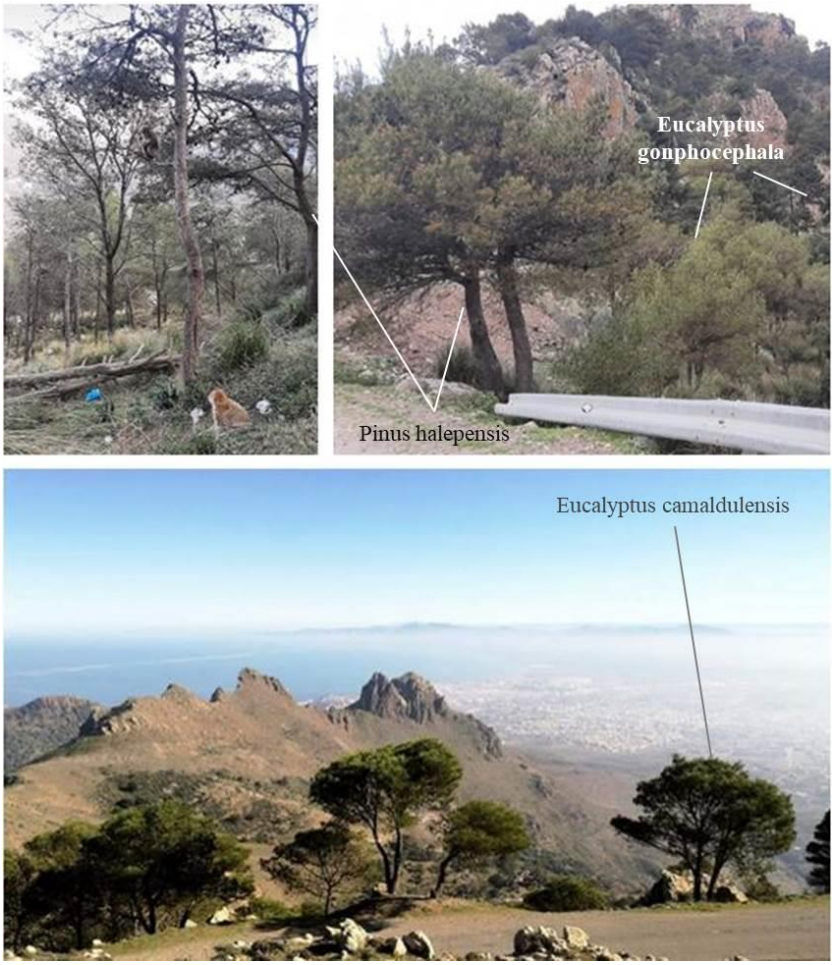


Figure 21: Pinus Halepensis, Eucalyptus gonphocephala et Eucalyptus camaldulensis Végétation du mont de Gourougou, de Beni Bou Ifrour et d'Afra

- Des Brousses à *Olea europea, Pistacia lentiscus, Chamaerops humilis* ;



Figure 22: Olea europea, Pistacia lentiscus (Massif Kebdana)

- Garrigues et matorrals à Juniperus oxycedrus, Pinus alepensis, romarin, doum.

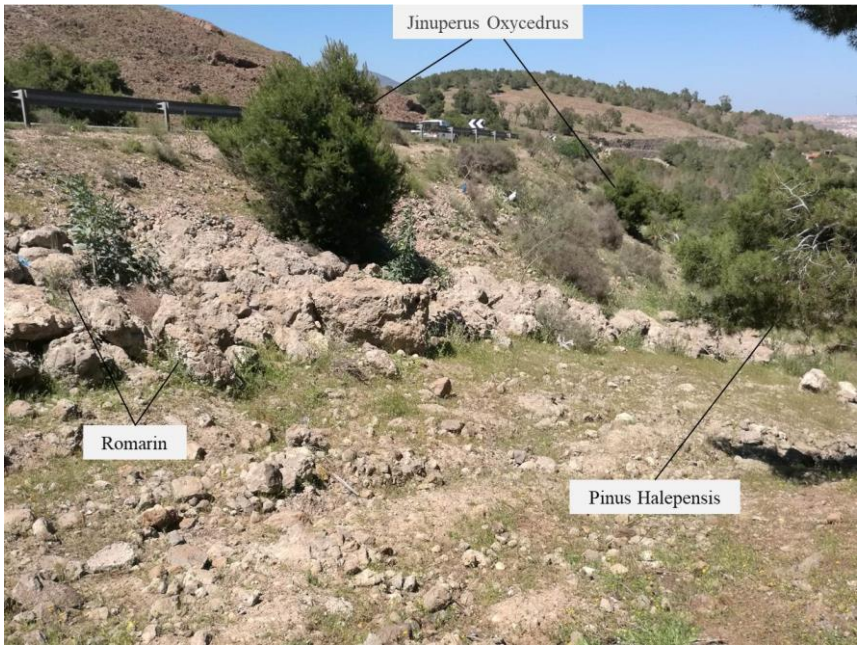


Figure 23: Juniperus oxycedrus, Pinus alepensis, Romarin

- Herbier à ***Zostera noltii*** et ***Cymodocea nodosa***: possédent une large répartition et se localisent au niveau des berges de la lagune entre la ville de Nador et l'embouchure de l'oued Selouane, où la formation commence à disparaître. Elle est associée à un tapis algal très dense (prolifération d'ulves).



Figure 24 : Zostera noltii et Cymodocea nodosa de la lagune de Marchica

- Groupement à ***Arthrocnemum macrostachyum*** et ***Sarcocornia fruticasa***: il est soit homogène, soit associé à d'autre espèce (*Juncus acutus, Juncus rigidus, Atriplex glauca, Suaeda maritima, Spergularia salina ...*).

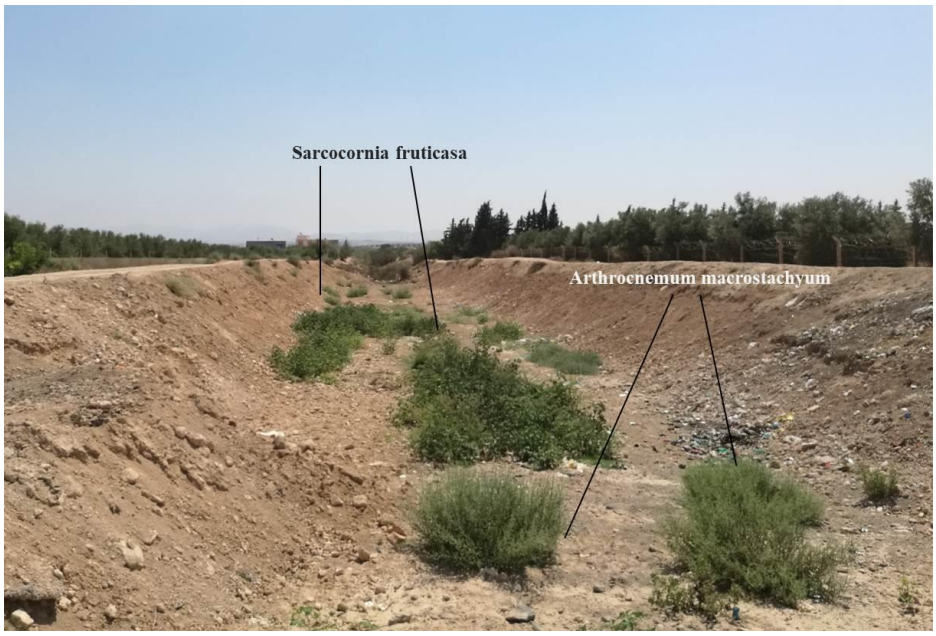


Figure 25: Arthrocnemum macrostachyum et Sarcocornia fruticasa, de la lagune de Marchica

- Groupement à ***Arthrocnemum macrostachyum*** et ***Atriplex portulacoides***: c'est un groupement qui peut être homogène ou infiltré par ***Suaeda maritima***.
- Groupement à ***Suaeda vera*** et ***Atriplex halimus***: il colonise les bordures du groupement à *Arthrocnemum*, là où le sol est sec pendant une longue période de l'année.
- Formation à ***Juncus rigidus***: il s'agit d'une formation pure, en voie de disparition.

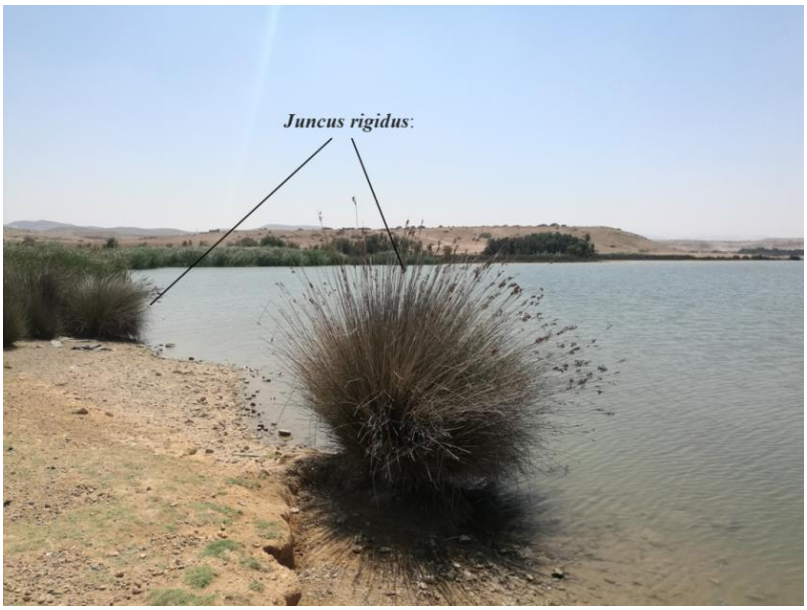


Figure 26: Juncus rigidus, de la lagune de Marchica

- Groupement à ***Arthrocnemum macrostachyum*** et ***Mesembryanrhemum nodiflorum***: c'est un groupement fréquent dans les milieux saumâtres.
- Groupement à ***Inula chritmoides*** et ***Suaeda maritima***: il s'installe dans les parties dégradées mais encore submersibles de la sansouire.

- Groupement à ***Phragmites australis***: parfois associée à ***Typha angustifolia*** et/ou à *Scirpus lacustris*, cette espèce colonise les canaux d'irrigation et de drainage, ainsi que les bords de la sansouire où émergent les eaux phréatiques, notamment à *Qariyate Arkmane* ; localement, des massifs exondés de ***Phragmites australis*** sont infiltrés par *Sarcocornia fruticosa*.
- Groupement à ***Limonium asparagoides***: endémique de cette région, cette espèce forme des groupements très homogènes ou en mélange avec *Centaurium candelabrum, Sarcocornia sp, Frankenia laevis ...*
- Formation à ***Juncus acutus***, souvent en association avec *Arthrocnemum macrostachyum*.
- Groupement à ***Arthrocnemum macrostachyum***: c'est un groupement très hétérogène avec un cortège floristique relativement diversifié: *Mesembryanthemum nodiflorum, Inula chritmoides, Spergularia salina, Suaeda vera, Limonium densiflorum ...*
- Formation à ***Limonium cymuliferum***: elle est souvent interrompue par des taches de *Juncus rigidus, Arthrocnemum macrostachyum* et *Atriplex portulacoides*.

VI. Le contexte géomorphologique

1. La morphologie de la province Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

La province de Nador ou est inscrit le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) s'inscrivent dans le Maroc Nord-Oriental. Ce territoire est caractérisé par des chaînes montagneuses en forme d'arc qui encadre les plaines de Gareb et Bouareg. Les reliefs sont diversifié et accidenté avec des pentes accusée, au milieu dominent de larges dépressions plus ou moins planes, ouvertes sur la Méditerranée vers la mer et l'intérieur du territoire (***HCP, 2017***).

Afin de bien cerné la géomorphologie de la zone d'étude, nous proposons un découpage spatial qui respecte les grandes unités morphologiques. A partir de l'Oued Kert à la limite Ouest de la province jusqu'à l'embouchure de l'Oued Moulouya à la limite Est de la province.

1. 1. Le massif de Guelaia

Ce massif est constitué de trois unités: le Cap des Trois Fourches, le massif volcanique du Gourougou et les monts de Bni Bou Ifrour:

1. 1. 1. Le mont volcanique du Gourougou

Il s'agit d'une puissante masse de montagne éruptive sombre de forme conique qui surplombe les villes de Nador et Mellila. Culminant à peu près à 900 m, la chaîne de Gourougou présente des versants très abrupts et une cavité en forme conique d'environ 30 km de diamètre à la base (***Barathon, 1989; Azdimousa et al.2006***). Les éruptions volcaniques qui ont édifiés ce stratovolcan couvre deux période différentes qui se sont succédées pendant la fin du Tertiaire et le début du Quaternaire. La première au Miocène supérieur à donner lieu à des laves de séries différenciées calco-alcalines ou shoshonitiques, tandis que la deuxième d'âge Plio-quaternaire à donner lieu à de longues coulées basaltiques alcalines (***Alsac et***

al.1969 ; Hernandez, 1985). Ces roches se sont répandus jusqu'à la limite Est de la plaine de Bouareg, au niveau d'Arkmane.

1. 1. 2. Le Cap des Trois Fourches

Le Cap des Trois Fourches est une curiosité géologique où les falaises maritimes verticales et creusées de grottes n'ont d'équivalent que dans le parc national d'Al Hoceima. Ce promontoire est allongé sur presque 25 km, situé plus à l'Ouest, pénètre profondément en mer et dont l'extrémité constitue une vraie presqu'île aux versants très abrupts, dominant la mer par des falaises hautes (100-200 m), de façon à contribuer à la création de la baie de Nador sur son côté Sud-Est. Rappelons que les zones humides s'y répartissent en une bande marine côtière adjacente à la presqu'île. Le bassin versant est donc composé de plusieurs petits réseaux hydrographiques qui occupent l'ensemble de la partie terrestre du SIBE, occupent une superficie totale d'environ 2500 ha. Les lignes de crête où culminent ces réseaux se trouvent à 260-350 m d'altitude, le site prolonge vers le nord le massif volcanique du Gourougou, ou ces deux reliefs formant pratiquement la limite orientale du Rif côtier. La morphologie des versants est marquée par un ensemble de crêtes et de collines taillées dans des formations peu rigides, composé d'un socle primaire, de roches éruptives (Rhyolites) miocènes et d'une couverture variée miocène à pliocène, voire même Quaternaire. La côte présente un contour très irrégulier, caractérisé par des avancées rocheuses séparant des petites baies (***Barathon, 1989***), où se développent parfois des plages très étroites composées de matériaux grossiers. Ces falaises présentent des profils très inclinés sur le versant est, alors que celles de l'Ouest sont moins pentues.

1. 1. 3. Les Monts de Bni Bou Ifrour

Les collines de Bni Bou Ifrour émergent au niveau de la plaine du Gareb en direction SSW-NNE, constitué de terrains autochtones jurassico-crétacés de nature variée, traversés par des filons de granodiorite dont l'âge va du Mésozoïque au Néogène (***Rhazi et Hayashi, 2002***). Structurellement, ils représentent une phase de transition entre l'orogenèse Rifain, dont il est composé pour l'essentiel des zones externes du Rif, et le front moyen-atlasique auquel appartiennent ses unités méridionales (***Wildi, 1983***). Sur le plan morphologique, les monts de Bni Bou Ifrour ne sont séparés du Gourougou que par un seuil d'environ 300 m d'altitude. Le relief est composé d'une multitude de collines qui présentent un étagement allant de 100 m sur les bords à plus de 600 m au centre, le point culminant étant *Jbel Ouiksane* à 697 m. Ce massif est marqué par de roches magmatiques liées aux accidents tectoniques qui se sont accompagné la minéralisation des flyschs et des calcaires. Le minerai de fer d'Ouichane et le gisement d'Ibourhardayn constitue de bons témoins (***Asebriy et Cherkaoui, 1995 ; Ddani et al.2005***).

1. 2. Les chaîne de type Atlasique (massif de Kebdana)

Morphologiquement, le massif de Kebdana est un chaînon allongé de près de 50 km selon une direction E-W; il sépare la vallée de la basse Moulouya du bassin de Bouareg. Son avancée en mer sous forme de cap (*Ras Kebdana* ou *Ras El Ma*) a permis de mieux

individualiser la baie de Bouareg, tout en définissant une baie très ouverte à l'est (baie de Saïdia). Ce massif culmine à 932 m (*Jbel Tamezzoukht*); ses versants nord-ouest possèdent une même inclinaison qu'ils maintiennent jusqu'à la mer, où ils se prolongent vers l'Est par des falaises maritimes verticales. La hauteur de ces dernières s'élève progressivement de 20 m (*Arkmane*) à 70 m (*Dhar Taffant*), pour s'abaisser de nouveau jusqu'à 46 m à Ras El Ma (***Dakki, 2003***). Ces falaises vives sont entrecoupées par des chenaux (cônes de déjection), alors qu'au niveau des avancées abruptes, des lambeaux se détachent et s'effritent en mer. Plusieurs rochers émergent ainsi le long de ce littoral, mais les plus importants sont ceux qui composent le complexe insulaire des îles Ja'farine qui émergent à trois kilomètres au nord de la pointe de Ras El Ma. A l'instar de toutes les unités orographiques du Nord-Est, le massif des Kebdana est cerné par un ensemble de failles et de flexures; en effet, il s'agit d'une ride fortement plissée et légèrement déversée vers le Sud.

De point de vue géologique, au Messinien, le massif métamorphique des Kebdana formait un relief allongé SW-NE, bordé au Nord et au Sud-Est par des zones littorales où s'accumulaient des dépôts variés: conglomérats, grès, calcaires construits, calcaires bioclastiques, sables fins et marnes sableuses. Ce massif constituait la marge méridionale du bassin de Melilla-Nador dont la marge nord était le siège d'une sédimentation de plate-forme carbonatée qui affleure largement dans la presqu'île des Trois Fourches. Un certain nombre de travaux montrent la superposition des terrains Messinien en discordance angulaire sur le Tortonien supérieur, décrivent partiellement les caractères de la sédimentation messénienne, en signalant la présence des masses coralliennes (***Guillemin & Rampnoux, 1975; Barathon, 1980; Achalhi et al.2016***). L'âge Messinien de la plate-forme a été proposé par ***Guillemin et Houzay (1982)*** et ***Wernli (1988)***, en raison de la présence de *Globorotalia conomiozea Kennett* dans les marnes du forage de Kariat Arekmane (partie ouest des Kebdana), supposées équivalentes aux dépôts carbonatés.

1. 3. Le bassin en forme de cuvette dans la partie centrale (bassin de Zenaga)

1. 3. 1. Plaines de Bou Areg et du Gareb

Cette zone en dépression, marqué par la présence de deux unités contiguës séparées par des seuils, s'alignant en direction ENE-WSW sur à peu près 90 km entre les vallées de l'oued Kert et de la Moulouya. En trouve à ce niveau les monts des Béni Bou Yahi qui correspondent à des petites montagnes culminant à 500-1100 m marquant une zone de transition entre le domaine moyen-atlasique autochtone et le domaine rifain; affectées que très peu par le charriage et la tectonique rifaine (nappe de charriage). Ces montagnes constituent une zone de partage des eaux entre trois bassins : Bou Areg, Kert et Moulouya; Jbel Ziata (532 m d'altitude) sur la bordure nord de ces monts, constitue la limite sud du bassin de Bou Areg; il donne lieu à des ruisseaux temporaires qui coulent vers la lagune.

Des formations rouges du Quaternaire moyen, à dominance argileuse, remplissent la quasi-totalité de ces cuvettes. Dans la plaine de Bou Areg, l'épaisseur de ces dépôts dépasse les 120 m près de la mer. Les conglomérats et grès pliocènes, principales formations emmagasinant l'eau, forment le soubassement des deux plaines. Ces mêmes formations sont largement

répandues sur le versant nord des Kebdana et dans quelques secteurs du promontoire des Trois Fourches. Des déformations (failles, axes anticlinaux et synclinaux) ont affecté ces plaines; la subsidence qui a accompagné ces déformations s'est traduite par l'édification de terrasses fluviatiles récentes recouvrant des formations plus anciennes.

1. 3. 2. La barrière de la Sebkha Bou Areg et côte marine

Un cordon dunaire rectiligne (appelé communément lido) sépare la lagune de Nador de la mer, la communication entre elles se faisant en un seul point, dit « Bokana ». Cette île barrière haute de 3-20 m et large de 300-1000 m (voire 2 km au sud) est composée d'un soubassement de dunes consolidées (barres de calcarénite) séparées par des couloirs en forme de chenaux (d'aspect parfois marécageux). ***Irzi (2002),*** identifie dans ce lido quatre unités morpho-sédimentaires aux caractéristiques différentes. La plus ancienne d'entre elles remonterait au Pléistocène; elle est composée d'un faciès lithifié de calcarénite témoignant d'un milieu sédimentaire littoral de haute énergie (***Irzi 1987***). Les barres plus récentes indiquent plutôt une dynamique tidale (grande influence de la marée). Par ailleurs, l'île montre en certains endroits des dépôts liés à des vagues de tempêtes. L'ensemble de ces caractères sédimentaires indique un système d'île barrière transgressive.

Du côté de la lagune, la bordure de l'île présente au niveau des unités nord et sud des pentes très douces, alors que les barres de calcarénite situées entre ces deux unités dominent la lagune par une falaise haute. Du côté marin, l'île montre des dunes vives et des plages, interrompues localement (au centre) par des falaises. Ces plages sont constituées dans leur majeure partie de sable coquiller et leur largeur varie entre 20 et 5 mètres. Au sud de la passe, le lido montre des couloirs correspondant à des passes anciennes et qui sont envahis d'hydrophytes hauts et denses ; des couloirs existent également au nord de la passe, mais leur tracé est peu marqué dans le paysage des dunes vives basses (3 mètres d'altitude). Ces couloirs constituent des éventails de tempêtes à travers desquels se font les apports d'eau et de sédiments marins vers la lagune lors des houles de tempêtes. Celles-ci jouent un rôle fondamental dans les changements de configuration de l'île et dans l'hydrologie et l'engraissement de la marge Est de la lagune.

Il est admis que la Sebkha Bou Areg s'est formée sur la bordure d'une plate-forme côtière grâce au concours de deux facteurs : une subsidence accentuée de la plaine de Bouareg et l'édification d'un cordon dunaire côtier qui retient l'eau de mer.

2. Les facteurs morphométriques du bassin versant Zenaga

Le diagnostic physico-géographique, figure la première étape de la connaissance des bassins versants, permet de déterminer les principaux facteurs naturels intervenant dans les processus de l'écoulement superficiel. Le bassin versant représente l'unité topographique de base pour toute étude en hydrologie. La connaissance de ces caractéristiques géomorphologique (altitudes, pentes, hydrographie, expositions...), est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant (lame d'eau précipitée, débit d'un cours d'eau, bilan...). Ces derniers revêtent une place de choix pour les

gestionnaires des cours d'eau et des géorisques. Constitue en austérité, une tentative d'expliquer le comportement hydrologique du bassin versant, et surtout sur son régime de ruissellement et sa dynamique à l'aide d'une évaluation quantitative de sa morphométrie (***Musy et Higy, 2010; Mesrar, 2016***).

Les modalités de fonctionnement des facteurs qui transforment les eaux de pluies en ruissellement, conçoivent des informations importantes, bien qu'insuffisante pour avoir une idée concernant la dynamique érosive. Il s'avère donc nécessaires à la caractérisation de la zone réceptionniste. Dès lors, la caractérisation des variables de temps et d'espace qui gouvernent le cycle hydrologique sont indispensables pour la gestion efficace de l'eau dans un bassin versant. L'étude morphométriques d'un bassin versant peut donc contribuer à caractériser ces variables (***Bewket & Sterk, 2005***).

La morphométrie étant définie comme, la mesure de la forme et l'analyse mathématique de drainage (***Clarke, 1966***). En effet, l'analyse des caractéristiques morphométriques d'un bassin versant au travers une méthode qualitative, permet de décrire divers paramètres topographiques influençant le comportement hydrologique (***Narmatha et al.2013***), et apparait donc, comme indispensable. Elles déterminent également son temps de réponse face aux évènements pluvieux, sa vulnérabilité vis-à-vis du risque hydrologique qui peut influencer dans une moindre mesure la gravité des crues, ainsi qu'une meilleure gestion des ressources en eau. En conséquences, elles permettent de mieux comprendre le fonctionnement morpho-hydrologique de l'hydrosystème.

Les premières études morphométriques dans le domaine de l'hydrologie furent l'œuvre de ***Horton*** en ***1941***, et ***Strahler*** en ***1950*** (***Kalaivanan et al.2018)***. Mais, le récent développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), principalement de télédétection et les SIG dans les années 1980, a considérablement révolutionné l'analyse morphométriques des bassins versants avec l'usage du numérique (***Rai et al.2017***). Ces caractéristiques restent encore peu considérées, alors que leur maîtrise et prise en compte aideraient indéniablement dans la gestion des zones à risques d'où leurs nécessités.

S'inscrivant dans cette perspective du numérique, le présent chapitre a pour but de déterminer et de quantifier les paramètres morphométriques du bassin versant Zenaga utilisables à des fins de prévention des risques hydrologiques et la dynamique érosive et ce, à partir des données issues de la télédétection et des SIG. Nous exposant les diverses méthodes de calcul, de mesure et de présentation employées pour décrire les principales caractéristiques physiques du bassin en question

2. 1. Méthodes utilisées pour caractériser la géométrie du bassin versant

Nous avons adopté dans la présente étude sur l'usage des données SRTM (***Shuttle Radar Topography Mission***) pour déterminer l'indice de Gravelius Kc donné par :

$$K_C = \frac{P}{2.\sqrt{\pi * A}} \approx 0{,}28.\frac{P}{\sqrt{A}} \quad \textit{Equation 7}$$

A et P sont respectivement, la superficie ou surface (km²) et le périmètre stylisé (km) du bassin étudié. A titre indicatif, cet indice est égal à 1 pour un bassin versant circulaire et est différent de 1 pour un carré ou allongé. Les bassins circulaires semblent favoriser beaucoup plus les phénomènes de crues.

Un bassin versant allongé avec des distances d'écoulement sur versants sont faibles, réagit vite à une averse. En effet, le détachement des particules du sol, leur emplacement et le début du creusement linéaire se déclenche très vite. Cela peut être expliqué du faite que l'agglomération des filets d'eau favorise la création des nappes puis la concentration des eaux qui se font d'une manière rapide. Par contre, un bassin proche de la forme ovoïde montre au contraire une hydrodynamique moins importante. Les effets ressentis sont lents et par conséquence moins agressifs.

L'indice de Horton exprime le rapport de la surface du bassin au carré de sa "longueur" L du cours d'eau principal, il suggère que le bassin et de forme allongé si l'indice et inférieur à 1. Il est calculé par l'équation 8:

$$K_H = \frac{l}{L^2} \qquad \textit{Equation 8}$$

Avec, l est la largeur moyenne du bassin versant (m) ; L: longueur du cours d'eau principal (m).

Le bassin versant Zenaga est étalé sur une superficie de 1213,75 km² de forme apparente allongée. Le périmètre exprimé en kilomètres représentant la ligne de partage des eaux est de 415,70 km. L'indice de compacité de Gravelius au niveau du bassin versant Zenaga, montre une valeur (Kc= 3.34) supérieur à 1. L'utilisation de l'indice de Horton nous a permet de déduire la forme du bassin versant Zenaga. La longueur moyenne est de 201.48 Km et sa largeur est de 25,68 km. La valeur calculée de l'indice est 0.54, il est inférieur à 1.

Les valeurs obtenues traduisent la forme allongée du bassin versant, par conséquent c'est un bassin mal drainé, mais avec une hydrodynamique importante. Cela indique une forte dynamique en faveur d'une érosion intense.

2. 2. Les caractéristiques du relief

Le relief est né des bouleversements de l'écorce terrestre et se transforme au cours des millénaires, donnant son modelé actuel, ensemble des formes du paysage. C'est la structure interne des terrains qui donne ses formes à la surface terrestre, soit directement par édification active de relief, soit indirectement par le jeu de l'érosion sur des roches de duretés diverses.

L'étude et la modélisation du relief précède la cartographie des couches car il influence nettement le positionnement des autres objets géographiques: l'information hydrographique puis les infrastructures édifiées par l'homme, c'est-à-dire le réseau routier, le réseau ferroviaire et les espaces bâti, sont disposées sur cette reconstruction planaire du terrain naturel.

L'analyse des caractéristiques du relief est déterminante, permet de déterminer la morphologie du bassin versant, sa réaction aux phénomènes climatiques et météorologiques, donc de caractérisé son comportement hydrologique. En effet les paramètres climatiques sont fortement influencés par les caractéristiques hypsométriques et morphométriques du bassin versant de point de vue local et régional. Il s'avère que son influence est confirmée, d'où la nécessité de l'étude de sa répartition afin de ressortir les différents paramètres caractérisant le relief.

2. 3. La morphologie et répartition des altitudes

En se basant sur l'analyse du modèle hypsométrique réalisé à base de l'utilisation du modèle numérique de terrain (MNT) et l'analyse spatial des données d'altitudes, en remarque que le bassin versant Zenaga est caractérisé par un relief typique présentant différentes morphologies. L'altitude moyenne est de 550 m (Figure 30) avec une altitude médiane de 110 m, les parties amont du bassin montrent des crêtes montagneuses dont l'altitude varie de 600 à 1000 m. les pentes y sont fortes et dépassent souvent 35%. Vers les parties NE-SW, au niveau de la partie avale et centrale dominent des basses montagnes ainsi que des collines offrant un relief aéré et des pentes moins accusées. Quatre grandes zones topographiques peuvent être distinguées dans le bassin versant de Zenaga, du Nord-est ou Sud-ouest au sud (Figure 31) :

Une partie amont représenté par l'encadrement montagneux avec un grand nombre de sommets d'altitude généralement élevée, notamment au niveau du massif de Gourgou (*Oulad Mîmoûn, Ibou Jâjene El Jabel, Ighanmine*), Jbel Wiksane (*Adrar Wiksane, Jbel Tazeka Azrou*..), Jbel Kerker (*Koudiat La'bada, Sidi Mohamed Ben Kadour*…), le massif de Beni Oukil (*Al Koudiat, Zaouyet Kerker*…) et le Massif des Kebdana (*Adrar-n-Takbat, Ich n'Tsiouanime, Bou Issamdane, Idzernane, Azrou Aissa, Tamezzoukht, Azrou Iberkanane, Ich n'Tanout, Bou Aassem*). Ces zones sont très accidentées et témoignent d'une forte dynamique de surface. Le passage rapide des altitudes hautes (1000 m) aux altitudes basses (400 -500 m), se fait généralement sur de courtes distances (± 10 Km). Les dénivellations élevées sont responsables d'une hydrodynamique forte. On peut dire que dans cette partie l'ablation l'emporte sur l'accumulation.

La deuxième partie commence au piémont des montagnes, ces endroits sont caractérisés par un équilibre paisible avec une progression plus lente entre les altitudes avec une différence nette entre les parties amonts Nord-est du côté de *Ibouayadene, Izennoudene, Iboû'jâjene-Louta, Ikekboûzene* représentant les petites agglomérations de *Beni Enzar*, et les parties amonts Sud-est (*Oulad Moussa, Adrar m'Moussa, Aît Bou-Ech-Chawene*) et Sud-ouest du côté de *Bled Am'acher, Sidi Mohamed Bou Ziane, Ouled Hammou* ou *Mellouka, Im'achene, Jbel Ouyer* et *Bled Marti*). Cette partie va jouer le rôle d'intermédiaire entre les parties amont et aval. Elle est caractérisée par des altitudes moyennes (350 à 550 m) en comparaison avec le reste du bassin, elle peut être un emplacement adéquat pour la mise en place des apports des matériaux mobilisable et la charge transporté des versants exposés vers le nord et le sud à la fois.

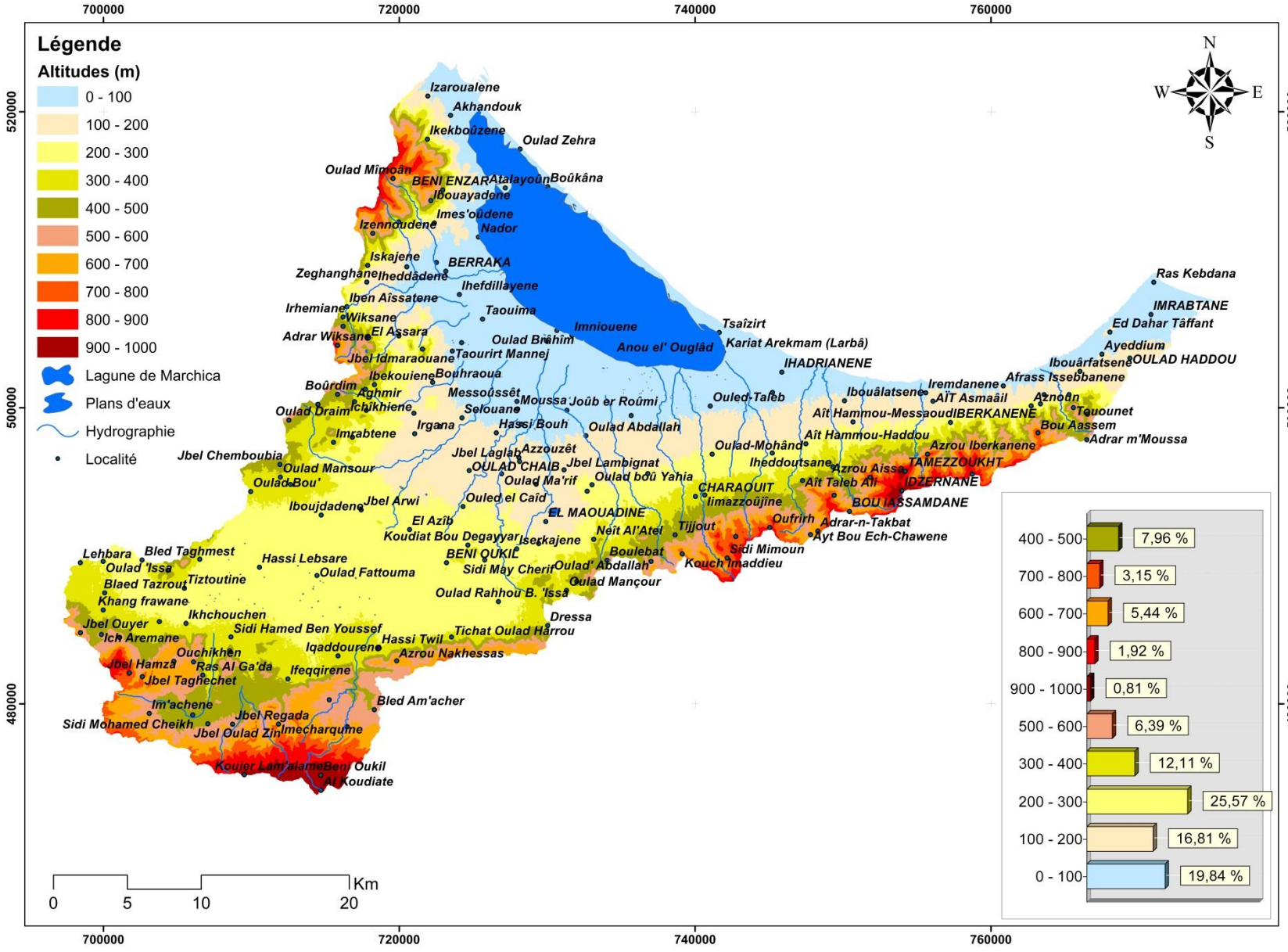


Figure 27: Carte hypsométrique du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

La troisième partie est caractérisée par des altitudes faibles (200-350 m) formée par des petites collines, qui s'ouvrent sur un large éventail encadrant la partie basse de la plaine alluvial de la partie aval du bassin versant Zenaga vers lequel convergent les systèmes hydrographiques (*Ifeqqirene*, *Sidi Mohamed Cheikh*, *Blade Tazrout*, *El Assara*, *Wiksane*, *Imrabtene*, *Iboû'jâjene-Louta*…).

La quatrième zone dessine une sorte d'arc qui encercle la lagune de Marchica (*Sebgha de Bou Areg*). Elle est caractérisé par des altitudes allant de 0 à 200 m. Les parties les plus élevée sont localisé au niveau de *Selouane*, *Iheddâdene*, *Atalayoûn*, *Akhandouk*, *Izaroualene*, *Iboualatssen* ainsi que d'autres endroits. A partir de ces parties, les altitudes deviennent de plus en plus basse et atteigne 100 m au niveau de *Taouima*, *Oulad Lahsene*, *Messoûssêt*, *Ihadrianene*, etc. pour aller ensuite vers les altitudes moins de 50 m au niveau de la zone porteur de la lagune de Marchica et de Bou Areg, considéré autant zone réceptrice et exutoire du bassin versant Zenaga.

La zone la plus large est celle des altitudes allant de 200 à 300 m avec un pourcentage en superficie estimé à 25.57%. Caractérisant une zone de passage vers les altitudes les plus élevée avec une progression des altitudes entre les parties amont Nord-est, Sud-est et Sud-ouest. Les altitudes arrivant en deuxième position marque une diminution ressentie caractérise les classes des altitudes 0-100 m et 100-200 m, elle représente 19.84 % et 16.81%. La classe d'altitude 300-400 m arrivant en troisième rang représentant un pourcentage de 12.11%. Quant aux altitudes les plus hautes, représenté par les classes 400-500 m, 500-600 m et 600-700 m, elle représente successivement 7.96 %, 6.39 % et 5.44 % en pourcentage de superficie, situé en grand partie dans les parties amonts du bassin versant Zenaga. Les altitudes élevées allant de 700 à 1000 m représentent 5.88 %, repéré au niveau des massifs des Kebdana, de Jbek Wiksane et du mont de Gourgou.

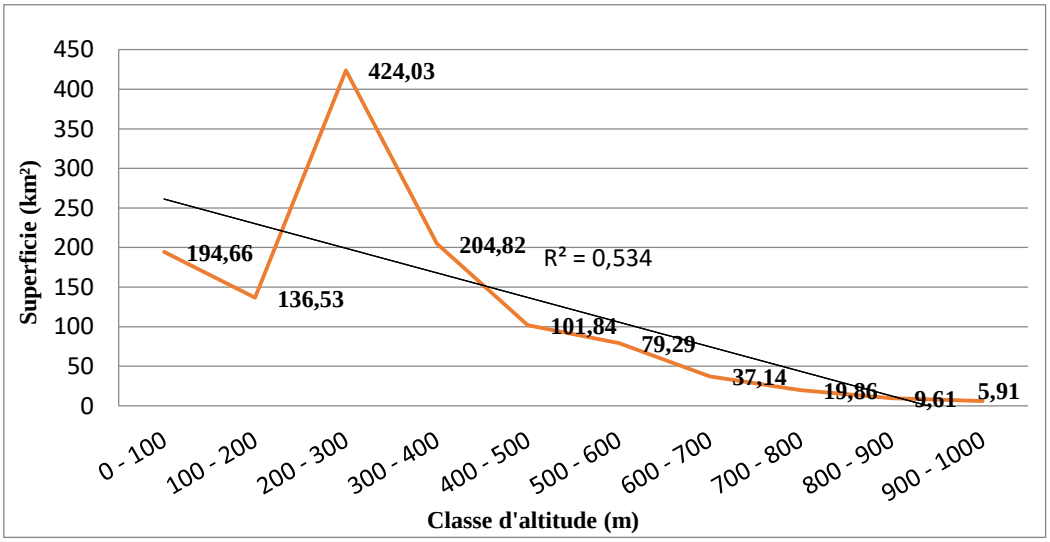


Figure 28: Courbe des tendances d'altitudes du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

En se basant sur la courbe des tendances (Figure 31), nous avons déterminé l'allure des variations des altitudes au sein du bassin versant Zenaga. L'interprétation de son aspect tenant

en compte les classes d'altitudes et la superficie en km² associée à chaque classe. Les résultats montre une tendance à la baisse des superficies en allant vers les altitudes les plus élevée, cela témoigne que les grandes superficies caractérise les basse altitudes localisant généralement au niveau des zones avales du bassin versant Zenaga.

2. 4. Détermination de la courbe hypsométrique

Afin de décrire, d'expliquer et de définir les formes de relief, on procède à la réalisation de la courbe "*hypsométrique*", qui permettent d'interprété la variation des altitudes et donc de déterminé l'état de maturité du bassin versant. L'utilisation de cette technique est primordiale, elle est basée sur la comparaison de l'allure de la courbe hypsométrique avec des recherches menées au niveau de plusieurs bassins (Figure 33). Pour cela, on dispose de cartes topographiques et des données brutes du modèle numérique de terrain (MNT). Le modèle matriciel du MNT est interpolé avec une maille de 25 m, qui représente la résolution spatial. Pour chaque cellule (S = 25 ×25 m²) le MNT donne une altitude. Il s'agit alors de calculer le nombre de cellule par classe d'altitude et le pourcentage de surface correspondant à partir desquelles on procède à la répartition de la superficie du bassin par tranche d'altitude.

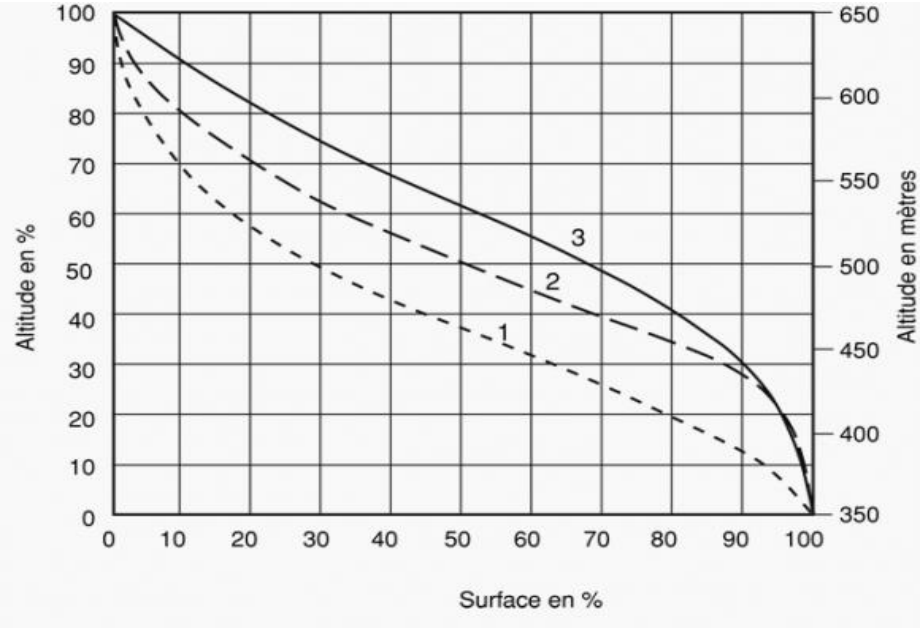
Le report du cumul des aires élémentaires et des valeurs altimétriques sur une échelle arithmétique permet de tracer la courbe hypsométrique du bassin. Cette dernière est susceptible de changer avec le temps au fur et à mesure que le bassin est consommé par l'érosion. Dans certains cas, il convient d'utiliser, au lieu de la surface cumulée, le cumul du pourcentage, par rapport à la superficie totale, des aires élémentaires. Le plus souvent, une courbe hypsométrique peut être remplacée sinon associée à un histogramme des fréquences altimétriques. La technique consiste à calculer les pourcentages des superficies en fonction des classes d'altitudes, chose qui a permis le calcul des cumules inverses (Tableau 16).

Tableau 15: Fréquences et des pourcentages cumulés inversé

Classes d'altitude (m)	A_i en Km^2	A_i en %	C en km²	%CI
0 - 100	240.83	16.87	240	**100**
100 - 200	204.08	16.81	444.91	**99.19**
200 - 300	310.32	25.56	755.23	**97.27**
300 - 400	146.94	12.10	902.17	**94.11**
400 - 500	96.59	7.95	998.76	**88.68**
500 - 600	77.59	6.39	1076.35	**82.29**
600 - 700	65.97	5.43	1142.32	**74.33**
700 - 800	38.25	3.15	1180.57	**62.22**
800 - 900	23.31	1.92	1203.88	**36.65**
900 – 1000	9.81	0.80	1213.69	**19.84**
Total	1213.69	100		

Ai : Surface de la classe d'Altitude en km² et en % ; **C** : Cumul en km² ; **CI** : % du cumulé inversé

La courbe hypsométrique d'un bassin versant est le pourcentage de surface qui se trouve au-dessus d'une altitude H donnée (**CI**). C'est un outil pratique pour comparer deux bassins ou comparer les différentes classes d'un même bassin versant. Il peut également être utilisé pour déterminer la profondeur moyenne des précipitations sur un bassin versant.



(3) Bassin plus jeunes avec des superficies généralement faible par rapport au changement d'altitude initiale caractérisant les bassins Abrupts ;
(2) Bassin mature avec un degré d'érosion plus important selon l'âge associée au bassin versant ;
(1) Vieux bassin, avec des plaines étendues associée à des cours d'eau où l'altitude varie très peu malgré une superficie importante.

Figure 29: Classification de l'aspect général des courbes hypsométrique selon l'état d'érosion

2. 4. 1. Altitude moyenne du bassin : rapport du volume montagneux (V) à la superficie du bassin (A).

Ce volume est la somme des volumes partiaux (V_i) de chaque tranche de surface comprise entre les isohypses choisies pour la planimétrie. Les volumes élémentaires s'obtiennent en multipliant les surfaces partielles (A_i) par la moyenne arithmétique des altitudes Zi et Z_{i+1} des courbes qui les limitent. Pour un système d'unité consistent on a:(k est le nombre de classes d'altitude).

$$Zmoy = \frac{\sum_{1}^{k1}(\mathrm{Zi}+\mathrm{Zi}+1)\times \mathrm{Ai}}{\sum_{1}^{k} Ai} = \frac{V}{A} \qquad \textit{Equation 9}$$

2. 4. 2. Altitude médiane(ou altitude de fréquence ½)

Il correspond à la valeur d'altitude qui divise l'aire du bassin de façon à ce que 50% de la superficie du bassin se caractérise par des côtes supérieures et l'autre moitié par des côtes

inférieures. Sur une courbe hypsométrique, l'altitude médiane est donnée par la valeur de la côte correspondant à une fréquence de 50%. Il peut également être utilisé pour fournir des indications sur le comportement hydrologique du bassin versant et de son système de drainage. Afin de pouvoir interpréter l'évolution du relief du bassin, on procède souvent au calcul du volume montagneux restant appelé "*Intégrale hypsométrique (IH)*". Ce paramètre est fortement lié à la forme de la courbe hypsométrique. Trois cas de figures peuvent être distingués:

1. *Cas où la convexité prédomine avec IH > 60%,*
2. *Cas où l'allure est convexo-concave avec 35% <IH <60%,*
3. *Cas où la concavité prédomine avec IH < 35%.*

Ces trois cas correspondent respectivement aux stades d'évolution du relief "jeune-début maturité, maturité et fin-maturité". Un relief est enfin dit en équilibre s'il y une balance entre les agents d'érosion et d'accumulation.

2. 4. 3. Altitude la plus fréquente

Elle correspond au maximum de l'histogramme des fréquences altimétriques. On parlera alors de classe modale ou classe d'altitude la plus répandue sur le bassin.

L'analyse de l'aspect de la courbe hypsométrique du bassin versant Zenaga (Figure 33), et l'utilisation de la classification citée, montre que le bassin versant possèdent une allure convexo-concave avec une tendance à la convexité qui prédomine. Cela indique qu'on soit devant un bassin moyennement mature dans lequel les changements d'altitudes sont élevés par rapport à la superficie surtout au niveau de la partie nord caractérisant les zones amont. L'altitude de fréquence ½ ou la médiane est située à la hauteur de 420 m (Classe d'altitude 466-500 m).

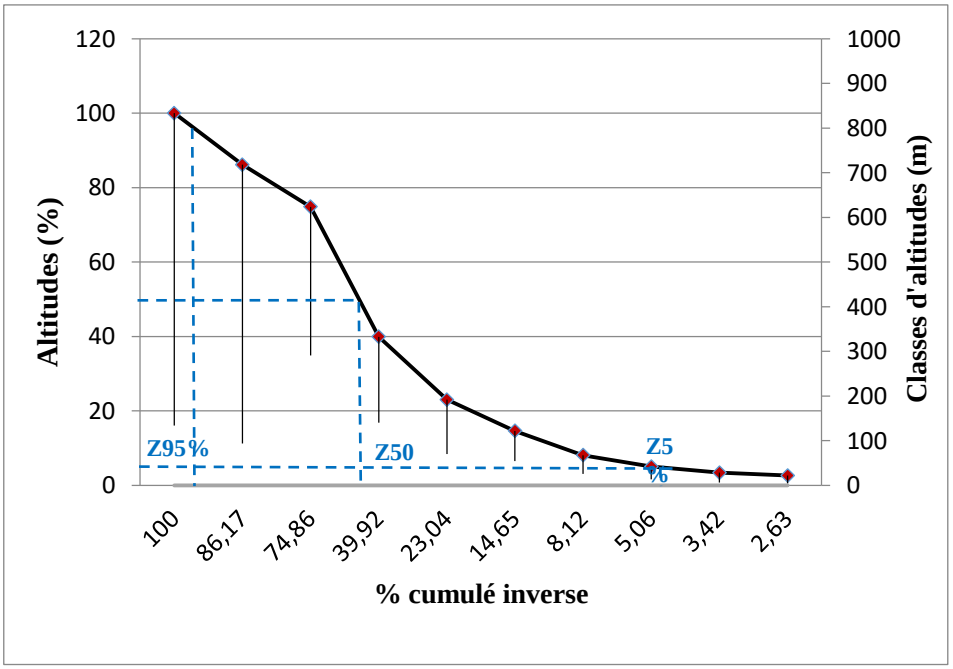


Figure 30: Courbe hypsométrique du bassin versant Zenaga

En effet, l'analyse de la distribution des classes d'altitudes, de la courbe des tendances et de la courbe hypsométrique affirme qu'on ait devant un bassin versant où les différences d'altitudes sont très marquées, par conséquence des pertes importantes en sol seront remarqué due au mode de circulation des eaux qui se fait généralement de manière agressive à l'intérieur du bassin versant Zenaga.

2. 5. Temps de concentration

Le temps de concentration (t_c) est le temps que met la particule d'eau la plus éloignée tombée dans le bassin à parcourir le chemin hydrologique pour arriver à l'exutoire. Il peut être notamment calculé par l'ancienne formule de ***Giandotti (1934),*** qui tient compte de la longueur du cours d'eau principal, et des altitudes moyenne et minimale :

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5Lcp}{0.8\sqrt{H_{Moy}} - Hmin} \qquad \textit{Equation 10}$$

Avec:

S: surface du bassin versant en km² ; L_{cp} : longueur du cours d'eau principal en km ; tc : temps de concentration en heure ; H_{moy}: altitude moyenne en m ; H_{min}: altitude minimale en m.

Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la forme du bassin mais aussi d'autres paramètres physique du milieu tels que la nature lithologique des terrains (les formations perméables favorisent l'infiltration au dépend du ruissellement ce qui fait retarder la concentration des eaux à l'exutoire), la pluviométrie et son agressivité (plus l'intensité pluviale est importante plus le temps de concentration est court et ceci quel que soit la nature du sol) et la morphologie. En effet, deux bassins ayant la même superficie et la même forme ne se comportent pas forcément de la même façon. Le temps de concentration au niveau du bassin versant Zenaga est de: tc = 10.13 heure.

2. 6. Rectangle équivalent

Pour estimer la forme, et par la suite les dimensions du bassin versant, on assimile ce dernier à un rectangle possédant la même superficie, le même périmètre et compacité. La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par ***Roche (1963)***, est une transformation purement géométrique du bassin versant en un rectangle de dimensions L et l, ce qui permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. La longueur "**L**" et la largeur "**l**" sont données par les équations 11 et 12 :

$$L = \frac{K_G\sqrt{S}}{1.12} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \qquad \textit{Equation 11}$$

$$l = \frac{K_G\sqrt{S}}{1.12} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right] \qquad \textit{Equation 12}$$

Avec : K_G est l'indice de compacité de Gravelius ; S est la superficie de bassin versant (km²) ; L représente la longueur du rectangle équivalent (km) et l la largeur du rectangle équivalent (km). La forme des courbes de niveau dans le rectangle équivalent découle directement de la distribution cumulative hypsométrique (Figure 34).

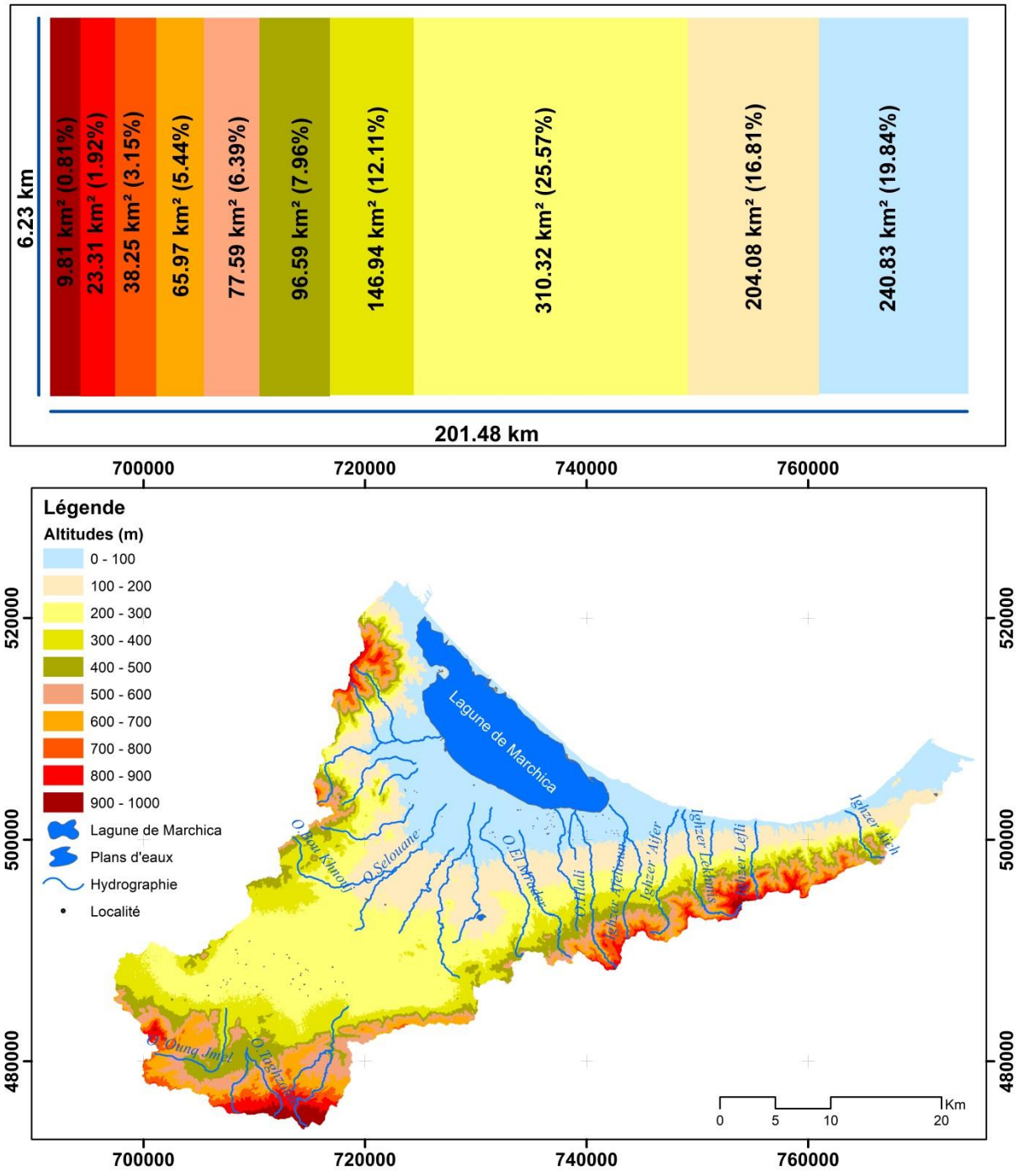


Figure 31: Rectangle équivalent du bassin versant Zenaga (Province de Nador)

Le bassin versant Zenaga illustré à la figure 34 a une superficie de 1213.35 km² et un périmètre de 415,70 km. En appliquant l'équation 7, nous pouvons déterminer que l'indice de forme "Gravelius" de ce bassin versant est 3.34. Ensuite, nous pouvons utiliser les équations

11 et 12. Les résultats obtenus montre une longueur équivalente de (L =201.48 Km) et une largeur équivalent de (l = 6.23 Km). Il en découle vu les dimensions, que le bassin Zenaga est bien drainé.

2. 7. Indices de pente et relief

La pente moyenne détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel et l'action érosive de l'eau, par contre une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol et favorise le dépôt de la charge solide dans l'eau.

L'appréhension du relief peut être faite à l'aide de l'indice de pente global I_g proposé par ***Roche*** (***1963***). Cet indice présente l'avantage d'être très simple et facile à calculer, vu qu'il est construit sur la base du rectangle équivalent et la courbe hypsométrique du bassin versant. L'indice de pente global (Ig), exprimé en m/km, est donné par le rapport de la dénivelée utile (D, en m); estimée à partir de la courbe hypsométrique; à la longueur du rectangle équivalent en km (L_e) :

$$I_g = \frac{D}{L_e} = \frac{Z_{95\%} - H_{5\%}}{L_e} \quad \textit{Equation 13}$$

$$\text{Avec : } Le = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.128}\left[1 + \sqrt{1 - (1.128/Kc)^2}\right] \qquad \textit{Equation 14}$$

I_g : Indice de pente global en m/km ; D : La dénivelée H 5% – H 95%, définie par la courbe hypsométrique (m) ; L_e :Longueur du rectangle équivalent (m) ; $Z_{5\%}$:Altitude correspondant à 5 % de la surface totale du bassin versant (m) ; $Z_{95\%}$: Altitude correspond à 95 % de la surface totale du bassin versant (m).

La dénivelée utile (D), dénotées respectivement par Z5% et Z95% (Figure 35). Ceci dit que 90% de la superficie s'étend entre ces altitudes. Selon la classification adoptée par l'ORSTOM (France), le relief est dit assez fort si l'indice de pente global est compris entre 20 et 50 m/km (Tableau 17).

Tableau 16: Classification du relief selon l'indice Ig donnée selon L'ORSTOM

Classe de relief	Type de Relief	Valeur d'I_g (m/km)	Ds (m)
R1	Très faible	Ig <0,002	< 10
R2	Faible	0,002 ≤ Ig < 0,005	10 ≤ D < 25
R3	Assez faible	0,005 ≤ Ig < 0,01	25 ≤ D < 50
R4	Modéré	0,01 ≤ Ig < 0,02	50 ≤ D < 100
R5	Assez fort	0,02 ≤ Ig < 0,05	100 ≤ D < 250
R6	Fort	0,05 ≤ Ig < 0,1	250 ≤ D < 500
R7	Très fort	Ig > 0.1	D > 500

L'indice de pente global est de 2.44. Selon la classification du relief donné par l'ORSTOM, la valeur de l'indice de pente global du bassin versant Zenaga montre un relief

très fort. Malgré sa simplicité, l'indice de pente global présente l'inconvénient de décroître pour un même bassin lorsque la superficie croit. Il permet la classification mais on ne peut pas s'en servir pour comparer des indices de pente des bassins versants de superficies différentes. Pour pallier à cette lacune, il serait préférable d'utiliser la dénivelée spécifique D_s (m) donné par l'équation suivante:

$$Ds = Ig \times \sqrt{A} \qquad \textit{Equation 15}$$

Le dénivelée spécifique du bassin versant Zenaga est de 84.99 m. Cet indice peut servir pour comparer le relief des bassins versants de superficies différentes.

L'étude de la pente moyenne donne une indication d'une part sur le temps que parcourt l'eau ruisselé, d'autre part, elle permet de renseigner sur la topographie globale du bassin versant et donc sur le temps de ruissellement et de concentration. Elle est calculée par les équations 16 et 17 :

$$\mathrm{P_{moy}} = \frac{\Delta \mathrm{H}}{\mathrm{Le}} = \frac{\mathrm{H_{max} - H_{min}}}{\mathrm{Le}} \qquad \textit{Equation 16}$$

$$\text{Ou par : } \mathrm{P_{moy}} = \frac{\Delta \mathrm{H}}{\sqrt{A}} = \frac{\mathrm{H_{max} - H_{min}}}{\sqrt{A}} \qquad \textit{Equation 17}$$

Avec : P_{Moy} : La pente moyenne du bassin versant (m/km) ; ΔH : L'altitude moyenne (m) 338.59 ; L : Longueur du rectangle équivalent (km).

D'où, P_{moy} = 9.72 m/km, témoignant d'un écart important de dénivelé, qui va être à la faveur de l'augmentation de l'agressivité du ruissellement et du temps de concentration, elle témoigne aussi d'une topographie variée mais aussi perturbé, caractérisée par un grand nombre de rupture et d'un relief est assez abrupt.

3. Caractéristiques du réseau hydrographique du bassin versant Zenaga

3. 1. Hiérarchisation du réseau hydrographique (La topologie)

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels et/ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. En effet, il figure l'une des caractéristiques fondamentales les plus importantes des bassins versants. L'étude et l'analyse des caractéristiques du bassin versant s'avèrent inéluctable. La caractérisation de son fonctionnement notamment, la structure du réseau et l'ordre du cours d'eau, les longueurs et les pentes caractéristiques, le degré de développement, le profil en long et la densité de drainage figurent intéressante, car c'est à travers ces informations qu'on va avoir une idée claire sur le régime hydrique, donc de la dynamique des eaux à l'intérieur de ce territoire.

Afin de caractériser le réseau hydrographique, il est souvent utile de reporter son tracé en plan sur une carte à une échelle adéquate. L'utilisation des cartes topographiques, de l'imagerie spatiale et du modèle numérique de terrain (MNT) est utile à cette identification. Divers paramètres descriptifs sont utilisés pour définir le réseau hydrographique.

3. 2. Classification de Strahler (1957)

La classification topologique s'avère essentiel dans la description du réseau hydrographique ou d'un réseau de drainage. Cette classification est facilitée par un système de numérotation des tronçons de cours d'eau (rivière principale et affluent). La codification des cours d'eau est également utilisée pour le traitement automatique des données. Les caractéristiques du réseau de drainage peuvent être déterminées en utilisant le système de classification proposé par ***Horton*** (***1945)***, modifié par ***Panov & Feodosiev*** (***1948)*** et rendu définitif par ***Strahler*** (***1957).*** Le système Strahler est encore le plus largement utilisé, il permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin versant de l'amont vers l'aval. Elle se base sur les règles suivantes:

- Tout cours d'eau ou rivière dépourvu de tributaires est un flux d'ordre 1 ;
- Tout cours d'eau ou rivière formée par la jonction de deux rivières de différents ordres prend l'ordre du flux d'ordre supérieur ;
- L'ordre du cours d'eau ou d'une rivière formée par la jonction de deux rivières du même ordre est augmentée par un ;
- Chaque bassin versant a un ordre égal à l'ordre de son principal fleuve. La même chose s'applique à des sous-bassins versants.

Le réseau hydrographique du bassin versant présente une longueur des cours d'eau estimé à 3354.67 km, il suit en quelque sorte le canevas dessiné par la structure et épouse la morphologie complexe du bassin. En plus de la concentration des eaux qui se fait dans les zones amont di différentes direction (NW, SW, SE et NE). Le cours d'eau principale particulièrement l'oued Selouane est d'ordre 6 selon l'échelle de Strehler (Figure 35), il en sort un réseau dense et ramifier à fort potentiel érosif. L'explication donnée au canevas de la structure du réseau de drainage, c'est que l'orientation des artères hydrographiques principales est conforme aux canevas de la fracturation NE-SW, liée à l'activité néotectonique récente.

Le type de réseau hydrographique et sa forme et liée d'habitude au type de climat, plus précisément aux quantités des précipitations reçus. Autrement les versant exposé à l'Est sont plus arrosées que celle exposé à l'ouest et reçoit un maximum de précipitations, d'autre part la différence d'altitude et la variabilité de la pente hydrographique joue un rôle inéluctable dans cette distribution.

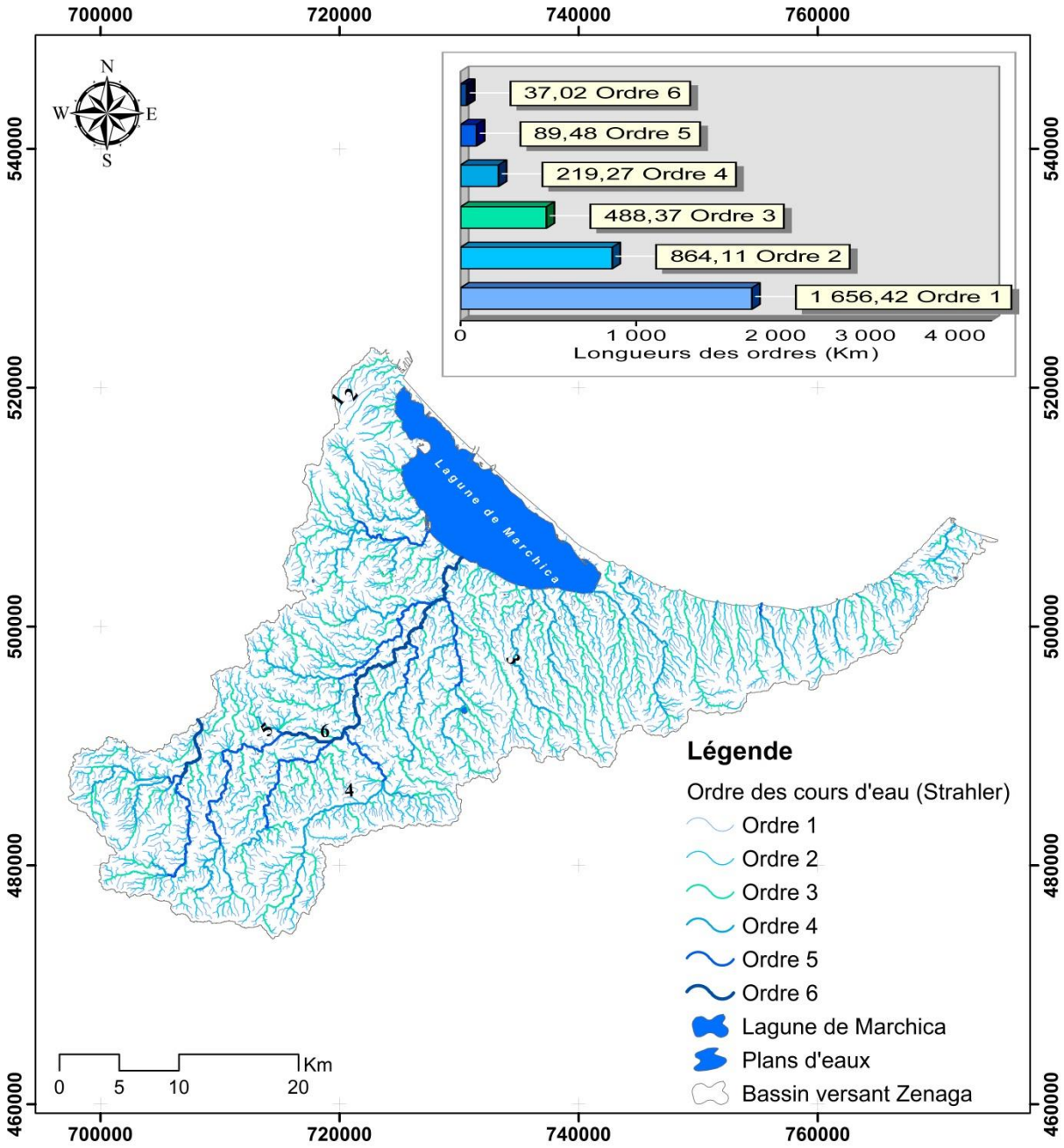


Figure 32: Carte du réseau hydrographique du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

3. 3. Formes du réseau hydrographique

La forme du réseau hydrographique dépend d'un complexe de facteurs qui agissent en interaction. La différenciation du réseau hydrographique du bassin versant est due à quatre principaux facteurs :

- La **géologie** : de par sa structure et ça nature lithologique, la sensibilité à l'érosion changes, en présentant des réponses plus ou moins grandes. En effet, la forme du réseau hydrographique est fortement contrôlé par a nature du substratum ;
- Le **climat** : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques, témoignant de l'influence

du régime climatique qui règne. Le climat agit également sur la couverture végétale qui limite le ruissellement superficiel. régularise le débit des cours d'eau et amortit les crues. Le régime des précipitations et le couvert végétale influence la densité du réseau hydrographique ;

- La **pente**: détermine si les cours d'eau sont en phase actif (érosion) ou passive (sédimentation). Dans les zones de pente plus élevées (Montagneuse), les cours d'eau participent souvent à l'érosion du substrat sur laquelle ils s'écoulent, et donc de la mobilisation des particules des sols. Au contraire, en plaines, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine ;
- **L'action anthropique**: le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges, la correction des cours d'eau et l'urbanisation modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique et par conséquence de sa dynamique ;

3. 4. Classifications descriptives du réseau hydrographique

Afin de caractérisé la structure du réseau hydrographiques, nous avons utilisé la classification proposée par ***Howard (1967)*** et ***Gregory*** and ***Walling (1973)***, par la suite développée par ***O'Callaghan and Mark (1984***), ***Argialas et al. (1988)***, ***Hadipriono (1990)***, ***Chorowicz and Fabre (1997)***. Cette typologie est basée sur des critères comme l'hydromorphométrie, la morphologie et la densité (***Howard***, ***1967*** ; ***Moussa et Bocquillon, 1993***).

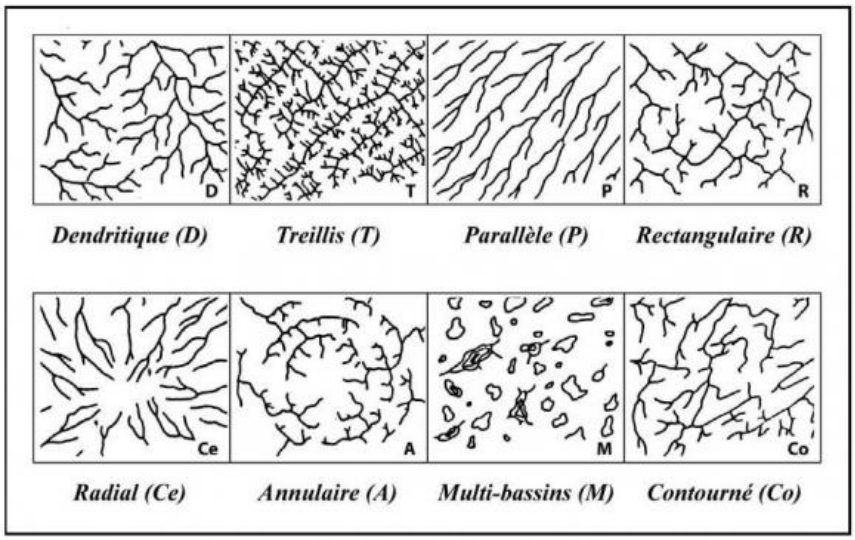


Figure 33: Classification du réseau de drainage (***Gregory and Walling, 1973***)

Le réseau hydrographique du bassin versant Zenaga est complexe parfois dendritiques dans des terrains imperméable, représenté par des sédiments uniformément résistants, horizontaux ou roche cristallines ; parfois parallèle avec des pentes moyennes à forte, montrant une forte densité et une dynamique importante. Les lignes de partage des eaux sont situées au niveau des massifs montagneux, favorisent l'écoulement des oueds du bassin versant selon une direction SW-NE. La majorité des affluents dessinent des lignes parallèles à structure ramifiées (Figure 35 et 36).

3. 5. Rapport de confluence et rapport de longueur

Horton (1932), ***Schumm (1956)*** et ***Strahler (1964)***, Sur la base de leurs théories sur l'ordonnancement des cours d'eau, ont proposé des lois concernant la relation entre des cours d'eau, d'une part, et le nombre et la longueur moyenne des cours d'eau d'autre part, à savoir le rapport de confluence Rc et de longueur R_L. Le rapport de confluence R_c (Tableau 18) est égal au quotient du nombre de talwegs d'ordre n par celui des talwegs d'ordre supérieur (n + 1). Elle exprime le développement du réseau de drainage d'un bassin versant et définie par l'équation suivante :

$$Rc = \frac{Nombre\ du\ cours\ d'eau nombre\ n}{\text{Nombre du cours d'eau d'ordre n+1}} = \frac{\text{N n}}{\text{N n+1}} \qquad \textit{Equation 18}$$

Tableau 17: Rapport de confluence bassin versant Zenaga

Ordre	Nombre de Thalwegs	Rc
1	4458	
2	2059	2.16
3	1229	1.67
4	567	2.16
5	239	2.37
6	102	2.34

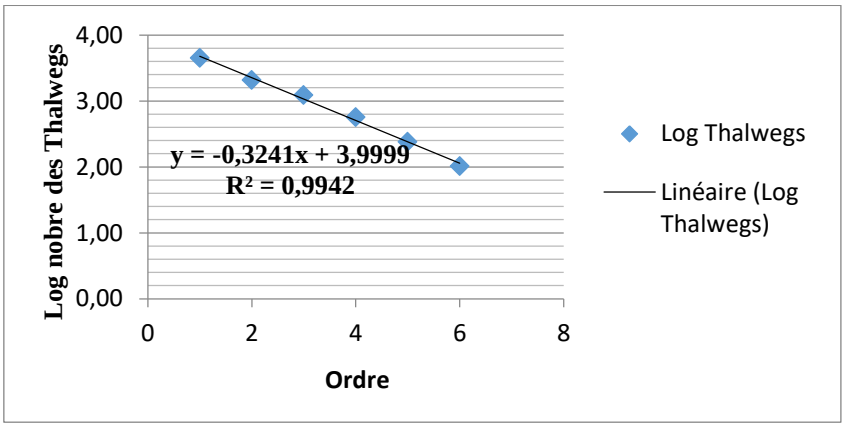


Figure 34: Droite représentative du nombre de Thalwegs en fonction de l'ordre

Le rapport Rc qui est la pente de la droite $a = \frac{Log\ 4458 - Log 2059}{2-1} = 0.99$

$$\boldsymbol{Rc = Log^{-1}a = 5.52}$$

Le rapport de longueur R_L (Tableau 18), c'est le rapport des longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre n aux longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre n – 1. Exprimé selon l'équation suivante :

$$RL = \frac{Longueur\ moyenne\ des\ cours\ d'eau\ d'ordre\ n}{Longueur\ moyenne\ des\ cours\ d'eau\ \text{d'ordre n}-1} = \frac{\text{L n}}{\text{L n+1}} \qquad \textit{Equation 19}$$

Tableau 18: Rapport des longueurs du bassin versant Zenaga

Ordre	Nombre de Thalwegs	L. Cumulé (Km)	L. Moy Km ²	R_L
1	4458	1656,42	0,37	1.91
2	2059	2520,53	1,22	1.76
3	1229	1352,48	1,1	2.22
4	567	707,64	1,24	2.44
5	239	309,11	1,29	2.42
6	102	126,86	1,24	-

Le rapport des longueurs moyennes des cours d'eau du bassin versant Zenaga $\mathbf{R_L = 2.15.}$

D'après la figure 40 on peut calculer « R_{Lm} » $\boldsymbol{R_{Lm} = log\text{-}1\ a}$

Avec : $a = \frac{Log\ 1.24 - Log 0.37}{6-1} = 0.87$ donc $\mathbf{R_{Lm} = 3.82}$

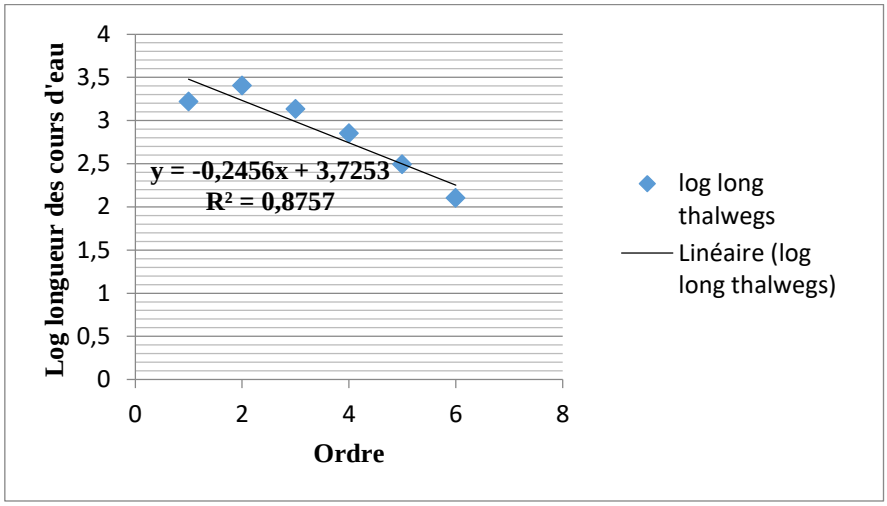


Figure 35: Droite représentative des longueurs des Thalwegs en fonction de l'ordre

Le rapport de confluence (Rc) et des longueurs (R_L) des cours d'eau sont des nombres sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. Ils varient suivant l'ordre considéré. Ce sont des éléments importants à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre.

Selon ***Strahler (1964)***, le R_C varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence, caractérisé par une ramification bien développée avec un espacement régulier des confluences (Type chêne).

La valeur du rapport de confluence renseigne sur la forme générale du réseau de canaux et sa répartition dans l'espace, au même titre que pour un réseau hydrographique naturel. Schématiquement, plus le rapport de confluence est grand (Rc>5), plus les confluences sont concentrées dans l'espace, et plus le réseau de canaux sera développé en longueur et non en largeur (type couloir). Dans cette configuration, l'écoulement préférentiel de crue sera

spatialement concentré le long d'un couloir, les inondations seront plus importantes, mais sur une zone plus faible. Plus le rapport de confluence est petit (Rc<5), mieux les confluences seront réparties dans l'espace et auront un espacement régulier. Dans cette configuration, l'écoulement préférentiel de crue sera spatialement étendu, les inondations moins importantes, mais sur des zones plus vastes.

Les valeurs du rapport de confluence et du rapport des longueurs permettent de dire que le bassin versant Zenaga présente une bonne organisation, avec un réseau dendritique de Type chêne, avec ramification bien développée accompagné d'un espacement régulier des confluences.

3. 6. La densité du drainage

La densité de drainage d'un bassin versant est une information quantitative utilisée pour décrire le réseau hydrographique. Décrit pour la première fois par ***Horton (1932),*** la densité de drainage est définie comme la longueur totale du canal dans un bassin hydrographique divisée par la superficie totale, représentée par l'équation suivante :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} = 2.26\ Km^{-1} \quad \textit{Equation 20}$$

Avec :

Dd : densité de drainage (km/km²) ; **Li** : Longueurs des cours d'eau (km) ; **A** : Surface du bassin (km²).

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En pratique, pour des régions ou l'écoulement n'a atteint qu'un développement limité, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 et se trouve généralement centralisé; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec infiltration faible.

- Le bassin versant Zenaga présente une densité de drainage de l'ordre de 2.76 km.km-², une valeur témoignant d'un bassin bien drainé

Selon ***Schumm (1956)***, la valeur inverse de la densité de drainage est exprimé par : $C = \frac{1}{Dd}$.

Définie autant que « **Constante de stabilité du cours d'eau** ». C'est un paramètre physique qui représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau). La valeur inverse de la densité de drainage du bassin versant Zenaga est estimée à 0.36 km.km-².

Conclusions et discussions

Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) occupe une position clés dans la province de Nador et la région orientale, avec une superficie de 1213.75 km². Actuellement, ce territoire est le siège d'une activité érosive importante, liée d'une part à l'accélération des processus de l'érosion, d'autre part à l'utilisation irrationnelle des ressources naturelles. La province de Nador connait un dynamisme marqué par une croissance démographique importante. Le taux d'urbanisation atteint 70%, avec une densité de l'ordre de 175.5 hab. /km² et une taille de ménage de 4.5. Le taux de vulnérabilité et de pauvreté est très important avec une disparité rotatoires entres les différentes communes de la province. Une telle situation est liée d'une part à l'exode rural des populations suite à la dégradation des ressources, la diminution des sources de revenue et la pauvreté.

L'analyse des données climatiques montre que le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) reçoit un volume de 347.6 × 106 m^3. an^{-1} et des températures moyennes annuelles comprises entre 15.8 °C et 18 °C, ce qui montre une certaine régularité interannuelle. La médiane sur 32 ans (1985-2017) était de 316.20 mm respectivement. Sur le plan hydrologique, le bassin versant Zenaga témoigne d'un climat méditerranéen tempéré à étés secs et hivers pluvieux. Le classement des précipitations annuelles par rapport à la moyenne de la série d'observation permet de détecter la fluctuation observé des précipitations entre l'humide et le sec. 11 années sèches ont été répertories sur la période allant de 1985 à 2017. L'analyse en fonction des années des précipitations moyennes annuelles a permet de distinguer des valeurs maximum pour les années 2003 (454.6-512.50 mm) et 2009 (457.29-507.50mm), et des valeurs minimum pour 1998 (202-217.50 mm) et 2017 (189.50-204.50 mm). La période arrosée commence en septembre et dure jusqu'en avril. Les mois de novembre, décembre, janvier et février durant la période pluvieuse concentre les moyennes pluviométriques mensuelles les plus élevé. La lame d'eau tombée estimé par la méthode des isohyètes ou des polygones de Thiessen montre des valeurs de 269.85 mm et de 302.99 mm avec un écart type standard enregistré de 23.43%. La pluviométrie marque généralement une diminution des quantités des précipitations de l'aval vers l'amont.

L'analyse en fonction des années des températures a permet de distinguer un accroissement annuelle de 1°C durant la période 1987-2017. L'analyse de corrélation sur la même période montre que la tendance à une succession d'années très sèches croix avec un coefficient de corrélation de 0.36. L'analyse des statistiques basiques des moyennes mensuelles, des maximum et minimum des températures, a permis de constater que ces dernier ont la même distribution temporelle. La température moyenne annuelle est élevée, elle peut atteindre 18°C. L'amplitude des écarts des températures moyennes maxima est de l'ordre de 5°C en hiver et dépasse 7°C en été.

L'utilisation des données climatiques issues de la base de donnée « **TerraClimate** » a permet la caractérisation du facteur climatiques au niveau de la province de Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). La combinaison entre la température et la précipitation par des différentes méthodes a montré que la station est sous un climat aride à

semi-aride. Les changements climatiques à Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), comme ailleurs en Méditerranée, concerne les températures et les régimes des précipitations mais aussi d'autres paramètres en étroite liaison avec les changements de ces deux paramètres et les usages des sols.

L'analyse des données climatiques prédit une tendance à un réchauffement progressive du climat et la régression des précipitations qui va sont doute influencer significativement la fréquence de la sécheresse. Ces résultats suivent de manière générale les prédictions établies par le ***PNEU/PAM-Plan bleau, 2020*** et la ***FAO, 2020***.

Géologiquement, le bassin versant renferme deux nappes interconnectées présentant une diversité des affleurements géologiques et une lithologie relativement friable: La nappe de Gareb localisé au niveau de la partie amont, constituée par des calcaires marneux du Villafranchien (Plio-Quaternaire), et la nappe de Bouareg, constituée par un substratum imperméable formé par de terrains Quaternaires continentaux très épais limoneux très hétérogènes. De point de vue géomorphologique, le bassin versant est caractérisée par des petites montagnes avec un relief accidenté et diversifié, façonné par des chaines montagneuses en forme d'arc au milieu qui dominent de larges dépressions plus ou moins planes, ouvertes sur la Méditerranée vers la mer et l'intérieur du bassin. Les grandes unités morphologiques sont le massif de Guelaia, Le massif de Kebdana (chaîne de type Atlasique) et le bassin de Zenaga (Gareb- Bou Areg) en forme de cuvette (***Guillemin & Rampnoux, 1975; Guilemin & Houzay, 1982 ; Morel, 1988 ; El Rhazi et Hayashi 2002***).

L'analyse et la détermination des divers paramètres morphométriques du bassin versant nous a permis d'expliquer les particularités topographiques. Il en sort, une altitude moyenne de 550 m et une médiane de 110 m. Une allure convexo-concave avec une tendance à la convexité indiquant un bassin moyennement mature. Un indice compacité de Gravelius de 3.34, et un indice de Horton de 0.54. Une longueur et largeur moyenne de 201.48 km et 25,68 km. Un temps de concentration de 10.13 heure et une pente moyenne de 9.72 m/km. Les valeurs obtenues témoignant d'un écart important de dénivelé, qui va être à la faveur de l'augmentation de l'agressivité du ruissellement et du temps de concentration, elle témoigne aussi d'une topographie variée mais aussi perturbé avec un grand nombre de rupture de pente et d'un relief accidenté. Ces différentes caractéristiques indiquent que le bassin versant Zenaga mal drainé, avec une hydrodynamique importante avec une forte dynamique en faveur d'une de l'érosion

Au niveau de ce territoire, la couverture végétale est assez diversifiée, conditionnée par l'action du climat, la morphologie du terrain, la nature des sols et de l'action anthropique. Ces facteurs sont très variables, ce qui fait que le territoire de la province de Nador présente une importante diversité d'associations végétales en relation avec la diversité de ses habitats entre l'amont et l'aval. L'analyse cartographique nous à permet de constater que le couvert végétal naturel du bassin versant Zenaga est constituée essentiellement par du matorral et steppe d'alfa avec 29.39%, forêts et matorral avec 5.93% de la superficie total. Les reboisements que ça soit feuillus et résineux avec 3.54% et 1.5% respectivement. Ces formations occupent

40.36% de la superficie totale. Le matorral à couvert claire et dense avec 19.83% et 10.22% respectivement. Occupant à peu près 30.05% de la superficie total du bassin versant Zenaga.

L'étude et l'analyse des facteurs naturels causaux influençant l'état des ressources indique que le risque de l'érosion hydrique est de plus en plus présent au niveau de ce territoire avec une dynamique des processus de l'érosion qui ne cesse de s'imposer son poids. Les contraintes au développement seront liées principalement à l'état des ressources rendu fragilisé par l'action combiné des processus érosives du risque de l'érosion hydrique et de l'action anthropique avec des dégradations ressentie au niveau des ressources en sols, le végétation naturelles et de l'infrastructure.

Chapitre III : Méthodes d'étude des sols et de l'érosion hydrique au niveau de la province Nador et du bassin versant Zenaga

Introduction

Dans un souci d'évaluation et de cartographie du risque de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) de la province de Nador. Ce travail point la prétention sur l'étude des principaux facteurs causaux du risque de l'érosion hydrique des sols et d'analyser les conditions favorables à sa genèse dans ce territoire en mutation. L'étude a pour objet de montrer aussi l'apport des outils de la géomatique et la modélisation, afin de concevoir une prise en compte dans les outils d'aménagement et de planification.

Ce chapitre récapitule les méthodes utilisé pour l'étude utilisé pour la caractérisation, identification et la classification des sols d'une part, ainsi que les progrès de la recherche en matière des modèles utilisé dans l'étude de l'érosion hydrique, qui discute les concepts de base de l'érosion hydrique, ainsi que son évaluation, détermination et sa prédiction.

I. Méthodes de caractérisation, d'identification et de classification des sols

La reconnaissance de type de sol (nature, composition et la répartition des grains de différentes tailles) est une étape importante. L'introduire des paramètres d'identification des sols menant à leur classification géotechnique permet en particulier la caractérisation des paramètres d'état (caractéristiques physiques des sols) serviront par la suite à décrire leurs comportements hydrauliques et mécaniques. Les essais qui conduisent à cette étude portent le nom d'essais d'identification. Ces essais permettent à la fois la caractérisation (identification) et la classification des sols.

1 Définition des principaux caractères des sols

Les grains d'un sol peuvent être soumis à des forces d'attraction intergranulaires diverses (des forces électriques, des forces de *Van der Waals,...*). Ces forces sont en général faibles et diminuent rapidement lorsque la distance entre les grains augmente. Elles n'influencent que le comportement des sols à dimensions très faibles. Dans ce cas le sol est doté d'une cohésion. Cette constatation va amener le géotechnicien à définir deux grandes familles de sol :

- les **sols grenus** qui sont de dimension **supérieure à 20 µm** (0,02 mm),
- et les **sols fins** de dimensions **inférieures à 20 µm**.

- **Les sols grenus**

Sols pulvérulents pour lesquels les caractéristiques géotechniques sont déterminées par des forces de volume ou de pesanteur. On distingue principalement deux sous-familles :

- Sables : 50% des grains au moins sont compris entre 0,02 mm et 2 mm.
- Graviers : 50% des grains au moins sont compris entre 2 mm et 20 mm.

- **Les limons (ou Silts)**

Sols dont la majeure partie des grains est comprise entre 2µm et 20 µm (définition purement descriptive). On distingue suivant leurs origines :

- Les limons éluviaux formés par altération sur place d'un substratum favorables.
- Les limons de ruissellement et d'inondation qui se présentent en strates.

- **Les argiles**

Définie granulométriquement comme une roche dont les grains sont compris entre 2 µm et 0,2µ. C'est une roche sédimentaire terreuse faisant pâte avec l'eau (plastique). La plasticité d'un matériau est caractérisée par le fait qu'il peut être déformé d'une façon permanente, à volume constant, sans perdre sa cohésion interne.

2. Essais d'identification des sols

2. 1. Analyse granulométrique et sédimentométrie (NF P 94-056 & -057)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue:

2. 1. 1. Par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80µm

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis (emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas) et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (**Représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension**).

2. 1. 2. Par sédimentométrie pour les grains plus fins (diamètre moyen inférieur à 80µm)

L'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente conformément à la loi de *Navier Stokes* sur la vitesse de chute de billes sphériques dans l'eau. La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre.

Un mode de représentation commode des résultats de l'analyse granulométrique est la courbe granulométrique. Elle représente pour chaque dimension de particule, le poids (ou masse) des particules de cette taille ou de tailles inférieures. Ce poids est exprimé en pourcentage par rapport au poids total de la matière sèche de l'échantillon étudié. Cette courbe est tracée en coordonnées semi-logarithmique.

NB : Diamètre de référence

Certaines coupures granulométriques sont plus particulièrement utilisées :

* La coupure granulométrique à 80 µm permet de séparer les sols grenus des sols fins :

- ⇨ **Sol grenu** : si plus de 50% de ces grains ont un diamètre supérieur à 80 µm;
- ⇨ **Sol fin** : si plus de 50% de ces grains ont un diamètre inférieur à 80 µm;

* La coupure granulométrique à 2mm permet de séparer les sables des graves.

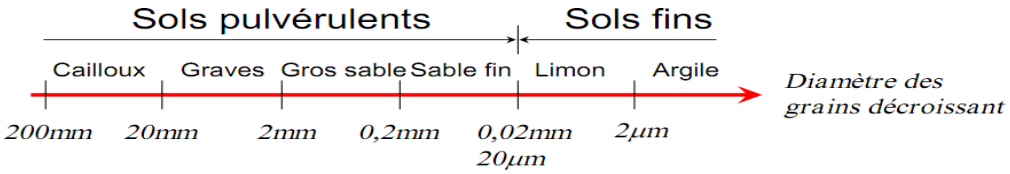


Figure 36: Caractéristiques dimensionnelles des sols pulvérulents et sols fins (https://coursgeologie.com/caracteristiques-dimensionnelles-des-sols-169/)

2. 2. Limites d'Atterberg : (NF P 94-051 et NF P94-052-1)

Les limites d'**ATTERBERG** sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction des sols fin passant au tamis de 0,4 mm ou 400 µm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et en observer sa consistance. Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique ou un liquide.

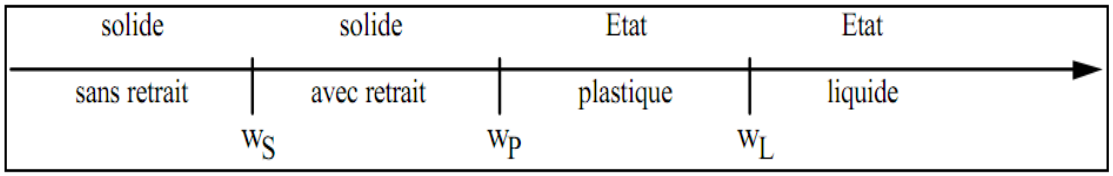


Figure 37: Limites d'Atterberg (https://www.btpdeutsch.com/)

Ce paramètre **IP** (Figure 39), caractérise l'argilosité des sols. On retient les seuils suivants :

- ✓ **Ip = 12 :** limite supérieur des sols faiblement argileux
- ✓ **Ip = 25 :** limite supérieur des sols moyennement argileux
- ✓ **Ip = 40 :** limite supérieur des sols argileux à très argileux

2. 3. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

Cet essai (effectué sur la fraction 0,2 mm du sol) est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à saturation. En d'autres termes, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être absorbée par les surfaces des particules de sols (Tableau 20). Cherchant à caractériser la phase argileuse d'un sol, l'essai consiste à introduire dans un échantillon des quantités croissantes de bleu de méthylène, par des doses successives jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Le sol adsorbera d'autant plus de bleu de méthylène que la quantité d'argile qu'il contient est importante.

Le résultat VBS s'exprime donc en grammes de bleu pour 100g de sol. On considère que cet essai exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans un sol. On distingue les valeurs suivantes :

Tableau 19: Nature des sols en fonction de la valeur du VBS (Valeur de bleu de méthylène)

Valeur du VBS	Nature du sol
VBS ≤ 0,2	Sols sableux (sol insensible à l'eau)
0,2 < VBS ≤ 2,5	Sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
2,5 < VBS ≤ 6	Sols limono-argileux (sol de plasticité moyenne)
6 < VBS ≤ 8	Sols argileux
VBS > 8	Sols très argileux

Ils existent des corrélations entre les valeurs VBS d'un sol et son indice de plasticité (IP): L'indice de plasticité (IP) et la valeur de bleu d'un sol (VBS) sont tous les deux des paramètres qui mesurent l'argilosité.

- La **VBS** est une grandeur qui exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenue dans le sol étudié, elle est donc applicable à l'identification de tous les sols.
- L'**IP** est un paramètre plus sensible que la VBS pour des sols moyennement argileux à très argileux. il est à la fois un paramètre d'identification et de comportement du sol.

3. Classification des sols

Il est important de caractériser un sol mais aussi de le classer, c'est à dire de le mettre dans un groupe ayant des comportements similaires. Au sens géotechnique, la classification des sols est basée sur les essais d'identification (analyse granulométrique ; limites d'Atterberg et/ou valeur au bleu de méthylène). Elle permet de fournir une définition rapide d'un sol. Il existe de nombreuses classifications parmi lesquelles on cite :

3. 1. Classification LCPC

Cette classification est celle utilisée dans les pays d'Afrique francophone. Elle a été mise au point en France en 1965 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Cette classification est une adaptation de la classification U.S.C.S (The Unified Soil Classification System) mis au point par le «Bureau of reclamation» et le «Corps of Engineers» aux Etats Unis.

La classification LCPC des sols utilise les résultats de l'analyse granulométrique, et des limites d'Atterberg. En effet, elle s'utilise avec le diagramme de plasticité associée. On distingue trois grands types de sols selon la classification LCPC:

- ✓ Les sols grenus dont 50% d'éléments en poids sont supérieurs à 80µm ;
- ✓ Les sols fins dont 50% d'éléments en poids sont inférieurs à 80µm ;
- ✓ Les sols organiques dont la teneur en composant organique est supérieure à 10% ;

3. 1. 1. Classification des sols grenus

Cette classification se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le tableau ci-après (Tableau 21).

Tableau 20: Classification des sols grenus (***LCPC, 2007*** ; ***Cerema, 2017***)

CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS (*Plus de 50% des éléments>0.08 mm*)					
Définition			**Symbole**	**Critères**	**Appellation**
GRAVES	Plus de 50% des éléments>0.08 mm ont un diamètre > 2 mm	Moins de 5% d'éléments <0.08 mm	Gb (GW)	$C_u > 4$ et $1< C_2<3$	Grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions Gb non satisfaites	Grave propre mal graduée

		Plus de 12 % d'éléments <0.08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A (Diagramme plasticité)	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de A	Grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments >0.08 mm ont un diamètre < 2 mm	Moins de 5% d'éléments < 0.08 mm	Sb (SW)	$C_u > 6$ et $1 < C_z < 3$	Sable propre bien graduée
			Sm (SP)	Une des conditions Sb non satisfaites	Sable propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments< 0.08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A (Diagramme plasticité)	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A (Diagramme plasticité)	Sable argileux
Lorsque : 5% < % d'éléments inférieurs à 0.08 < 12% => on utilise un double symbole					

3. 1. 2. Classification des sols fins (basé sur l'abaque triangulaire de Taylor)

C'est une technique qui utilise seulement la granulométrie, et qui permet de baptiser un sol (argile, limon, sable, limon argilo-sableux...). L'utilisation des pourcentages des trois catégories de sol par rapport à la fraction inférieur à 2 mm permet d'appliquer le diagramme de Taylor (Figure 40).

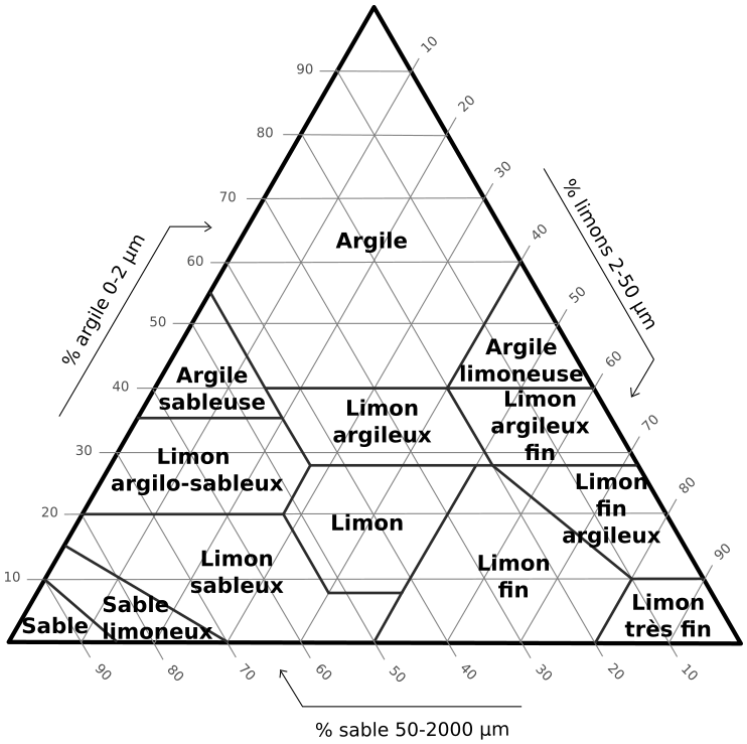


Figure 40: Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2mm) Triangle des textures de Taylor (***www.seedtohumus.org, Portet et al.2011***)

3. 1. 3. Classification des sols fins (basée sur les limites d'Atterberg, 1911)

C'est l'un des essais d'identifications les plus importants. Ces limites sont mesurées avec un appareillage normalisé du tamisas de 0,40mm. On peut considérer quatre états caractérisant la consistance des sols fins. Pour des teneurs en eau décroissantes :

- **L'état liquide** : Le sol a une consistance très faible. Il à l'aspect d'un fluide et tend à se niveler suivant une surface horizontale. Les particules glissent facilement les unes sur les autres.
- **L'état plastique** : Le sol a une consistance plus importante. Il ne tend plus à se niveler. Soumis à de faibles contraintes, il se déforme largement sans se rompre et garde sa déformation après suppression des contraintes. Les particules ont mis en commun leur couches adsorbées lorsqu'il y a déformation, les particules restent attachées les uns aux autres sans s'éloigner.
- **L'état solide** (*avec retrait*) : Le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes (petites déformations élastiques).
- **L'état solide** (*sans retrait*) : Les particules arrivent au contact en quelques points en chassant l'eau adsorbée, le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue.

La transition d'un état à un autre est très progressive, pour cela toute tentative pour fixer la limite entre deux états comporte une part d'arbitraire. Néanmoins, on utilise les limites définies par Atterberg et précisées en suite par Casagrande (***Casagrande, 1932***). Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles (teneur en eau pondérale entre WL et WP) qui marque les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (*limite de liquidité WL*).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (*limite de plasticité WP*).

Ces deux limites sont utilisées afin de déterminer la classification d'un sol (Figure 41). Elles s'appliquent sur la fraction de sol passant au travers du tamis de 400 µm.

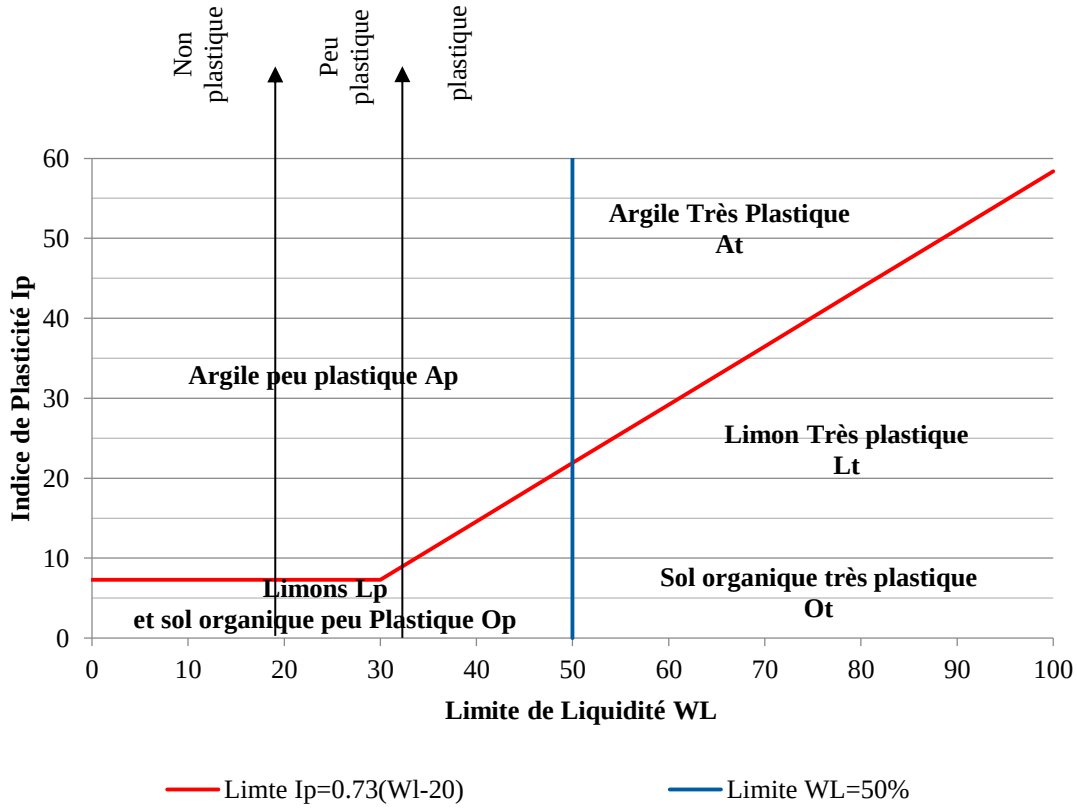


Figure 38: Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins (***Casagrande, 1958***)

3. 2. Classification GTR (NF P 11 300)

La classification GTR (***Guide des Terrassements Routier, 1992***) pour la réalisation des remblais et des couches de forme, et la norme qui en découle (NF P 11-300). Cette classification est la seule présentant un réel intérêt pratique dans les travaux de terrassement (Tableau 22 et 23). Son utilisation est détaillée dans le Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de forme d'infrastructures routières; C'est pour cette raison qu'elle est désignée par classification GTR.

Tableau 21: Classification GTR (***Sétra-LCPC, 2000***)

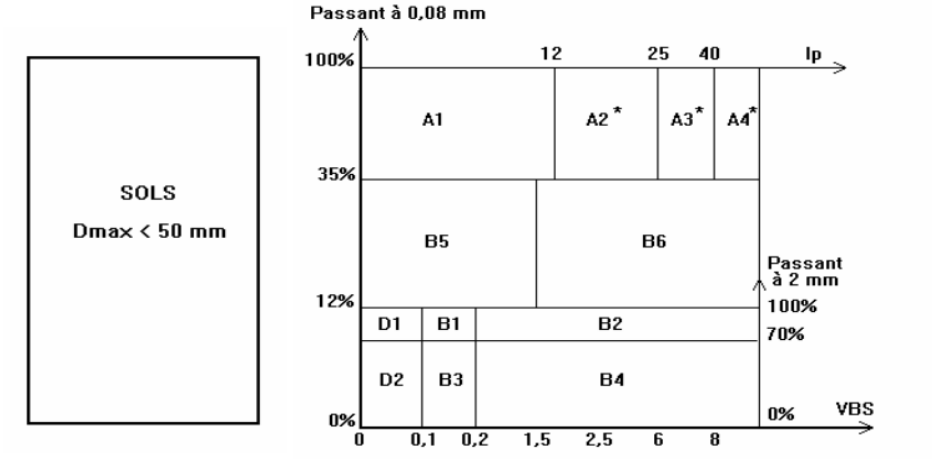
Classe	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50$mm et passant à 80 µm > 35%	A1 à A4 selon VBS ou I_p
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50$mm et passant à 80 µm ≤ 35%	B1 à B6 selon VBS ou I_p et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	D_{max} > 50mm et passant à 80 µm > 12% ou passant à 80 µm ≤ 12% VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS, I_p et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS ≤ 0,1 et passant à 80 µm ≤ 12%	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	

F	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300

D_{max} = Diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension inférieur à 50 mm (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments

VBS (Valeur de bleau de méthylène)= Quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fraction 0/50 mm d'un sol.

Tableau 22: Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (***LCPC & SETRA ; 2000***)



MATERIAUX ROCHEUX	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies — R1
			Calcaires — R2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites... — R3
		Roches siliceuses	Grés, poudingues, brèches... — R4
		Roches salines	Sel gemme, gypse — R5
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites..., gneiss..., schistes métamorphiques et ardoisiers...	R6
MATERIAUX PARTICULIERS	Sols organiques, sous-produits industriels		F

* Matériaux pour lesquels la mesure de l'I_p est à retenir comme base de classement. Pour les autres matériaux on utilisera la **VBS**.

** C1 : matériaux roulés et matériaux anguleux peu charpentés (0/50 > 60 à 80 %)

C2 : matériaux anguleux très charpentés (0/50 ≤ 60 à 80 %)

NB : D_{max} = Diamètre des plus gros éléments présents dans le sol (il est apprécié visuellement en général) exprimé en mm ; D_{max} < 50mm = diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension

inférieur à 50 mm (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible) ; D_{max} > 50mm = diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension supérieur à 50 mm (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible) ; Passant à 0.08= passant à 80 µm ; VBS (Valeur de bleau de méthylène)= C'est un indice permettant de caractérisé l'argilosité (ou la propreté) d'un sol. Il représente la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fraction 0/50 mm d'un sol ; Ip (Indice de plasticité) = Indice caractérise l'argilosité d'un sol.

- **Normes française**

NF P 94-050 (1995). Détermination de la teneur en eau pondérale (par méthode d'étuvage).
NF P 94-052-1 (1995). Détermination des limites d'Atterberg. Partie I : Limite de liquidité – méthode du cône de pénétration, 10 p.
NF P 94-052-1(1995). Détermination des limites d'Atterberg (méthode du cône de pénétration).
NF P 94-056 (1996). Analyse granulométrique (méthode par tamisage à sec après lavage).
NF P 94-057 (1992). Analyse granulométrique des sols (méthode par sédimentation).
NF P 94-068 (1995). Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.
NF-P 11-300 (1995). Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d´infrastructures routières.

- **Normes marocaines**

NM 10.141 (1995): Granulats _ Essai au bleu de méthylène (méthode à la tache).
NM 13.1.007 (1998): Essai d'identification _ détermination des limites d'Atterberg.
NM 13.1.008 (1998): Analyse granulométrique des sols par tamisage.
NM 13.1.010 (1998): détermination de la teneur en eau pondérale des sols (par méthode d'étuvage).

3. 3. Classification internationale

La classification moderne est basée sur l'ensemble des caractéristiques et des propriétés du sol précisément définies et quantifiées en tant que telles, ou en combinaison pour définir les grandes classes de sols telles que celles de la classification française que nous avons adoptée et compte un certain nombre de classe basé sur des critères analytiques :

Les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques, les sols isohumiques, les sols vertiques, les sols brunifiés à profils A(B) C ou ABtC, les sols Fersiallitiques, les sols hydromorphes, les sols salsodique.

II. Modèles d'étude du risque de l'érosion

De nombreuses méthodes existent dans la littérature pour l'évaluation de l'érosion des sols (***Vrieling, 2006 ; Mesrar et al.2015 ; Báčová et al.2019; Jarrah et al.2020 ; Meinen et Robinson, 2020; Tahouri et al.2022***). Selon ***Sadiki, (2005),*** ces différentes méthodes s'avèrent complémentaires quant à l'explication des interdépendances des facteurs naturels causaux du risque.

La modélisation de l'érosion hydrique est l'une des techniques populaires souvent utilisées à grande échelle spatiale. Elle fournit un moyen rapide pour caractériser le phénomène de l'érosion en intégrant des données sur les différents facteurs causaux de l'érosion par le biais des relations d'interaction. C'est aussi une méthode pratique pour évaluer l'efficacité des mesures de contrôle de l'érosion (***Morgan et Quinton, 2001 ; Blanco-Canqui et Lal, 2008;***

Sadiki et al.2009). Il existe actuellement de nombreux modèles pour caractériser différents aspects de l'érosion des sols (***Morgan & Duzant, 2008 ; Karydas et al.2014 ; Pandey et al.2016 ; Boardman et Evans, 2020***). Les modèles diffèrent en termes de complexité, d'objectif et de contexte pour leur développement, les exigences en matière de données d'entrée, l'échelle de temps, l'échelle d'application, les types d'érosion représentés, les sorties de modélisation, entre autres. Certains de ces modèles sont présentés dans le tableau 22.

Tableau 23: Modèles couramment utilisés pour l'étude de l'érosion (FAO. 2022. Global Soil Organic Carbon Map – GSOCmap v.1.6. Technical report. Rome. https://doi.org/10.4060/cb9015en)

Modèle d'érosion	Type d'érosion	Algorithme	Echelle de temps	Echelle spatiale	Références
USLE	Eau	Empirique	Moyenne	Champ/ Versant	***Wischmeier and Smith (1978) ; Renard et al. (1991)***
WEPP	Eau	Mécanistique	Événement	Champ	***Nearing et al. (1989)***
MUSLE	Eau	Empirique	Événement	Champ	***Williams and Berndt (1977)***
SWAT	Eau	Mécanistique	Moyenne	Bassin versant	***Gassman et al. (2007)***
WaterERI	Eau	Empirique	Moyenne	Champ/ Versant	***Lobb et al. (2016)***
WEQ	Vent	Empirique	Moyenne	Champ	***Woodruff and Siddoway (1995)***
RWEQ	Vent	Mécanistique	Moyenne/ Événement	Champ	***Fryrear et al. (2000)***
WindERI	Vent	Empirique	Moyenne	Champ/ Versant	***Lobb, McConkey and Li (2016)***
SLEMSA	Eau	Empirique	Moyenne	Champ	***Smith (1999)***
EPIC	Eau/Vent	Empirique	Moyenne	Bassin Versant	***Williams et al. (1983)***
WEPS	Vent	Mécanistique	Moyenne	Bassin Versant	***Hagen (2008)***
WaTEM/ SEDEM	Eau	Mécanistique	Moyenne	Bassin Versant	***Van Oost et al. (2009)***
TEM/ TillERI	Labour	Empirique	Moyenne	Bassin Versant	***Lobb et al. (2016)***
TillERI/ DirTillEM	Labour	Mécanistique	Moyenne	Champ	***Li et al. (2007) ; Li et al. (2008)***
MMF	Eau	Empirique	Moyenne	Champ	***Morgan and Duzant (2008)***
LISEM	Eau	Mécanistique	Événement	Champ	***De Roo et al. (1996)***
EROSION-3D	Eau	Mécanistique	Événement	Bassin Versant	***Schmidt et al. (1999)***
EUROSEM	Eau	Mécanistique	Événement	Champ	***Morgan et al. (1998)***
KINEROS	Eau	Mécanistique	Événement	Bassin Versant	***Woolhiser et al. (1990)***
ANSWERS	Eau	Mécanistique	Événement	Bassin Versant	***Beasley et al. (1980)***
AGNP	Eau	Mécanistique	Événement	Bassin Versant	***Young et al. (1989)***
AnnAGNPS	Eau	Mécanistique	En moyenne	Bassin Versant	***Bingner and Theurer (2001)***
EMP	Eau	Empirique	En moyenne	Bassin versant	***Dragičević et al. (2018)***
CREAMS	Eau	Mécanistique	Evènement	Champ	***Knisel and Douglas-Mankin***

					(2012)
CSLE	Eau	Empirique	En moyenne	Champ	***Liu et al. (2020)***
USPED	Eau	Empirique	En moyenne	Champ	***Mitasova et al. (1996)***
SEDD	Eau	Empirique	Moyenne	Champ	***Ferro and Porto (2000)***
PAP/CAR ; PAM ; PNUD, DGCONA ; FAO Modified PAP/RAC model	Eau	Empirique / Physique	Moyenne/ Événement	Bassin versant	***PAP/CAR (1998) ; PAP/CAR (1998a) ; Mesrar et al. (2015) ; Tahouri et al. (2022)***

Les revues de littérature sur l'application de la modélisation de l'érosion montrent que les modèles quantitatifs basés sur l'USLE sont les plus populaires (***Avwunudiogba et Hudson, 2014 ; Alewell et al.2019; Jarrah et al.2020 ; Borrelli et al.2021***). Les modèles de type USLE sont structurés comme l'équation universelle de perte de sol (USLE) ou utilisent le concept USLE dans leurs modèles. Ils comprennent (mais sans s'y limiter) :

- Les modèles d'érosion hydrique tells que : USLE, RUSLE, RUSLE2, MUSLE, USPED, CSLE, SWAT, WATEM/SEDEM, SEDD, CREAMS, AGNPS, EPIC ;
- Les modèles d'érosion éolienne tels que : RWEQ, WEQ, WEPS ;
- Les modèles d'érosion du travail du sol tels que : TEM et TillERI.

Cependant, les modèles qualitatifs basés dans leur fondement sur la modélisation des facteurs de prédisposition et sur les processus actifs s'avèrent très utiles pour identifier, décrire, et mesurer les processus dynamiques de l'érosion. Ces modèle incluent les situations extrêmes telles que la dégradation irréversible d'une part, et les zones stables non affectées, d'autre part (***PAP/CAR, 1989 ; PAP/CAR, 1992 ; PAP/CAR, 1996 ; PAP/RAC, 1997 ; PAP/CAR, 1998 ; PAP/CAR, 1998a ; PAM/PNUE, 2000 ; PAP/RAC, 2000 ; Aboulabbes et al.2005 ; Rafla et al, 2005 ; Sadiki et al.2012 ; Mesrar et al.2015 ; Tahouri et al.2022***).

Certes, le degré d'érosion est un indicateur majeur de la durabilité d'un schéma d'aménagement, ce qui veut dire que la cartographie de l'érosion hydrique s'avère un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène, ainsi que pour la caractérisation qualitative et quantitative du risque.

Ces modèles se sont avérés utiles pour identifier les zones agricoles à risque d'érosion et les facteurs de gestion à cibler lors de la planification du contrôle de l'érosion. Ils ont également été utilisés à grande échelle pour comparer la sensibilité à l'érosion entre les zones/régions et sensibiliser à l'action contre l'érosion. Puisqu'ils sont structurés, ils peuvent être mis en œuvre avec des données d'entrée similaires pour développer des informations sur les facteurs d'érosion (***Majhi et al.2021***).

2. Méthodes d'étude adoptées pour l'étude du risque de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant Zenaga

Les méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion varient d'une part en fonction des objectifs, des moyens mis en œuvre, des échelles de travail et d'autres parts de la région et de ses caractéristiques. La présente étude vise l'analyse des risques environnementaux par l'étude et la modélisation des processus et facteurs naturels et

anthropiques causaux. Il s'avère très utile de construire, disant d'élaborer un diagnostic de la dynamique de surface et des dégradation des ressources naturelles et des modèles des risques environnementaux qui portent menace à la population de la province de Nador et du bassin versant Zenaga, ses biens, et ses infrastructures, mais aussi à l'interaction «Environnement-projets envisagés» prenant en compte la combinaison (Nat-Tech). Ils seront des outils efficaces d'analyse, de planification, de prédiction quantitative à différentes échelles spatiales et temporelles, et surtout de prise de décision (***Paul-Hus, 2015***).

Une démarche scientifique consolidé a été choisie, elle consiste dans un premier temps à recenser, à localiser et à caractériser les risques et leur processus d'endommagement, puis dans un deuxième temps à intégrer les données déjà assemblées portant sur l'analyse des caractéristiques des différents facteurs causaux du risque dans une base de données SIG. Cette base de données constituera un socle que nous allons utiliser par la suite pour traiter et évaluer l'ampleur de l'aléa majeur que connait le territoire de Nador. Pour mieux enrichir cet œuvre, la méthodologie adoptée a nécessité de passer en revue les progrès de recherche en relation avec les modèles réalisée pour l'étude du risque de l'érosion hydrique, qui traites les concepts de bas de l'érosion, de son évaluation, mais aussi de sa détermination et sa prédiction. Il apparait intéressant de passer en revue la définition de la notion du risque et le développement durable, puis l'état de l'art des différents modèles d'études de l'érosion hydrique des sols, ainsi que les travaux ayant utilisé ces modèles à l'échelle nationale et internationale.

Les environnements côtiers sont particulièrement vulnérables aux effets des catastrophes ; en partie en raison du taux d'urbanisation liée à l'accroissement des populations et des activités économiques connexes (agriculture, l'aquaculture, tourisme, industries…). Les méthodes optées pour étudier le risque d'érosion hydrique dans sa globalité, dépend des caractéristiques naturelles du terrain (pente, surface ou l'intensité du processus et le type d'érosion), il dépend aussi des caractéristiques humaines et des ressources financières dont nous disposons. L'approche est orientée vers la cartographie du risque de l'érosion des sols via **l'analyse spatio-temporelle** des changements d'utilisation des terres (**LULC**) par l'utilisation des indices de télédétection, leur impact sur l'érosion hydrique et donc de la sédimentation des réservoirs des zones réceptrice.

Trois approches différentes ont été utilisées pour l'étude de l'évolution superficielle des sols du bassin versant de Zenaga :

- L'apport de la télédétection multi-capteur, du modèle LUCAS et des indices RS pour la modélisation et l'évaluation des activités anthropiques sur les changements de température de surface des Terre (LST) et d'utilisation/occupation des sols dans la région de Nador, Rif oriental, Maroc;
- Le modèle du Centre d'activité régional du programme d'action prioritaire (PAP/CAR) et ça version modifiée (***Mesrar et al.2015 ; Tahouri et al.2022***): pour l'évaluation de la susceptibilité et les tendances de l'érosion à l'échelle du bassin versant Zenaga, province de Nador, Rif oriental, Maroc;
- Le modèle universel révisé de perte de sol (RUSEL) pour évaluer et quantifier l'érosion hydrique annuelle moyenne à l'échelle du bassin versant Zenaga; province de Nador, Rif Oriental, Maroc ;

1. Méthode d'étude de l'évolution de la température de surface des sols (LST) et d'utilisation/occupation des terres (LULC)

La télédétection reste la technologie la plus fiable utilisée pour estimer les propriétés de surface à différentes échelles, et pour recueillir des informations sur les objets et leurs caractéristiques à la surface de la terre, selon un ensemble de connaissances et de techniques (***Quattrochi et Luvall, 1999 ; Zhang et al.2008 ; Griffiths et al.2010 ; Hansen et al.2010***).

La température de surface terrestre (LST) est le paramètre clé pour évaluer les changements dans la couverture terrestre, le bilan énergétique de surface et d'autres caractéristiques (***Kikon et al.2016***). C'est un paramètre important pour décrire les environnements thermiques qui peut être récupéré à partir d'images satellites (***Walawender et al.2014; Li et al.2013; Wang et al.2013***). Ces dernières années, de nombreuses études utilisant l'imagerie satellite se sont concentrées sur les effets de transformations de LULC sur les changements de LST (***Zhang et al.2013; Li et al.2016***). Ces derniers ont également été utilisés dans des études sur l'effet des îlots de chaleur urbains (UHI), à savoir NOAA/ AVHRR (***Streutker, 2002; Sobrino et al.1991 ; Balling et Brazel, 1988***), Landsat TM / ETM + (***Li et al.2016 ; Fu et Weng, 2016 ; Kim et Guldmann, 2014 ; Weng et al.2004***), ASTER (***Pu et al.2006 ; Liu et Zhang, 2011***) et MODIS (***Wan et al. , 2002 ; Pu et al.2006 ; Hu et Brunsell, 2013 ; Quan et al.2014***). Ces études établissent des simulations et des modèles de l'évolution spatio-temporelle de LULC, en montrant la relation existante entre ses évolutions et la couverture en surface (***Weng et al.2004 ; Buyantuyev et Wu, 2010 ; Weng, 2003***).

La récupération de la température de surface a largement utilisé l'algorithme à canal unique (SC) basé sur les données Landsat pour sa fiabilité, son intégrité et la nécessité d'utiliser un seul canal infrarouge thermique (***Wang et al.2019***). Selon des études antérieures (***Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2003; Sobrino et al.2007; Cristobal et al.2009; Abrams, 2000; Oguz, 2013; Jiménez-Muñoz et al.2014; Yu et aL.2014***), cet algorithme est très efficace. Plusieurs chercheurs avaient montré que la transformation de l'utilisation des terres/couverture des terres (LULC) avait un impact significatif sur le LST (***Hua & Ping, 2018 ; Pal & Ziaul, 2017 ; Sahana et al.2016 ; Kikon et al.2016 ; Zhang et al.2013***). Ces recherches s'appuient notamment sur l'utilisation d'outils SIG et de méthodes de télédétection pour mesurer, analyser et quantifier les changements drastiques observés. Les objectifs spécifiques de cette recherche est :

1) La cartographie à grande échelle de l'occupation des sols (LULC) pour les années 2007 et 2017 en utilisant la classification supervisée (basée sur l'algorithme du maximum de vraisemblance) et la matrice de confusion ;

2) La cartographie de la LST pour les années 2007 et 2017 en utilisant l'équation de transfert radiatif (RTE) la première méthode de l'algorithme Single Channel (SC) ;

3) Examiner la configuration spatiale des valeurs de LST à partir des modèles obtenus en étudiant l'évolution entre 2007 et 2017 des NDVI, MNDBI, MNDWI et MNT ;

4) Analyser statistiquement pour examiner, explorer et expliquer les relations spatiales des facteurs qui influencent les schémas spatiaux observés des changements LST et LULC.

1.1 Sources de données et prétraitement

Les images ont été acquises couvrant la région de Nador, dont une image Landsat-5 TM pour 2007 et une autre image Landsat-8 OLI pour 2017. Les caractéristiques des images sélectionnées ont été mises en évidence dans le tableau 25.

Les données TM et OLI ont été téléchargées depuis le site Web de l'US Geological Survey vers un produit 1G (voir http://www.earthexplorer.usgs gov/). Les deux images utilisées répondent aux critères de ***Tan et al. (2010)***: (1) Faible couverture nuageuse (2) la disponibilité est une longue série d'au moins 5 ans ou plus entre deux images pour maximiser la séparabilité et différencier entre les différentes classes d'occupation du sol. Les données météorologiques, y compris la température annuelle moyenne et les précipitations, ont toutes été extraites de la base de données TerraClimate (http://www.climatologylab.org/).

Tableau 24: Caractéristiques des données satellitaires Landsat-5 TM et Landsat-8 OLI utilisées dans l'étude (https://landsat.gsfc.nasa.gov)

Satellite	Capteur	Chemin /Ligne	Résolution spatiale (m)	Longueur d'onde (µm)	Date d'acquisition (h/min/s)	Élévation du soleil (°)
Landsat-5	**TM (Thematic Mapper)**	199/036	30	Band 1: 0.45 - 0.52	17 juin 2007 (10:38:50)	67.06
				Band 2: 0.52 - 0.60		
				Band 3: 0.63 - 0.69		
				Band 4: 0.76 - 0.90		
				Band 5: 1.55 - 1.75		
				Band 6: 10.40 - 12.50 (Thermal Band)		
				Band 7: 2.08 - 2.35		
Landsat-8 OLI	**OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor)**	199/036	30	Band 1: 0.453 - 0.451	28 juin 2017 (10:44:34)	67.65
				Band 2: 0.452 - 0.512		
				Band 3: 0.533 - 0.590		
				Band 4: 0.636 - 0.673		
				Band 5: 0.851 - 0.879		
				Band 6: 1.566 - 1.651		
				Band 7: 2.107 - 2.294		
			Panchromatique resolution 15 m	Band 8: 0.503 - 0.676		
				Band 9: 1.363 - 1.38		
				Band 10: 10.60 - 11.19 ((Thermal Band)		
				Band 11: 11.5 - 12.51 (Thermal Band)		

1. 2. Prétraitement des images

La correction radiométrique du capteur optique est destinée à extraire des paramètres physiques de surface tels que la température, les niveaux de réflectance et l'émissivité (***Tan et al.2017***). Tout d'abord, le logiciel ENVI 5.3 a été utilisé pour convertir les nombres numériques bruts en valeurs de luminance. Par la suite, les images satellites ont été géo-enregistrées et corrigées géométriquement à l'aide de cartes topographiques numériques (échelle = 1 : 50 000) pour extraire les points de contrôle au sol (GCP). Dans notre cas, les images satellites ont été géoréférencée selon l'ellipsoïde de Clarke 1880, selon la projection

Lambert Maroc, Merchich zone 1 (zone nord). Les images Landsat ont ensuite été stockées au format de données GeoTIFF et ré-échantillonnées à leur résolution spatiale basée sur l'algorithme du plus proche voisin ; avec une taille de pixel de 30 × 30 pour toutes les scènes. Les erreurs quadratiques moyennes étaient inférieures à 0,5 entre 2007 et 2017. Pour permettre la correction atmosphérique et minimiser les effets destructeurs des aérosols, le module FLAASH du logiciel ENVI 5.3 intégrant le code de transfert de rayonnement MODTRAN 4 a été appliqué (***Richter, 1996 ; ENVI, 2009***). Il effectue la correction atmosphérique et la récupération de la réflectance spectrale requises à partir d'images de rayonnement multispectrales (***Exelis Visual Information Solutions, 2017***).

1. 3. Méthodologie

Un ensemble de techniques de traitement d'images utilisant le logiciel ENVI 5.3 et ArcGIS 10.4 ont été appliqués pour étudier les changements dans l'utilisation des terres/couverture des terres, NDVI, MNDBI, MNDWI et LST dans la région de Nador. La section suivante explique la méthodologie adoptée pour étudier ces facteurs (Figure 42).

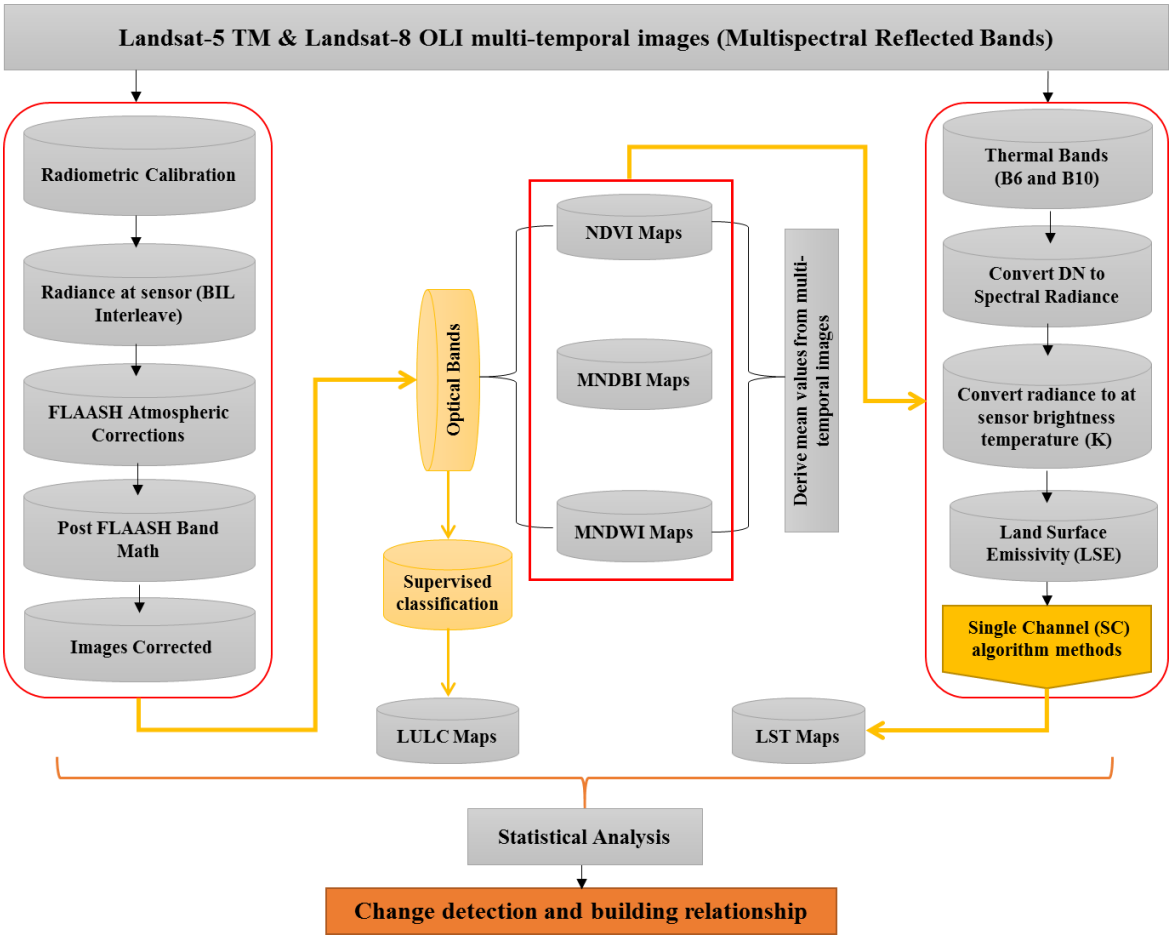


Figure 39: Carte Modèle conceptuel de la méthodologie adoptée ; DN : numéro numérique ; NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée ; NDBI : indice construit de différence normalisée ; MNDWI : indice de différence d'eau normalisé modifié ; MNDBI : indice construit de différence normalisée modifiée

1.3.1 Changement d'utilisation /couverture des terres (LULC) pour la région de Nador

La génération de la carte d'utilisation des terres/couverture des terres (LULC) est un processus qui implique trois séquences principales : 1) Génération de la couleur composite

(FCC) des données Landsat ; 2) Création de classes d'utilisation des terres de signature à l'aide de FCC et de Google Earth, et 3) Génération de données de vérité sur le terrain avec des informations spécifiques provenant de visites sur le terrain et de référentiels virtuels en ligne. Dans notre étude, l'algorithme de classification Gaussian Maximum Likelihood (MLC) a été appliqué aux images satellites lors de l'analyse de classification (***Bharath et al.2018***), en tenant compte de la moyenne, de la covariance et des rangs, sur la base des données de la fonction de densité. L'estimation du maximum de vraisemblance est un cadre probabiliste pour résoudre le problème de l'estimation de la densité. Elle permet de maximiser une fonction de vraisemblance afin de trouver la distribution de probabilité et les paramètres qui expliquent le mieux les données observées. Il fournit également un cadre pour la modélisation prédictive dans l'apprentissage automatique où la recherche de paramètres de modèle peut être présentée comme un problème d'optimisation (***Brownlee, 2019***).

Sur la base de la MLC, l'étude de la zone a été classée en cinq classes : terres agricoles, arbustes et terres herbacées, terres forestières, terres urbaines et bâties, terres arides (terres salines, terres désertiques et sols sablonneux) et terres aquatiques (compris les lacs, les rivières et les zones riveraines), comme indiqué dans le tableau 26. Afin d'évaluer la fiabilité de la classification, une évaluation de l'exactitude des données de vérité sur le terrain et de Google Earth a été effectuée. Une matrice de confusion/matrice d'erreur a été créée et la précision globale et le coefficient kappa ont été estimés (***Shafia et al.2018***). La précision globale de la classification était de 87,90 % et 93,14 % pour les cartes de 2007 et 2017 respectivement et les coefficients kappa étaient de 0,86 et 0,93 en 2007 et 2017, respectivement.

Tableau 25 : Catégories de classification d'utilisation/couverture des terres (LULC) adoptées d'après le modèle LUCAS

Utilisation/ couverture des terres	**Déscription**
Terres Agricoles	Terrasses agricoles ; prairies des plaines ; Terres agricoles ; Terres cultivées et pâturages ; Vergers, Fruits de brousse ; bosquets ; vignobles; pépinières et horticulture ornementale; Opérations d'alimentation confinées ; Autres terres agricoles
Arbustes et terres herbacées	Végétation herbacée buissonnante et de transition avec quelques arbres épars Noyaux d'arbustes; Périphéries d'arbustes et parcelles ouvertes environnantes Jeunes plantes à feuilles caduques et conifères avec une végétation herbacée et des arbres solitaires matures épars; Jeunes feuillus et conifères Arbres et arbustes endommagés ou morts; Arbres entièrement développés, couvrant moins de 30 % de la superficie des arbustes ; Végétation herbacée (graminées et herbes);
Terres forêstière	Terrain forestier feuillu; Terre forestière à feuilles persistantes; Terre forestière mixte; Zone humide boisée ; Aucune zone humide forestière et autres terres forestières
Terrains urbains et bâtis	Toutes les infrastructures ; Terrain urbain; Villages ; Terrains résidentiels; Services commerciaux et institutionnels; Complexes industriels et commerciaux; Mixte; colonies ; Terrains de transport ; Trottoirs et structures artificielles Terrains extérieurs et autres terrains urbains et bâtis

Terre stérile	Salines ; Plages et bords de rivières ; Zones sablonneuses (hors plages) ; Roche nue/exposée ; Mines à ciel ouvert/ Carrière ou gravier ; Sol nu et sol labouré ; Sites de fouilles et espaces ouverts ; Jachères; Terres et décharges Autres terres stériles
Plans d'eaux	Des lacs; Rivière; Eau libre permanente ; Canaux; Zone humide permanente/saisonnière ; Étangs; Basses Terres ; Réservoirs, Réservoirs ; Zone humide et barrage

1.3.2 Récupération de LST

- **Conversion de comptes numériques en rayonnement spectral**

Les signaux reçus par les capteurs thermiques Landsat sont stockés et représentés sous forme de comptes numériques (DN). L'équation 21 a été utilisé pour convertir les bandes du spectre infrarouge thermique Landsat TM et Landsat OLI en rayonnement spectral (TOA) (***Markham and Barker, 1986 ; Thome et al.1997; Chander et al.2002; Chander et Markham 2003***) :

$$L(\lambda) = B + G * DN \qquad \textit{Equation 21}$$

Où :
-L (λ) est la luminance au niveau du capteur (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1}),

-DN est un nombre ou compte numérique (la valeur du pixel),

-G est la pente de la luminance selon l'équation 23,

-B (l'ordonnée à l'origine de la luminance selon l'équation 22) représente les coefficients de conversion DN (***Landsat Project Science Office, 2002***).

B et G sont exprimés comme suit :

$$B = Lmin - (Lmax - Lmin / Qmax - Qmin) * Qmin \qquad \textit{Equation 22}$$

$$G = (Lmax - Lmin / Qmax - Qmin) \qquad \textit{Equation 23}$$

Où, B = biais, G = gain. Lmax et Lmin sont fournis dans le fichier Meta. Qmax est la valeur de pixel calibrée quantifiée maximale correspondant à Lmax. Qmin est la valeur de pixel calibrée quantifiée minimale correspondant à Lmin.

- **Conversion de la radiance spectrale (Lλ) en température de luminosité au niveau du capteur (Tsensor)**

La luminance spectrale a été convertie en température de luminosité du capteur en °C à l'aide de l'équation. 4 (***Chander et Markham, 2005***).

$$TB = K2 / ln(K1/\lambda 1 + 1) - 273.15 \qquad \textit{Equation 24}$$

Où T est la température de luminosité au niveau du capteur en Kelvin (K), K1 et K2 pour B6 et B10 caractérise les constantes d'étalonnage avant le lancement (***Chakraborty et al.2015***).

Pour Landsat TM, K1 est 607,76 et K2 est 1260,56 ; Pour Landsat OLI : K1 est 774,8853 et K2 est 1321,0789 (Wm-²sr-1µm-1).

- **Récupération de l'émissivité de la surface terrestre (LSE)**

Selon ***Dash et al. (2002)***, l'application de la méthode $NDVI^{THM}$ (Normalized Difference Vegetation Index Thresholds Method) est l'une des méthodes de calcul d'émissivité les plus conçues. Outre l'estimation de la LSE, des erreurs comprises entre 0,2 et 1,2 K pour les valeurs de LST aux latitudes moyennes en été, et entre 0,8 et 1,4 K en hiver pour une émissivité de 0,98 et à 0 km au niveau du sol peuvent être retenues (***Weng et al.2004***). Le NDVI est l'indice de végétation le plus largement utilisé et a été utilisé pour caractériser les types de végétation sur la base de valeurs spectrales. C'est la méthode la plus simple et la plus opérationnelle utilisée pour estimer LSE. Le NDVI a été défini à l'aide de l'équation 5 (***Rouse et al.1974, Effat et Hassan, 2014***).

$$NDVI = (NIR - RED) \,/\, (NIR + RED) \quad \textit{Equation 25}$$

$$NDVI_{TM} = (\rho band4 - \rho band3)/\,(\rho band4 + \rho band3) \quad \textit{Equation 26}$$

$$NDVI_{OLI} = (\rho band5 - \rho band4)/\,(\rho band5 + \rho band4) \quad \textit{Equation 27}$$

Où : ρband3 et ρband4 sont respectivement la réflectance spectrale de la bande rouge (Band 3) et de la bande proche infrarouge (Band 4) pour le Landsat-5 TM et ρband4 et ρband5 sont respectivement la réflectance spectrale de la bande rouge (Band 4) et bande proche infrarouge (bande 5) pour le Landsat-8 OLI. Le NDVI est la base du calcul de l'émissivité dans trois cas différents, comme indiqué par l'Equation 8 (***Sobrino et al.2004; Skokovic et al.201***4).

$$\begin{cases} 0.937 \quad NDVI<0.2 \\ \varepsilon = \varepsilon v * Pv + \varepsilon s\,(1- Pv) + d\varepsilon \quad 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \quad \textit{Equation 28} \\ 0.986 \quad NDVI > 0.5 \end{cases}$$

Où εv est l'émissivité du couvert végétal et εs est l'émissivité du sol nu; dans cet article εv= 0,986 et εs =0,973, Pυ est la proportion de végétation obtenue selon l'Equation 29 (***Carlson et Ripley, 1997***).

$$Pv = [(NDVI - NDVIs)/\,(NDVIv - NDVIs)]^{2} \quad \textit{Equation 29}$$

Où NDVIs est la valeur minimale de NDVI pour le sol nu sur la région d'intérêt et NDVIV est le NDVI le plus élevé attendu pour un pixel entièrement végétalisé. Le dε dans l'équation 10 représente l'effet de la répartition géométrique des surfaces naturelles ainsi que des réflexions internes; il s'exprime comme suit:

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon s)\,(1 - PV)\,F\varepsilon v \quad \textit{Equation 30}$$

F est un facteur de forme supposant diverses distributions géométriques avec une valeur moyenne de 0,55 (***Sobrino et al.2004 ; Alsultan et al.2005***). Si NDVI < 0,2, le pixel est considéré comme un sol nu, la valeur d'émissivité moyenne utilisée dans cette étude était de 0,97. Dans ce cas NDVI > 0,5, le pixel est considéré comme entièrement végétalisé, et une valeur constante pour l'émissivité (ε) est supposée ; généralement de 0,99. Si le NDVI > 0,2 et < 0,5, un mélange de sol nu et de végétation constitue le pixel, et le LSE est calculé selon :

$$\varepsilon = \varepsilon v \times Pv + \varepsilon s \times (1 - PV) + dw \quad \textit{Equation 31}$$

- **Calcul de la température de la surface terrestre (LST)**

LST peut facilement être acquis sur une grande surface en utilisant diverses technologies RS thermiques (***Gillespie et al.1998; Qin et al.2001; Jiménez et Sobrino, 2003***). Elle a été utilisée dans cette étude plutôt que la température de brillance. L'équation de transfert radiatif (RTE), la première méthode de l'algorithme monocanal (SC), s'est avérée être la méthode la plus précise pour extraire le LST d'un seul canal thermique (***Sobrino et Raissouni, 2000; Dash et al.2002 ; Jiménez-Munoz et al.2009 ; Yu et al.2014***). Il a été utilisé pour obtenir la répartition spatiale des LST et son évolution entre 2007 et 2017 dans la région de Nador.

La méthode SC adoptée nécessite un certain nombre de paramètres atmosphériques, qui sont généralement dérivés du transfert radiatif MODTRAN. Pour cela, le calculateur de paramètres de correction atmosphérique en ligne disponible en ligne à l'adresse http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/ a été adopté (***Barsi et al.2005***).

La température de surface a été déduite des images Landsat-5 TM de la bande thermique 6 et de la bande infrarouge thermique Landsat-8 TIRS OLI + (TIR) avec sa résolution spatiale, comme le montre le tableau 23. Dans notre étude, seule la bande 10 a été sélectionnée. Cela peut s'expliquer par l'avis d'étalonnage de l'US Geological Survey (USGS) indiquant que les données de la bande 11 du capteur infrarouge thermique Landsat-8 (TIRS) présentaient de grandes incertitudes. Il a été suggéré que les données TIRS de la bande 10 soient utilisées comme un spectre unique en raison de sa transmissivité atmosphérique élevée pour l'estimation du LST (***Yu et al.2014***). Afin d'être en relation équivalente avec les données Landsat-5 TM et Landsat-8 OLI, la dimension pixel de chaque donnée TIR a été rééchantillonnée à une résolution spatiale de 30 m. Enfin, en utilisant une seul bande thermique TIRS (bandes 6 et 10) pour Landsat TM 5 et OLI 8, les LST ont été calculés à l'aide de l'équation suivante :

$$Lsensor, \lambda = [\varepsilon \lambda B \lambda * (Ts) + (1 - \varepsilon \lambda) * Latm, \lambda \downarrow] * \tau \lambda + Latm, \lambda \uparrow \quad \textit{Equation 32}$$

Ou : *Lsensor* est le sommet du rayonnement atmosphérique (TOA), ε est l'émissivité de la surface terrestre, *B (Ts)* est le rayonnement du corps noir donné par la loi de Planck et *Ts* est le LST, *Latm* ↓ est le rayonnement atmosphérique descendant, τ est la transmissivité atmosphérique totale entre la surface et le capteur et *Latm* ↑ est le rayonnement atmosphérique ascendant.

Cependant, à l'aide du logiciel MODTRAN et d'une suite d'algorithmes d'intégration, les paramètres atmosphériques *τ, Latm* ↓ et *Latm* ↑ sont dérivés. Ces paramètres calculés peuvent

être appliqués à des images thermiques mono bande pour dériver une température cinétique à la surface pour tous les pixels de la scène.

Par conséquent, à partir des équations. 12, il est possible de trouver Ts par inversion de la loi de Planck :

$$Ts = [C1 / \lambda iln * (C2 / (\lambda i^5 (Lsensor, \lambda - Latm \uparrow - \tau\lambda * (1 - \varepsilon\lambda) * Latm \downarrow) / * \tau\lambda \varepsilon\lambda) + 1)] \quad \textit{Equation 33}$$

Où, Ts est la température de surface du sol, λi est la longueur d'onde effective de la bande i, C1 est 14 387,7 μm. C2 est 1,19104 * 108 W.μm^4.m^{-2}.sr^{-1}. Grâce aux données de radiance thermique mesurées par le capteur TIR, ainsi qu'aux paramètres atmosphériques.

La LST a été établi et classé en six classes pour présenter les gradients de température dans chaque zone de la région de Nador. La classification adoptée s'est basée sur un codage LST de type centroïdes pour montrer l'importance des changements de température de surface observés dans la région de Nador pour les années 2007 et 2017 (Tableau 27).

Tableau 26: Classes et descriptions des gradients de température des centroïdes LST

Centroïdes LST	Description	Classes LST (° C)	Degré
LLA	Faible LST	15 - 20	Faible
NLA	LST normales	20 - 25	Modéré
HLA	LST élevée	25- 30	Elevée
VHLA	LST très élevées	30 - 35	Très élevés
EHLA	LST extrêmement élevées	≥ 35 °C	Extrême

- **Calcul de l'indice construit de différence normalisée modifiée (MNDBI)**

La modélisation des espaces bâtis est d'une importance capitale dans les études d'impact de l'urbanisation sur la dynamique des paysages naturels (***Hao et al.2015***). En effet, la cartographie des terres urbaines est essentielle pour la prévision du ruissellement des bassins versants et d'autres applications de planification (***Small, 2003***). Suivre son évolution avec la technologie RS dans le temps au détriment de la zone non urbaine est un indicateur clé de l'importance du changement urbain et de la dégradation de l'environnement (***Guindon et al.2004 ; Bhatta, 2009 ; Griffiths et al.2010 ; Xu, 2008***).

- **Calcul de l'indice modifié de construction par différences normalisées (MNDBI) par la méthode d'extraction de zone bâtie**

La méthode NDBI a pu extraire les zones construites avec une précision raisonnable lorsqu'elle a été appliquée aux données Landsat-5 TM (***Zha et al.2003 ; He et al.2010***). Cependant, cette méthode a montré ces limites lorsqu'elle est appliquée aux données Landsat-8 OLI des zones urbaines. Pour résoudre ce problème, la méthode BAEM d'extraction de la surface bâtie basée sur les indices NDBI, NDVI et MNDWI (***Bhatti et Tripathi, 2014***) a été proposée dans cette étude. La méthode utilisée a montré que les faibles corrélations entre NDBI, NDVI et MNDWI indiquent une confusion spectrale réduite et produisent un meilleur contraste entre les différents types de couverture terrestre dans la sortie. La méthode s'exprime selon l'équation 34 :

$$MNDBI_{BAEM} = NDBI - (NDVI + MNDWI) \quad \textit{Equation 34}$$

- **Calcul de l'indice construit de différence normalisée (NDBI)**

L'indice NDBI basé sur la cartographie à grande vitesse des zones urbaines et bâties a été adopté (***Zha et al.2003***). Néanmoins, cet indice ne permet pas de vérifier la répartition des surfaces bâties par rapport aux terres nues (***He et al.2010***).

$$NDBI = (SWIR - NIR)/(SWIR + NIR) \quad \textit{Equation 35}$$

$$\mathrm{NDBI_{TM}} = (\rho band5 - \rho band4) / (\rho band5 + \rho band4) \quad \textit{Equation 36}$$

$$\mathrm{NDBI_{OLI}} = (\rho band7 - \rho band5) / (\rho band7 + \rho band5) \quad \textit{Equation 37}$$

Où : ρband 5 et ρband4 sont respectivement la réflectance spectrale de la bande infrarouge à ondes courtes 1 (SWIR 1) et la bande proche infrarouge (NIR) pour le Landsat-5 TM et ρband7 et ρband5 sont respectivement la réflectance spectrale de l'infrarouge à ondes courtes bande 2 (SWIR 2) et la bande proche infrarouge (NIR) pour le Landsat-8 OLI.

- **Calcul de l'indice de différence d'eau normalisé modifié (MNDWI)**

L'indice NDWI était fortement lié à la teneur en eau de la plante ce qui explique son pouvoir comme indicateur de stress hydrique de la plante (***Gillespie et al.1998***). Malgré son importance, le NDWI a montré ces limites. Le MNDWI a réussi à distinguer les zones de coexistence des masses d'eau, à savoir les lacs et les oasis (***Xu, 2006***). Considéré comme l'un des indices les plus utilisés pour diverses applications, à savoir la cartographie des eaux de surface, les analyses LUCC et la recherche écologique (***Duan et Bastiaanssen, 2013)***. De nombreux chercheurs ont largement utilisé cet indice pour extraire des informations sur les masses d'eau. Le MNDWI peut être exprimé selon l'équation 38 (***Davranche et al.2010 ; Tebbs et al.2013).***

$$\mathrm{MNDWI} = (\mathrm{GREEN} - \mathrm{SWIR}) / (\mathrm{GREEN} + \mathrm{SWIR}) \quad \textit{Equation 38}$$

$$\mathrm{MNDWI^{TM}} = (\rho band2 - \rho band5)/ (\rho band2 + \rho band5) \quad \textit{Equation 39}$$

$$\mathrm{MNDWI_{OLI}} = (\rho band3 - \rho band7)/ (\rho band3 + \rho band7) \quad \textit{Equation 40}$$

Où ρband2 / ρband5 sont respectivement la réflectance spectrale de la bande verte (bande 2) et la bande infrarouge intermédiaire (bande 5) pour Landsat-5 TM et ρband3 / ρband7 est la réflectance spectrale de la bande verte (bande 3) et la bande courte bande infrarouge (bande 7) pour le Landsat-8 OLI. Par rapport au NDWI, le contraste entre l'eau et les terres urbanisées du MNDWI sera considérablement élargi en raison de la valeur croissante des caractéristiques de l'eau et de la baisse de la valeur des terres urbanisées de positive à négative.

L'amélioration de la qualité de l'eau dans une image du MNDWI permet une extraction plus précise des éléments d'eau libre, des terres désertiques, des sols salins et de la végétation de toutes les valeurs négatives et est ainsi supprimée (***Zhang et al.2015***).

2. Le modèle du Centre d'activité régional du programme d'action prioritaire (PAP/CAR)

Pour connaitre la répartition et l'ampleur géographique du phénomène de l'érosion hydrique, le Plan d'Action Prioritaire du Centre d'Activités Régionales (***PAP/CAR, 1989***) à entamée une action prioritaire intégré intitulée « *Promotion de la protection des sols en tant que composante essentielle de la protection de l'environnement dans les bassins et zones côtières méditerranéens*». Cette action a été entreprise dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée (PAM), en collaboration avec la Direction générale de la conservation de la nature (DGCONA) du ministère espagnol de l'Environnement et la Division de la mise en valeur des terres et des eaux (AGL) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Le modèle PAP/CAR de cartographie, d'évaluation et de mesures qualitative de la sensibilité à l'érosion hydrique conçu pour la gestion intégrée des zones côtière, s'appuie sur les liens et l'interdépendance des facteurs causaux de risque (Lithologie, pente, couvert végétal et densité de couvert, Occupation des sols) pour appréhender ce phénomène. La méthode a été choisie pour étudier l'interaction des facteurs causaux du risque.

La version classique du modèle (***PAP/CAR, 1998 ; PAP/CAR, 1998a ; PAP/CAR, 2000***) dans sa partie technique préconise une approche méthodologique, dont ces opérations ont été regroupées en une approche cartographique de plusieurs opérations de croisement, de traitement et d'analyse des jeux de données en trois phases complémentaires :

- Une phase prédictive basée sur la cartographie et la superposition de certains facteurs de l'érosion.

- Une phase descriptive basée sur la cartographie des formes réelles de l'érosion.

- Une phase d'intégration des résultats des deux phases précédentes pour réaliser une carte consolidée de l'érosion hydrique et pour déduire les tendances futures de l'évolution du sol.

2. 1 Approche prédictive

L'approche prédictive consiste à identifier, évaluer et intégrer certains paramètres physiques afin de déterminer des informations sur l'état actuel de la dégradation des terres. Elle conduit à la cartographie d'unités homogènes d'états érosifs. Cette approche est construite sur le traitement des données selon une séquence de 7 opérations (Figure 44) :

- **Opérations 1 et 2** : Élaboration de la carte des pentes et de lithofaciès
- **Opération 3** : Carte d'érodibilité par superposition de la carte de lithofaciès et de la carte des pentes ;
- **Opérations 4 et 5** : Développement des cartes d'occupation du sol et densité de couverture ;
- **Opération 6** : Carte de protection des sols par superposition de la carte d'occupation du sol et de la densité de couverture ;
- **Opération 7** : Cartographie des états érosifs par superposition de la carte d'érodibilité et de protection des sols.

2.2 Approche descriptive

La deuxième approche est considérées comme complémentaire à la phase prédictive. C'est la phase de l'évaluation de la susceptibilité. Elle consiste à la description et la délimitation cartographique des degrés atteints pour chaque forme et processus d'érosion se produisant sur le terrain pour l'élaboration de la carte de l'érosion réelle.

Cette approche permet d'identifier deux grandes catégories de milieux géographiques : les milieux morphologiquement stables non affectés par les processus de l'érosion, et les milieux instables, affectés par divers processus de l'érosion ; la procédure combinée d'observation de terrain et d'identification des processus se déroulera en trois opérations :

- **Opération 1 :** Caractérisation des degrés de risque/potentiel d'érosion des milieux stables/instables
- **Opération 2 :** Identification et description des types de processus érosifs dominants, de leur intensité relative et des tendances évolutives pour les milieux instables.
- **Opération 3 :** Identification et évaluation des particularités locales telles que les principales zones sujettes à l'érosion ou les facteurs causaux sont plus spécifiques.

2. 3 Approche de consolidation

Le résultat principal de cette approche est la carte consolidée de l'érosion hydrique obtenue par la superposition et la consolidation des informations qualitatives issues de l'approche prédictive et descriptive. Cette approche s'avère intéressante car c'est à travers elle qu'on va étudier et essayer de déterminer les facteurs causaux.

La dernière étape consiste à valider les résultats en superposant les deux cartes obtenues pour produire la carte de susceptibilité contenant des informations potentielles et probabilistes sur les différents aspects du phénomène d'érosion.

L'intersection des paramètres d'entrée consiste à les relier selon des matrices définies par les directives PAP/CAR. La logique établie dans la réalisation des matrices PAP/CAR a été obtenue grâce à des études menées au niveau de l'ensemble bassin méditerranéen pour montrer les différentes corrélations possibles entre les paramètres en jeu (***PAP/RCA, 1989; PAP/CAR, 1992 ; PAP/CAR, 1996 ; PAP/CAR, 1997 ; PAP/CAR, 1998 ; PNUE/PAM/PAP, 2000 ; PAP/RAC, 2000 ; Aboulabbas et al.2005 ; Attia et al.2005 ; Tahouri, 2014 ; Mesrar et al.2015 ; Tahouri et al.2019***).

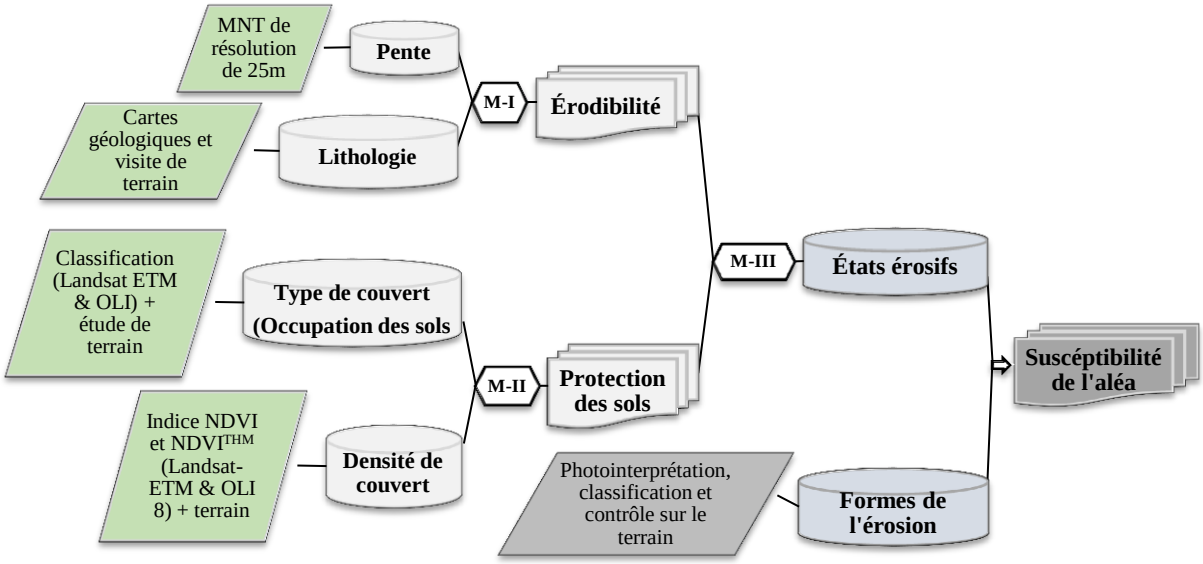


Figure 40: Modèle conceptuel du modèle PAP/CAR classique (***PAP/CAR, 1998 ; 2000***)

Compte tenu de l'influence d'autres facteurs d'érosion, l'intégration des paramètres nouveaux notamment des paramètres climatiques, à savoir l'érosivité des précipitations, l'exposition des pentes, l'humidité du sol et la température de surface nous ont paru bénéfiques et apporteront leur contribution à l'amélioration du modèle. Nous décrirons les détails dans le chapitre VI (Modélisation par les directives du PAP/CAR modifié).

3. Modélisation par le modèle de quantification de l'érosion RUSLE

L'érosion des sols continue de progresser à un rythme élevé malgré l'attention qu'elle attire et son importance dans la dégradation de l'environnement (***Borrelli et al.2021 ; Bridges et Oldeman, 1999 ; FAO, 2022***). La prédiction de la susceptibilité des sols à l'érosion et la vérification des principales sources d'érosion dans une zone constituent le début du choix de stratégies appropriées pour le contrôle de l'érosion et les mesure de conservation et de gestion des ressources naturelles (***Sadeghi et al.2019 ; Auerswald et al.2014***).

La quantification de l'érosion hydrique des sols est un outil efficace pour évaluer l'efficacité des stratégies adopté pour la gestion agricole. L'un des défis de la modélisation de l'érosion est l'accès aux données d'entrée. Le manque de bases de données appropriées pour quantifier l'érosion des sols affecte négativement les informations nationales cohérentes sur l'érosion dans de nombreux pays (***Garcia-Ruiz et al.2015***). Une base de données d'entrée appropriée est importante pour un étalonnage correct du modèle afin de produire une évaluation précise de l'érosion (***Batista et al.2019***). Actuellement, il existe peu de bases de données d'entrée régionales et mondiales mises à jour périodiquement pour soutenir l'évaluation de l'érosion des sols (***Liniger et Critchley, 2007 ; Panagos et al.2017 ; Xiong et al.2019***).

Selon ***Auerswald et al. (2014)***, le modèle le plus souvent utilisé pour les prévisions d'érosion des sols dans le monde est l'équation universelle de perte de sol (USLE de ***Wischmeier et Smith, 1978***). C'est un modèle empirique d'érosion du sol qui est utilisé le plus souvent par les professionnels et les techniciens pour prédire la perte de sol due à l'érosion

hydrique (***Bagarello et al.2012 ; Vaezi et al.2017***). Selon ***Sadiki (2005)***, l'objectif de (***Wischmeier et Smith, 1978***) était d'établir un modèle empirique Baptisé USLE (Universal Soil Loss Equation) de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production. Le modèle USLE et son successeur "Revised USLE" ou RUSLE pour une meilleure adaptation aussi bien au contexte climatique et géologique à l'échelle du bassin versant au lieu de la parcelle. Selon Williams (1985), l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE) est la technologie de base dans un certain nombre d'autres modèles de modélisation de l'érosion qui présente plus d'éfficacité (***Hession et Shanholts, 1988; Renard et al.1991 ; Auerswald et al.2014 ; Renard et al.2017).***

Les données d'entrée pour la quantification à grande échelle de l'érosion des sols à l'aide de modèles de type USLE peuvent être regroupées en cinq catégories : données sur le climat, le sol, le relief, la couverture du sol et la gestion du sol. Ces catégories correspondent aux facteurs d'érosion dans les modèles d'érosion (***Zachar, 1982 ; Morgan et Quinton, 2001***).

1. **Le climat** : C'est l'un des principaux moteurs de l'érosion des sols. Les données climatiques pour modéliser l'érosion sont les précipitations, le vent, la température de l'air, l'évaporation et le rayonnement solaire. Les modèles d'érosion hydrique utilisent des données sur les précipitations pour estimer le facteur d'érosivité des précipitations (***Yin et al.2017***), tandis que les modèles d'érosion éolienne utilisent le vent, la température, l'évaporation et le rayonnement solaire pour estimer les facteurs météorologiques dans les modèles (***Fryrear et al.2000***).

2. **Le sol** : C'est le matériau érodé dans le processus d'érosion. L'érodibilité du sol est estimée à l'aide de données d'entrée telles que la texture, la structure, la teneur en matière organique, les agrégats secs, la teneur en carbonate, la teneur en humidité, la perméabilité du sol et les classes de drainage, et la densité apparente. Il existe de nombreux sous-modèles dans la littérature pour estimer l'érosion hydrique, éolienne et due au travail du sol (***Lobb et Kachanoski, 1999 ; Benavidez et al.2018 ; Jarrah et al.2020***).

3. **Le relief** : Fournit le gradient pour déplacer le sol érodé. Il est représenté par les paramètres de pente et de longueur de pente. Le modèle numérique de terrain (DEM) est la principale donnée d'entrée pour estimer la pente et la longueur de pente (***Hrabalikova et Janeček, 2017 ; Kruk et al.2020***).

4. **La couverture du sol** : elle protège le sol des forces érosives des agents d'érosion. L'utilisation et l'occupation des sols, la gestion des cultures, la rugosité de la surface et les images de télédétection sont les principales données d'entrée pour les caractéristiques de la couverture du sol (***Benavidez et al.2018 ; Fryrear et al.2000***).

5. **La gestion des sols** : représente l'influence humaine sur l'érosion des sols. Il est indexé par les pratiques de conservation et les opérations de travail du sol (***Hudson, 2015***).

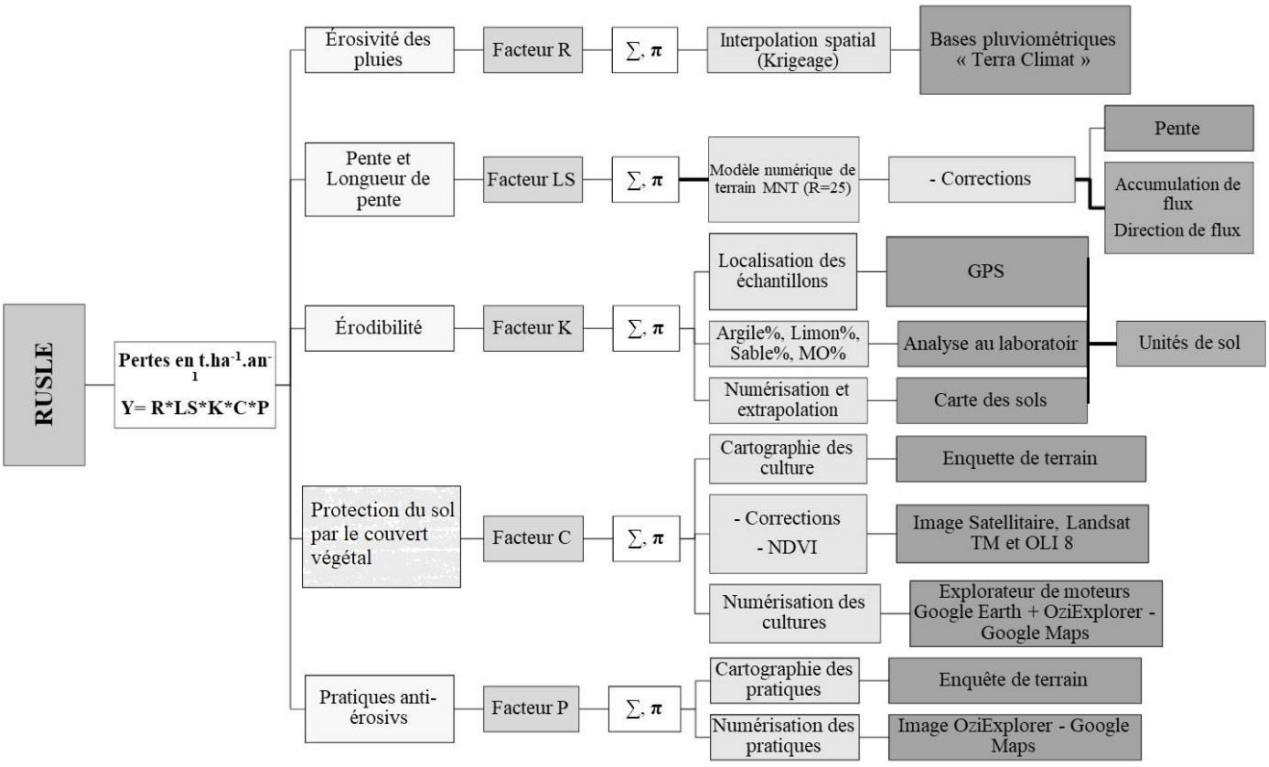


Figure 41: Organigramme méthodologique RUSLE adopté

Le modèle USLE et RUSLE sont des équations empiriques qui quantifient l'érosion annuelle moyenne du sol en t ha^{-1} an^{-1}. Que ce soit le modèle USLE ou RUSLE, les deux sont liés au facteur d'érosivité de la pluie (R), au sol facteur d'érodibilité (K), facteur de longueur et d'inclinaison de pente (LS), facteur de protection du sol par le couvert végétale (C) et le facteur de pratiques antiérosives (P) (***Wang et al.2001***).

Les facteurs de l'érosion citée ont été modélisés et extrapolés spatialement sur la base des algorithmes mathématiques par modélisation en se basant sur les processus cartographiques de télédétection et SIG. L'objectif est de générer des jeux de données raster de chaque facteur étudié. Ensuite, les couches à cinq facteurs ont été multipliées selon l'équation RUSLE (ci-dessous) pour quantifier la perte de sol annuelle moyenne du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

$$\boldsymbol{Y = R \times K \times LS \times C \times P} \qquad \textit{Equation 40}$$

Où :

- **Y ($t^{-1}.ha^{-1}.an^{-1}$)** : Perte annuelle moyenne de sol par unité de superficie ;
- **R ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.an^{-1}$)** : Facteur d'érosivité des précipitations/ruissellement qui correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 min consécutives ;
- **K ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$)** : Facteur d'érodibilité du sol signifie le taux de perte de sol de l'érosivité spécifique des précipitations du sol par unité mesurée dans une parcelle standard. Il dépend de la granularité, de la quantité de matière organique de la perméabilité et de la structure du sol ;

- **LS (sans unité)** : Représente le facteur d'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m) ;
- **C (sans unité)** : Couverture et facteur de gestion ;
- **P (sans unité)** : Facteur de pratique antiérosive et de soutien des sols.

Nous décrirons le modèle RUSLE adopté pour la quantification de l'érosion des sols au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) en détails dans le chapitre VII.

4. Analyses géostatistique multivariée de l'érosion et des facteurs causaux

Pour identifier les principaux facteurs qui contrôlent l'érosion au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bou Areg), des tests géostatistiques ont été adopté pour l'analyse à l'échelle du bassin versant (***Matheron, 1989***). Ces analyses portent sur l'étude de corrélation, l'analyse de variance, la régression multiple et l'analyse de composantes principales (***Wackernagel, 2003***). Ces différentes analyses géostatistiques vont permettre, une définition globale des principaux facteurs qui contrôle l'érosion. Aussi que pour déterminer s'il existe des différences significatives au niveau des variables analysées ou en d'autres termes déterminer les valeurs d'hypothèses nulles que le test rejette avec des de $P<0,05$ et $P<0,01$ et des intervalles de confiance 95% et 99%. L'examen des relations entre les différentes variables physico-chimiques du sol, des indices de télédétection (LST, NDVI, MNDBI, MNDWI et DEM) et les facteurs de l'érosion que ça soit pour le modèle PAP/CAR et RUSLE a été faite à travers l'étude de corrélation, en utilisant l'indice de corrélation de Pearson qui mesure la force de relation linéaire entre les variables physico-chimiques du sol et l'analyse de régression multiple. L'analyse en composantes principales (ACP) a été menée pour réduire le nombre de variables et de facteurs. Puisque l'ACP réduit les dimensions en révélant plusieurs composants sous-jacents, connus sous le nom de composants principales, ils sont définis comme une combinaison et un regroupement linéaire des variables d'origine.

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour étudier les différences significatives des moyennes de variance des différentes facteurs physiographiques et d'évaluer le pouvoir explicatif des variables du modèle RUSLE.

Deuxième partie:

- **Etude des sols et matériaux mobilisable par l'érosion hydrique du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)**

- **Etude de l'évolution de la température de la surface des sols (LST) et d'occupation/utilisation des terres LULC) par la modélisation et la télédétection**

Chapitre IV: Etude des sols et matériaux mobilisable par l'érosion hydrique du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

I. Lithologie des affleurements géologiques de la province de Nador et du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

La nature lithologique des affleurements rocheux et leur produits d'altération renseigne sur leur degré d'érodibilité. Par conséquent, la reconnaissance de la nature et la quantité des matériaux mobilisables par l'érosion hydrique qu'il soit des matériaux meubles initialement avant leur météorisation ou ameublis par l'altération superficielle ou même transformés en sols. Cela dépend de plusieurs facteurs tels que, la texture, la structure et la cohésion entre les éléments des matériaux mobilisables (***Sadiki, 2005***).

Les matériaux cibles de l'érosion hydrique sont les matériaux meubles, donc il s'avère indispensable de les étudier. La nature lithologique des affleurements a été décrite dans la section "Facteur géologique". Ici nous étudierons leur répartition, leur altération et leur transformation en matériaux meubles facilement mobilisables par l'érosion hydrique ainsi que leur répartition spatiale. Nous visant aussi déterminer leurs quantités relatives au niveau du bassin versant Zenaga, décrire leurs profils sur quelques décimètres de profondeur et de réaliser des cartes exposant la répartition spatiale des différents types de matériaux mobilisables.

1. Répartition des faciès lithostratigraphiques au niveau du bassin versant Zenaga

Le tableau 28 montre la répartition des faciès lithostratigraphiques au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). 21 types de formations étalés sur 10 systèmes et sous-systèmes peuvent être inventoriés. Les alluvions, éboulis, dayas, sebkhas, limons et terrasses limoneuses du Quaternaire récent et actuel, avec 23.97% suivie des Regs et surfaces encroutées Quaternaire moyen et ancien, avec 22.85 %. Ces faciès sont les plus représentatifs datant du Quaternaire. Les faciès des marnes bleues, sables et bancs gréso-calcaires à bioclastes du Tortonien occupent 10.89% suivie par les faciès des séries gréseuses et schisto-gréseuses à Orbitolines du Crétacé inférieur et les conglomérats et cailloutis des couches rouges du Villafranchien, représentent 9.9% et 7.86 % respectivement. Les trachytes, brèches et coulées andésitiques du Miocène avec 6.75%. Les séries schisteux-gréseuses avec des flyschs et les calcaires et marno-calcaires du Jurassique enregistrent 3.3% et 3.25% respectivement. Les faciès les moins représentés sont attribués au Trias. Il s'agit entre autre, d'un Trias généralement intrusif gypseux et salifère (Gypses, marnes, tufs, gneiss) et des faciès des séricitoshistes, avec un pourcentage de 0.68% pour les deux faciès.

Les proportions des superficies des faciès compte tenu de leur distribution à l'intérieur du bassin versant Zenaga montrent que 57% des faciès sont des formations Quaternaires prédisposées à l'érosion hydrique. Le reste soit environ 43% sont des formations plus ancienne et sur lesquelles se développe un sol meuble support de végétation et de culture qu'il faut étudier et caractériser pour pouvoir modéliser et quantifier ses pertes et sa participation pour alimenter les matières en suspension des cours d'eau qui envase les ouvrages hydro-agricoles.

Tableau 28: Répartition des faciès lithostratigraphiques du bassin versant Zenaga (Carte géologique du Maroc 1/50.000)

Ages	% du total	Lithologie	% du total	% du faciès par âge
Actuelle Quaternaire	**57**	Alluvions, éboulis, dayas, sebkhas, Limons, terrasses limoneuses	**23.97**	**42.05**
		Dunes vives ou actuelles	**0.91**	**1.59**
		Formation marine et dunaire consolidées	**0.44**	**0.77**
		Regs, surfaces encroutées	**22.85**	**40.08**
		Conglomérats, cailloutis, couche rouges	**7.86**	**13.78**
		Basaltes ankaratrites	**0.97**	**1.70**
Pliocène	**1.39**	Marnes et conglomérats, sables, colonies coralliennes, diatomites	**1.39**	**100**
Miocène	**20.93**	Trachytes, brèche et coulées andésitiques	**6.75**	**32.25**
		Faciès transgressive ; marno-calcairo-gréseuse avec grès chenalisé, encroutements	**2.56**	**12.23**
		Faciès des marnes bleues, sables et bancs gréso-calcaires à bioclastes	**10.98**	**45.88**
		Faciès transgressive	**0.64**	**3.05**
Crétacé supérieur	**0.3**	Flysch et schistes marneux à Inocérâmes avec faisceaux calcaires à Ammonites et Bélemnites	**0.27**	**90**
		Faciès continental	**0.03**	**10**
Crétacé inférieur	**9.9**	Crétacé inférieur marin et Faciès continental	**9.9**	**100**
Post-Jurassique		Dolérites et Gabbros, localement syénites et Diorites	**0.39**	**100**
Jurassique supérieur	**5.29**	Calcaires et marno-calcaires	**3.25**	**61.43**
		Lias supérieur, Toarcien, Aalénien	**2.04**	**38.56**
Jurassique moyen	**0.81**	Gypses, marnes rouge salifère et gneiss	**0.81**	**100**
Jurassique inférieur	**3.3**	Série schisteux-gréseuse avec des flyschs	**3.3**	**100**
Trias	**0.68**	Trias généralement intrusif gypseux et salifère: Gypses, marnes, tufs, gneiss	**0.34**	**50**
		Permo Trias continental	**0.34**	**50**

2. Résultats des essais de laboratoire

2. 1. Travaux de reconnaissance

La campagne de reconnaissance géotechnique in situ a consisté à faire un relevé visuel des différents faciès lithologiques présents au niveau du bassin versant Zenaga, ainsi qu'au prélèvement d'échantillons des sols pour analyse et identification. Les lieux des prélèvements, leurs coordonnées géographiques, ainsi que les références attribuées pour chaque échantillon prélevé de sol sont données par le tableau ci-après (Tableau 29).

Les échantillons des sols ont été prélevés et choisis en fonction des caractéristiques biogéographiques et pris en considération autant que possible les facteurs qui contrôlent la redistribution des particules des sols : Lithologie, pentes, longueur de pentes, altitudes et utilisation/ occupation des terres et érosivité des pluies (Figure 47). Les échantillons choisie pour calculer l'érodibilité des sols ont été pris au niveau des zones stables, non touchées par l'érosion, ni le dépôt ou perturbées par les pratiques humaines (Figure 45).

Tableau 279: Localisation des sites d'échantillonnages

Lieu de prélèvement	Réf. échantillon	Coordonnées géographiques
Ibouaalouten	OC1	X 714 329; Y 506 430
Wikssane	OM3	X 716 919; Y 504 788
El haddara	IC1	X 737 439; Y 496 751
Tiztoutine	IC2	X 706 865; Y 489 054
Arkmane	OM1	X 742 200; Y 503 286
Afra	NF1	X 722 590; Y 505 758
Sebkha de Bouareg (Joûb Er Roûmi)	RA1	X 732 777; Y 501 277
Selouane	DM1	X 726 607; Y 494 900
Sebkha de Bouareg (Oulad El Bachir)	CA1	X 736 361; Y 500 447
Gourougou (St. Youssef)	DM2	X 723 478; Y 514 518
Gourougou (Tirakaa)	NF2	X 725 482; Y 513 887
Paysage volcanique Tiztotine	RA2	X 704 046; Y 485 406
Boulkhnafess	OM2	X 737 928; Y 491 335

L'évolution des sols au niveau du bassin versant est contrôlée par les processus actif de l'érosion combiné à une surexploitation humaine des terrains en pentes raides. En effets, les sols sont constamment rajeunis et n'atteint pas des stades de développement assez avancés. Les informations relatives aux différentes zones d'échantillonnage des sols ont été illustrées dans la figure 46. Les échantillons des sols ont été nommés selon la nomenclature de la classification de l'occupation des sols (***Weigand et al.2020; Eurostat, 2022***).

- **IC**: Intensive Crops (culture intensive),
- **CA**: Crops and Arboriculture (culture et arboriculture),
- **DC**: Dense Crops (culture dense),
- **RA**: Rainfed agriculture (culture sèche),
- **OC**: Olivier and Cereal (olivier et Céréaliculture),
- **DM**: Dense Matorral (Matorral dense),
- **OM**: Open Matorral (matorral clair).

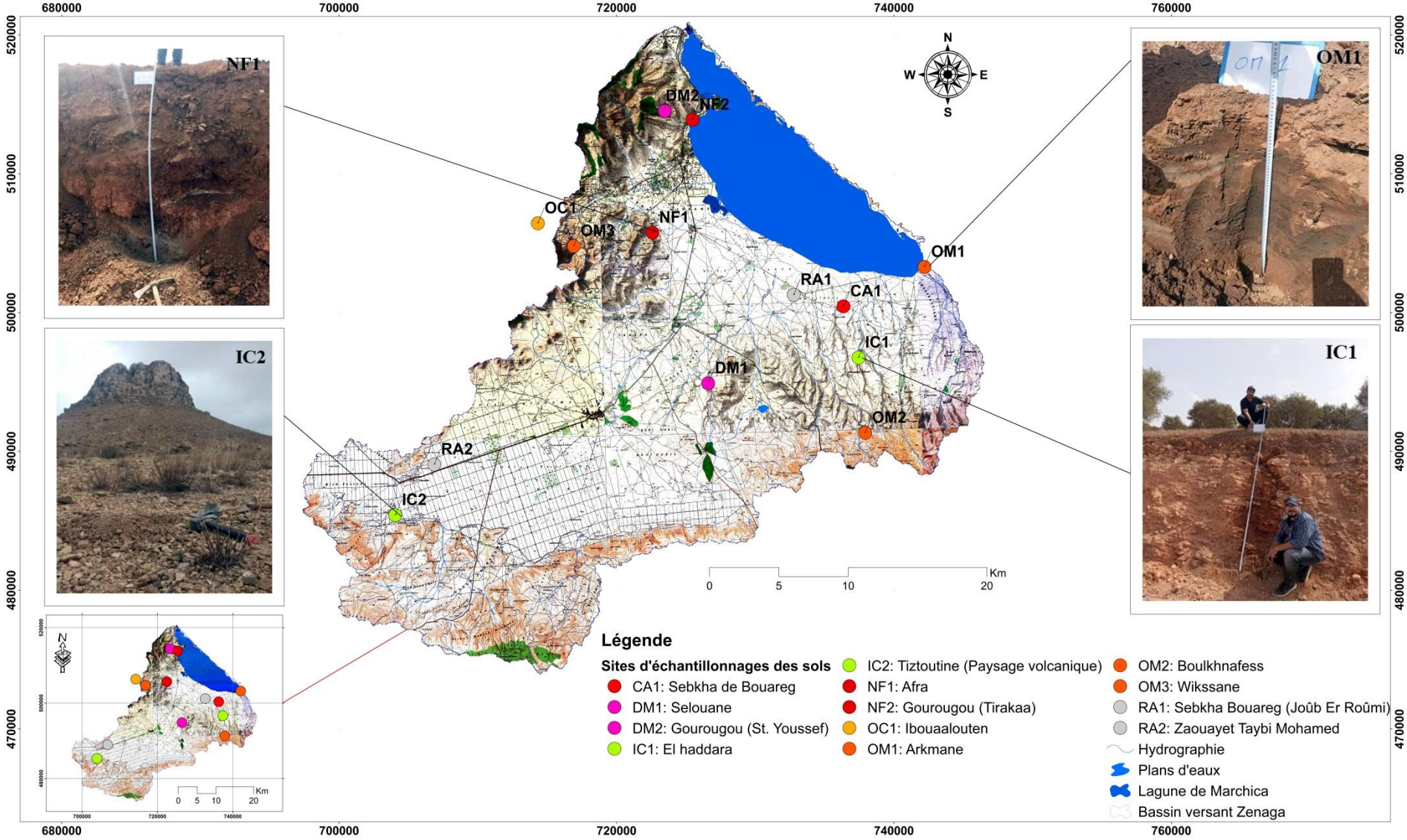


Figure 45: Situation géographique sites de prélèvement et échantillons des sols

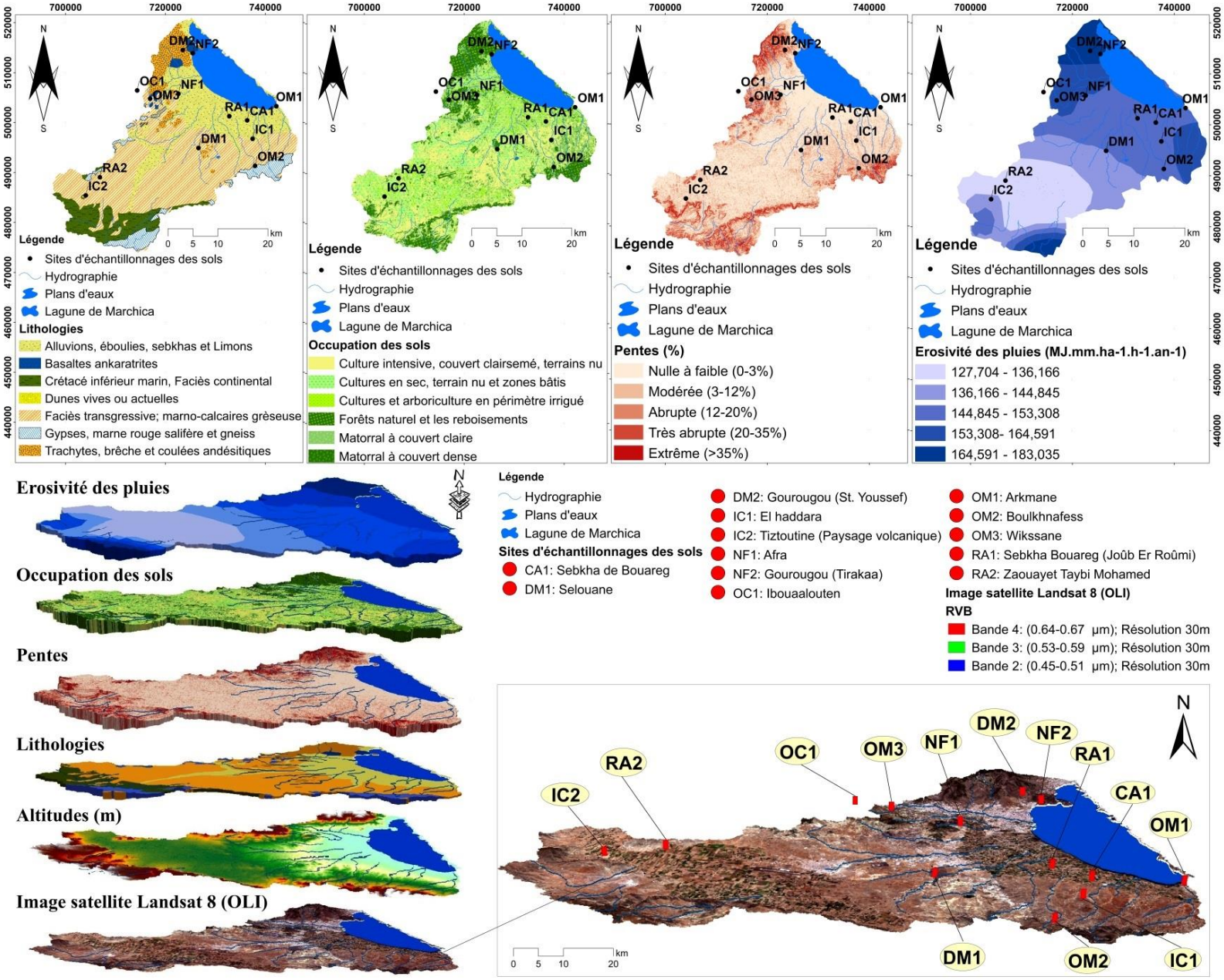


Figure 46: Caractéristiques biogéographiques et situation des sites étudiée dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Boureg)

2. 2. Essais Réalisés

Dans le but de caractériser et d'identifier les sols présents en place, une série d'essais physiques de type Granulométrie, accompagnés de mesures de teneur en eau (W%), la valeur au bleu de méthylène VBS et les limites d'Atterberg ont été réalisés sur les natures des sols rencontrées suivant un programme d'essai bien défini illustré dans le tableau 30.

Tableau 30: Essais de laboratoire réalisés selon les normes en vigueur (norme marocaine et françaises)

Essai	Référence normative
Analyse granulométrique des sols par tamisage	NM 13.1.008
Analyse granulométrique des sols (méthode par sédimentation)	NF P 94-057
Teneur en eau des sols par étuvage	NM 13.1.152
Limites d'Atterberg	NM 13.1.007
Valeur de bleu de méthylène	NM 10.1.141

2. 3. Résultats des essais de laboratoire

Les résultats des essais réalisés sont regroupés dans les tableaux présentés ci-après (Tableau, 31, 32 et 33).

Tableau 31: Résultats des Analyses Granulométriques par tamisage

	Ref.échantillon (Tamisats en %)												
Ø Tamis (mm)	**OC1**	**OM3**	**IC1**	**IC2**	**OM1**	**NF1**	**RA1**	**DM1**	**CA1**	**DM2**	**NF2**	**RA2**	**OM2**
125													
100													
80													
63			100						100				
50			92,7						95,2				
40			92,1	100				100	93,7	100		100	
31,5			91,7	94,8		100		92,2	91,9	98,7	100	97,5	
25			90,5	94		93,5		91	89	95,8	93,5	94	
20	93,4		90,5	93,8		90,7		87,1	84,8	91,5	90,7	93,8	
16	92,5		87,6	93		89	100	83,8	81,1	88,7	89	93,6	
12,5	90,7		83,7	91	100	87,2	97,7	77,6	79,6	84,8	87,2	93,1	
10	85,2		78,9	89,2	99,5	85,3	96,9	70,1	73,5	81,6	85,3	93,1	
8	82,3		75,5	86,1	98,7	83,7	94,3	64,8	69,9	77,7	83,7	92,7	100
6,3	79,5		69,4	83,5	98,1	81,6	91,6	61,4	63,2	73,3	81,6	89,4	99,6
5	76,8		63,7	80,3	97,4	79,9	87	55,5	61	69,5	79,9	84,8	99,5
4	73,4		58,6	75,5	96,6	76	81,7	48,7	58,7	64	76	82,6	99,2
3,15	70,2	100	52,3	69,5	95,9	72,5	77,1	46,7	56,5	61,1	72,5	78,7	98,6
2,5	67,5	99,3	47,6	65,9	95,2	70,2	73	45,1	54	55,8	70,2	75,5	98,5
2	63,4	99	45,5	63	94,2	63,3	69,3	44,3	51,6	50,2	63,3	73	98
1,6	61	98,5	41,6	57,7	93,3	60	65,4	43,3	50	44,6	60	68,2	97,7
1,25	58,8	97,6	38,4	53,6	92	56,4	62	42,4	48,4	39	56,4	65,3	97,1
1	56,5	96	33,5	49,3	90,5	54,2	59,1	42	45,8	36	54,2	62,5	96,7
0,8	54,2	93,2	31,7	46,4	86,1	51,2	56,1	41,2	43,7	33,7	51,2	57,6	96,2
0,63	52,5	90,3	29,8	46	82,8	48,3	53,6	39,6	42,6	31,9	48,3	54,8	94,4
0,5	50,2	86,2	27,4	44,1	75	46,1	50,5	38,6	41,7	27,6	46,1	52,4	92,3
0,4	48,5	82,8	25,5	42,6	70,4	43,9	48,4	38	39,8	25,5	43,9	51	91,3
0,315	46	78,5	22,4	41,7	65,7	41,7	46,2	37	38,2	24	41,7	48,5	90,5
0,25	44	74	21,8	39,9	58,8	39,5	42,5	34,9	36,6	22,4	39,5	46,6	89,6
0,2	42,7	68,5	19,7	38,5	56	38	39	33,2	34,9	20,5	38	44,9	88,1
0,125	36,9	63,2	17,3	38	50,6	36	33,8	29,6	32,9	19,3	36	43,5	86,3
0,1	36,5	61,8	16,4	37,2	48,5	35,8	32,3	28	31,5	18,7	35,8	42,7	85,1
0,08	36	61,5	16	36,9	47,2	33,9	31,8	27,4	31	17,4	33,9	42	83,9
0,063	36	61,4	15,5	36,2	47,1	33,1	31,4	27,4	29,6	16,5	33,1	40,8	83,8

Les courbes granulométriques relatives aux échantillons analysés sont présentées ci-après

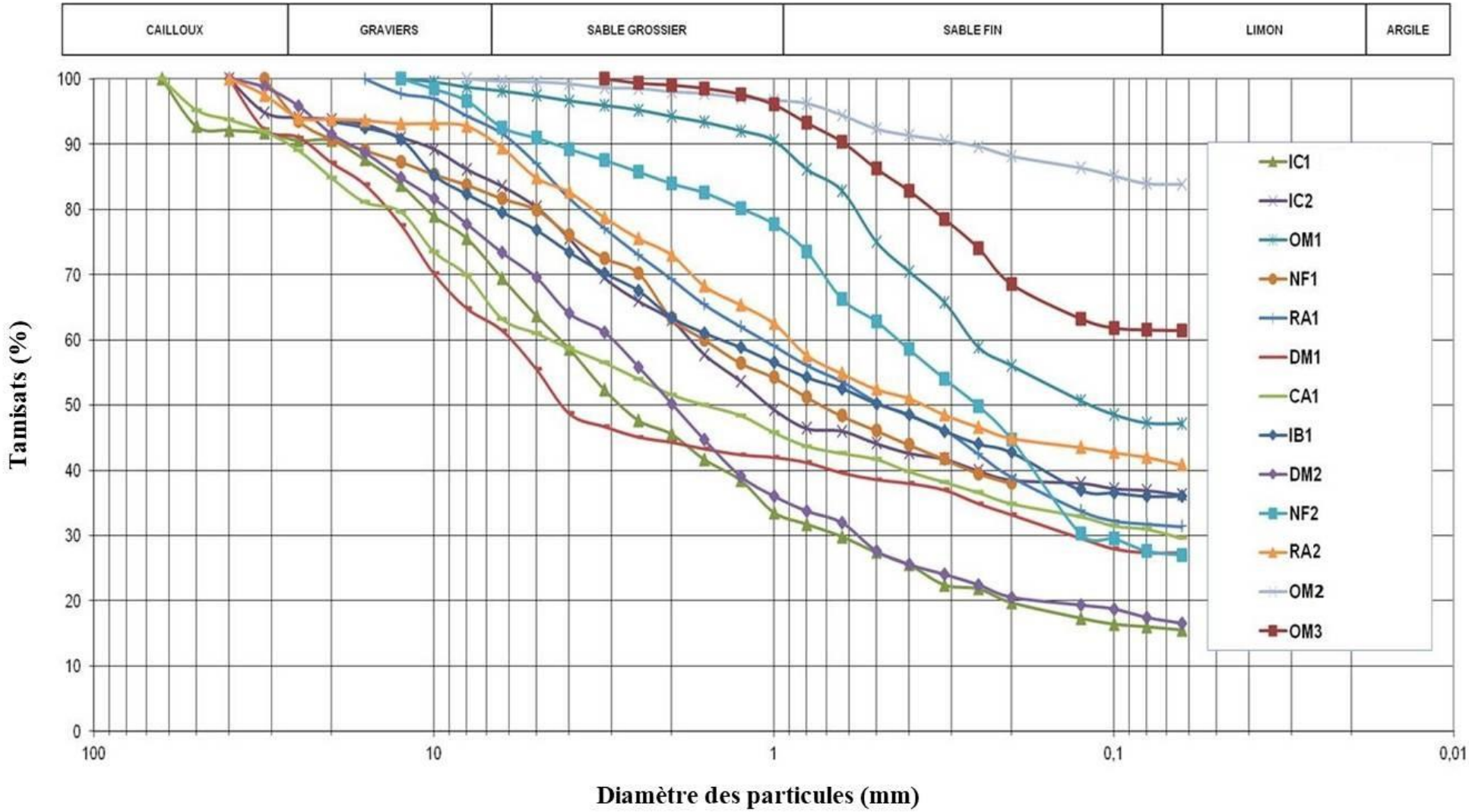


Figure 427: Courbes granulométriques des échantillons des sols (pourcentage du tamisât en fonction du diamètre des particules)

Tableau 32: (a) Résultats des analyses granulométriques par sédimentation ; (b) Résultats des essais d'argilosité - plasticité et de la teneur en Matière organique (MO)

(a) Résultats des Analyses Granulométriques par sédimentation

SEDIMENTOMETRIE (%)			
Réf. échantillon	Analyse granulométrique par sédimentation NF P 94-057		
	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)
OC1	7.6	17.39	79.37
OM3	0.99	15.87	83.13
IC1	44.4	29.55	26.35
IC2	2.6	15.34	82.04
OM1	2.59	32.7	64.69
NF1	3.38	18.69	77.92
RA1	3.62	20.2	76.17
DM1	45.59	27.7	26.96
CA1	3.46	20.15	76.12
DM2	3.81	17.92	78.26
NF2	2.02	19.42	78.54
RA2	1.33	17.89	80.77
OM2	0.76	25.42	73.81

(b) Résultats des essais d'argilosité - plasticité et de la teneur en MO

Lieu de Prélèvement	**PLASTICITE - ARGILOSITE**				**Teneur en matière organique**
Réf. échantillon	Limites d'Atterberg NM 13.1.007			Valeur de bleu de méthylène NM 10.1.141	
	WL (%)	WP (%)	IP	VBS (%)	MO (%)
OC 1	32	20	12	0.6	1.03
OM3	21	11	10	0.8	0.78
IC1	14.50	NM	NP	0.2	0.87
IC2	22	15	7	0.4	1.08
OM1	23	15	8	0.7	0.84
NF1	25	18	7	0.5	0.71
RA1	16	NM	NP	0.3	0.68
DM1	16	NM	NP	0.2	0.76
CA1	21	12	9	0.7	0.70
DM2	14	NM	NP	0.3	0.55
NF2	24	18	6	0.4	1.61
RA2	25	17	7	0.4	0.45
OM2	31	18	13	0.9	0.84

Tableau 33: Classification des sols d'après LCPC -GTR

Lieu de Prélèvement		GRANULARITE				PLASTICITE - ARGILOSITE				Classification des sols		Nature/Famille des sols	
Lieu	Réf. échantillon	Caractéristiques granulaires (%) NM 13.1.008				Limites d'Atterberg NM 13.1.007			Valeur de bleu de méthylène NM 10.1.141				
		> 50mm	> 2mm	< 2mm	≤80 µm	WL (%)	WP(%)	IP	VBS(%)	LCPC	GTR	Appellation	Description
Ibouaalouten	OC1	0	36,6	63.4	36	32	20	12	0.6	GA	A1	Grave argileuse	Sols fins : limons peu plastiques-silts alluvionnaire et sable fin peu évolué
Wikssane	OM3	0	1	99	61.5	21	11	10	0.8	Ap	A1	Argile peu plastique	
El haddara	IC1	7.3	54,5	45.5	16	14.50	NM	NP	0.2	GA	C1B5	Grave argileuse	Sol comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse
Tiztoutine	IC2	0	37	63	36.9	22	15	7	0.4	GA	A1	Grave argileuse	Sols fins : limons peu plastiques-silts alluvionnaire et sable fin peu évolué
Arkmane	OM1	0	5,8	94.2	47.2	23	15	8	0.7	SA	A1	Sable argileux	
Afra	NF1	0	36,7	63.3	33.9	25	18	7	0.5	GA/GL	B5	Grave argilo-Limoneuse	Sol sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux
Sebkha de Bouareg (Joûb Er Roûmi)	RA1	0	30,7	69.3	31.8	16	NM	NP	0.3	SL	B5	Sable limoneux	
Selouane	DM1	0	55,7	44.3	27.4	16	NM	NP	0.2	GL	B5	Grave limoneuse	
Sebkha de Bouareg (Oulad El Bachir)	CA1	4.8	48,4	51.6	31	21	12	9	0.7	GA	C1B5	Grave argileuse	Sol comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse
Gourougou (St. Youssef)	DM2	0	49,8	50.2	17.4	14	NM	NP	0.3	GL	B5	Grave limoneuse	Sol sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux
Gourougou (Tirakaa)	NF2	0	16,1	83.9	27.6	24	18	6	0.4	SA/SL	B5	Sable argilo-Limoneux	
Paysage volcanique Tiztotine	RA2	0	27	73	42	25	17	7	0.4	SA/SL	A1	Sable argilo-Limoneux	Sols fins : limons peu plastiques-silts alluvionnaire et sable fin peu évolué
Boulkhnafess	OM2	0	2	98	83.9	31	18	13	0.9	Ap	A2	Argile peu plastique	Sols fins : sable fin argileux - limon argileux et marne peu plastique

Nota : *NM = non mesurable *NP = Non plastique

2. 4. Interprétations des résultats des essais

Le total des données (Tableau 34), pour les différents sites de prélèvement des sols montre une granulométrie avec une abondance de la fraction fine (< 2 mm) allant jusqu'à 69,13%. La valeur moyenne de la fraction ≤80 µm était de 37,89%.

Tableau 34: Statistiques descriptives (Données quantitatives)

Statistique	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	MO (%)	> 50mm	> 2mm	< 2mm	≤80 µm	WL (%)	WP (%)	IP	VBS (%)
Nb. Obs	133	133	133	133	133	133	133	13	13	13	13	13
Minimum	0,76	15,34	26,35	0,45	0	1	44,3	16	14	0	0	0,20
Maximum	45,59	32,70	83,13	1,61	7,30	55,7	99,00	83,90	32,00	20	13	0,90
1er Quartile	2,02	17,89	73,81	0,70	0	16,1	51,60	27,60	16,00	0	0	0,30
Médiane	3,38	19,42	77,92	0,78	0	36,6	63,40	33,90	22	15,0	7	0,40
3ème Quartile	3,81	25,42	79,37	0,87	0	48,4	83,90	42,00	25	18,00	9	0,70
Moyenne	9,39	21,40	69,54	0,83	0,93	30,8	69,13	37,89	21,88	11,07	6,07	0,49
Variance (n-1)	252,64	31,00	383,19	0,08	5,42	377,6	377,6	333,15	33,17	65,07	21,7	0,05
Ecart-type (n-1)	15,89	5,56	19,57	0,28	2,32	19,43	19,43	18,25	5,76	8,06	4,66	0,22

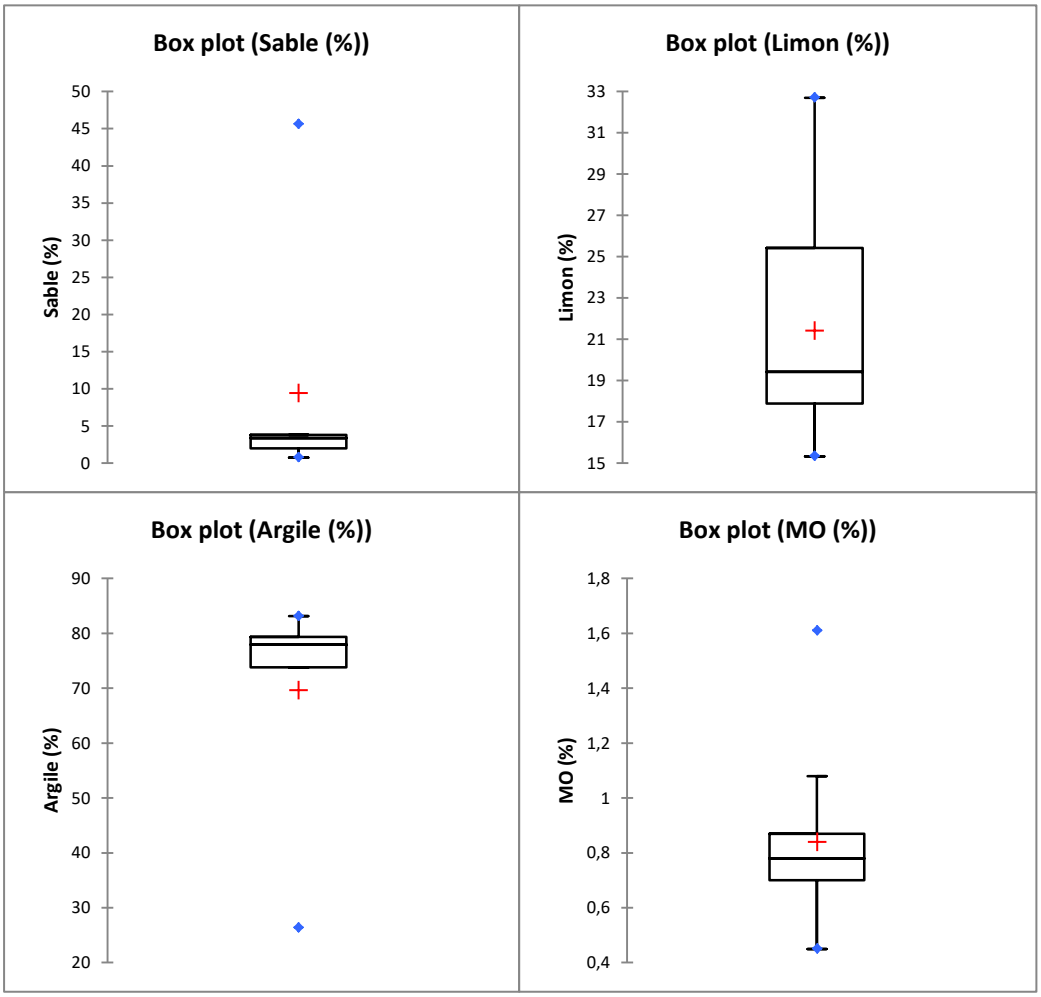


Figure 48 : Statistiques des % d'argiles, % des limons, % des sables et le % de la matière organiques (MO) des principaux sols étudiées

La fraction prédominante est celle des argiles avec une moyenne de 69,54%. La fraction de limons avec une moyenne de 21,40%. La fraction de sables est la moins abondante avec une moyenne de 9,39%. La matière organique enregistre 0,83% avec une fourchette allant de 0.45 à 1.61 % (Figure 49 et Tableau 33). Les pourcentages les plus élevés ont été enregistrés au niveau des localités d'Ibouaalouten, Tiztoutine et Gourougou, au niveau des cultures intensives, des oliviers, des céréaliculture, des forêts et matorrals dans les horizons de surfaces. Les sols ont montré des différences significatives en ce qui concerne les pourcentages de la matière organique (MO), la valeur du bleau de méthylène (VBS), l'indice de plasticité (IP), les limites plasticité et de liquidité (WP et WL). Ces différences sont liées à l'occupation des sols et aux substrats. Les sols cultivés coïncident grossièrement avec des sols qui se développent sur des marnes et la végétation naturelle, forêts et matorrals est surtout développée sur des sols calcimagnésiques, des sols peu évoluée ou des Lithosols.

La reconnaissance géotechnique a montré que les sols testés sont dotés de ce qui suit :

❖ ***IB1 (OC) : Site Ibouaalouten (X 714 329; Y 506 430)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- Une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 36,6%
- ✓ **Élément <2mm : 63%**
- ✓ **Élément <0,08mm :** 36%
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 7,6%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 17,39%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 79,37%

- Une faible à moyenne plasticité (pour un indice de plasticité de l'ordre de IP = 12)

- Une faible argilosité, donnée par la valeur au bleu (VBS= 0,6%)

- Une faible tener en matière organique (MO = 1,03%)

Ce sol se classe dans la catégorie grave argileuse (GA) selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de **nature légèrement graveleuse**, appartient à la famille des **Sols fins** (**limons peu plastiques**) et légèrement **sensible à l'eau**.

❖ ***OM3: Site Wikssane (X 716 919; Y 504 788)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 1 %
- ✓ **Élément<2mm : 99%**
- ✓ **Élément<0,08mm: 61,5%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 0,99%

- **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 15,87%
- **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 83,13%

- une faible plasticité (pour un indice de plasticité de l'ordre de IP = 10,30)

- un faible taux d'argilosité, donnée par la valeur au bleu (VBS= 0,78%)

- une faible tener en matière organique (MO = 0,78%)

Ce sol est classé Ap selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature argileuse peu plastique, appartient à la famille des sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué)

❖ ***EH1(IC1): Site El haddara (X 737 439; Y 496 751)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 7 %
- ✓ Élément >2mm : 54,5 %
- ✓ **Élément <2mm : 45%**
- ✓ **Élément <0,08mm : 16%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 44,4%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 29,55%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 26,35%

- une plasticité non mésurable (non plastique)

- un faible taux d'argilosité, donnée par la valeur au bleu (VBS= 0,2%)

- une faible tener en matière organique (MO = 0,87%)

Ce sol est classé GA selon la classification LCPC et C1B5 selon la classification GTR. Ce sol, de nature grave argileuse, appartient à la famille des sols comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse.

❖ ***IC2-TZ : Site Tiztoutine (X 706 865; Y 489 054)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 37 %
- ✓ **Élément<2mm: 63%**
- ✓ **Élément<0,08mm : 37%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 2,6%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 15,34%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 82,04%

- une faible plasticité (pour un indice de plasticité de l'ordre de IP = 7)

- une faible argilosité donnée par la valeur au bleu (VBS= 0,4%)

- une faible tener en matière organique (MO = 1,08%)

Ce sol est classé GA selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave argileuse, appartient à la famille des sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué).

❖ ***OM1: Site Arkmane (X 742 200; Y 503 286)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0%
- ✓ Élément >2mm : 5,8%
- ✓ **Élément <2mm : 94%**
- ✓ **Élément <0,08mm : 47%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 2,59%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 32,7%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 64,69%

- une faible plasticité (pour un indice de plasticité de l'ordre de IP = 8)

- une argilosité moyenne donnée par la valeur au bleu (VBS= 0,7%)

- une faible tener en matière organique (MO = 0,84%)

Ce sol est classé SA selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable argileux, appartient à la famille des sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué)

❖ ***NF1: Site Afra (X 722 590; Y 505 758)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 36,7 %
- ✓ **Élément<2mm : 63%**
- ✓ **Élément<0,08mm :34%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 3,38%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 18,69%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 77,92%

- **une faible plasticité** (pour un indice de plasticité de l'ordre de IP = 7)

- une faible argilosité donnée par la valeur au bleu = 0,5%

- une faible tener en matière organique (MO = 0,71%)

Ce sol est classé GA/GL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave limono-argileuse, appartient à la famille des Sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux;

❖ ***RA1: Sebkha de Bouareg (X 732 777; Y 501 277)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 30,7 %
- ✓ **Élément<2mm : 69 %**
- ✓ **Élément<0,08mm : 32%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 3,62%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 20,02%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 76,17%

- une plasticité non mesurable (IP = non plastique)

- une faible argilosité donnée par la valeur au bleu = 0,3%

- une faible tener en matière organique (MO = 0,68%)

Ce sol est classé SL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable limoneux, appartient à la famille des sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux;

❖ ***DM1: Selouane (X 726 607; Y 494 900)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 55,7 %
- ✓ **Élément <2mm : 44%**
- ✓ **Élément<0,08mm : 27%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 45,59%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 27,7%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 26,96%

- une plasticité non mesurable (IP = non plastique)

- une faible argilosité donnée par la valeur au bleu = 0,2%

- une faible tener en matière organique (MO = 0,76%)

Ce sol est classé GL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave limoneuse, appartient à la famille des sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux;

❖ ***CA1 : Sebkha de Bouareg (X 736 361; Y 500 447)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 5 %
- ✓ Élément >2mm : 48,4 %
- ✓ **Élément <2mm : 51%**
- ✓ **Élément<0,08mm : 31%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 3,46%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 20,15%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 76,12%

- une faible plasticité (IP = 9)

- une argilosité donnée par la valeur au bleu = 0,7%

- une faible tener en matière organique (MO = 0,70%)

Ce sol est classé GA selon la classification LCPC et C1B5 selon la classification GTR. Ce sol, de nature grave argileuse, appartient à la famille des sols comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse.

❖ ***DM2 : Gourougou (X 723 478; Y 514 518)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 49,8 %
- ✓ **Élément <2mm : 50%**
- ✓ **Élément<0,08mm : 17%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 3,81%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 17,92%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 78,26%

- une plasticité non mesurable (IP = non plastique)

- une argilosité donnée par la valeur au bleu (VBS= 0,3%)

- une faible tener en matière organique (MO = 0,55%)

Ce sol est classé GL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave limoneuse, appartient à la famille des sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux.

❖ ***NF2 : Gourougou (X 725 482; Y 513 887)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- une granulométrie composée des fractions suivantes :

- ✓ Élément >50mm : 0 %
- ✓ Élément >2mm : 16,1 %
- ✓ **Élément <2mm : de 84 %**

- ✓ **Élément<0,08mm : 27%**
  - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 2,02%
  - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 19,42%
  - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 78,54%

- **une faible plasticité (IP = 6)**

- **une argilosité donnée par la valeur au bleu (VBS= 0,4%)**

- **une faible tener en matière organique** (MO = 1,61%)

Ce sol est classé SA/SL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable limono-argileuse, appartient à la famille des sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux.

❖ ***RA2 : Paysage volcanique Tiztoutine (X 704 046; Y 485 406)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- **une granulométrie composée des fractions suivantes :**

  - ✓ Élément >50mm : 0 %
  - ✓ Élément >2mm : 27 %
  - ✓ **Élément <2mm : 73%**
  - ✓ **Élément<0,08mm : 42%**
    - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 1,33%
    - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 17,89%
    - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 80,77%

- **une faible plasticité (IP = 7)** ;

- **une argilosité donnée par la valeur au bleu = 0,4%**

- **une faible tener en matière organique** (MO = 0,45%)

Ce sol est classé SA/SL selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable limono-argileux, appartient à la famille des sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué).

❖ ***OF2 (OM2) : Boulkhnafess (X 737 928; Y 491 335)***

L'analyse de l'échantillon de sol prélevé au niveau de ce site a montré les caractéristiques suivantes :

- **une granulométrie composée des fractions suivantes :**

  - ✓ Élément >50mm : 0 %
  - ✓ Élément >2mm : 2 %
  - ✓ **Élément <2mm : 98%**
  - ✓ **Élément<0,08mm : 84%**
    - **Sables (**entre 0.05 et 2 mm) : 0,76%
    - **Limons** (entre 0.05 et 0.002) : 25,42%
    - **Argiles** (inférieur 0.002 mm) : 73,81%

- **une plasticité moyenne (IP = 13)**

- **une argilosité donnée par la valeur au bleu = 0,9%**

- **une faible tener en matière organique** (MO = 0,84%)

Ce sol est classé Ap selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature argileuse peu plastique, appartient à la famille des sols fins (sable fin argileux à limono-argileux et marne peu plastique.

Tableau 35: (A) Matrice de corrélation (Pearson) **; (B)** Coefficients de détermination (R^2)

Variables	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	MO (%)	>50mm	> 2mm	< 2mm	≤80 µm	WL (%)	WP (%)	IP	VBS (%)
Sable (%)	**1**	0,555	**-0,966**	-0,031	0,511	0,605	-0,605	-0,442	-0,497	-0,609	-0,580	-0,585
Limon (%)	0,555	**1**	**-0,745**	-0,030	0,344	-0,004	0,004	0,027	-0,188	-0,278	-0,225	-0,045
Argile (%)	**-0,966**	**-0,745**	**1**	0,046	-0,519	-0,482	0,482	0,347	0,487	0,591	0,555	0,493
MO (%)	-0,031	-0,030	0,046	**1**	-0,054	-0,230	0,230	-0,047	0,282	0,365	0,199	0,020
>50mm	0,511	0,344	-0,519	-0,054	**1**	0,473	-0,473	-0,378	-0,361	-0,339	-0,233	-0,178
> 2mm	0,605	-0,004	-0,482	-0,230	0,473	**1**	**-1,000**	**-0,812**	-0,533	-0,550	-0,625	**-0,721**
< 2mm	-0,605	0,004	0,482	0,230	-0,473	**-1,000**	**1**	**0,812**	0,533	0,550	0,625	**0,721**
≤80 µm	-0,442	0,027	0,347	-0,047	-0,378	**-0,812**	**0,812**	**1**	0,630	0,512	**0,740**	**0,828**
WL (%)	-0,497	-0,188	0,487	0,282	-0,361	-0,533	0,533	0,630	**1**	**0,918**	**0,897**	0,672
WP (%)	-0,609	-0,278	0,591	0,365	-0,339	-0,550	0,550	0,512	**0,918**	**1**	**0,875**	0,632
IP	-0,580	-0,225	0,555	0,199	-0,233	-0,625	0,625	**0,740**	**0,897**	**0,875**	**1**	**0,890**
VBS (%)	-0,585	-0,045	0,493	0,020	-0,178	**-0,721**	**0,721**	**0,828**	0,672	0,632	**0,890**	**1**

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,01

Variables	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	MO (%)	>50mm	> 2mm	< 2mm	≤80 µm	WL (%)	WP (%)	IP	VBS (%)
Sable (%)	**1**	0,308	0,933	0,001	0,261	0,366	0,366	0,195	0,247	0,371	0,337	0,343
Limon (%)	0,308	**1**	0,555	0,001	0,118	0,000	0,000	0,001	0,035	0,077	0,051	0,002
Argile (%)	0,933	0,555	**1**	0,002	0,269	0,232	0,232	0,121	0,237	0,349	0,308	0,243
MO (%)	0,001	0,001	0,002	**1**	0,003	0,053	0,053	0,002	0,079	0,133	0,039	0,000
>50mm	0,261	0,118	0,269	0,003	**1**	0,223	0,223	0,143	0,131	0,115	0,054	0,032
> 2mm	0,366	0,000	0,232	0,053	0,223	**1**	1,000	0,659	0,284	0,302	0,391	0,519
< 2mm	0,366	0,000	0,232	0,053	0,223	1,000	**1**	0,659	0,284	0,302	0,391	0,519
≤80 µm	0,195	0,001	0,121	0,002	0,143	0,659	0,659	**1**	0,397	0,262	0,548	0,686
WL (%)	0,247	0,035	0,237	0,079	0,131	0,284	0,284	0,397	**1**	0,842	0,805	0,452
WP (%)	0,371	0,077	0,349	0,133	0,115	0,302	0,302	0,262	0,842	**1**	0,765	0,399
IP	0,337	0,051	0,308	0,039	0,054	0,391	0,391	0,548	0,805	0,765	**1**	0,793
VBS (%)	0,343	0,002	0,243	0,000	0,032	0,519	0,519	0,686	0,452	0,399	0,793	**1**

2. 5 Profils d'altération

Lors de notre compagne de reconnaissance, nous avons procédé un relevé visuel des différents faciès existants au niveau des sites étudiés. Notre intervention a consisté en la description visuelle des faciès rencontrés au niveau des profils étudiés, tout en faisant la distinction des différents horizons formant un profil de sol. Nous présentant ci-après quelques profils d'altération relevés, lors de notre investigation géotechnique, aux différents sites du terrain étudié.

- ***NF1: Site Afra (X 722 590; Y 505 758)***

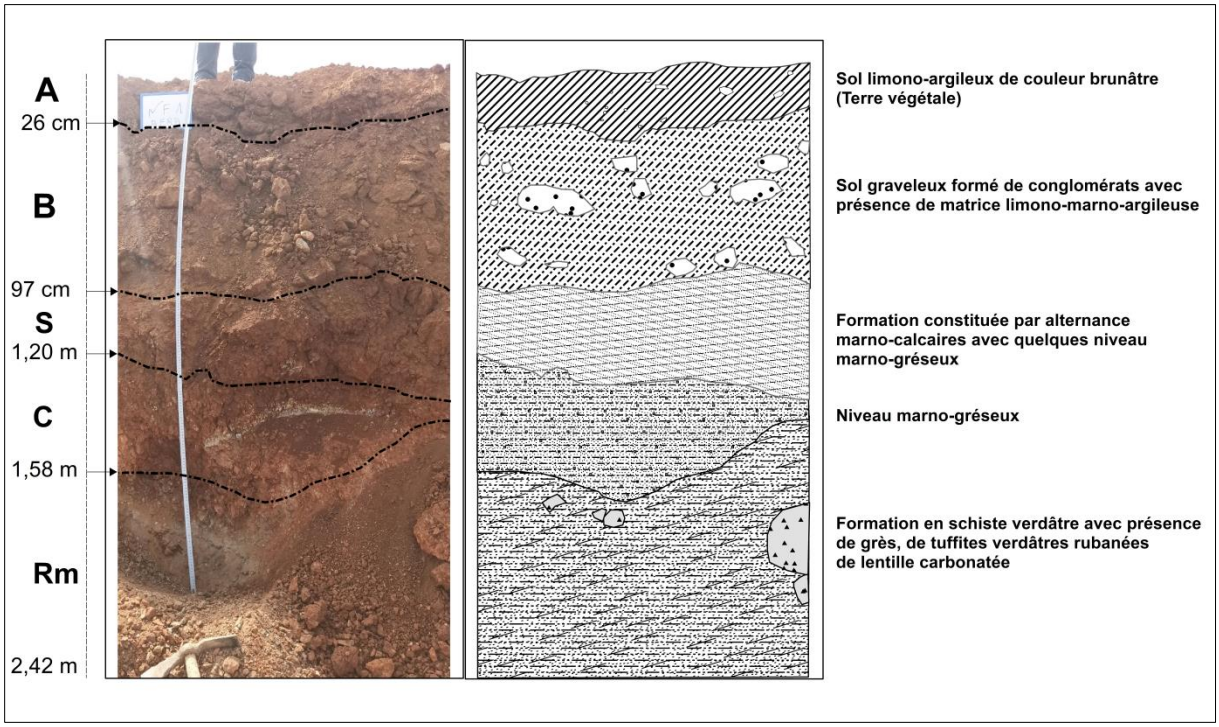


Figure 49 : Profile de sol site Afra

- ***IC1: Site El haddara (X 737 439; Y 496 751)***

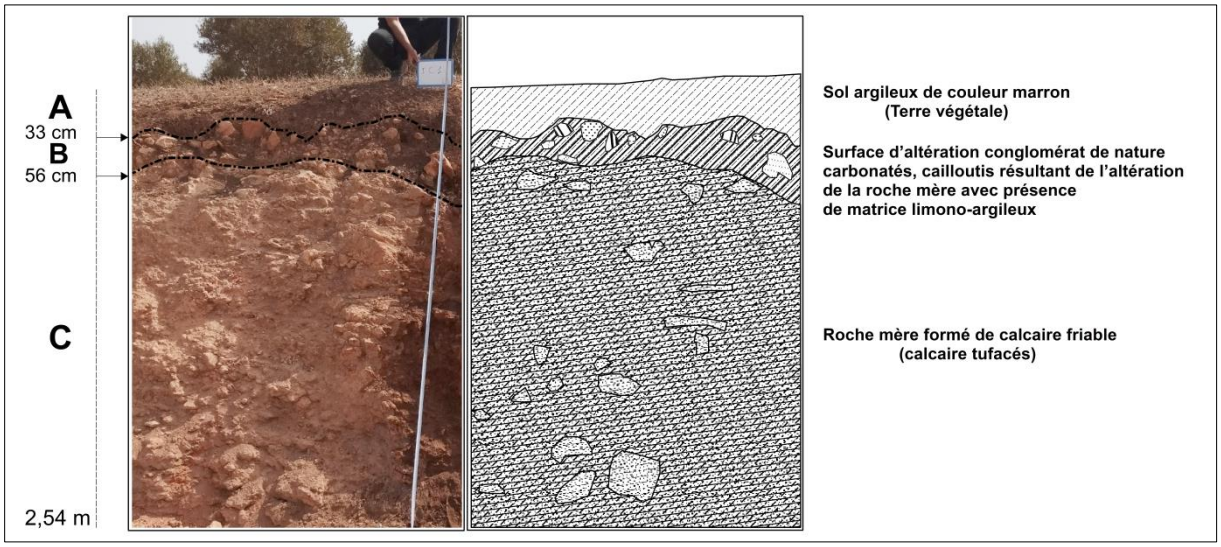


Figure 50 : Profile de sol El Haddara

- ***OC1 : Site Ibouaalouten (X 714 329; Y 506 430)***

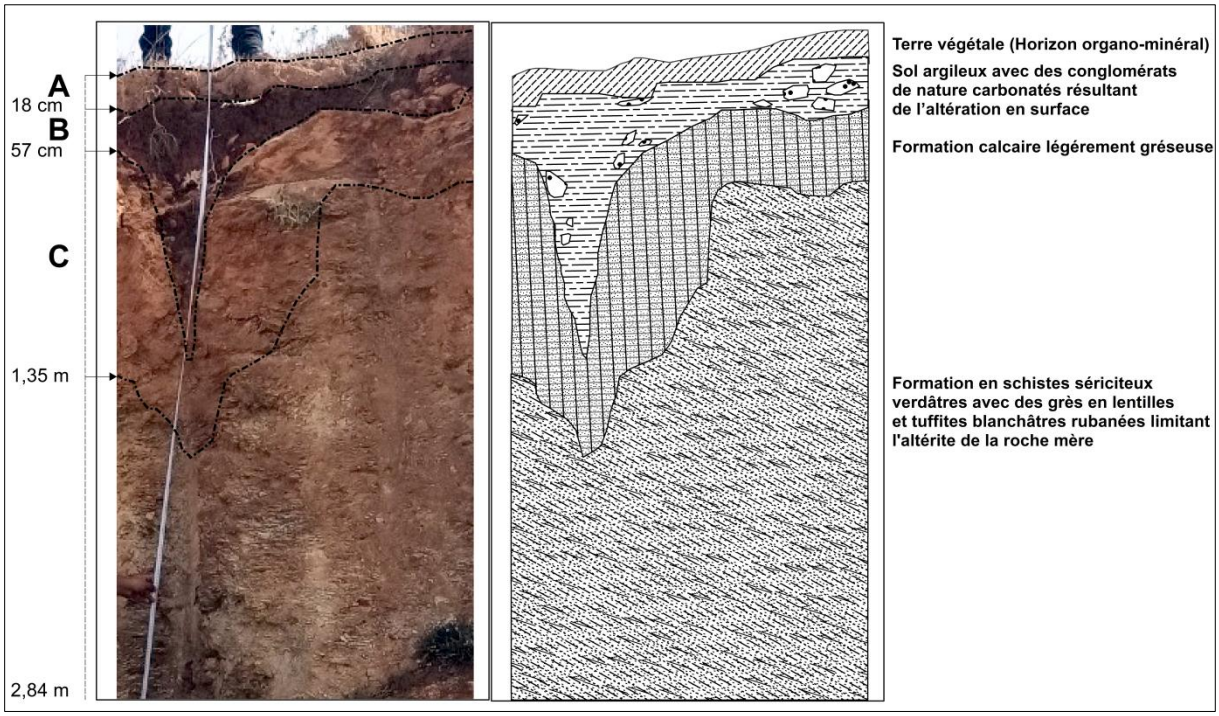


Figure 51 : Profile de sol Ibouaalouten

- ***Oulad Settout***

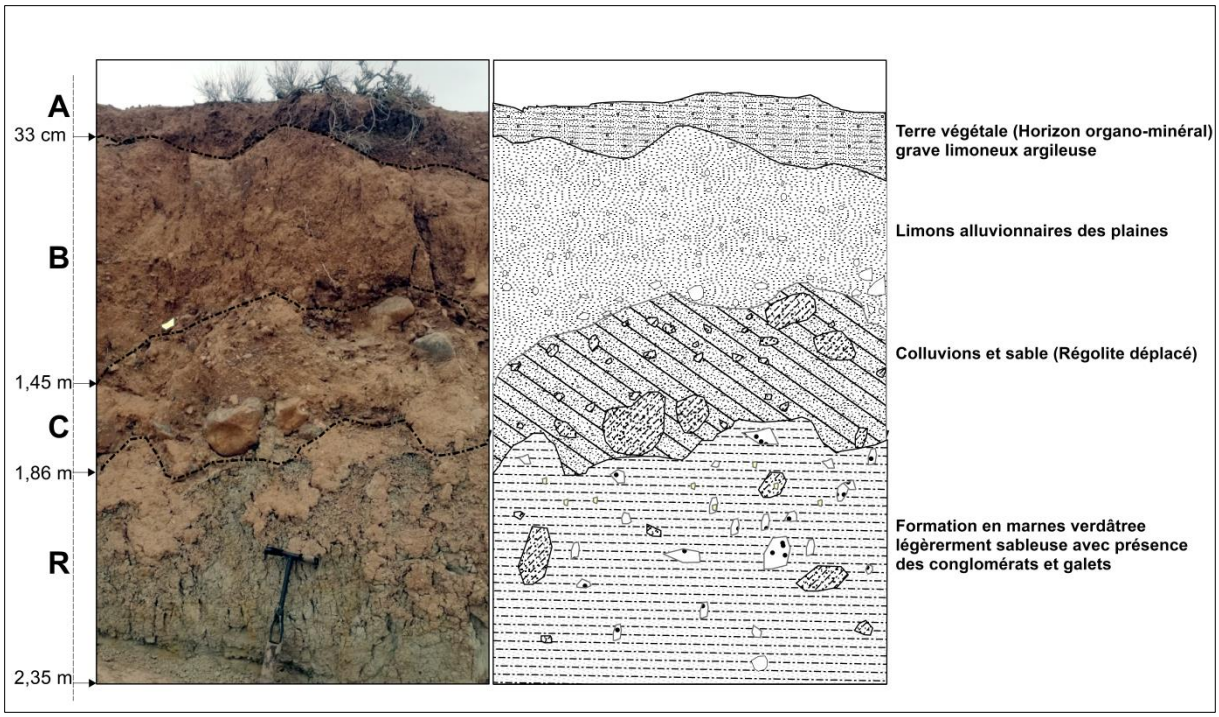


Figure 52 : Profile de sol Oulad Settout

L'extrapolation des résultats des analyses des sols ont permis de classer les sols du bassin versant Zenaga et de cartographier les grands ensembles de sols. Cinq classes de sols ont pu être identifiées dans le bassin. Des sols peu évolués de différents types, des sols calcimagnésiques, des Vertisols, des sols peu évolué de différentes natures et des sols isohumiques.

II. Description des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Les sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) ont été décrites selon les résultats obtenues par les analyses géotechniques des sols en fonction des paramètres de prédisposition qui contrôle ça formation à savoir la nature de la roche mère (lithologies), la pente, le types de couvert végétale, le climat (érosivité des pluies) et le temps.

Les sols analysé au laboratoire ont permet la détermination la nature et le comportement des produites d'altération issue de la roche mère. Les différents sols échantillonnés ont prés en considération différentes occupation/utilisation des sols indiquant différentes états de conservation et préservation.

L'extrapolation des résultats des analyses des sols ont permis de classer les sols du bassin versant Zenaga et de cartographier les grands ensembles de sols. Cinq classes de sols ont pu être identifiées dans le bassin. Des sols peu évolués de différents types, des sols calcimagnésiques, des Vertisols et des sols isohumiques.

1. Pédologie et cartographie numérique des sols (DSM)

1.1 Répartition des sols en fonction des caractéristiques biogéographique et des résultats d'analyses géotechnique

Les tableaux 34 et 35 illustrent différentes informations de base sur les sites d'échantillonnage et la classification des sols couvrant en parties le bassin versant Zenaga (Figure 54).

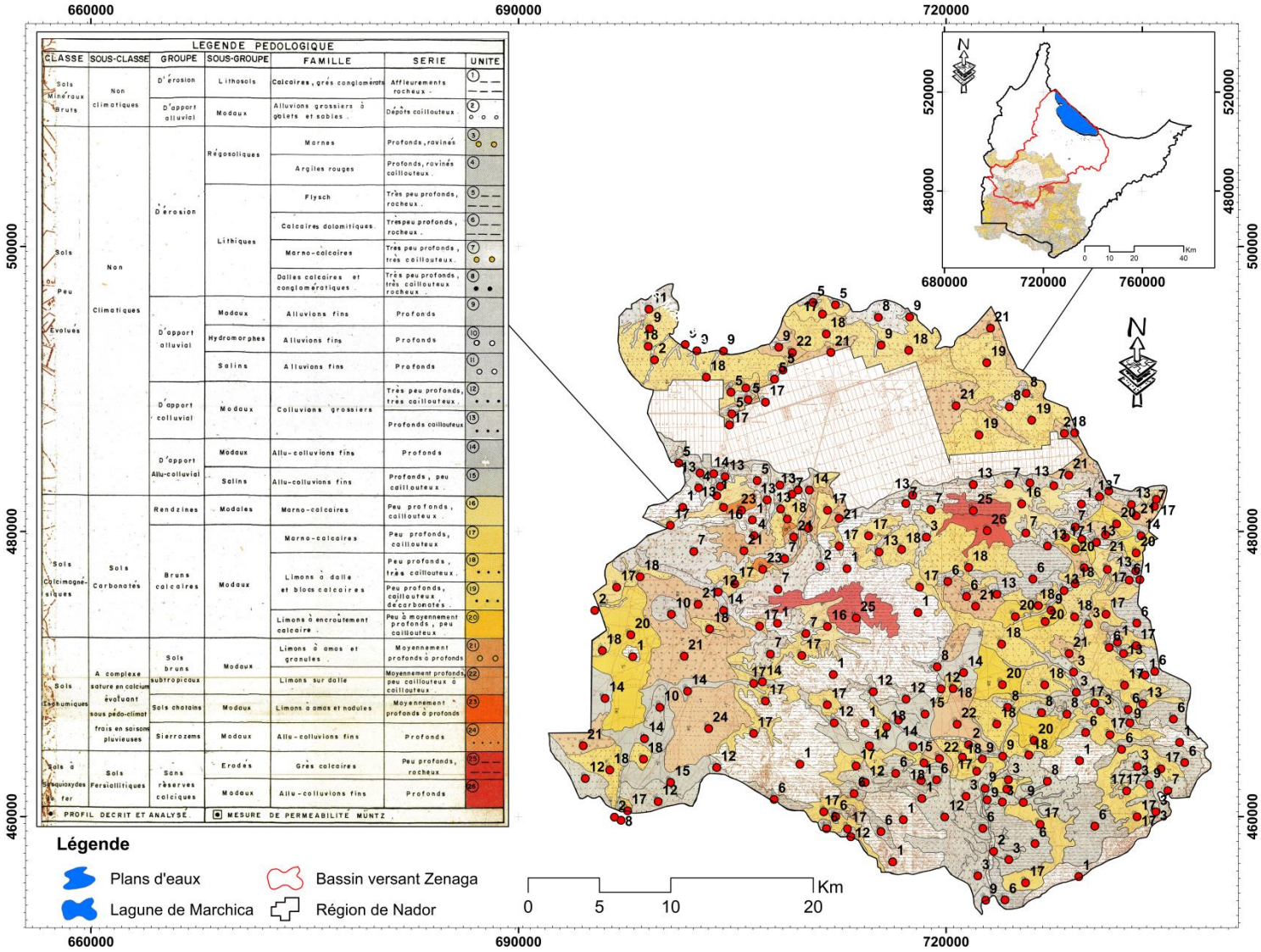


Figure 53: Carte pédologique de références occupant en partie la province de Nador et le bassin versant Zenaga (***Direction Provinciale de l'Agriculture de Nador, 1994***)

Des études antérieures réalisées dans la province de Nador, dans le cadre de l'étude pédologique au 1/100000 pour la mise en valeur des sols des communes rurales de Beni Oukil Fetouma, Tistoutine, Afsou et Hassi Berkane dans le cercle de Louta, ont montré que les types des sols sont généralement des sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols calcimagnésiques, sols isohumiques et les sols à sesquioxydes de Fer (Figure 54). Les informations figurées dans la légende et les caractéristiques de chaque profil de sol illustré dans la carte ont été décrite dans le tableau 36.

Tableau 36: Classification des sols dans les communes rurales de Beni Oukil, Tistoutine, Afsou et Hasi Berkane dans le cercle de Louta, province de Nador selon la légende pédologique (***Direction Provinciale de l'Agriculture de Nador, 1994)***

Classe	**Sous-classe**	**Groupe**	**Sous-groupe**	**Famille**	**Série**	**Réf. Sols**
Sols minéraux bruts	Non climatiques	D'érosion	Lithosols	Calcaires, grès, conglomérats	Affleurements rocheux	1
		D'apport alluvial	Modaux	Alluvions grossiers à galets et sables	Dépôts caillouteux	2
Sols peu évolués	Non Climatiques	D'érosion	Régosolique	Marnes	Profond, ravinés	3
				Argiles rouges	Profond, ravinés, caillouteux	4
			Lithiques	Flysch	Très peu profonds, rocheux	5
				Calcaires dolomitiques	Très peu profonds, rocheux	6
				Marno-calcaires	Très peu profonds, caillouteux	7
				Dalles calcaires et conglomératiques	Très peu profonds, très caillouteux rocheux	8
		D'apport alluvial	Modaux	Alluvions fins	Profonds	9
			Hydromorphes	Alluvions fins	Profonds	10
			Salins	Alluvions fins	Profonds	11
		D'apport colluvial	Modaux	Colluvions grossiers	Très peu profonds, très caillouteux	12
					Profonds caillouteux	13
		D'apport allu-colluvial	Modaux	Allu-colluvions fins	Profonds	14
			Salins	Allu-colluvions fins	Profonds, peu caillouteux	15
Sols calcimagnésiques	Sols carbonatés	Rendzines	Modales	Marno-calcaires	Peu profonds, caillouteux	16
		Bruns calcaires	Modaux	Marno-calcaires	Peu profonds, caillouteux	17

				Limons à dalles et blocs calcaires	Peu profonds, très caillouteux	18
					Peu profonds, caillouteux de carbonates	19
				Limons à encroutement calcaire	Peu à moyennement profond, peu caillouteux	20
Sols Isohumiques	A complexe saturé en calcium évoluant sous pédoclimat frais en saisons pluvieuses	Sols bruns subtropicaux	Modaux	Limons à amas et granules	Moyennement profonds à profonds	21
				Limons sur dalle	Moyennement profonds peu caillouteux à caillouteux	22
		Sols châtains	Modaux	Limons à amas et nodules	Moyennement profonds à profonds	23
		Sierozems	Modaux	Allu-colluvions fins	Profonds	24
Sols à sesquioxydes de Fer	Sols Fersiallitiques	Sans réserve calciques	Erodés	Grès calcaires	Peu profonds, rocheux	25
			Modaux	Allu-colluvions fins	Profonds	26

PROFILE DECRIT ET ANALYSE

Ces sols ne couvrent pas l'ensemble des terrains occupant la province de Nador et le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). La reconnaissance in situ a été complétée par des essais de laboratoire réalisés sur les échantillons des sols prélevés à partir des profils étudiés. Ces essais ont permet d'identifier plus précisément les natures (types) des sols existants en place. Les résultats obtenus ont été présenté dans le tableau 36.

1.1 Cartographie des sols par la méthode SCORPAN

La réalisation de la carte des sols pour le bassin versant Zenaga a pris en considération l'ensemble des facteurs contrôlant leur formation (Lithologie, pente, climat, végétation…). La méthode utilisée nous a permis de déduire les classes de type de sol en fonction des informations relatives aux sols analysés et la carte pédologique occupant en partie le bassin versant. La méthode utilisée se base sur la superposition des différents facteurs influençant la formation des sols (Figure 54).

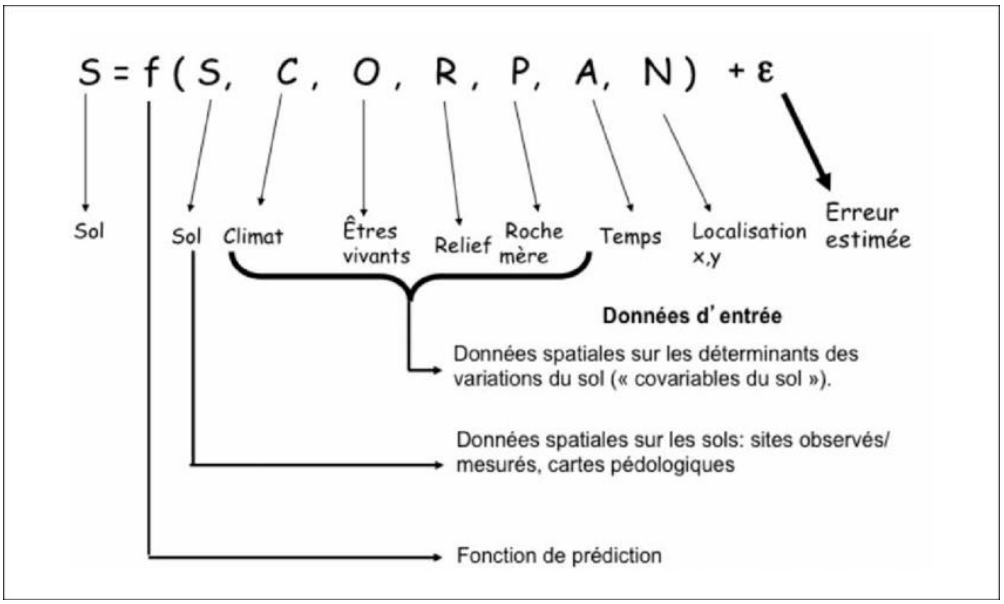


Figure 54: Méthode SCORPAN (***Lagacherie et al.2020***)

.

Tableau 37: Informations de base sur les sites d'échantillonnage et caractéristiques biogéographiques sommaires du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Points d'échantillonnage	Lithologie		Pente %	Ppt (mm)	LULC	Type des sols		Nature/Famille des sols		
	Code	Lithologie				LCPC	GTR	Appellation	Description	
OC1	JcF	Série de schiste gréseux avec des flyschs	>35%	300.74	Olivier et Céréaliculture	GA	Al	Grave argileuse	Sols fins : limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué	Sols peu évolué (brunifiés)
OM3	JcF	Série de schiste gréseux avec des flyschs	>35%	300.74	Matorral clair	Ap	Al	Argile peu plastique		Sols peu évolué (brunifiés)
IC1	A	Alluvions, éboulis, dayas, sebkhas, Limons, terrasses limoneuses	3-12%	288.95	Culture intensive	GA	C1B5	Grave argileuse	Sol comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse	Vertisols
IC2	ci	Crétacé inférieur marin, Faciès continental	0-3%	278.33	Culture intensive	GA	Al	Grave argileuse	Sols fins : limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué	Sols peu évolués (brunifiés)
OM1	A	Alluvions, éboulis, dayas, sebkhas, Limons, terrasses limoneuses	0-3%	288.95	Matorral clair	SA	Al	Sable argileux		Vertisols
NF1	mia (αM)	-Faciès transgressive; marno-calcairo-grèseuse avec grès chenalisé, encroutements -Trachytes, brêche et coulées andésitiques	3-12%	300.74	Forêt naturel	GA/GL	B5	Grave argilo-Limoneuse	Sol sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux	Vertisols
RA1	A	Alluvions, éboulis, dayas, sebkhas, Limons, terrasses limoneuses	0-3%	288.95	Culture sèche, terrain nu et zone bâtis	SL	B5	Sable limoneux		Vertisols

DM1	mpc	Marnes et conglomérats, sables, colonies coralliennes, diatomites	3-12%	278.33	A Matorral dense	GL	B5	Grave limoneuse		Sols peu évolués (régosolique-lithiques)
CA1	A	Alluvions, éboulies, dayas, sebkhas, Limons, terrasses limoneuses	0-3%	288.95	Culture et arboriculture	GA	C1B5	Grave argileuse	Sol comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse	Vertisols
DM2	αM	Trachytes, brèches et coulées andésitiques	12-20%	327.29	Matorral dense	GL	B5	Grave limoneuse	Sol sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux	Sols peu évolués (brunifiés)
NF2	β	Basaltes ankaratrites	3-12%	327.29	Forêt naturel	SA/SL	B5	Sable argilo-Limoneux		
RA2	qC	Regs, surfaces encroutées	0-3%	255.91	Culture sèche	SA/SL	Al	Sable argilo-Limoneux	Sols fins : limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué	Sols peu évolués (brunifiés)
OM2	Js	Calcaires et marno-calcaires b	3-12%	288.95	Matorral clair	Ap	A2	Argile peu plastique	Sols fins : sable fin argileux - limon argileux et marne peu plastique	Calcimagnésiques

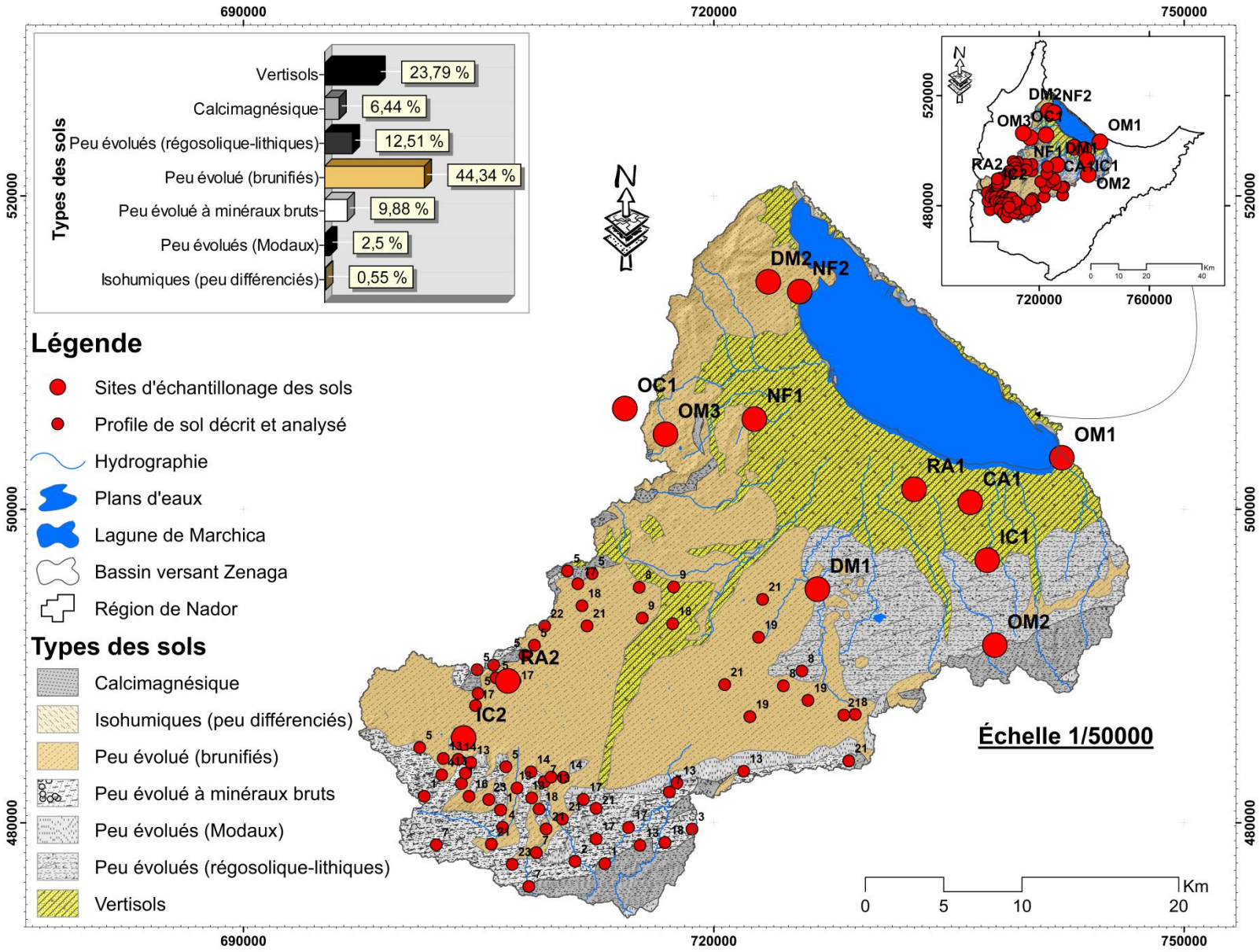


Figure 55: Cartes des types de sols selon la classification LCPC/GTR.

En effet, et après les traitements des données obtenus (différentes analyses, études et essaie de modélisation), on est arrivé à déterminer les types des sols qui occupent le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

1. Les sols peu évolués

Cette classe regroupe tous les sols à faible degré d'altération physico-chimique. Ceux-ci sont jeunes, et se différencient par une faible altération des minéraux et un taux de matière organique limité. Elle comprend d'une part des sols sous un climat humide et froid qui ne permet qu'une faible degré altération de la roche, et d'autre part les stades initiaux de certains types de pédogenèse en climat plus chaud ou plus humide. Ces sols sont caractéristiques des pentes. Ils sont continuellement soumis à l'érosion avec une faible épaisseur. Les matériaux les plus fins et la matière organique disparaissent rapidement.

Ces sols caractérisent aussi les profils dans lesquels la marne semble légèrement altérée en surface. L'horizon fertile humifère de surface est peu épais (15-25 cm), repose sur un matériel d'altération qui passe en profondeur à une roche sain non altérée. La texture varie selon la nature du substrat : fine sur les faciès marneux et schisteux, moyenne sur schiste et légèrement importante sur les faciès de grès. Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), on distingue deux classes de types de sols :

1.1 Les sols peu évolués d'érosion (lithiques et régosolique)

Ce sont des sols qui se développent sur roche mère (friable ou dure) qui présentent une profondeur peu importante inférieure à 20 cm et une proportion élevée d'éléments grossiers.

1.2 La classe des sols peu évolués d'apport : alluviaux et colluviaux

Ces sols se répartissent particulièrement dans les chenaux d'oueds alluvionnés, les épandages de débordement sur la terrasse récente des oueds principaux et les plans d'eaux. Ils présentent la majeur partie des sols cultivés en céréales, les principaux groupements végétaux sont des groupements cultigènes et jachères, à (***Zizyphus lotus***) et à (***Artemisia herba-alba***). Ils sont de texture fine, moyenne et grossière avec une grande hétérogénéité dans le profil, la structure est généralement lamellaire sur les premiers centimètres, polyédrique subangulaire en profondeur, la profondeur est de 10 à 50 cm. Les sols peu évolués sont assez diversifiés. On compte quatre types pour les deux classes de types de sols mentionnée (Figure 55) :

-Sols peu évolués brunifiés (44.34 %), sont situés au niveau de la zone amont nord du mont de Gourougou, Bni Bou Ifrour et Jbel Wiksane en allant vers Tiztoutine au niveau de Jbel Tarzoute avec une forte présence au niveau des parties avals au niveau de la nappe de Gareb du bassin versant Zenaga.

-Sols peu évolués modaux (2.5 %), se trouvent sur les affleurements des faciès transgressif; marno-calcairo-gréseuse avec grès chenalisé et encroutements du Miocène (Tortonien). Ces sols se trouvent jalonnant *Hassi Berkane et Afsou*. Ils tracent une bande qui délimite les parties amont du bassin des parties aval au niveau de la partie Nord-ouest (NW).

-Sols peu évolués à minéraux bruts (9.88 %), occupe les parties amonts du bassin versant en passant de Hassi Berkane ver Afsou selon une bande qui marque les zones caractérisée les zones à forte pouvoir érosive des pluies avec un couvert végétale restreint.

Ces sols squelettiques, caillouteux avec affleurements rocheux se situent sur les sommets et crêtes culminantes du bassin versant en partant de la plaine de Gareb vers les zones amont en direction ESW, sur un substrat géologique dur du Crétacé inférieur caractérisant un faciès continental, soumis à une intense érosion hydrique par leur position topographique en pente forte. Ils sont occupés par la céréaliculture marginale chez des privés ou valorisés par les reboisements forestiers sur les terrains domaniaux, surtout en Pin d'Alep;

-**Sols peu évolués régosolique et lithiques** (12.51 %), marque la zone délimité au Sud par le massif de Kebdana et vers le Nord-Ouest par la plaine de Bouareg au niveau de la lagune de Marchica. Ces sols ce localise au niveau des faciès de Marnes bleues, sables et bancs gréso-calcaires à bioclastes d'âges Miocène supérieur (Tortonien). Généralement, la classe des sols peu évolués, marque :

- Les sols moyennement profonds à texture limono-sableuse avec forte manifestation de l'action anthropique sur la dégradation de la végétation naturelle favorisant l'érosion hydrique.

- Les sols développés sur des alluvions quaternaires riches en limons. Ils occupent les terrasses entre les lits des oueds, ils sont peu profonds et sont réservés aux constructions villageoises par leur position privilégiée pour héberger les douars.

- Les sols développés sur schistes ou marnes, peu profonds, de texture grossière, occupés surtout par les plantations forestières en pentes érodées.

- Les sols formés sur des roches volcaniques avec abondance de matériaux caillouteux avec affleurements rocheux, rendant la mécanisation difficile. Relativement profonds, ils se prêtent à l'arboriculture fruitière ou céréaliculture en pentes faibles ou moyennes, et des reboisements de Pin d'Alep et d'Eucalyptus en fortes pentes érodées ;

2. Les sols calcimagnésiques

Les sols calcimagnésiques présente 6.44 % de la superficie totale, ils occupent les parties méridionales au niveau des périphéries selon une bande qui trace la limite du bassin versant Zenaga. Ils sont issus d'altération biochimique dominante, cause qu'ils sont très minces. Ces types de sols couvrent des positions topographiques, essentiellement formés sur des roches calcaires ou dolomitiques en place, à pente plus au moins forte et plus ou moins soumises à l'érosion hydrique. Les arbres ne peuvent pas pousser, cependant on note la présence de nombreux arbustes. Ils sont en partie occupés par des reboisements forestiers de pin d'Alep. Ils sont à bonne vocation arboricole, oliviers et caroubiers, et doivent faire l'objet de mesures antiérosives. En effet, les roches calcaires ou magnésiennes, quand elles libèrent des quantités suffisantes de calcaire actif, sont à l'origine des sols Calcimagnésiques. Ces sols se localise principalement au niveau des parties amonts du bassin versant Zenaga au niveau des sommets de *Oulad Abdessami'e, Bled d'Ounq Jmal, Arrouf Mohand Mohamadi, Bled Am'acher* et *Jbel sidi Moussa*.

3. Les Vertisols

Les vertisols « *Tirs* » représentent des sols à pédoclimats contrastés caractérisant la zone tempérée. Il en est de même pour les vertisols de l'Espagne du Sud « *Tierras Negras*

Andaluzas » ou « **Tierras de Bujeo** » (***Guerrero, 2001***). Ces sols occupent 23.79 % de la superficie du bassin (Figure 55). Ils sont situés entre les sols peu évolués à l'aval du bassin versant au niveau du pourtour de la lagune Marchica et Bouareg et au niveau des rives de l'oued Selouane qui reçoit les produits de l'érosion des massifs qui l'encadrent qui de sont de nature colluvial et alluvial, à ces endroit ces produits augmente d'épaisseur pour atteindre 60 m (***Guillemin & Houzay, 1982***). Les mouvements vertiques incorporent la matière organique très profondément dans tout le profil du sol sans l'appui de l'activité biologique. Ces sols vertiques sont objet de mouvements verticaux déterminés par le retrait et le gonflement des argiles qui les constituent.

Les sols Fersiallitiques sont des sols argileux rouges (Fe, Si, Al) qui semble avoir été utilisé pour désigner des sols formé par des minéraux argileux (Type 2 :1 ou 2 :1 :1) issue de l'altération géochimique dominante de roches dures carbonatées du domaine méditerranéen "*Terra rosa*" (***Comel, 1931*** ; ***Botelho, 1964***). Ces sols sont le résultat d'une association stable entre de l'argile sous forme colloïdale et des oxydes de fer et en oxydes d'alumine. Ils se forment sous couvert forestier et en climat méditerranéen où le mode d'altération est la fersialitisation. Ces sols sont le résultat d'une association forte et stable entre des colloïdes argileux et des oxydes de fer (***Campy et Macaire, 1989 ; Sadiki, 2005***). Dans la lagune, la répartition des argiles dominées par les matériaux du substrat, est contrôlée par la nature des apports et par les courants intra-lagunaires (***Mahjoubi et al.2003***).

5. Les sols isohumiques

Dans la plus grande partie des plaines et des Vallées du Maroc, on retrouve, sur les alluvions et colluvions du Quaternaire, toute une série de sols qui, d'après la classification française (***Aubert, 1963***) sont des sols isohumiques subtropicaux: ce sont les sols châtains, les sols bruns et les sierozems, Les études menées en particulier en Basse-Moulouya ont conduit à reposer le problème de la formation et de la classification de ces sols (***Ruellan, 1966***).

D'après les descriptions classiques, le premier caractère important de ces sols est la répartition profonde, lentement décroissante, d'une matière organique bien évoluée d'origine steppique.

Les sols isohumiques ne présente que 0.55 % de la superficie du bassin. Ce sont des sols qui se situent le long du cordon dunaire avec des sols profonds de texture argilo-limoneuse fine. Ils sont considérés comme les meilleures terres du périmètre malheureusement envahies par les dépôts de sable et par endroit des constructions des douars. Avec une bonne vocation maraîchère et de vignes, ils sont plutôt dominés par les céréales et légumineuses (petits pois, fève).

Conclusions et discussions

L'analyse granulométrique des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) a montré une prédominance de la fraction des argiles avec une moyenne de 69,54%. La fraction de limons avec une moyenne de 21,40% et la fraction de sables avec une moyenne de 9,39%. La matière organique n'enregistre que 0,83% avec une fourchette allant de 0.45 à 1.61 %. Les proportions les plus importantes ont été enregistrées au niveau des localités d'Ibouaalouten, Tiztoutine et Gourougou. Les sols au niveau de ces zones ont montré des différences significatives en ce qui concerne les pourcentages de la la matière organique (MO), la valeur du bleau de méthylène (VBS), l'indice de plasticité (IP), les limites plasticité et de liquidité (WP et WL). La reconnaissance géotechnique a montré que les sols au niveau des zones étudiées sont dotés des caractéristiques suivantes :

- Le site d'Ibouaalouten (OC1) : sol de type grave argileuse (GA) selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature légèrement graveleuse, appartient à la famille des Sols fins (limons peu plastiques) et légèrement sensible à l'eau.
- Le site de Wikssane (OM3) : sol de type Ap selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature argileuse peu plastique, appartient à la famille des sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué).
- Le site El haddara (IC1) : sol est classé GA selon la classification LCPC et C1B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave argileuse, appartient à la famille des sols comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse.
- Le site Tiztoutine (IC2) : sol classé GA selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave argileuse, appartient à la famille des Sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué).
- Le site Arkmane (OM1) : sol classé SA selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable argileux, appartient à la famille des sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué).
- Le site d'Afra (NF1) : sol classé GA/GL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave limono-argileuse, appartient à la famille des Sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux.
- Le site de Sebkha de Bouareg, Joûb Er Roûmi (RA1) : sol classé SL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable limoneux, appartient à la famille des sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux.
- Le site Selouane (DM1) : sol classé GL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave limoneuse, appartient à la famille des Sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux.
- Le site de Sebkha de Bouareg, Oulad El Bachir (CA1) : sol classé GA selon la classification LCPC et C1B5 selon la classification GTR. Ce sol, de nature grave argileuse, appartient à la famille des Sols comportant des fins et des gros éléments à matrice argileuse.

- Le site Gourougou, St. Youssef (DM2) : sol lassé GL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature grave limoneuse, appartient à la famille des Sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux.
- Le site Gourougou, Tirakaa (NF2) : sol classé SA/SL selon la classification LCPC et B5 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable limono-argileuse, appartient à la famille des Sols sableux et graveleux avec des fines : sables et graves silteux.
- Le site de paysage volcanique Tiztotine (RA2) : sol classé SA/SL selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature sable limono-argileux, appartient à la famille des Sols fins (limons peu plastiques- silts alluvionnaire et sable fin peu évolué).
- Le site de Boulkhnafess (OM2) : sol classé Ap selon la classification LCPC et A1 selon la classification GTR. Ce sol de nature argileuse peu plastique, appartient à la famille des sols fins (sable fin argileux à limono-argileux et marne peu plastique.

L'extrapolation des résultats des analyses des sols a permis de dénombrés sept types de sols dans bassin versant Zenaga et de les cartographier. Les principaux sont : les sols peu évolués, les Vertisols, les sols calcimagnésiques et les sols isohumiques. Il s'agit dans la plupart des cas de sols à horizon minces et peu évolué. La différenciation spatiale de leur variété peut être expliquée par l'action conjuguée du bioclimat, de la topographie et surtout le type de faciès.

Les sols au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) sont constamment rajeunis et n'atteint pas des stades de développement assez avancés sous l'effet combinée de des processus actif de l'érosion et l'exploitation des terrains en pentes.

Chapitre V: Etude de l'évolution de la température de la surface des sols (LST) et d'occupation/utilisation des terres (LULC) par la modélisation et la télédétection dans la province de Nador

I. Résultats et analyses

1. Caractérisation des changements d'utilisation/couverture des terres dans la zone d'étude

Les différents traitements effectués pour l'évaluation par télédétection des activités anthropiques sur les changements de la température de surface (LST) et d'utilisation/occupation des terres (LULC) dans la province de Nador ont été évoquée dans la premier partie "Matériels et Méthodes" dans le chapitre III.

Compte tenu de l'intérêt de l'étude des changements de l'occupation des sols dans la province de Nador. Nous avons opté à la génération de cinq principales classes LULC à savoir:

- Les terres agricoles: regroupent différentes types de cultures et arboricultures en périmètre irriguée;
- Les terrains urbains, bâtis et terrains nus;
- Les arbustes et reboisements;
- Les forêts et matorrals;
- Les parcours et terres dégradées.

Les résultats issus de la classification donnent une idée des principales caractéristiques de l'évolution de LULC pour le mois de Juin pour les années 2007 et 2017 (Figure 56). La région d'étude dans les mesures d'image est de 3101,04 km².

Tableau 28: Résultats de la classification de l'occupation des sols pour les images 2007 et 2017 montrant les changements de superficie de chaque classe

Classes LULC	2007 Superficie (km²)	% de ST	2017 Superficie (km²)	% de ST	Changement (Km²)	Changement en %
Terres agricoles	179.78	5.8	388.31	12.55	+208.53	**+6.75**
Arbustes et reboisements	423.35	13.65	453.33	14.62	+29.28	**+0.97**
Forêts et matorrals	38.18	1.23	41.78	1.35	+3.6	**+ 0.12**
Terrains urbains, bâtis et terrains nus	207.10	6.68	411.08	13.26	+203.98	**+6.58**
Parcours et terres dégradées	2252.35	72.63	1806.27	58.24	-446.08	**-14.38**
Totale	**3101.04**		**3101.04**			

NB : % de ST: Pourcentages de superficie par rapport à la superficie de mesure d'image (3101.4 km²).

La carte résultante pour les mois de Juin en 2007 (Figure 56-a) et 2017 (Figure 56-b) pour les différentes classes de LULC pour la région de Nador montre que l'occupation des sols a manifestement changé au cours des 10 dernières années. Nous constatons une mutation importante caractérisée par une urbanisation rapide et un développement agricole en plein essor.

L'analyse des images satellite Landsat-5 TM et Landsat-8 OLI révèle que les terres agricoles ont enregistrée un développement en passant de 179,78 km² en 2007 à 388,31 km² en 2017 (Tableau 38), avec un accroissement de 6,75% par rapport au totale des superficies. Les arbustes et reboisements sont passés de 423,35 km² en 2007 à 453,33 km² en 2017,

enregistrant une augmentation de 29,28 km² équivalents à 0,97%. Les forêts et matorrals sont passées de 38,18 km² en 2007 à 41,78 km² en 2017 enregistrant une augmentation de 3,6%. Les terrains urbains, bâtis et terrains nus ont progressivement évolué de 2007 à 2017 où ils ont enregistré une augmentation significative de 203,98 km² soit 6,58%. Cependant, les parcours et terres dégradées ont passé de 2252.35 km² à 1806,27 km² de 2007 à 2017 avec une régression de l'ordre de 14.38 % des classes de superficies d'occupation des sols.

Ce changement est principalement dû au changement climatique, mais aussi aux politiques de développement ciblées dans la région qui se traduisent par une urbanisation rapide, un développement agricole durable et la mise en place de zones d'attraction touristique dans la région.

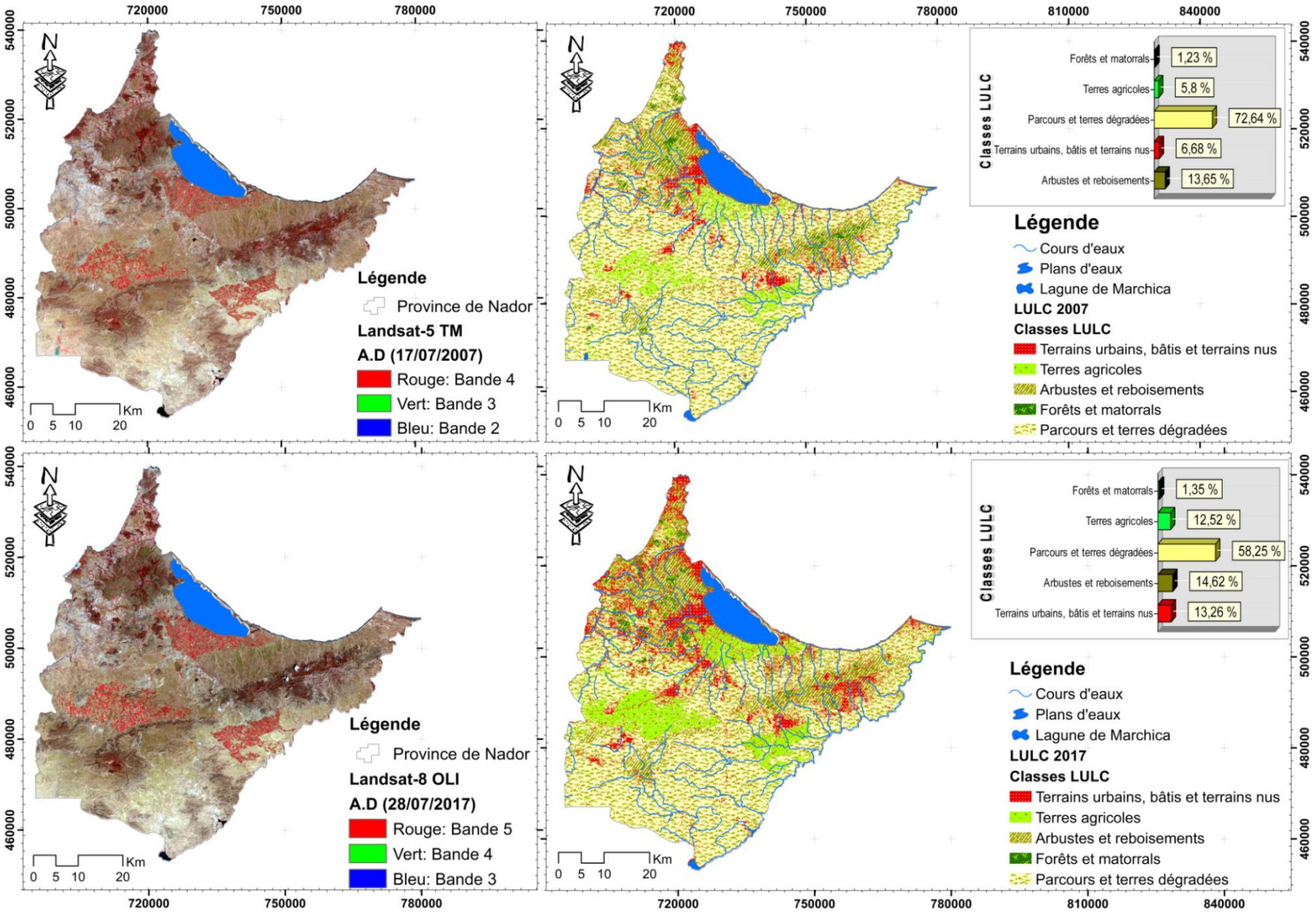


Figure 43 : Spatialisation de l'utilisation/occupation des sols (LULC) dans la région de Nador pour 2007 (a) et 2017 (b) par l'algorithme de classification supervisée basée sur l'estimation de vraisemblance maximale (MLC) ; **A.D** : dâte d'acquisition

2. Réponse des indices RS et LST

2.1 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

L'analyse cartographique des résultats de l'évolution de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) pour le mois de Juin au cours des années 2007 (Figure 57-a) et 2017 (Figure 57-b) a montré que la superficie des classes NDVI a enregistrée une mutation importante. Les valeurs moyennes de l'indice NDVI étaient respectivement de 0,206 et 0,200. Les changements enregistrés sont marquée par une réduction ou augmentation de certaines classes de l'indice NDVI, ce qui indique une variation de la densité de la couverture verte. Les zones avec un indice NDVI < 0,2 ont enregistré une réduction de 27,86 %, tandis que les zones avec un indice NDVI > 0,2 ont augmenté de 28,03 % (Tableau 39).

Tableau 29: Superficie et pourcentage de chaque classe d'indice NDVI

Classes NDVI	2007		2017		2007 -2017	
	Superficies (km²)	% de ST	Superficies (km²)	% de ST	Changement (Km²)	Changement (%)
Sol nu	22.59	0.72	10.25	0.33	-12.34	-0.39
0 - 0.1	513.32	16.56	11.19	0.36	-502.13	-16.2
0.1 -0.2	1191.68	38.43	842.45	27.17	-349.23	-11.26
0.2 - 0.3	848.51	27.37	1498.15	48.32	+649.64	+20.95
0.3 - 0.4	302.99	9.77	462.61	14.92	+159.62	+5.15
0.4 - 0.5	160.54	5.18	203.75	6.75	+43.21	+1.57
Végétation dense	61.05	1.97	72.15	2.33	+11.1	+0.36

NB : % de ST : Pourcentages de superficie par rapport à la superficie de mesure d'image (3101.4 km²).

L'analyse des cartes résultantes de l'évolution de l'indice NDVI pour le mois de Juin pour les années 2007 et 2017 montre que les zones avec un indice NDVI<0,2 variaient de 1727,59 km² à 863,89 km² avec une réduction de 27,85 % de la superficie totale occupée. Ces zones représentent généralement de sol nu avec une végétation épars.

Les zones avec un indice 0,2<NDVI<0,5 représentant un mélange de sol nu et de végétation ont enregistré la variation la plus important, passant de 1312,04 km² en 2007 à 2164,51 km² en 2017 avec une augmentation estimée de 27,67 % de la superficie totale.

Les terres avec un indice NDVI>0,5, considérées comme entièrement végétalisées avec végétation dense et verte, ont enregistré une légère augmentation passant de 61,05 km² en 2007 à 72,15 km² en 2017 avec une augmentation de la classe mentionnée d'environ 11,1 km², soit une variation positive de 0,36 %.

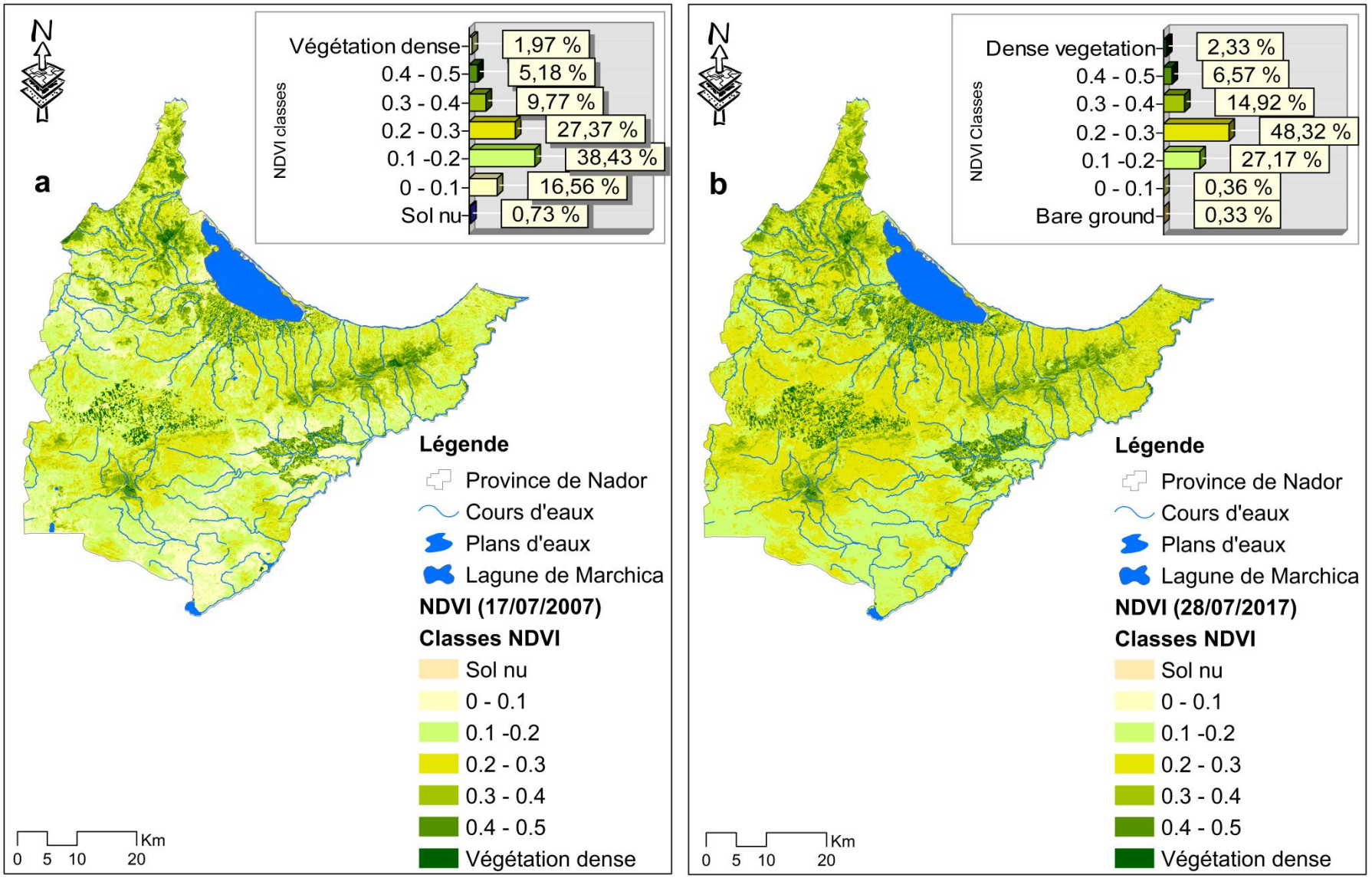


Figure 44: Répartition spatiale de l'indice de végétation par différentce normalisé (NDVI) pour la région de Nador pour le mois de juin pour 2007 (a) et 2017 (b)

2.2 Détection des zones bâties par l'indice modifié de construction par différences normalisées (MNDBI) par la méthode BAEM

L'indice modifié de construction par différences normalisées (MNDBI) a été extrait en utilisant l'équation 13 (Chapitre III: Méthodes d'étude des sols et de l'érosion hydrique au niveau de la province Nador et du bassin versant Zenaga) basé sur la méthode BAEM (Méthode d'extraction des zones construites), en utilisant les indices NDBI (L'indice construit par différence normalisée "NDBI" ; L'indice de végétation par différence normalisé "NDVI" et l'indice modifié d'eau par différence normalisé "MNDWI") comme facteurs d'entrée.

L'analyse cartographique des résultats a montré que l'indice MNDBI a changé de 2007 (Figure 58-a) et 2017 (Figure 58-b). L'indice MNDBI moyen pour la région de Nador était de 0,132 et 0,236, respectivement. Le pourcentage et la superficie de chaque classe de l'indice MNDBI ont été calculés pour les années 2007 et 2017 (Tableau 40).

Tableau 30 : Superficie et pourcentage de chaque classe de l'indice MNDBI

Classes MNDBI	**2007**		**2017**		**2007- 2017**	
	Superficie (km^2)	**% de ST**	**Superficie (km^2)**	**% de ST**	**Changement (km^2)**	**Changement (%)**
Terrains non-construits	2893.69	93.32	2689.70	86.74	-203.99	-6.58
Terrains construits et défrichie	207.10	6.68	411.08	13.26	+203.98	+6.58

NB : % de ST : Pourcentages de superficie par rapport à la superficie de mesure d'image (3101.4 km^2).

On note que les terrains non construites sont passées de 2893,69 km^2 en 2007 à 2689,70 km^2 en 2017 enregistrant une régression de 6,58%. Les terrains construits et défrichées ont enregistré une expansion de 6,58%, en allant de 207,10 km^2 à 411,08 km^2 de 2007 à 2017.

Les résultats obtenus de l'analyse cartographique de l'indice MNDBI selon la méthode BAEM montrent un aspect mixte de la «détérioration/développement» du paysage naturel de la région de Nador. Ces changements, qui ont marqué chaque classe de l'indice MNDBI, montrent que les terrains de la région se sont transformés en de nouvelles zones allouées à la construction et l'agriculture pour répondre aux besoins d'une population en constante augmentation. Les zones recouvertes de végétation naturelle et des plans d'eau ont également été réduites en raison du défrichement et la sécheresse.

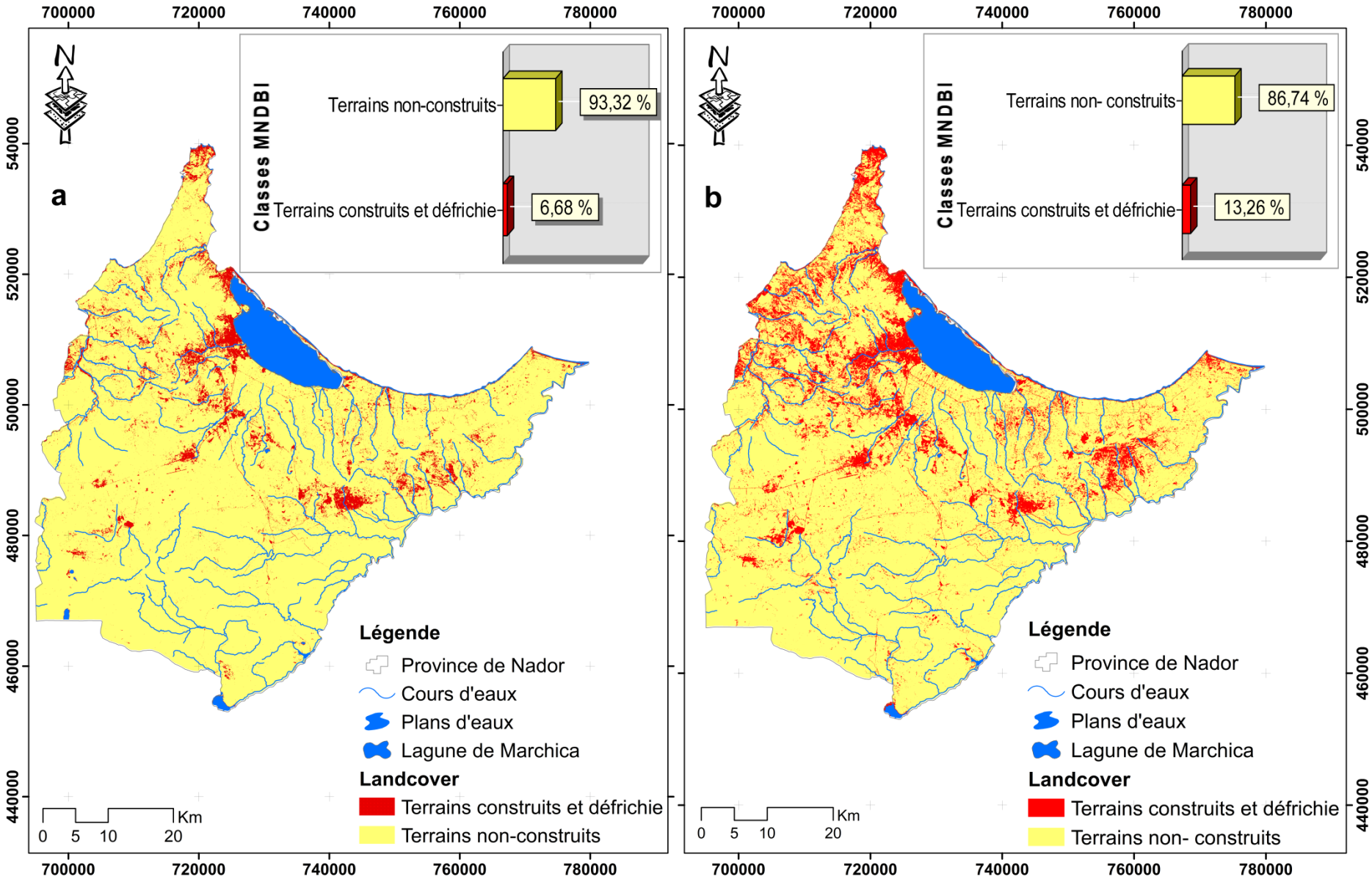


Figure 45: Répartition spatiale et pourcentages de chaque classe de l'indice MNDBI selon la méthode BAEM dans la région de Nador en 2007 (a) et 2017 (b)

2.3 Indice modifié d'eau par différence normalisé (MNDWI)

L'indice modifié d'eau par différence normalisé (MNDWI) s'est avéré être l'outil le plus approprié pour l'extraction et la délimitation des zones d'eaux libres, notamment les lacs et les oasis, compte tenu de la présence de zones urbaines et périurbaines. Plusieurs répétitions ont été effectuées pour sélectionner le seuil optimal. Ce dernier a été choisi en corrélant la localisation des masses d'eau à partir des données d'enquêtes de terrain et des images Google Earth avec l'indice MNDWI calculé pour les années 2007 et 2017. Un seuil de 0,7 a été choisi comme le plus approprié pour l'extraction des eaux de surface. Le seuil a pris en compte les critères suivants: non-inclusion d'éléments tels que les ombres nuageuses, les routes et la végétation dans les eaux de surface.

Les cartes réalisé pour l'indice MNDWI pour les années 2007 et 2017 (Figure 59) pour le mois de juin, la superficie totale et le pourcentage de chaque classe de l'indice MNDWI ont été illustrées et calculés (Tableau 41).

Tableau 31: Superficie totale et pourcentage de chaque classe de l'indice MNDWI

Classes MNDWI	**2007**		**2017**		**2007-2017**	
	Superficie (km²)	**% de ST**	**Superficie (km²)**	**% de ST**	**Changement (km²)**	**Changement (%)**
Zones non aquatiques	3075.28	99.17	3077.53	99.25	+2.25	+0.08
Zones aquatiques	25.64	0.83	23.39	0.75	-2.25	-2.25

NB : % de ST : Pourcentages de superficie par rapport à la superficie de mesure d'image (3101.4 km²).

Les résultats montrent une diminution significative des eaux de surface (zones aquatiques) au cours de la dernière décennie, avec des valeurs moyennes de l'indice MNDWI de -0,37 et -0,34. L'analyse de l'indice MNDWI a révélé que la classe des zones non-aquatiques est passée de 3075,28 km² en 2007 à 3077,53 km² en 2017, ce qui représente une augmentation modeste de 0,08 %. A l'inverse, les masses d'eau ont enregistré une diminution substantielle de 20,9% en passant de 25,64 km² en 2007 à 23,39 km² en 2017 de la superficie totale.

Les résultats de l'analyse cartographique indiquent avec certitude que la composante humidité de la transformation MNDWI peut montrer à certains endroits un grand nombre de pixels d'eau. Il est important de noter que les changements dans les masses d'eau peuvent être attribués à divers facteurs et doivent être interprétés avec prudence. Le grand nombre de pixels d'eau visibles dans certaines zones est probablement dû à l'inclusion de l'humidité du sol et des plantes des zones aquatiques.

Les résultats obtenus de l'indice MNDWI pour la région de Nador entre 2007 et 2017 démontrent une diminution significative des masses d'eau. La régression des ressources en eau est due à leur utilisation intensive, notamment dans les plantations de céréales, de légumes et de fruits, mais aussi pour la consommation domestique et industrielle. Le changement climatique exacerbe ce problème, entraînant une pénurie d'eau, une diminution des précipitations et une augmentation des températures.

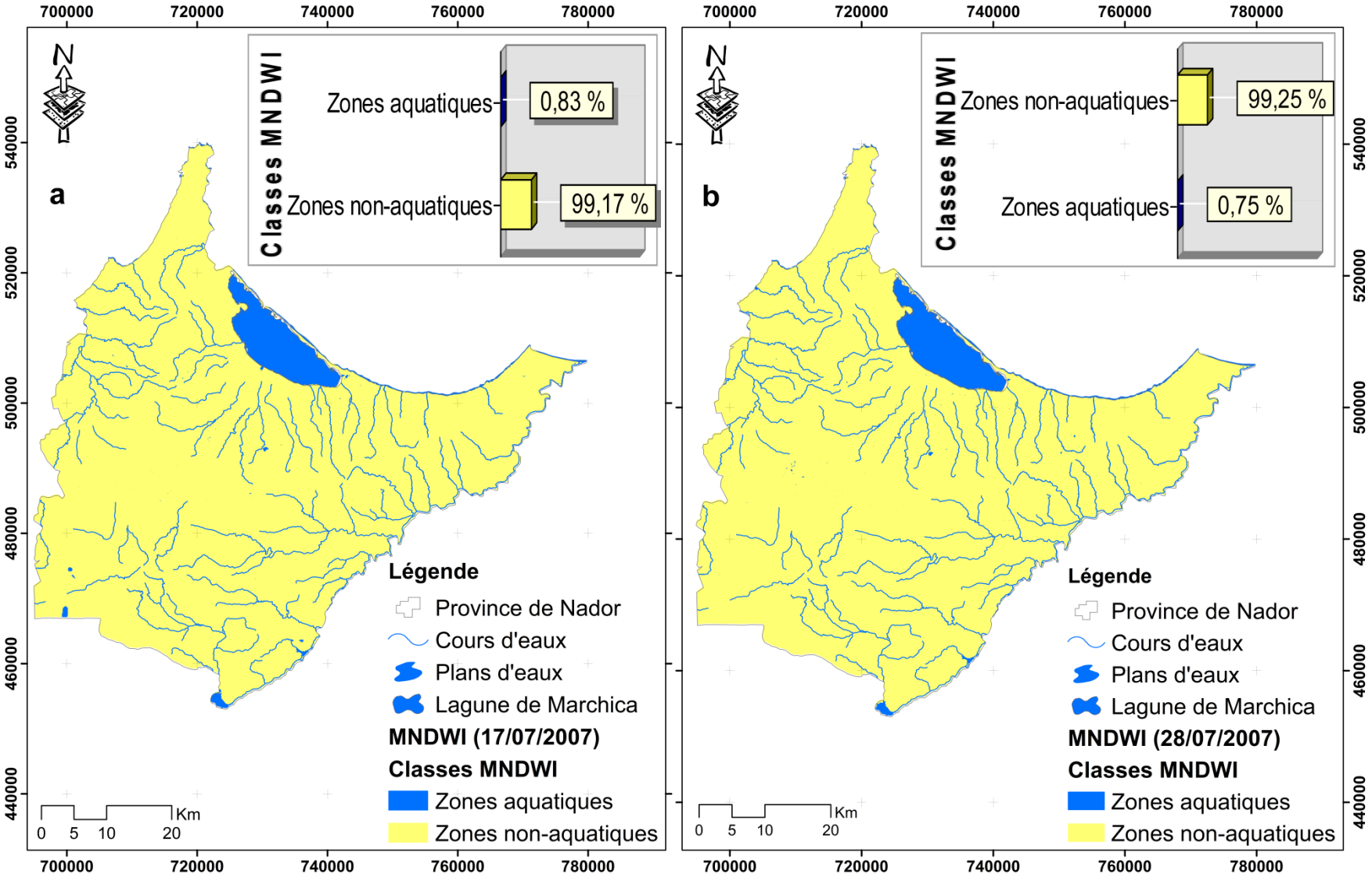


Figure 46: Répartition spatiale des classes de l'indice MNDWI dans la région de Nador pour 2007 (a) et 2017 (b)

2.4 Température de surface des terres (LST)

L'utilisation de l'équation 32 (Chapitre III) a permet d'extraire les informations relatives à la température de surface des terres (LST) via les données satellitaires en se basant sur les bandes infrarouge thermique 6 pour Landsat-5 TM et 10 pour Landsat-8 OLI. Dans notre étude, nous avons opté à l'utilisation de la bande infrarouge thermique 10 vue que les paramètres issue de la bande 11 du capteur infrarouge thermique Landsat-8 (TIRS) présentaient de grandes incertitudes comme expliquer par l'avis d'étalonnage établi par l'USGS. Ce qui fait les données TIRS de la bande 10 a été suggéré pour être utilisées comme un spectre unique en raison de sa transmissivité atmosphérique élevée pour l'estimation du LST (***Yu et al.2014***).

Les résultats de l'analyse spatiale ont montré que LST avait changé de manière significative pour le mois de juin de 2007 à 2017 (Figure 60). Les températures à proximité des zones de végétation naturelle et des plans d'eaux étaient inférieures à celle avoisinant les zones de terrains défrichie, des zones bâtis et des terrains agricoles. Les zones non perturbée par les pratiques humaines peuvent générer un refroidissement localisé ce qui au contraire des zones impactée caractérisée par un réchauffement. Les valeurs moyennes de l'indice LST pour 2007 et 2017 étaient de 32,83°C et 38,04°C respectivement. LST variait de 17,7°C à 39,8°C en 2007 et de 15,4°C et 47,6°C en 2017.

L'analyse cartographique de l'évolution de répartition de l'indice LST pour la période étudiée montre que la température de surface se croise dans certaines zones avec une diminution du Nord-Est au Sud-Ouest en se concentrant dans la partie Sud de région. La tendance générale de la distribution des températures de surface trace un système complexe d'utilisation/d'occupation des terres (LULC). Les cartes LST pour 2007 et 2017 ont été présentées (Figure 60-a et 60-b). La description, la superficie et le pourcentage des classes de l'indice LST ont été calculés (Tableau 42).

Tableau 32 : Superficies et pourcentages pour chaque classe des centroïdes de l'indice LST

Classes LST	**Centroïdes LST**	**Classes (°C)**	**2007**		**2017**		**2007 -2017**	
			S (km²)	**% de ST**	**S (km²)**	**% de ST**	**Ch.t(Km²)**	**Ch.t (%)**
Faible	LLA	15-20	6.55	0.21	0.67	0.04	-5.88	**-0.17**
Modéré	NLA	20-25	43.57	1.41	14.13	0.82	-29.44	**-0.59**
Elevé	HLA	25-30	447.44	14.43	78.41	4.54	-369.03	**-9.98**
Très élevé	VHLA	30-35	1845.03	59.5	585.36	33.87	-1259.67	**-25.63**
Extrême	**EHLA**	**≥ 35**	**758.22**	**24.45**	**1049.74**	**60.74**	**291.52**	**+36.29**

NB : S (km²) : Superficie en km² ; % de ST : Pourcentages de superficie par rapport à la superficie de mesure d'image (3101.4 km²); Ch.t (km²) : Changement en km²

L'analyse des résultats de répartition des centroïdes de l'indice LST a révélé que la classe LST faible "LLA" (15-20°C) variait de 6,55 km² en 2007 à 0,67 km² en 2017, soit une régression de 0,17 %. De même, la classe LST "NLA" (20-25°C) est passée de 43,57 km² en 2007 à 14,13 km² en 2017, soit une réduction de 0,59 %. Entre 2007 et 2017, la superficie occupée de la classe LST "HLA" (25-30°C) a diminué d'environ 9,98 %, passant de 447,44

km² à 78,41 km². Les classes LST "VHLA" (30-35°C) et "EHLA" (≥35°C) ont connu les changements les plus significatifs et ont varié respectivement de 1845,03 km² à 585,36 km² et augmentant de 758,22 km² à 1049,74 km².

De 2007 à 2017, ont enregistrant une forte régression de 25,63% pour la classe LST Très élevée et une forte augmentation de la classe LST extrême de 36,29 % respectivement. En 2007, les plans d'eau ont été placés dans la zone de température de surface avec les centroïdes HLA, NLA et LLA, alors qu'ils ont été placés dans les zones de température HLA, VHLA et EHLA en 2017. Les arbustes et reboisements, et les forêts et matorrals n'ont pas été classés dans la même zone de température mais respectivement dans les zones de centroïdes LST: NLA, HLA et VHLA. Les zones étudiées étaient entourées des parcours et des terres dégradées mais également caractérisées par la présence de terres urbaines, bâties et terrains nus. La température de surface dans ces zones a été placée dans les zones de centroïdes LST: VHLA et EHLA. En 2017, les terres agricoles, les arbustes et reboisements et les forêts et matorrals étaient principalement réparties dans les zones de centroïdes LST: HLA, VHLA et EHLA.

Les parcours et terres dégradées n'avaient pas le même profil de température de surface, bien que les deux se situent dans la plage de température extrêmement élevée, comme le montre la distribution des gradients de température des terres agricoles, des arbustes et reboisements, des forêts et matorrals, des terres urbaines, bâties et terrains nus et des plans d'eaux, on peut voir que la température globale avait généralement tendance à augmenter entièrement au niveau de la région de Nador pendant la saison d'été.

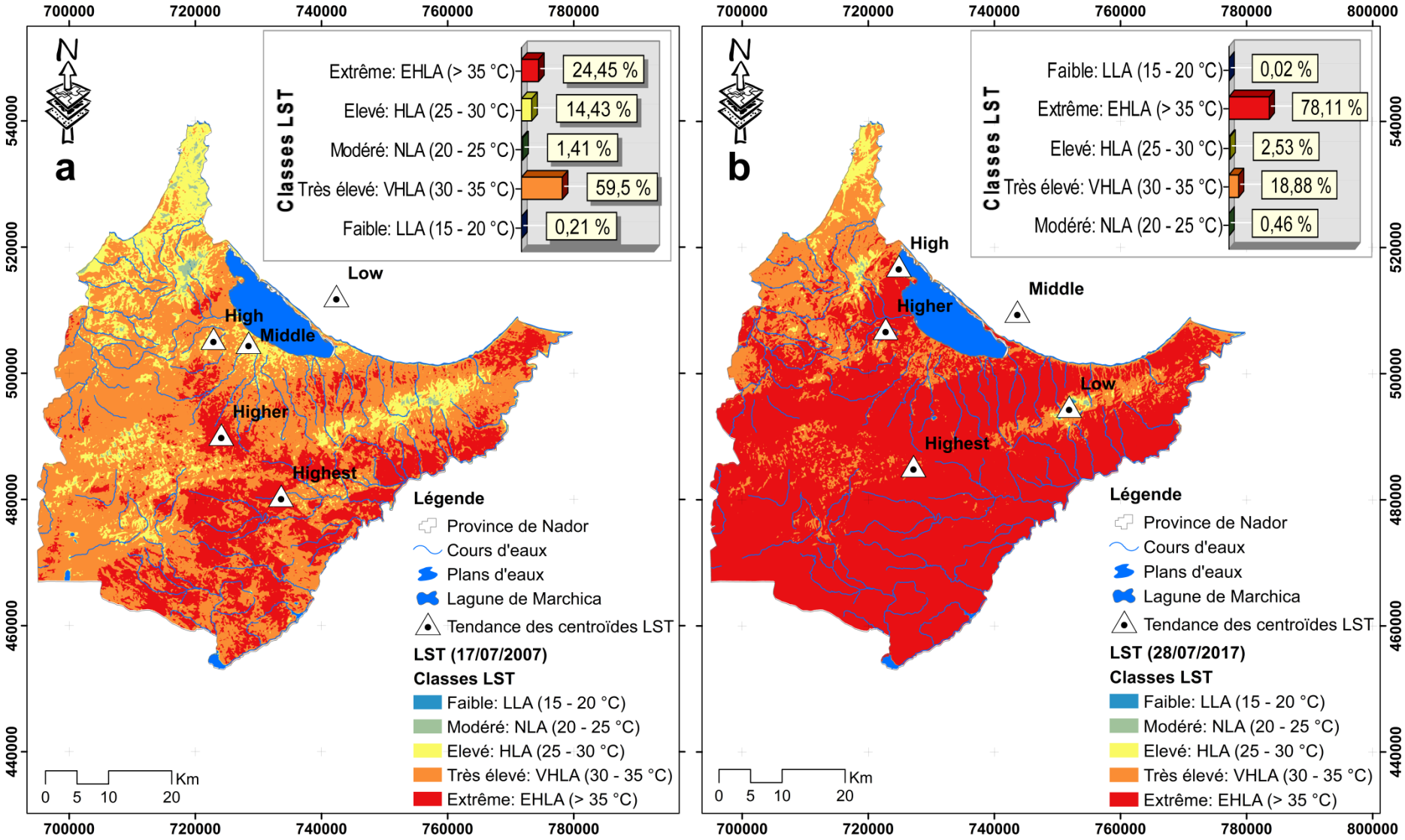


Figure 47: Carte de répartition spatiale de l'évolution de la température de surface et la tendance des centroïdes LST dans la région de Nador en 2007 (a) et 2017 (b)

2.5 Spatialisation de la distribution LST

L'utilisation des images satellites Landsat-5 TM et Landsat-8 OLI prises en juin 2007 et 2017 a permis d'extraire l'image LST pour la région de Nador. L'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la température de surface a montré qu'il avait changé de manière significative au cours de 10 ans (Figure 58). Un profil Est-Ouest a été construit en tenant compte des différentes utilisation/occupation des terres (LULC) de la région de Nador: Terrains urbains, bâtis et terrains nus; Terres agricoles; Arbustes et reboisements; Forêts et matorrals; Parcours et terres dégradées. La carte du profil Est-ouest a été construite pour cartographier et suivie la distribution et les limites de différentes changement de classes LULC en fonction de la variation spatiale de l'indice LST (Figure 61).

En 2007, la répartition des classes LULC à partir du profil Est-ouest était dans l'ordre E-B-A-E-C-D (Parcours et terres dégradées; Terres agricoles; Terrains urbains, bâtis et terrains nus; Parcours et terres dégradées; Arbustes et reboisements; Forêts et matorrals). Sous l'influence des pratiques et activités humaines et des facteurs et processus naturels, certaines classes de LULC ont été évoluées vers des caractéristiques différentes. En 2017, en gardant la même distribution du profil LULC, nous constatons une variation en termes de représentativité au niveau des différentes classes étudiée. Plus de détails sur les profils de température d'Est en Ouest dans la région de Nador ont été décrits. Les températures de surface ont augmentée de préférences pour chaque type d'occupation avec une allure changeante (Figure 61-a). Nous constatons une variation importante de LST pour chaque classe LULC en suivant le même ordre de distribution (E-B-A-E-C-D).

Les activités humaines et les facteurs naturels ont provoqué des changements significatifs dans le comportement thermique de surface des sols selon les différents changements d'occupation des sols. La configuration thermique du profile tracée partant de l'Ouest en Est de 2007 à 2017 a montré des variation très importantes de l'indice LST extraite de la figure en termes de superficie occupée en gardant le même ordre de distribution des classes LULC (Figure 61-b).

En comparant la distribution et la superficie occupée de chaque classe LULC pour 2007 et 2017 suivant le profil étudié, on peut identifier les types d'utilisation/occupation des terres (LULC) qui affectent les fluctuations de température de surface (LST). En 2007, dans le profil de température Est-Ouest, les classes LULC converties dans les mêmes types ont entraîné des changements de température de surface. Les mutations observées peuvent être expliquée par la conversion de certaines classes LULC. Les arbustes et reboisements, les parcours et terres dégradées ont changée en termes de superficie occupée en enregistrant une régression, par conséquences, les terres agricoles, et les terrains urbains, bâtis et terrains nus ont augmentée de préférences et ont entraîné une fluctuation de température de surface importante. Après avoir comparé les profils LULC-LST, il a été constaté une augmentation des terrains urbains, bâtis et terrains nus et des terres agricoles, tandis que les arbustes et reboisements, les parcours et terres dégradées, et les forêts et matorrals ont enregistrée une régression. Ces mutations de LULC suite à l'action mixte de l'activité anthropique et le changement climatique étaient le principal facteur influençant la distribution de la température de surface "LST" dans la région de Nador pendant la période étudiée.

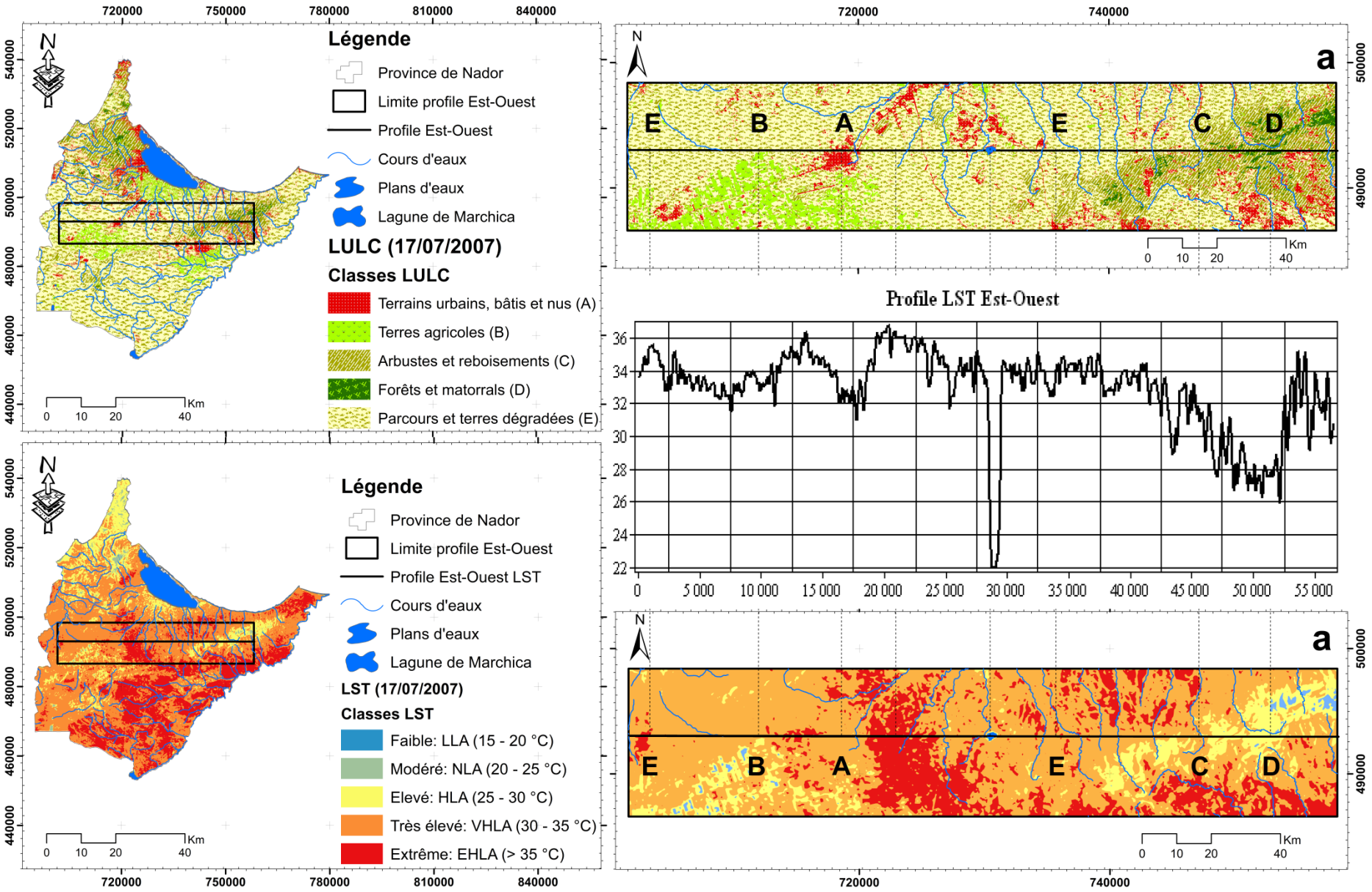


Figure 48 (a) : Ligne de profil LST sur la ligne Est-Ouest de LULC en 2007

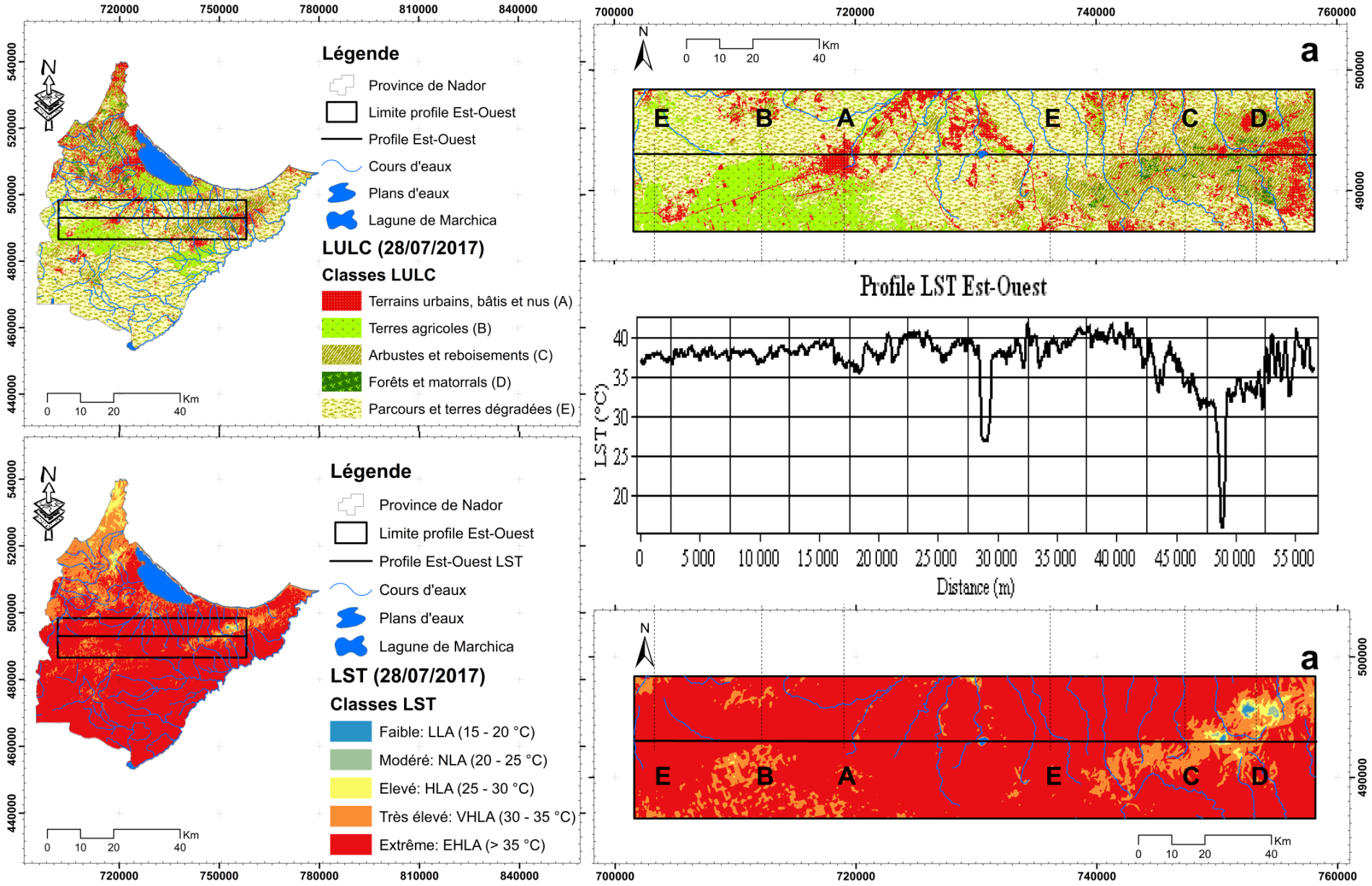


Figure 49 (b): Ligne de profil LST à la ligne Est-Ouest de LULC en 2017

3. LST pour divers types d'utilisation/couverture des terres (LULC)

L'étude de l'effet du changement des différents types d'utilisation/d'occupation des terres (LULC) sur la température de surface (LST) dans la région de Nador est une étape importante. Cinq classes LULC ont été générées dans la zone d'étude. Afin de montrer la relation entre le développement de différents types de LULC et la LST, les valeurs thermiques de chaque catégorie LULC ont été obtenues en superposant une image LST avec la carte LULC générée de la même année (Tableau 43). Les valeurs de l'indice LST maximum, minimum et moyen de différentes catégories LULC a été calculé en faisant la moyenne de toutes les valeurs de pixel correspondantes.

Tableau 33: Valeur LST maximale, minimale et moyenne dans différentes catégories LULC

Classes LULC	LST minimale (°C)		LST maximale (°C)		LST moyenne (°C)	
	2007	**2017**	**2007**	**2017**	**2007**	**2017**
Terres agricoles	20.22	22.72	38.31	46.64	30.30	**36.52**
Arbustes et reboisements	18.44	21.38	39.07	45.86	32.51	**34.82**
Forêts et matorrals	19.33	21.94	34.40	39.60	26.07	30.64
Terrains urbains, bâtis et nus	18.44	15.48	39.07	47.54	32.51	**36.03**
Parcours et terres dégradées	15.72	20.66	39.84	47.63	33.68	**39.73**

Le tableau 43 montre que les statistiques relatives à l'indice LST dans la région de Nador pour le mois de joint de 2007 et 2017. Les valeurs minimal, maximal et moyenne de l'indice LST pour 2007 et 2017 ont montré des variations significatives. Les classes de l'utilisation/ couverture des terres (LULC) qui ont enregistrée les valeurs les plus importante sont celle des terrains urbains, bâtis et nus, des parcours et terres dégradées, des terres agricoles et arbustes et reboisements, par contre les valeurs de LST pour les forêts et matorrals sont plus faibles en raison de leur grande capacité thermique. Selon les résultats obtenus par les profils est-ouest établie de la variation de l'indice LST pour différentes utilisation/occupation des terres (LULC) dans la région de Nador, différentes classes LULC ont présentaient une augmentation de la température de surface de 2007 à 2017 (Figure 62).

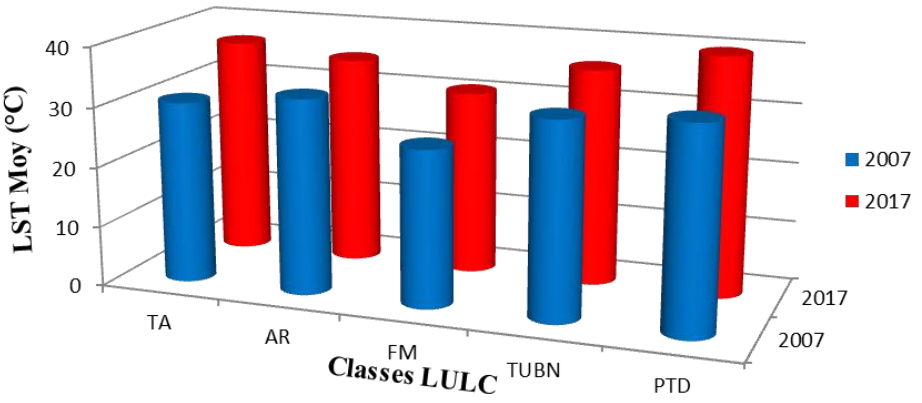


Figure 50: Températures de surface moyennes pour les types d'utilisation/de couverture des terres (voir les abréviations dans le tableau 42)

4. Relation entre la température de surface et NDVI-MNDBI-MNDWI-MNT

Cinq types d'utilisation/couverture des terres (LULC) ont été considérés comme étant en corrélation avec les conditions LST. Pour cela, la relation entre les différents indices à savoir LST et NDVI, LST et MNDBI, et entre LST et MNDWI pour les années 2007 et 2017 a été prise en compte. Comme la température de surface peut être réduite pour augmenter en haute altitude, le MNT (Modèle numérique de terrain) a été ajouté au calcul. Afin d'expliquer les facteurs sous-jacents aux tendances spatiales observées des changements de LULC, et de modéliser, examiner et explorer les relations spatiales entre les facteurs utilisés. Un ensemble de points avec différents types LULC a été choisi à l'aide du logiciel ArcGIS. Le tableau 44 présente les résultats de l'analyse de régression entre les différents facteurs utilisés.

Tableau 34: Corrélations entre LST et NDVI-MNDBI-MNDWI-DEM

		LST		NDVI		MNDBI		MNDWI		DEM	
		2007	**2017**	**2007**	**2017**	**2007**	**2017**	**2007**	**2017**	**2007**	**2017**
LST	**2007**	1									
	2017	0.996	1								
NDVI	**2007**	0.974	0.986	1							
	2017	0.994	0.981	0.951	1						
MNDBI	**2007**	0.936	0.925	0.942	0.938	1					
	2017	0.984	0.978	0.971	0.979	0.965	1				
MNDWI	**2007**	0.924	0.905	0.884	0.927	0.926	0.966	1			
	2017	0.943	0.935	0.928	0.935	0.931	0.982	0.989	1		
DEM		0.934	0.909	0.885	0.947	0.948	0.968	0.992	0.975	1	

NB: La corrélation est significative au seuil de 0,01

Les résultats du tableau 44 ont montré que la corrélation entre le MNDBI et LST était significativement positive. En revanche, la corrélation entre LST et NDVI, entre LST et MNDWI, et entre LST et le MNT était significativement négative. Pour approfondir leurs relations quantitatives, les images NDVI, MNDBI, MNDWI et LST de juin 2007 et 2017 ont été sélectionnées comme échantillons pour établir une régression multiple linéaire, qui peut, espérons-le, être utile pour surveiller et élever l'environnement thermique en fonction du LULC et du terrain, comme indiqué dans l'équation 41:

$$Y = -13.60 * \mathrm{NDVI} + 7.06 * \mathrm{MNDBI} - 15.39 * \mathrm{MNDWI} - 0.028 * \mathrm{DEM} \qquad \textit{Equation 41}$$

Où, X1 est le NDVI, X2 est l'albédo, X3 est MNDWI, X4 est DEM et Y est LST.

5. Facteurs clés des changements de température de surface terrestre (LST)

5. 1. Facteurs naturels

Plusieurs paramètres influencent la température de surface (LST), à savoir les facteurs climatiques, hydrographiques et géophysiques. Les données sur la température et les précipitations annuelles moyennes ont été recueillies au cours de la période 1985-2017 (Figure 63). Les précipitations annuelles ont diminué dans toute la région de Nador. Au cours de la même période 2007-2017, la zone d'étude a connu une variation importante de la température annuelle. Il semble avoir diminué pour les quatre stations. Ces changements ont

été principalement causés par le rayonnement atmosphérique, le rayonnement solaire et les conditions liées au changement climatique. Par conséquent, ces facteurs naturels peuvent affecter les changements dans le LST et le paysage de la région.

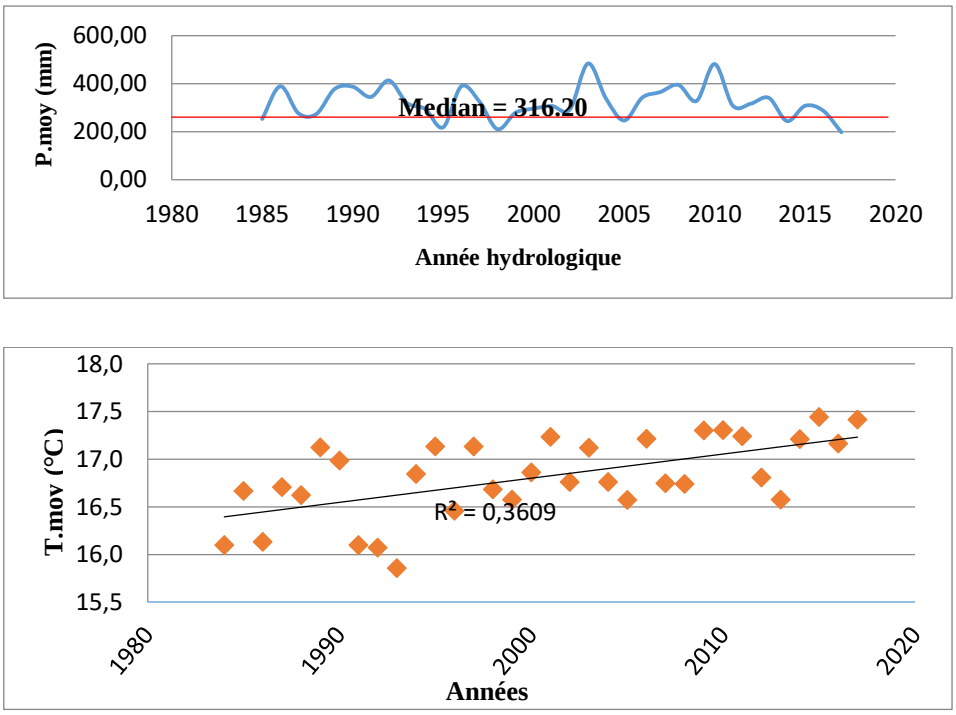


Figure 51 : Les précipitations et températures annuelle dans la région de Nador (1985-2017)

5. 2. Facteurs anthropiques

Les activités anthropiques, autres que les facteurs naturels, ont influencé la distribution de la température de surface. Les activités humaines de plus en plus menaçantes ont modifié les paysages de la région en transformant l'état de ces ressources pour répondre aux besoins exprimés en nourriture, logement et en matière d'aménagement. Ces pratiques ont documenté une tendance à la hausse rapide. Au fur et à mesure que la population augmentait, les ressources en sol, en eau et en végétation ont commencé à être exploitées de manière intensive. L'étude a tenté de clarifier la relation entre LST d'une part et entre NDVI, MNDBI et MNDWI d'autre part en 2007 et 2017. Des diagrammes de dispersion NDVI-LST, MNDBI-LST et MNDWI-LST ont été tracés pour un ensemble de sites d'échantillonnage représentant différents catégories d'utilisation/couverture des terres.

L'analyse des résultats de corrélation a montré que les valeurs de NDVI les plus importante étaient associées aux valeurs de température de surface les plus élevées pour 2007 et 2017. Les terrains urbains, bâtis et nus et les parcours et terres dégradées avaient très peu ou pas de végétation. Une augmentation du NDVI a entraîné une baisse de la température de surface. Ces résultats montrent qu'un taux de couverture végétale plus élevé était associé à de faibles valeurs de LST. L'indice MNDBI a montré que les valeurs LST les plus élevées sont associées à des valeurs MNDBI élevées. Cela signifie qu'une augmentation de l'indicateur MNDBI a provoqué une augmentation de la température LST. Les changements enregistrés pour l'indice MNDWI ont montré que les valeurs de LST les plus élevées sont associées aux valeurs de

MNDWI les plus basses de 2007 à 2017. Une augmentation du MNDWI peut influencer les valeurs de température.

Les valeurs R de la corrélation (Figure 62) ont été obtenues en prenant en compte le modèle numérique d'élévation. Pour NDVI et LST, la valeur R était de 0,88 en 2007 et de 0,93 en 2017. Pour MNDBI et LST, la valeur R était de 0,87 en 2007 et de 0,95 en 2017 et pour MNDWI ; la valeur R était de 0,96 en 2007 et de 0,95 en 2017 (Figure 62). Les résultats ont montré une forte corrélation négative entre LST et NDVI ; entre LST et MNDWI et entre LST et DEM, cependant, la corrélation entre LST et MNDBI est fortement positive. Les indices NDVI, MNDWI et DEM sont corrélés négativement avec LST et MNDBI. L'indice MNDBI a une influence positive sur les changements LST, ce qui explique la forte corrélation positive déterminé.

Les résultats ont montré que les changements climatiques aggravés par les activités humaines avaient un impact direct sur NDVI et le MNDWI et qui étaient positifs pour la MNDBI, qui influence les températures de surface des sols (LST).

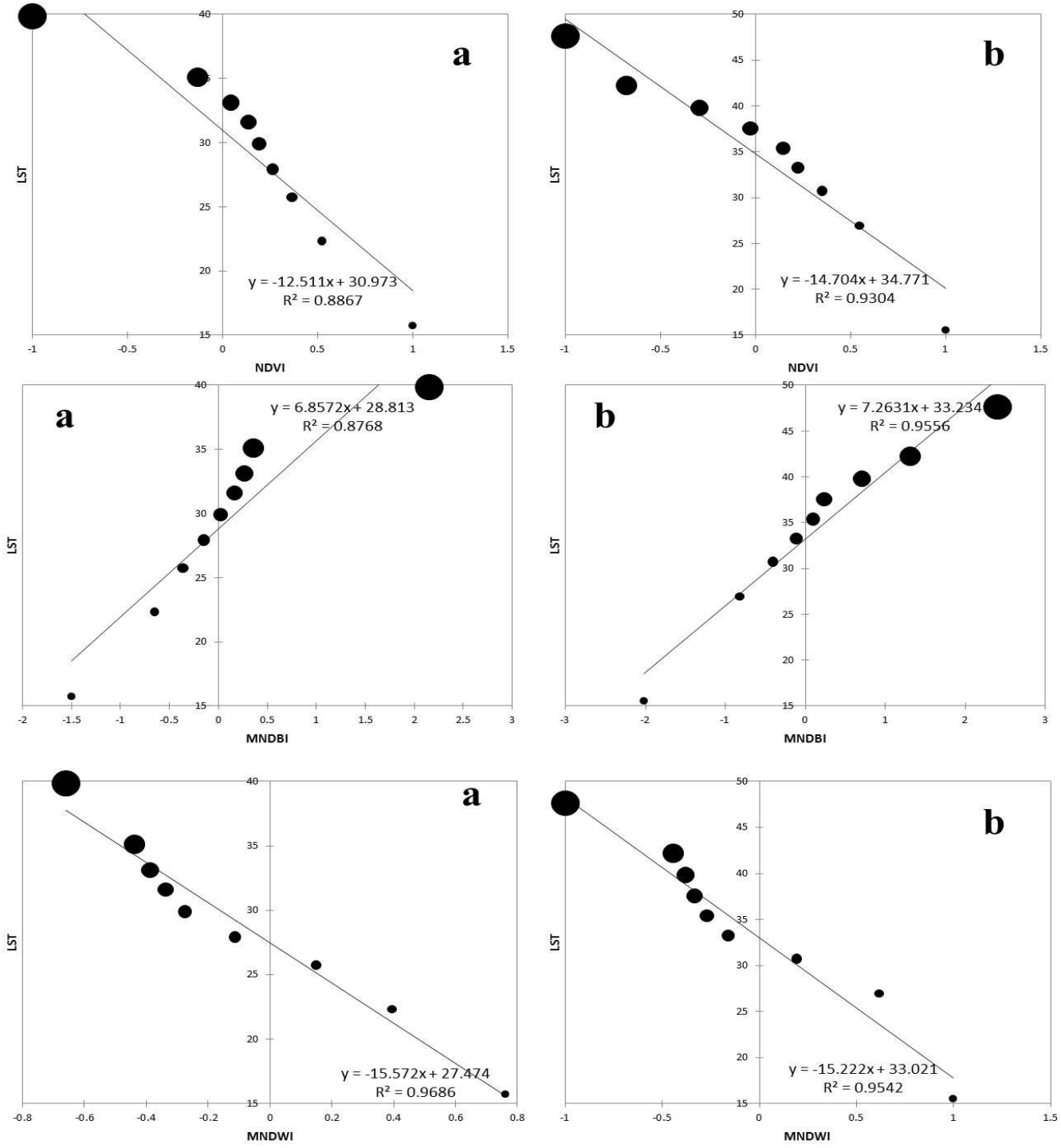


Figure 52: La relation entre le LST et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice modifié de construction par différences normalisées (MNDBI) et l'indice modifié d'eau par différence normalisée (MNDWI) dans la zone d'étude pour 2007 (a) et 2017 (b).

Conclusions et discussions

Selon des analyses indépendantes de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), les températures à la surface de la Terre en 2019 étaient les deuxièmes les plus chaudes depuis le début de la tenue de registres modernes en 1880 (https://www.giss.nasa.gov/). À l'échelle mondiale, les températures de 2019 étaient juste derrière celles de 2016 et ont poursuivi la tendance au réchauffement à long terme de la planète: les cinq dernières années ont été les plus chaudes des 140 dernières années selon GISS (Institut Goddard d'études spatiales) de la NASA. Les observations de température de l'air aux stations au sol sont essentielles pour étudier le réchauffement en fonction de l'altitude, mais de nombreuses zones de haute altitude sont encore largement sous-échantillonnées (***Lawrimore et al. 2011***). La discussion peut être résumée en trois parties comme suit :

(1) Cette étude évalue les changements dans la LST et les changements à grande échelle dans l'utilisation/occupation des terres (LULC) causés par l'impact du changement climatique et des activités humaines à l'aide de données dérivées de données satellitaires multispectrales et multitemporelle Landsat-5 TM et Landsat-8 OLI. Les indices NDVI, MNDBI et MNDWI ont été utilisés pour analyser qualitativement les relations entre les classes LST et de LULC. Dans cette étude, l'équation de transfert radiatif (RTE) de la méthode monocanal a été appliquée pour récupérer les températures de surface de la Terre (LST) des bandes thermiques infrarouges 6 (Landsat-5 TM) et 10 (Landsat-8 OLI). La méthode a montré sa fiabilité en appliquant une seule bande thermique à partir d'images Landsat.

(2) En 2007, la classification et la répartition de l'utilisation/occupation des sols (LULC) selon cinq classes: Terres agricoles ; Arbustes et reboisements ; Forêts et matorrals ; Terrains urbains, bâtis et terrains nus; Parcours et terres dégradées a été observée le long du profil est-ouest dans l'ordre E-B-A-E-C-D. Les résultats ont montré que l'action anthropique et les processus environnemental naturel ont entraîné des changements de la température de surface LST dans les positions relatives des différentes types LULC. En 2017, le profil est-ouest a été modifié en ce qui concerne les superficies occupée pour chaque classe LULC avec une variation importante de température de surface LST. Les facteurs naturels et les activités humaines ont entraîné des changements dans l'utilisation/ occupation relative LULC qui, à leur tour, ont affecté les températures de surface dans la région de Nador. En particulier, l'expansion des terres agricoles ; des terrains urbains, bâtis et nus; des arbustes et reboisements et des forêts et matorrals, ainsi que la contraction des parcours et terres dégradées et des masses d'eau ont été les principaux facteurs influençant la distribution de la température de surface dans le Région de Nador. Les activités liées au facteur anthropique ont à savoir l'expansion des zones alloués à l'urbanisation et l'agriculture ont été identifiés comme les principaux moteurs conduisant l'augmentation des températures de surfaces LST. Avec les besoins humains en croissance pour répondre au développement économique qui ne cesse de pester, l'utilisation des ressources naturelles est devenue de manière irrationnelle. Conduisant à une utilisation intensive des techniques et méthodes complexes pour le développement de l'utilisation/occupation des sols au niveau de la région Nador.

(3) Cette étude a noté que la distribution spatio-temporelle de l'indice LST pour le mois de juin pour 2007 et 2017 a considérablement évolué. Les LST minimum et maximum pour juin étant respectivement de 15.91°C et 39,84°C en 2007 et de 15.48°C et 47,63°C en 2017.

Sur dix ans, les centroïdes LST ont changé d'emplacement, le centroïde EHLA (≥ 35°C) a montré la plus grande dominance en 2017 par rapport au centroïde VHLA (30 - 35°C) qui était le plus dominant en 2007. A noter que l'amplitude du centroïde EHLA (≥ 35°C) était proche de celle du centroïde VHLA (30 - 35°C) ce qui indique que LST a changé visiblement au cours du mois de juin voir même annuellement.

La distribution de température de surface se croise dans certaines zones et la température diminue du nord-est au sud-ouest en se concentrant dans la partie sud de la zone d'étude. La tendance générale de la distribution des températures trace un système complexe d'utilisation des terres/d'occupation des terres. De 2007 à 2017, ont enregistrant une forte régression de 25,63% pour la classe LST Très élevée et une forte augmentation de la classe LST extrême de 36,29 % respectivement. En 2007, les plans d'eau ont été placés dans la zone de température de surface avec les centroïdes HLA, NLA et LLA, alors qu'ils ont été placés dans les zones de température HLA, VHLA et EHLA en 2017. L'évolution de la distribution spatio-temporelle des centroïdes LST indique que la région de Nador semble avoir un effet de réchauffement de surface chaud mis en évidence par la distribution apparente de la température de surface LST. En revanche, une relation significativement négative a été observée entre LST et NDVI, LST et MNDWI, et LST et DEM. La relation entre MNDBI et LST avaient une relation significativement positive. Une analyse de régression multiple a été créée avec LST et les indices NDVI, MNDWI, MNDBI et DEM, qui peuvent être utilisés pour surveiller l'environnement thermique en fonction des variations observes pour différentes classes LULC.

À l'avenir, les relations couplées entre les modèles d'occupation des sols et la température de surface, ainsi que d'autres paramètres devront être considérés pour l'aspect mixte de la relation entre les facteurs naturels et anthropiques. Celles-ci devraient être étudiées pour améliorer la précision de la réduction d'échelle des ensembles de données. Les données sur les caractéristiques du substrat et des sols et leur comportement thermique peuvent être utiles pour déterminer les relations entre la température de surface et les changements à grande échelle de LULC.

En outre, la relation entre les précipitations et la température à la surface de la Terre est plus instantanée, ce qui la rend plus utile pour la réduction d'échelle des ensembles de données de précipitations hebdomadaires ou quotidiennes, ce qui est très important pour la recherche hydrologique, météorologique et écologique. L'analyse des déterminants des changements de LST a identifié des facteurs naturels importants, notamment la température et les précipitations annuelles moyennes, autres que l'effet des facteurs anthropiques. Avec le soutien de la télédétection et du SIG, cet étude a analysé que les résultats suivants indiquent que la LST a considérablement changé au cours des 10 dernières années dans la région de Nador, Rif oriental, Maroc. Les résultats peuvent être utilisés comme outils d'aide à la décision pour les projets de développement et d'aménagement du territoire à différents niveaux de manière efficace et durable.

Troisième partie: Modélisation de l’érosion hydrique

Chapitre VI : Les directives PAP/CAR pour l'évaluation de la susceptibilité à l’érosion hydrique des sols dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Chapitre VI: Les directives PAP/CAR et le modèle PAP/CAR modifié pour l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion hydrique des sols du bassin versant Zenaga

- **Le modèle PAP/CAR classique**

Introduction

Les directives du Plan d'Action Prioritaire du Centre d'Activités Régionales (***PAP/CAR, 1989***) consistent en une action prioritaire intégrée intitulée «*Promotion de la protection des sols en tant que composante essentiel de la protection de l'environnement dans les bassins et zones côtières méditerranéens*». Cette action a été entreprise dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée (PAM), en collaboration avec la direction générale de la conservation de la nature (DGCONA) connu par l'institut national de la conservation de la nature (***ICONA, 1997***), le centre arabe d'étude des terres arides (ACSAD), le ministère espagnol de l'environnement et la division de la mise en valeur des terres et des eaux (AGL) de l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

Au cours des années 90, plusieurs contributions ont été lancées dans ce sens pour garantir la réussite de ce programme. Plusieurs directives ont été élaborées pour la mise en place du modèle cartographique de base (***PAP/CAR, 1989, 1992, 1996, 1997, 1998 et PNUE/PAM/PAP, 2000***).

Nombreuses publications consacrées à l'étude de l'érosion (***Attia et al. 2005; Sadiki et al.2012; Mesrar et al. 2015; Tahouri et al. 2016; Tahouri et al.2022***) ont démontré leur fiabilité à travers l'utilisation du modèle consolidé ***PAP/CAR/PNUE/PAM/PAP (2000)*** pour l'évaluation de la dégradation des terres.

Les directives PAP/CAR pour l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion hydrique s'appuient sur les liens d'interdépendance des facteurs causaux de l'érosion (Lithologie, pente, densité du couvert végétal et occupation des sols) avec différentes formes et processus de l'érosion réelle. Le modèle permet d'hiérarchiser la surface d'un bassin versant en unités distinctes selon le risque à l'érosion hydrique. Ce qui va permettre de déterminer les zones fragiles potentiellement vulnérable, ainsi que d'identifier, décrire et de mesurer les processus dynamiques de l'érosion hydrique, telles que la dégradation irréversible d'une part, et les zones stables non affectées d'autre part.

Notre étude a pour objectifs d'évaluer le processus d'érosion hydrique en étudiant la distribution, l'interaction et l'interdépendance des facteurs influençant l'état érosif des sols et leur degré d'influence, ainsi que les tendances du risque de l'érosion hydrique par l'application des directives PAP/CAR et le modèle PAP/CAR modifiée selon une approche opérationnelle de vérification de cartes et d'analyse de bases de données.

La version classique du modèle (***PAP/CAR, 1998 ; PAP/CAR, 1998a ; PAP/CAR, 2000***) préconise, dans sa partie technique, une approche méthodologique, dont les opérations ont été regroupées en une approche cartographique de plusieurs opérations de croisement, de traitement et d'analyse des jeux de données en trois phases complémentaires (Phase

prédictive, descriptive et de consolidation). Il s'agit de concilier les avantages, la diversité des techniques et la modélisation du traitement des données et de la cartographie (Figure 41).

I. Approche prédictive pour l'évaluation des états érosifs

L'approche prédictive consiste à identifier, évaluer et intégrer tous les paramètres physiques afin de déterminer des hypothèses préliminaires, ainsi qu'à obtenir des informations sur l'état actuel de la dégradation des terres en fonction de l'influence potentielle des différents facteurs qui contrôlent l'érosion (Lithologie, pente, utilisation, protection des sols, degré de recouvrement, etc.). Elle conduit à la cartographie d'unités homogènes d'états érosifs, fournissant le cadre pour cartographier le potentiel et les tendances de l'érosion des sols

La phase prédictive de cartographie de la susceptibilité des sols à l'érosion, présente des avantages colossaux dans la phase initiale des prospections, tels la vitesse d'exécution, les coûts relativement bas et les besoins restreints en personnel expérimenté, lui confère une phase de qualité. L'approche consiste à représenter la vulnérabilité des sols à l'érosion par un zonage selon un jeu de données (Dataset), représentant un ensemble de valeurs «organisées» où chaque valeur est associée à une variable (attribut) et à une observation réelle sur le terrain. Une variable décrit l'ensemble des valeurs décrivant le même attribut et une observation contient l'ensemble des valeurs décrivant les attributs d'une unité.

Les éléments pris en compte pour la cartographie d'unités homogènes des états érosifs sont l'érodibilité par la lithologie et la pente, et la protection du sol par le couvert végétal et le degré de recouvrement. Ce processus définit la résistance des matériaux à l'arrachement, leur protection contre l'agressivité des pluies et le ruissellement.

La carte d'érodibilité des sols est réalisée en mettant en jeu les classes de pentes topographiques, exprimées en pourcent avec les classes de lithofaciès exprimé selon leur résistance mécanique et leur degré de cohésion. On différencie les roches dures et compactes, non-érodible, du matériel modérément ou fortement érodible, ou des sols et sédiments meubles, non cohésifs dont les constituants sont facilement détachables et mobilisables par l'eau.

La carte de protection des sols a été obtenue en mettant en relation deux facteurs, l'occupation des sols (types de végétation) et la densité du couvert végétale, exprimé en pourcentage selon le degré de recouvrement. Ces deux facteurs ont été obtenus grâce à l'utilisation des imageries satellitaires, la télédétection, la photo-interprétation, la classification automatisé des occupations des sols et des visites de terrains. Leur superposition détermine le degré de protection du sol.

La superposition des deux cartes précédente permet d'obtenir la carte des états érosifs, fournissant ainsi le canevas pour la cartographie de la susceptibilité à l'érosion. La superposition des paramètres d'entrée consiste à les mettre en relation selon des matrices définies par les directives du PAP/CAR. Ces matrices ont été obtenues à travers des études, des ateliers et des expériences au niveau d'un certain nombre de pays méditerranéens afin de tirer les différentes corrélations entre les paramètres mis en jeu ***PAP/CAR, (1998)***, ***PAM/PNUE, (2000)***, ***PAP/CAR, (2000)***, ***Aboulabbas, (2005)***.

1. Elaboration de la carte d'érodibilité des sols

L'évolution d'un sol est liée en grande partie à sa vitesse de formation (pédogenèse) et de celle de son décapage superficiel (érosion en nappe). L'érodibilité des sols est fonction de l'intensité et la vitesse du ruissellement contrôlée par la pente topographique. L'élaboration de la carte d'érodibilité a nécessité la réalisation de la carte des pentes et la carte des lithofaciès. La superposition des deux cartes par la combinaison des entités de base de chaque facteur résultant permet d'obtenir la carte d'érodibilité.

1. 1. Carte des pentes

La démarche pour l'élaboration de la carte des pentes, commence par la délimitation de tous les thalwegs identifiables à partir de la carte topographique de référence (Cours d'eau temporaires ou permanents), chose qui va permettre de délimiter tous les espaces en pente. L'identification des lignes de partage des eaux pour délimitée les versants, les portions de pentes continues, la représentation des ruptures de surface de pentes et la cartographique des changements de pente à l'intérieur de chaque polygone identifié. Cependant, il est avéré que la démarche de réalisation de la carte des pentes est d'une complexité, ce qui rend le modèle des directives PAP/CAR moins performant en termes d'application.

La méthode actuelle pour la réalisation de la carte des pentes est fondée sur la base du processus cartographique basique. L'utilisation de la modélisation par SIG, le modèle numérique de terrain (MNT) de 25 m de résolution (***USGS, 2017***) et l'extension Arc Hydro avec ces deux composantes: Arc Hydro Data Model et Arc Hydro Tools (***ESRI, 2011***). Ce système basé sur ArcGIS est une technologie de système de gestion de base de données relationnelle géospatiales (SGBDR) de pointe conçu pour prendre en charge les applications de ressources en eau permettant d'intégrer l'hydrographie et l'hydrologie au SIG (***Shamsi, 2008; Zhang et al.2010***). L'extension «Spatial Analyst» avec ces boites à outils est utilisée pour l'extraction du MNT du bassin versant. La reclassification des classes de pentes selon les directives du modèle PAP/CAR (Tableau 45):

Tableau 45: Classes de pentes

Code PAP/CAR	Classe des pentes
1	Nulle à faible (0-3%)
2	Modérée (3-12%)
3	Abrupte (12-20%)
4	Très abrupte (20-35%)
5	Extrême (>35%)

L'analyse des résultats de traitement mis en jeu selon la méthode PAP/CAR (Tableau 45 et Figure 65) montrent que les pentes faible (0-3%) sont les plus dominantes avec 51.18% suivies des pentes modéré (3-12%) avec 29.4% de la superficie totale, ces deux classes apparaissent au niveau de la partie centrale et méridionale caractérisant les parties basse du bassin versant Zenaga. Les pentes abruptes (12-20%) sont apparentes sur les parties de passage vers les zones les plus élevés, avec des pourcentages allant à 11.61%. Par contre, les

pentes très abrupte (20-35%) et extrême (>35%), ne présentent que 6.81% du totale de superficies des pentes, caractérisant les zones amonts du bassin versant. Malgré leur faible représentation, la présence de ces types de versants s'explique par un relief irrégulier, facilitant ainsi l'activité de l'eau et rendant le bassin versant plus vulnérable.

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), l'influence de la pente est remarquable sur le ruissellement. Les caractéristiques morphométriques étudiées témoignent d'un écoulement des eaux à forte dynamique pendant les périodes arrosées, chose qui va influencer positivement l'ablation des matériaux de surface. Les pentes supérieures à 20% marquent les sommets d'altitudes importantes du bassin versant. Les pentes inférieur à 3% prédominent et jalonnant les périmètres irrigués du Gareb (*Guaret*), Bou Areg et sur le cordon dunaire Bokana.

La répartition des surfaces de pentes (Figure 34) suit en grand partie le canevas établie de la courbe hypsométrique du bassin, les altitudes élevées marquent les pentes fortes et celle basse les pentes faibles. L'alternance dans le bassin versant de faciès présentant différentes résistance explique la variation de l'érosion différentielle et donc la structuration de la forme de pente dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

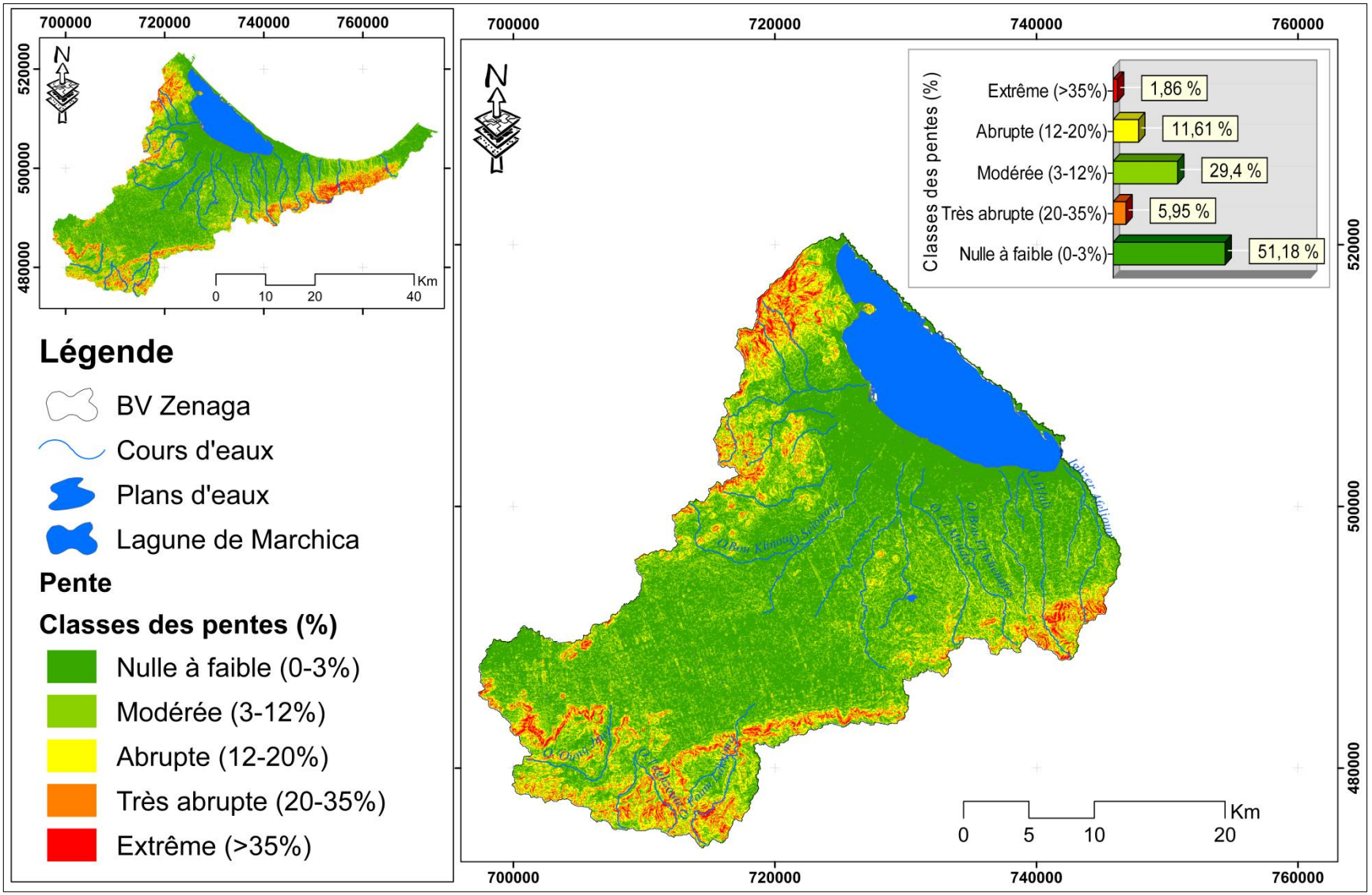


Figure 53: Carte des pentes du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

1. 2. Carte des lithofaciès

La carte des lithofaciès a été réalisée sur la base des cartes géologiques couvrant le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), cela a nécessité la réalisation d'une mosaïque des cartes géologiques à l'échelle de 1/50000. L'absence de recouvrement cartographique géologique à l'échelle de 1/50000 a nécessité l'amélioration des données obtenue, pour cela d'autre donnée ont été utilisé à savoir la carte géologique de Oujda (1/500000), la carte géologique de Suter (***Suter, 1980***) et les visites/études de terrain. La présente carte permet d'identifier les différents types des faciès lithologiques exposés à l'érosion hydrique. Les roches à l'affleurement ou leur couverture de formations superficielles pédologique ou sédimentaire. Ces types de faciès sont classés selon le degré relatif de cohésion de leur constituant et de résistance mécanique et physique à l'érosion. Les différents faciès lithologiques sont répartis en 5 classes. A chaque classe est affecté un code pour chaque degré de friabilité ou résistance (Tableau 46).

Tableau 46: Classes de lithofaciès selon le degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion

Classe de lithofaciès	Degré de cohésion des sols
1 (a)	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, croûtes, affleurements de grès ferrugineux (calcaires massifs, sols fortement pierreux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroûtés).
2 (b)	Roches fracturés modérément altéré et sous-sols très compactés et cohésifs.
3 (c)	Roches ou sols/sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.).
4 (d)	Roches 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. meuble, non cohésif et matériel détritique

Les classes de sédiment ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique 5(e) représente 47.96% des terrains du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Ils sont situés à l'extrême Nord-ouest et Nord-est et étalés sur de grandes surfaces du bassin de Gareb et au niveau de Sebkha de Bou Areg jalonnant les lits des oueds et la lagune de Marchica.

Les roches compactes non altérées 1(a) occupent la partie amont Nord-est du massif de Gourougou et des massifs satellite, à savoir le Jbel Afra, Beni Bou Ifrour et Iksan de la partie aval, mais aussi au niveau des zones amont du bassin versant en allant des massifs de Kebdana vers Tiztoutine, il représente 25.72% de la superficie du bassin (Figure 66).

La classe des roches et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés 4(d) est localisée au niveau de la zone de passage en allant de Sebkha de Bou Areg vers les sommets des massifs des Kebdana, la partie Nord-ouest au niveau de Oulad Bou'Azza et Tiztoutine, répartie sur 13.12% des terrains du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). La classe des roches fracturées modérément altéré sous-sols très compactés et cohésifs 2 (b) sont éparpillées au niveau des parties amont et aval du bassin avec une superficie qui ne dépasse pas 8.47% des terrains du bassin. Les roches ou sols/sédimentaires faiblement ou modérément compactés 3(c) étalée sur 4.73% de la superficie total du bassin et occupant en parties les massif de Kebdana, Selouane, Zeghanghane et kariat Arekmane.

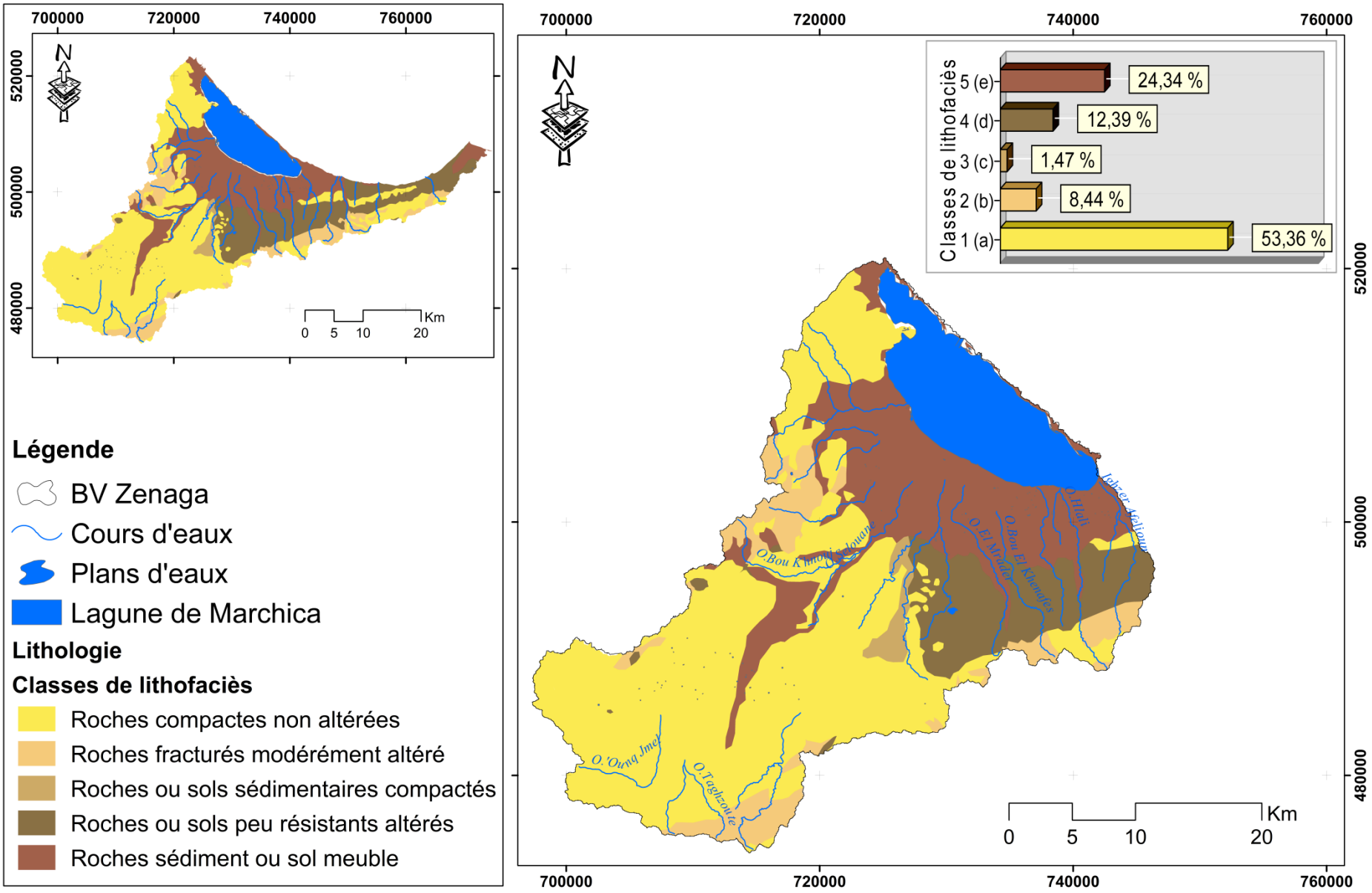


Figure 54: Carte des lithofaciès du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), 53.36% des terrains possèdent une résistance à l'arrachement et la mobilisation. 24.34% des terrains sont de faible résistance mécanique à l'érosion. La classification du faciès lithologique selon les directives PAP/CAR montre une certaine corrélation (Figure 66). L'alternance dans l'espace de faciès compacte constituée de roches cohésives avec des faciès de faible résistance sur des altitudes élevée et des pentes fortes donnent une indication sur la vitesse de l'écoulement qui est généralement forte.

Les pentes fortes vont être à l'origine de la formation de sols peu évolués avec la présence d'un substrat constitué des roches fracturés et modérément altérés. A ces niveaux, les produits d'altération de roches sont constamment évacués par l'érosion hydrique. Les résidus d'altération constitués par des fractions grossières avec des particules fines piégées dans des poches protégés de l'écoulement ou fixées par le réseau racinaire des végétaux, présentant généralement de faibles pourcentages. Ces zones à la différence de la partie aval sont caractérisées par des sédiments ou des sols meubles, modérément cohésifs et de matériel détritique, avec des quantités de matériaux érodés relativement faible qui dépendra des quantités mobilisables donc de la vitesse d'altération et d'ameublissement des faciès.

L'action combinée des facteurs naturels et de l'action anthropique aura un impact direct sur la résistance des faciès lithologiques du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). L'étude menée sur les facteurs causaux de l'érosion à savoir les facteurs morphométriques, le réseau hydrographique, la pente moyenne du bassin et le contexte climatique affirme en quelque sorte cette constatation.

1. 3. Carte d'érodibilité

Le facteur «érodibilité» présente la prédisposition d'un substrat rocheux à fournir des éléments meubles qui peuvent être mobilisés suite à l'action érosive des pluies sur des pentes qui contrôlent leur évacuation du profil en fonction de leur cohésion et leur résistance au détachement. En d'autres termes, nous relions la résistance et la vitesse d'altération et d'arrachement d'un substrat avec l'inclinaison de la pente topographique qui détermine la quantité des éléments susceptible d'être emportés et celle des éléments qui vont favoriser le développement du sol. Il permet de détecter l'influence des changements physiographique sur le comportement des matériaux en fonction de l'action de la dynamique des eaux qui coulent en surface.

Tableau 47: Matrice M-I de degré d'érodibilité

Classe de pentes	**Classe des lithofaciès**				
	1	2	3	4	5
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

La carte d'érodibilité selon l'approche PAP/CAR et le résultat de la superposition de la table de données des pentes et celle des lithofaciès. Les polygones résultant du croisement et la superposition des deux tables de données sont classés selon la matrice générant l'érodibilité du modèle PAP/CAR (Tableau 47 et 48).

Tableau 358: Classes du degré d'érodibilité

Classe	Degré d'érodibilité
1	Faible (EN)
2	Modérée (EB)
3	Moyenne (EM)
4	Forte (EA)
5	Extrême (EX)

L'analyse des résultats issue de la modélisation de l'érodibilité (Figure 67), permet de déterminer la distribution et les superficies de chaque classe dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). L'érodibilité au niveau du bassin versant est fonction de la pente et du degré de cohésion des faciès lithologiques. Selon les directives PAP/CAR classique, l'érodibilité est toujours extrême dans les zones à fortes pentes et à faible résistance. Les classes fortes et extrêmes sont situées dans l'encadrement montagneux dans les périphéries du bassin versant au niveau des parties amont où la pente est supérieure à 35 %. Les classes modérées et faible d'érodibilité occupent la partie médiane WSE et NW au niveau de la partie médiane et la partie aval, là où les pentes deviennent faible.

La classe faible d'érodibilité est la plus représentative avec 50.78%, suivie des classes modérée et moyenne érodibilité, avec respectivement 28.56% et 16.59% de la superficie totale. D'autre part, les classes d'érodibilité forte et extrême ne représentent que 3.75% et 0.33% et ne dépasse pas 4.08%.

Nous remarquons que le degré de cohésion des faciès lithologiques et le degré d'inclinaison de la pente contrôlent l'érodibilité au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Un certain déséquilibre a été constaté vue que les pentes faibles et modérées présente sur plus de 80.58% des terrains du bassin versant. Par contre les pentes modérées, fortes et extrêmes ne présentent que 19.42%. Les zones à forte pente sont celles caractérisées par des roches ou sols à faible résistance et à forte érodibilité. Ces zones vulnérables sont situées à l'extrême Nord-est, Nord-ouest et en aval dans une direction NE-SW. Ces résultats expliquent en quelques sortes le traçage obtenu de la courbe hypsométrique qui suggère que le bassin Zenaga tend vers un stade de maturité.

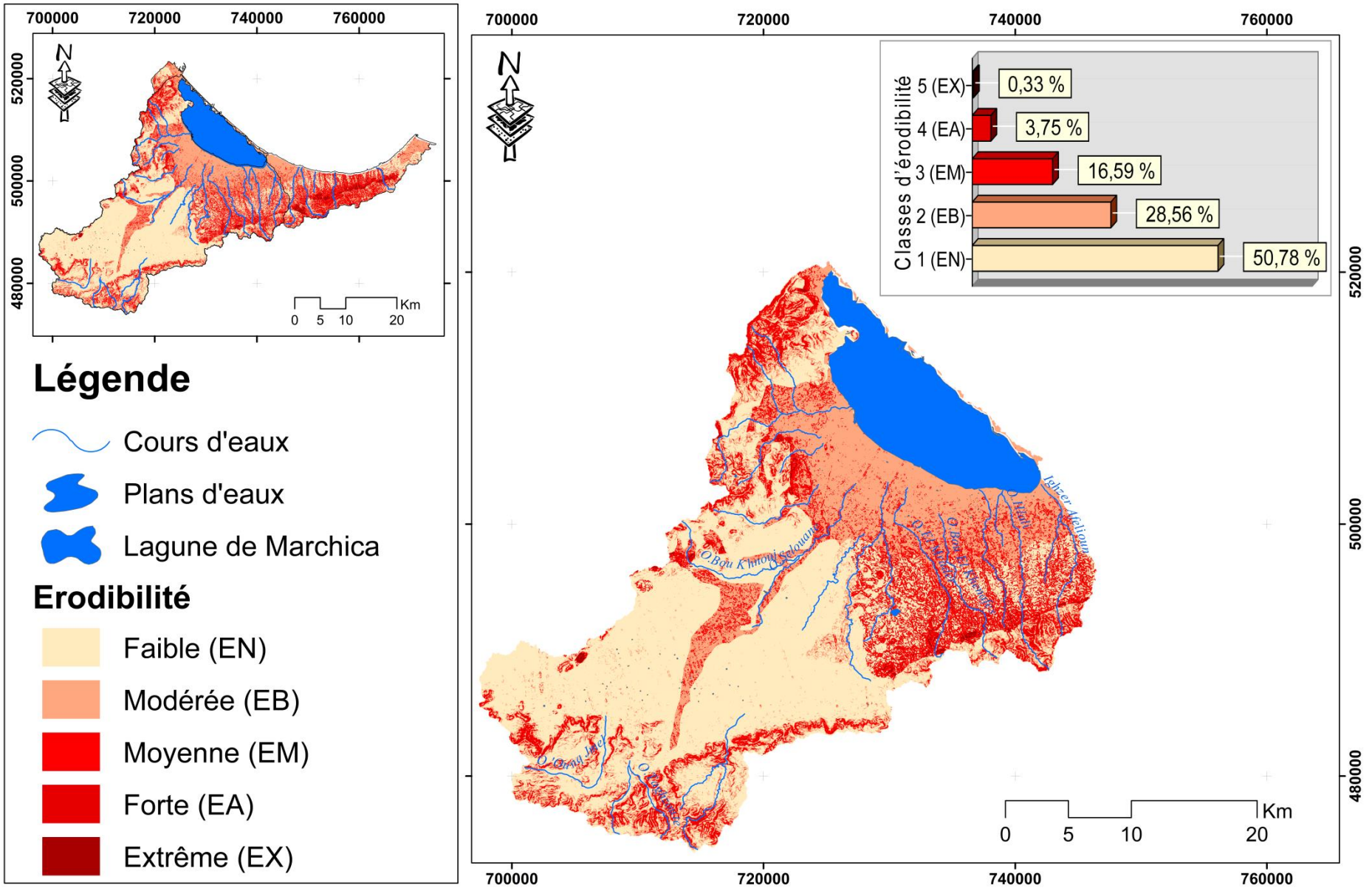


Figure 55: Carte d'érodibilité du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

2. Elaboration de la carte de protection des sols

La végétation protège les sols de l'ablation d'une part en réduisant l'énergie des agents érosifs comme la diminution et le freinage de la vitesse de ruissellement. D'autre part en réduisant l'énergie de l'érosion pluviale en interceptant les gouttes de pluie, grâce aux parties aériennes des plantes (***Rey et al.2004***). Au sol, la végétation aide à lutter contre le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau (***Cerda, 1998***). L'effet de la végétation peut être différent selon les formations végétales; cela peut dépendre du type de végétation ou de l'utilisation des terres (***Kim & Jeong, 1998***).

La carte de protection des sols est réalisée à partir de la superposition de la carte d'occupation des sols et de celle des densités du couvert végétale. Ces deux cartes ont été identifiées au moyen de l'utilisation de la télédétection, la photo-interprétation et surtout les visites de terrain. La carte d'occupation est représentée par des polygones qui fournissent des informations sur chaque type de couvert végétal ou de type de culture. La carte de degré de recouvrement renseigne sur la densité de couvert végétale. Elle est utilisée dans notre cas d'étude pour corriger la carte d'occupation des sols en prenant compte du rôle joué par chaque type de couverture. L'objectif de cette carte est de prioriser la superficie du bassin versant selon le degré de protection que peut offrir chaque type de couvert végétal. Elle fournit également des informations sur le type et le degré de répartition de la végétation et permet de définir le rôle du couvert végétal. La séparation de la carte d'utilisation des terres de la carte de densité de couverture peut ne pas contribuer à des résultats significatifs dans les cas majeurs. Le regroupement de ceux-ci permet de détecter des zones noires nécessitant une intervention urgente. Les degrés de protection des sols sont obtenus en appliquant la matrice de croisement (Tableau 45). La matrice permettant cette superposition n'est pas applicable ailleurs car adaptée aux conditions bioclimatiques méditerranéennes (***Mesrar et al.2015***).

2. 1. Carte d'occupation des sols

La carte d'occupation des sols au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est répartie selon le tableau 49.

Tableau 49: Classes d'occupation des sols

Classe	Occupation du sol
1	Cultures sèches, terrains nus et zones bâtis
2	Culture en ligne (arbres fruitiers, vignobles)
3	Arboriculture en périmètre irrigués
4	Forêts et reboisements
5	Arbustes et matorrals à couvert denses
6	Arbustes et matorrals à couvert claires

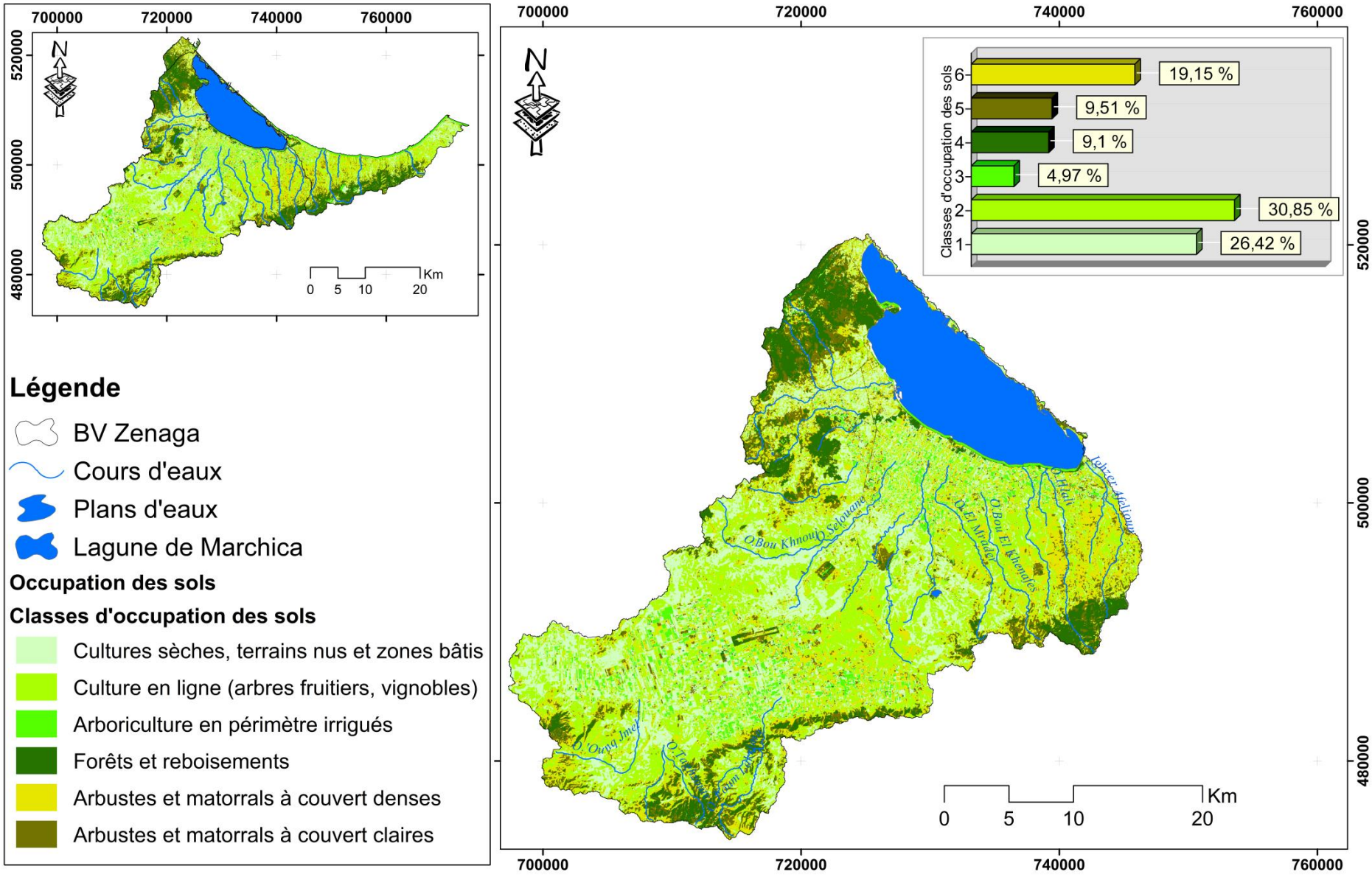


Figure 56: Carte de couvert végétale du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

La répartition des différents types d'occupation (Figure 68) montre que les forêts et reboisements, les arbustes et matorrals (dense et claires) occupent les zones de moyennes et forte altitudes et se concentrent au niveau du massif de Gourougou, Afra et Kebdana. Une grande partie de la zone basse du bassin est occupée par des cultures sèches, terrains nus et zones bâtis et des cultures en lignes.

La classe des cultures sèches, terrains nus et zones bâtis est étalée sur 26.42% de la superficie du bassin. La classe des cultures en lignes (arbres fruitiers, vignobles) représente 30.85%. L'arboriculture en périmètres irrigués avec 4.97% de la superficie des classes d'occupation. Les forêts et reboisements, les arbustes et matorrals denses et celle des arbustes et matorrals claires présentent successivement 9.1%, 9.51% et 19.15% des terrains du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

2. 2. Carte de densité de couvert

La densité de couvert est un facteur clé dans le maintien de la résistance des sols, la protection du sol en dépend énormément, car plus le couvert est denses, plus forte est la protection des sols et plus l'action érosive des pluies est faible.

La carte de densité de couvert a été réalisée moyennant le calcul de l'indice de végétation par différence normalisée «NDVI», mais aussi sur la méthode de seuil d'émissivité basée sur le NDVI ($NDVI^{THM}$), classé selon la codification suggéré par la méthode PAP/CAR (Tableau 50). Le résultat est une carte classifiée selon la densité de recouvrement.

Tableau 50: Classe de densité de couverture

Classe	Degré de couvert végétal
1	Inférieur à 25%
2	25% – 50%
3	50% – 75%
4	Supérieur à 75%

Les résultats obtenus selon la carte de densité de recouvrement (Figure 69), montrent que la classe de densité 25%-50% est la plus dominante, elle enregistre 73.99 % de la superficie totale du bassin versant. La classe de densité 50%-75% enregistre une valeur de 18.48 %, il occupe la deuxième position en terme fréquence de représentativité. La classe de densité supérieure à 75% qui présente le degré de recouvrement le plus important par la classification du modèle PAP/CAR couvre une surface relativement faible avec 6.9%, qui témoigne de la faible présence du couvert naturelle et l'accélération des facteurs de dégradation liée principalement à l'impact anthropique en relation avec l'exploitation des terrains à des fins agricoles. La classe de densité inférieure à 25%, correspond à la valeur la moins représentée au niveau du bassin versant avec 0.64%.

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), l'état de la densité de couvert végétale rend le sol plus vulnérable au risque de l'érosion hydrique. La couverture dense qui joue le rôle protecteur des sols subie une forte dégradation suite à l'action mixte de l'exploitation agricole et l'urbanisation. Le changement climatique actuel exprimé par un réchauffement devient de plus en plus important va sans doute avoir des effets néfastes sur la végétation naturelle et les sols au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

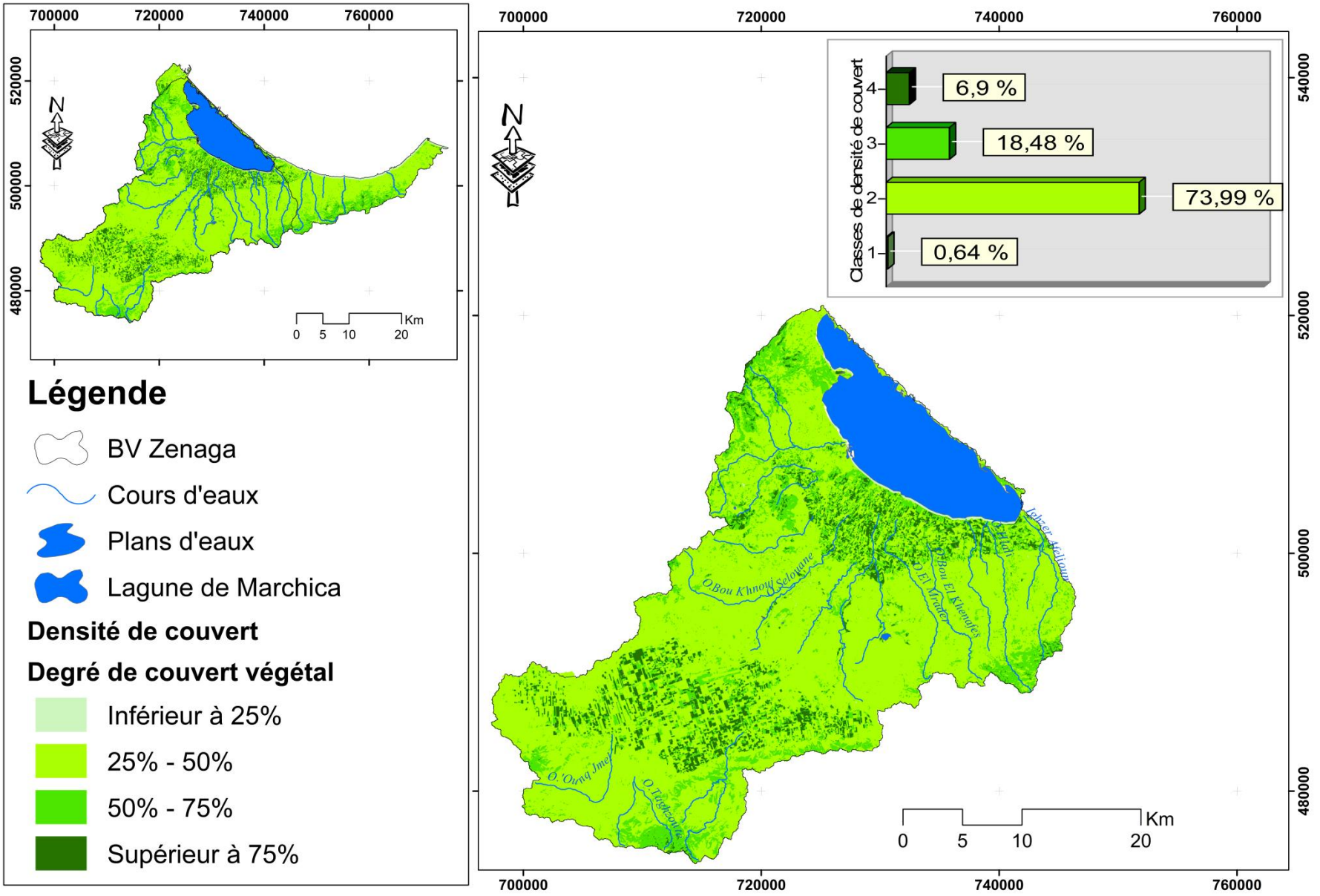


Figure 57: Carte de densité de couvert du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

2. 3. Carte de protection des sols

La carte de protection des sols représente le résultat de superposition de la carte d'occupation des sols et celle de la carte densité du couvert végétal, selon le type et le degré de répartition de la végétation.

Tableau 51: Matrice générant le degré de protection des sols

Occupation du sol	Couvert végétal			
	1	**2**	**3**	**4**
1	5(MB)	5(MB)	4(B)	4(B)
2	5(MB)	5(MB)	4(B)	3(M)
3	3(M)	2(A)	1(MA)	1(MA)
4	4(B)	3(M)	2(A)	1(MA)
5	5(MB)	4(B)	3(M)	2(A)
6	5(MB)	4(B)	3(M)	2(A)

L'objectif de la réalisation de cette carte est d'hiérarchiser la surface du bassin versant Zenaga (Gareb-BouAreg), selon le degré de protection que peut conférer le couvert végétal. L'application de cette étape s'avère nécessaire, car elle permet de cerner le rôle du couvert végétal. La prise de la carte d'occupation des sols séparée de celle de densité du couvert, ne contribue pas dans le majeur des cas à des résultats significatifs. Le groupement de ces derniers, permet de détecter les zones noires qui nécessitent une intervention urgente. La superposition des deux cartes, se fait en appliquant la matrice représentative dans le tableau 50, qui permet d'effacer les limites séparant les polygones avec le même degré de protection des sols (Tableau 52).

Tableau 52: Classes du degré de protection

Classe	Degré de protection
1	Très élevée (MA)
2	Élevée (A)
3	Moyen (M)
4	Faible(B)
5	Très faible (MB)

L'analyse des résultats (Figure 70) montre que la classe la plus représentative est celle de très faible protection (MB), avec une superficie de 49.64% du bassin versant, cette classe de protection possède une forte présence au niveau de la partie amont au niveau de Gareb et vers l'aval en allant vers sebkha de Bou Areg.

La classe faible protection arrive en deuxième lieu en terme superficie, avec 29.95% éparpillée sur l'ensemble du bassin.

Les classes les moins représentatives sont celles de protection moyenne, élevée et très élevée avec des pourcentages de 8.74%, 6.68% et 5%, localisées surtout dans la partie amont et aval au niveau des périmètres irriguées, des massifs forestier de Gourougou, Kebdana et Afra et dans la banlieue de la lagune de Marchica.

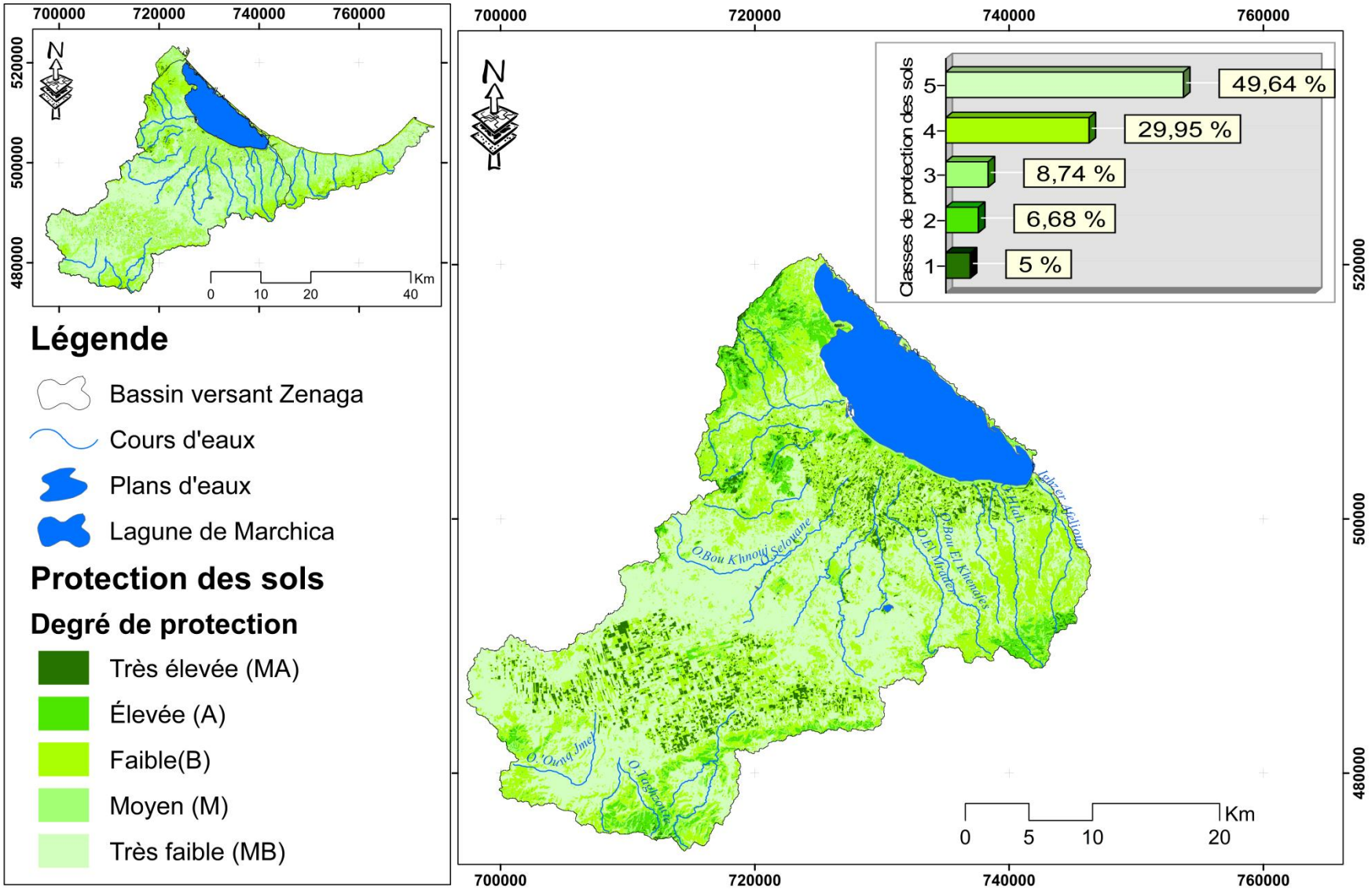


Figure 58: Carte de protection des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

3. Elaboration de la carte des états érosifs prédictifs

La carte des états érosifs est le produit final de l'approche prédictive résultant de la superposition de la carte d'érodibilité (Figure 67) et celle des degrés de protection des sols (Figure 70) selon la matrice générant l'aptitude du sol à l'érosion (Tableau 53). L'objectif de la modélisation des états d'érosion est de montrer les différentes combinaisons des degrés d'influence des facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique et de prioriser la superficie du bassin versant en unités selon le degré d'érosion (Tableau 54).

Tableau 53: Matrice générant les états érosifs

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

La présente carte tend à suivre les différentes combinaisons des degrés d'influence des facteurs qui contrôle l'érosion hydrique. Ainsi que d'hiérarchiser la surface du bassin versant en unité selon l'état érosif (Figure 71).

Tableau 36: Classes des états érosifs

Classes	**États érosifs**
1	Très faible
2	Faible
3	Notable
4	Élevé
5	Très élevé

L'analyse des résultats de la modélisation des classes des états érosifs montre que la classe qui présente le pourcentage de superficie le plus important et celle de l'état érosif faible avec 49.49% de la surface total du bassin versant. La classe des états érosifs élevés arrive en second lieu avec 29.76%. Les classes des états érosifs très faible et notable occupent respectivement 9.03% et 8.9% des pourcentages des superficies. La classe des états érosifs très élevées ne dépassent pas les 2.82% (Figure 71).

La répartition des états érosifs sur la carte montre que les zones les plus érodées et vulnérables par l'érosion hydrique se localisent au niveau des parties amont du bassin versant en traçant une sorte de ligne qui part de l'extrême nord-ouest du bassin au niveau de Tiztoutine, vers le sud-est du massif de Kebdana et au niveau des extrémités du mont de Gourougou. La partie basse du bassin versant au niveau de la nappe de Bou Areg, à l'aval au niveau des massifs d'Afra et au niveau de la zone caractérisant les terrasses fluviatile des oueds principalement l'oued Selouane. Autre part, l'érosion hydrique est notable, faible ou très faible mais avec une forte tendance à l'évolution vers des secteurs de vulnérabilité élevée.

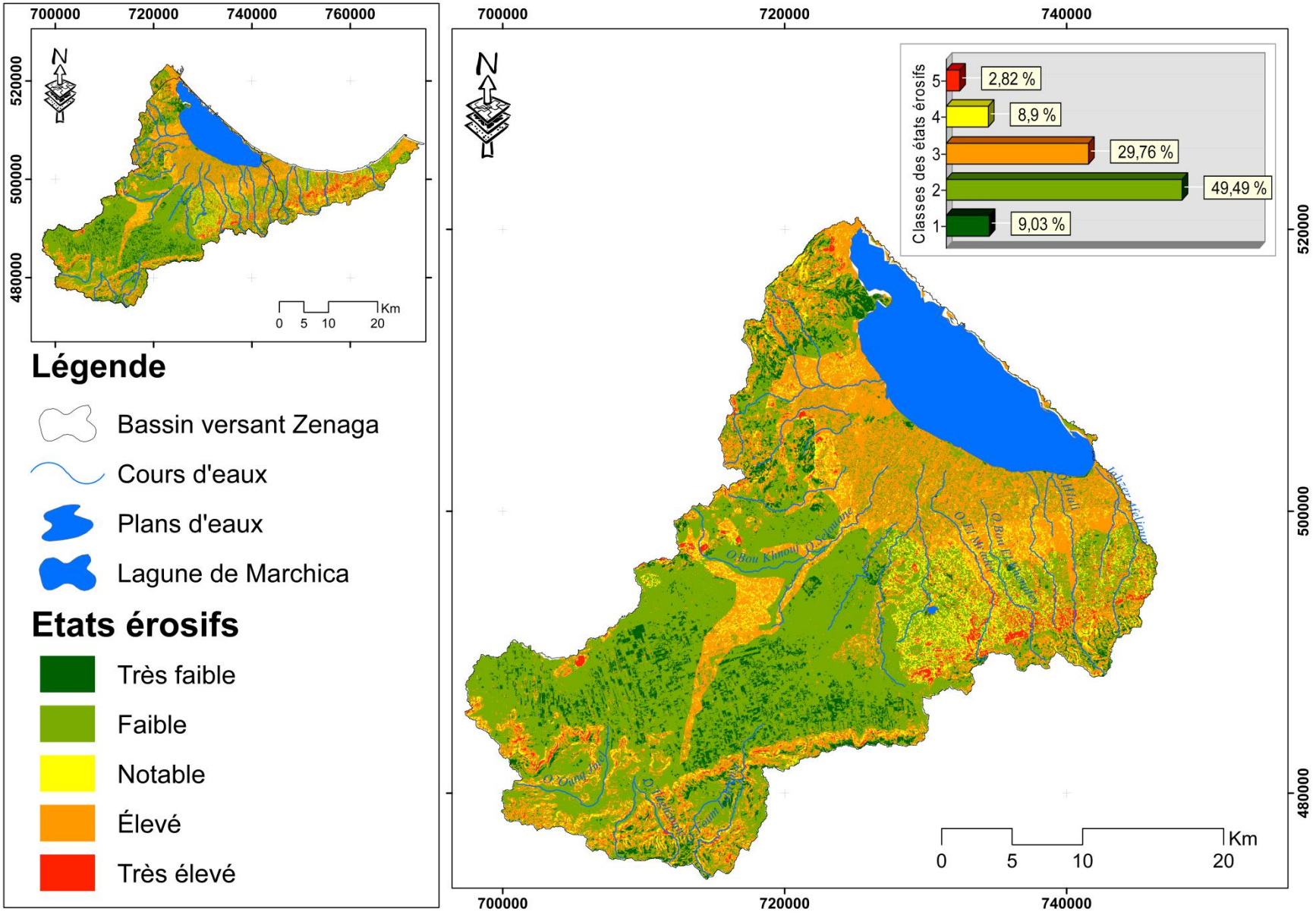


Figure 59: Carte des états érosifs du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Le processus de l'érosion au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) dépend du facteur de protection et de l'état des surfaces des sols. La présence de faciès à forte érodibilité combinée avec une végétation de faible protection à un impact significatif sur l'état de l'érosion au niveau du bassin versant. En effet, le type de végétation, de l'utilisation des sols et le degré de recouvrement de la végétation peuvent influencer l'état de l'érosion, soit en diminuant ou en augmentant son évolution. Les résultats obtenus pour les états érosifs montrent que le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est très vulnérable à l'érosion hydrique. Ceci s'explique par le fait que tous les facteurs agissent par leur haut degré, que ce soit pour l'érodibilité et la protection des sols. On constate que les états érosifs importante par le modèle PAP/CAR classique sont représentés de manière exhaustive, ce qui amène à réfléchir que la situation actuelle du phénomène de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant n'est pas seulement due à l'action naturelle mais plutôt à l'action mixte d'autres facteurs qu'ils soient naturels et anthropiques.

II. Approche descriptive: Description des formes de l'érosion du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

L'approche descriptive basée sur la cartographie de l'érosion réelle sur le site, consiste à identifier et à faire une évaluation qualitative des processus actuels de l'érosion par la délimitation cartographique des degrés atteints pour chaque forme et processus d'érosion. Cette approche fournit la réalité du terrain et permet de consolider et de corriger les diagnostics concernant l'érosion potentielle prédite par l'étude des facteurs et d'identifier les particularités locales, telles que les facteurs causaux du risque d'érosion. Pour cela, l'approche descriptive a été considérée comme complémentaire à l'approche prédictive.

Cette section utilise une approche à deux procédures combinées, l'une liée aux observations de terrain et par l'usage de la photo-interprétation (Photogrammétrie) pour déterminer le type de processus et la forme d'érosion qui en résulte. La seconde porte sur l'identification des degrés d'intensité des processus d'érosion dominants.

1. Études des formes et processus de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

L'érosion hydrique a été définie comme l'ensemble des processus affectant la roche mère, de détachement des particules du sol déjà ameubli et préparé par l'altération superficielle (***Fleming, 1977; Sadiki, 2005***). D'autres auteurs, l'explique par l'ensemble des opérations qui affectent la roche saine à l'affleurement, à savoir l'altération météorique, le détachement des particules, le transport et le dépôt qui font partie intégrante du processus de l'érosion hydrique (***Derruau, 1974; Coque, 1977; Birot, 1981***).

En fait, les deux types existent on les appelle selon la littérature scientifique: l'érosion géologique et l'érosion des sols (***Pouquet, 1951; Sundborg, 1983; Langhor, 1990; Roose, 1976, 2004***). L'érosion géologique est un phénomène naturel qui se produit depuis le début des âges géologiques et conduit au façonnement des reliefs et à la formation de plaines fertiles. Ce processus est très lent et se déroule sur des milliers voir millions d'années. D'autre part, l'érosion des sols accélérée est le résultat mixte des processus naturel et des activités

humaines, ne suit jamais le rythme de la formation du sol. Ce processus qui conduit à l'érosion des sols et à la détérioration de sa productivité, à certains égards, peut être considérée comme un danger pour le développement durable.

Aujourd'hui, le risque de l'érosion hydrique et la production des sédiments mobilisable comptent parmi les problèmes environnementaux les plus critiques, en particulier dans les régions arides et semi-arides (***Kiani-Harchegani et l.2021; Borrelli et al.2021)***. Prendre en considération ces risques joue un rôle très important dans les plans de conservation de l'eau et des sols, les projets de gestion des bassins versants, le développement des ressources en eau et la construction de barrages. Par conséquent, une connaissance précise des processus régissant l'érosion des sols, le transport des sédiments et leurs interactions possibles est d'une grande importance dans le développement de modèles d'érosion des sols (***Mahmoodabadi & Cerda 2013; Rodrigo-Comino et al.2016, 2019***). Une bonne compréhension des processus et facteurs responsable de l'action de l'érosion hydrique des sols dans les systèmes de bassins versants est une nécessité incontournable pour la gestion globale des sols et des eaux des bassins versants (***Sadeghi et al.2022***).

L'érosion hydrique au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) se manifeste par différentes formes de détachement et d'arrachements d'éléments de différentes tailles et de différentes formes depuis les endroits où ils ont pris naissance. Ces détachements peuvent se passer de manière presque inaperçus par des petits filets d'eau emportant des particules, par des creusement de ravins de plus en plus grands ou par des processus spectaculaires de mouvement de masse de chute de blocs et de pierres, de glissements, d'effondrements et de tassements. Dans chacun de ces cas, et selon le comportement des matériaux rocheux et des sols, on est en présence d'un déplacement de volume rocheux soumis à la loi de la pesanteur et aux lois physique de la résistance des matériaux rocheux (***Gartet, 2005***).

L'étude et la cartographique de l'évolution des formes et processus de l'érosion permet d'évaluer et de comprendre l'ampleur de la situation du risque de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant.

1. 1. Érosion en nappes ou érosion diffuse (Sheet Food)

L'érosion en nappe résulte du ruissellement qui se répand à la surface du sol lors des précipitations. Le ruissellement en surface se produit lorsque le taux d'infiltration a été dépassé, c'est-à-dire, lorsque le pouvoir d'infiltration des sols est inférieur à l'intensité des précipitations (***Horton, 1945***). Les sols ameublis par l'altération rendent ses particules vulnérables à l'éjection suite à l'impact des gouttes de pluie «*Effet Splash*». Les distances parcourues par ces éjections dépendent du poids fonction de leurs diamètres et de la hauteur de la chute des gouttes de pluie et de la vitesse du vent qui peut augmenter l'énergie des gouttes de pluie de 20 à 50% (***Lal, 1976 in FAO, 2010***).

Selon ***Le Bissonnais (2000)***, les particules du sol dispersées naissant de la désagrégation des mottes sous le battage des gouttes de pluie qui provoque une redistribution et une réorganisation des particules fines entre les particules grossières. Les particules fines sont entrainées suite à l'action de ruissèlement d'eau dans des porosités ou déposées dans des dépressions. Ces processus favorise le colmatage des ports de surface des sols en passant

d’une surface rugueuse vers une autre lisse dénudée appelée croûte de battance (***Ellison, 1944***). Selon l’inclinaison et la longueur de pente et sous l’effet de la gravitation, les gouttes s’agglomèrent d’abord en petits filets qui s’écoulent d’une façon linéaire. Si la pente le permet, les petits écoulements linéaires s’anastomosent, se rejoignent latéralement, fusionnent et forment une pellicule puis une nappe (***Coque, 1977 ; Birot, 1981***). L’érosion en nappe peut prendre diverses formes et degrés.

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), l’érosion en nappe due au ruissellement diffus est le type d’érosion le plus répondue (Figure 72). Ce processus de l’érosion se manifeste sur des pentes faibles à fortes, qui présente une certaine longueur de pente plus ou moins importante ou le sol est soumis à une forte érosion. Le ruissellement en nappe prend naissance suite à la formation des flaques de débordement de l’eau non infiltrée d’une flaque à l’autre, formée suivants les gros orages de fin de saison sèche. Pendant ces périodes les particules de sol peuvent sauter jusqu’à 50 cm de haut et plus de 2 m de distance (***Christoï, 1961***).

L’érosion est le résultat de ce processus, il se produit pendant la pluie dès que le taux d'infiltration est dépassé et qu'un film d'eau commence à se déplacer sur la surface. Les effets sont limités au transport de particules fines et au développement d'un film sableux dans les petits sillons de culture (traces) ou là où les particules fines sont piégées par de petites touffes de végétation herbacée. Il peut y avoir un délogement occasionnel de petites racines superficielles. Dans ce cas, une lame d’eau peu profonde d’épaisseur irrégulière s’écoule sur la surface de manière diffuse. Les sédiments sont détachés de la matrice du sol essentiellement suite à l’effet de l’impact des gouttes de pluie. La présence d’une fine lame d’eau rend ce détachement plus efficace dont l’impact détache plus de sédiments que si la pluie tombait directement sur un sol nu encore sec.

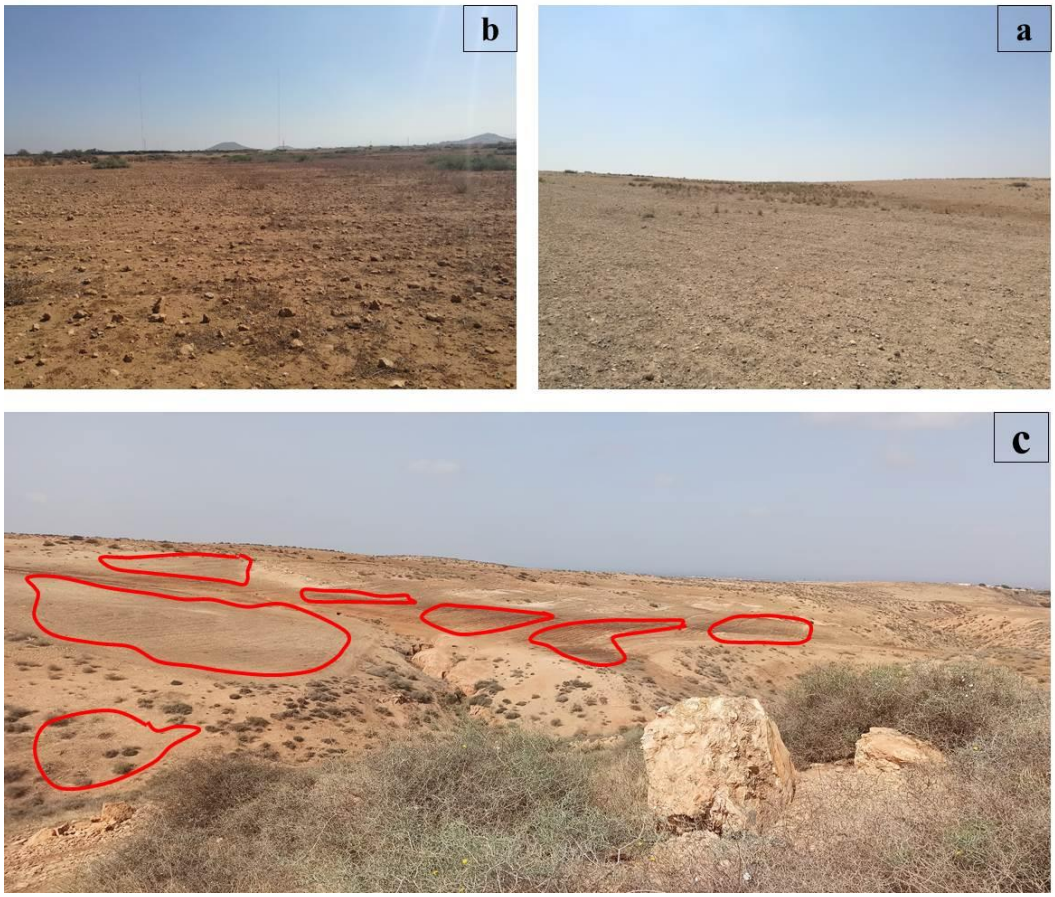


Figure 60: Erosion en nappe ; a et b) érosion en nappe sur pente faible ; c) érosion en nappe sur pentes moyenne et forte avec polychromie de la surface sol rouge développé sur des colluvions encroûtées, l'encroûtement blanc affleure dans les zones érodées.

L'érosion en nappe peut être facilement détectée pendant la saison sèche, par la présence des surfaces de sol bariolées avec des couleurs claires et d'autres sombres qui témoignent du degré de lessivage et de développement du sol. Les parcelles avec des couleurs sombres indiquent que les sols sont riches en matière organique et en substances utiles, par contre, les parcelles avec une couleur claire montrent le cas contraire; un sol peu évolué rajeunit par le décapage de son horizon de surface. Le vrai problème qui se pose c'est qu'on assiste à une dégradation de la matrice fine qui rend le sol de plus en plus pauvre alors que cette forme d'érosion bien que très néfaste n'est pas très spectaculaire. La superficie occupée par cette forme d'érosion au niveau du bassin versant est assez importante par rapport aux autres formes alors que le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) considéré économiquement comme une terre à vocation agricole avec une forte tendance à l'urbanisation. C'est donc une forme d'érosion à combattre en urgence.

1. 2. Érosion en rigoles, en ravines et en ravins

Plusieurs facteurs de l'érosion hydrique interviennent pour déclencher le ruissellement (érosivité des pluies, infiltrabilité, érodibilité, battance du sol, pente topographique, occupation et utilisation des sols). Ce processus peut à part le transport des sédiments fins, attaquer le sol et creuser des rigoles hiérarchisées, ce qui augmente rapidement la vitesse de l'écoulement en passant vers le stade de l'érosion linéaire (***Mesrar, 2016***).

L’érosion en rigoles est la première forme d’incision linéaire qui affecte les sols qui résulte de la concentration des eaux de surface (érosion en nappe). Les écoulements d’eau peu profonds entraînant l'érosion en nappe ont tendance à fusionner et donc à augmenter à la fois en masse, en vitesse et en capacité de creusement et d'affouillement suivant la pente.

Les rigoles peuvent se produire sur des terrains naturels mais elles sont facilitées et aggravées sur les terrains de culture. Elles présentent une préoccupation particulière dans les systèmes de culture en plates-bandes surélevées. Au fur et à mesure que l'écoulement devient plus profond, la vitesse augmente et l’énergie cinétique de l’écoulement détachant les particules de sol augmente. Quand elles deviennent plus profonds, avec une capacité de transporter des particules de plus en plus grosses (graviers, cailloux, blocs…), ils sont appelés ravinements. Les matériaux transportés sont souvent riches en nutriments et en particules fines. Ils endommagent les ouvrages hydrauliques en aval par la turbidité, l’envasement et l'eutrophisation.

L'érosion en rigoles représente le processus intermédiaire entre l'érosion en nappe et l'érosion en ravines. La différence est en étroite relation avec la taille, les rigoles peuvent être effacées après le labour, tandis que les ravines nécessitent généralement une intervention lourde.

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), les formes linéaires de l’érosion hydrique sont parmi les formes les plus abondantes et les plus rencontrées (Figure 73). Quand l’érosion en rigole prend de l’ampleur, elle évolue en érosion en ravines. Les ravines augmentent de dimension pour se transformer en ravins. L’érosion en rigole s’observe sur les terrains cultivés qui présente certaines prédispositions (sols mal structurés de nature argileuse ou limoneuse, précipitations intense, longueur et angle de pente importants, couvert végétal restreint). Suite aux averses automnales, le ruissellement en nappe sur les sols affaiblis par le labour se concentre et creuse des rigoles emportant toute l’épaisseur de sol labourée parfois sur plusieurs mètres de largeur ***(Sadiki, 2005)***. Elles peuvent être isolées, en chevelu ou parallèles.

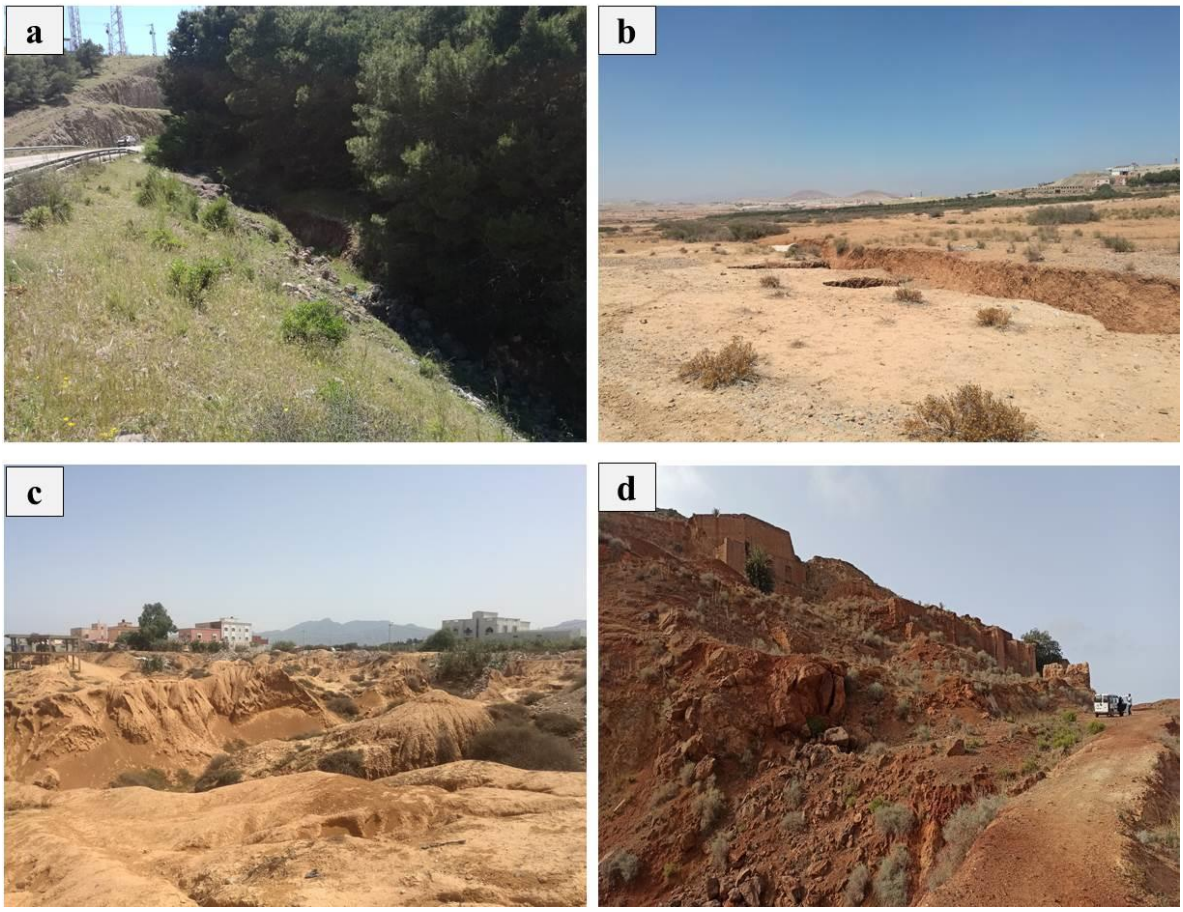


Figure 61: Formes de l'érosion concentré (linéaire) au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) ; a) Ravines ; b) Ravins ; c) Ravinement généralisé ; d) Griffes et rigoles

L'érosion en ravines est une forme d'érosion des sols très visible au niveau du bassin versant Zenaga. Au fur et à mesure que l'eau s'écoule avec force dans ces ravins, le cycle de dégradation se poursuit. Les particules de sol sont arrachées et déposées ailleurs, provoquant un blocage et un envasement des cours d'eau, des réservoirs et une sédimentation de plus en plus importante au niveau de la lagune de Marchica.

Les sédiments transportés en suspension contiennent également des nutriments et des pesticides réduisent alors la qualité de l'eau. Une fois que ces fins dépôts de sol obstruent les aquifères souterrains, ils peuvent polluer les principaux cours d'eau et affecter négativement les schémas respiratoires de la vie aquatique au niveau de la lagune de Marchica.

1. 3. Les mouvements de masses (Glissement de terrain)

Les mouvements lents et continus sont les processus responsables de la déformation des terrains que ça soit par fluage ou par tassement et qui génèrent le désordre (***Dauphine, 2000; Flageollet et al.2000, Remaître et al.2002, Faleh & Sadiki, 2002; Tribak, 2006***). Les déformations produites sont généralement progressives soit avec ou sans ruptures et sans accélération brutale. Le contrôle et le suivie de ces mouvement est rendu possible grâce à la faible vitesse de déplacement lente, ces phénomène ne portent pas une menace directe à la sécurité des personnes et de leurs bien.

Les glissements de terrain se définissent comme étant des mouvements de masses de roches, de débris de terre ou de matériaux le long d'une pente ou surface de cisaillement bien délimitée à des vitesses plus ou moins lentes et continues (***Selby, 1982***). L'évolution des glissements de terrain est influencée par les interactions entre les événements déclencheurs et les conditions naturelles locales de couvert végétal, de topographie et du contexte géologique (***Qiu et al.2017***).

Le changement climatique devrait augmenter la fréquence et l'intensité des événements pluvieux extrêmes, exacerbant ainsi le risque de glissements de terrain induits par les précipitations dans plusieurs régions à l'échelle mondiale (***Gariano et al.2017 ; Zhang et al.2019, 2021 ; Lin et al.2020 ; IPCC & GIEC, 2021***). Cependant, la façon dont la situation des risques de glissement de terrain évoluera à l'avenir n'est toujours pas claire, notamment en raison du manque d'évaluations complètes des changements potentiels de la sensibilité aux glissements de terrain et de la fréquence d'occurrence sous l'effet du changement climatique (***Lin et al.2022***).

Les terrains du Rif oriental présentent un aspect dégradé reflétant la vulnérabilité et la fragilité du milieu et sa sensibilité à l'hydrodynamique active et aux actions anthropiques. Elle se manifeste, entre autres, par différents types de mouvements de masse allant des petits arrachements aux grands glissements rotationnels profonds, ayant pour causes principales la quantité et l'agressivité des précipitations liées à une mauvaise gestion du bassin récepteur. Les années 2008, 2009 et 2015 relativement pluvieuses ont connu le déclenchement et la réactivation de nombreux glissements de terrain.

1. 3. 1. Les mouvements en masse lents

Les instabilités de terrains liée au phénomène gravitaires lents constituent une menace réelle pour les humaines et leurs bien au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Malgré leur faible ampleur et leurs effets limités. Ils se déclenchent préférentiellement au niveau des zones qui présentent certains déséquilibres dans le comportement des sols, aggravés suite aux sollicitations des processus de l'érosion hydrique et des actions anthropiques non adéquates.

Le glissement identifié se localise au niveau dans la partie Nord-Ouest de la ville Nador au niveau de la commune d'Iksane. Ces types de glissements de terrain s'opèrent le long d'une surface de rupture concave. Ces glissements s'expriment par un mouvement lent d'une pellicule de sol superficielle du versant qui se produit lorsque la limite de plasticité des minéraux constituants le manteau d'altération est franchie (***Selby, 1982; Flageollet, 1989; Sadiki, 2005***).

Les glissements localisés identifiée se situent au niveau des versants marneux des collines d'Iksane. La dégradation de la stabilité du sol est entrainée suite à la modification de son comportement géotechnique par saturation en eau lors des périodes d'averses intenses. L'eau infiltrée dans les faciès de marnes altérées atteint le substrat imperméable. A ce niveau, un plan lubrifié apparait, la pellicule de faible épaisseur se désolidarise du reste du versant et glisse sous l'effet de la gravité dans le sens de la pente (Figure 73).



Figure 62: Glissement de terrain de Jbel Iksane

Les mouvements de masse engendrée au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) sont soit des mouvements de «*Solifluxion*» sans limite nette dominantes pour les faciès de marne, soit des glissements présentant des niches d'arrachements superficiels pour les faciès marneux ou schisteux. La solifluxion est un mouvement liée à un déséquilibre dans la couverture pédologique provoquée par l'effet de stockage de l'eau dans les espaces interstitiels des sols, mais suite au déséquilibre provoqué par les changements biogéographiques apportés par le facteur humain. Ce déséquilibre peut se manifester progressivement sur un ou plusieurs plans de glissement suite à leur humectation. Ces glissements sont responsables de l'instabilité qui affecte l'infrastructure humaine.

Deux catégories des mouvements de masse peuvent être distinguées: des glissements actifs qui montrent un mouvement lent de quelques centimètres par an et qui peuvent être stabilisés suite à la recolonisation de la végétation et la réduction progressive de la pente. Des glissements peu actifs mais qui peuvent connaitre des phases d'accélération instantanées ou des ruptures soudaines de l'équilibre, peuvent occasionnellement conduire à des situations de crise aiguë (***Parriaux et al.2010***).

L'année hydrologique 2008-2009 a été marquée par 2 mois particulièrement humides et pluvieux, à savoir octobre 2008 et février 2009, avec des précipitations à caractère orageux dans certaines zones. Des records jamais enregistrés au cours du même mois, particulièrement au niveau des régions du nord et de l'Oriental du Royaume. Au niveau de la province de Nador, la pluviométrie d'octobre 2008 a même dépassé la moyenne annuelle avec des pourcentages allant de 300% (http://www.equipement.gov.ma). Cette situation a provoqué la réactivation des glissements superficiels par le déclanchement des ruissellements intense suite à la saturation des sols en eau.

Le premier site est celui de la commune d'Iksane située au Nord-ouest de la ville de Zeghanghane. Ce site est caractérisé par des versants à pente forte dépassant par endroits les

30% avec un faciès lithologique friable de nature marneuse. Ces mouvements de masse possèdent une forme ovoïde de plusieurs mètres (1 à 6 m) de largeur et de 30 cm à 1.20 m de hauteur, la niche d'arrachement est bien individualisée, indiquant la zone de départ des particules de sol qui subissent un tassement vers le bas du versant qui n'évolue que rarement en loupe de solifluxion. Les marnes pouvant avoir un comportement mécanique potentiellement viscoplastique lorsque les pentes des versants sont trop fortes, favorisant le déclenchement de ces types de mouvements. Le deuxième site étudiée est localisée au niveau de la de la rocade méditerranéenne au niveau des massifs d'Afra. Il s'agit d'un ensemble de mouvements de terrain déclenchés par les fortes pluies, ces petites loupes de glissement déclenchées sont de taille limitée et affectent les versants à pente forte. Ils forment un ensemble d'environ 14 m de largeur, pour un déplacement latéral de 1 à 3 m et un recul en tête de 1 m à peu près (Figure 75).

Ces mouvements de terrain se produisent sur des zones où la végétation qui étaient constituée de petite arbustes a été enlevée laissant place à des terrains désaffectés constitué de dépôts de pente ou de versant formée essentiellement de débris rocheux avec une matrice argilo-limoneuse. Les zones en aval constituée essentiellement par des alluvions fines quaternaires recouvrant le plus souvent des faciès plus grossiers d'épaisseur faible à moyenne. Ces dépôts de versants sont composés des limons et d'argiles issues des phénomènes de solifluxion quaternaires, vraisemblablement mélangés à des formations sous-jacentes (calcaires altérés, marnes et argiles).



Figure 63: Glissement de terrain au niveau de la rocade méditerranéenne au niveau des massifs d'Afra

Les sites étudiés sont actuellement en état de réactivation de mouvement, les parties glissées ayant été évacuée plus loin ce qui justifie une intervention des aménageurs et décideurs pour lutter contre ce phénomène. Une intervention adéquate genre végétalisation

des versants, ou des talus des versants les plus impactés est souhaitable pour limiter cette voie de dégradation, réactivée lors des périodes d'averses intenses. La surveillance et le contrôle de ces zones plus impliquée lors des saisons humide est souhaitable.

1. 3. 2. Risques des mouvements brutaux

Regroupent l'ensemble des mouvements de terrain qui se caractérisent par un processus rapide et instantané avec une propagation des matériaux déplacée de manière violent. Le terme implique que l'événement est inattendu et susceptible de causer des pertes ou des dommages importants (***Giles, 2020***). Parmi ces mouvements on cite: les effondrements, les chutes de pierres et de blocs, les éboulements et les coulées boueuses. Ces mouvements font partie intégrante des risques géologique (Géorisques), conséquence d'une combinaison défavorable de processus géologiques et de conditions liée au comportement du sol, parfois aussi par certaines activités anthropique. Selon ***Flageollet (1989)***, ces phénomènes peuvent évoluer vers des stades de rupture pour atteindre des cas d'accélérations brutales. Leurs amplitude, vitesse et leur brutalité peuvent être ponctuels ou limités dans l'espace-temps avec des mouvements de grande ampleur (***Remaître et al.2002; Xiao et al.2022***). Ces formes de l'érosion peuvent être destructrices portant une vraie menace pour les biens et les populations, causant parfois un désastre meurtriers lorsqu'ils se produisent. Voir cette situation, le suivie de ces phénomènes est imprévisibles et reste de plus en plus difficile à cerner.

En se basant sur la classification des types de mouvements selon les mécanismes de déstabilisation, plusieurs types de mouvements de terrain à caractère brutale se présentent au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), causant des menaces réelles ou potentielles (Tableau 55).

Tableau 37: Types de mouvements selon les mécanismes de déstabilisation, source (***Cruden and Varnes 1996***)

Type de mouvement (mécanisme)	**Type de matériaux**		
	Roches indurées	**Roches meubles ou sédiments**	
		Sols grossiers	**Sols fins**
Chutes gravitaire	Chutes de blocs Avalanche rocheuse	Chutes de débris	Chutes de sols fins
Basculement	Basculement rocheux	Basculement de sols grossiers	Basculement de sols fin
Glissement	Glissement rocheux	Glissement de débris	Glissement de sols fins
Etalement	Etalement de blocs	Etalement de débris	Coulée d'argile
Ecoulement	Fluage Tassement « Avalanche rocheux »	Coulée de débris Avalanches de débris	Coulée de boue Coulée de terre

- ***Les chutes de pierres et de blocs et éboulement rocheux***

Les chutes de pierres sont des mouvements rapides impliquant des blocs qui dégringolent sur une pente en rebondissant ou en roulant. Très fréquents dans les zones montagneuses et dans les zones côtières sur les côtes avec des falaises et des escarpements rocheux (***Fabre and Hantz, 2019***). Ces mouvements rapides proviennent de l'évolution mécanique des escarpements rocheux altérés ou fracturés. Les chutes de pierres ne concernent qu'un nombre réduit d'éléments de la paroi fracturée, pour lesquelles l'interaction entre éléments est négligeable, tandis que les éboulements rocheux "Avalanches" sont caractérisés par des écoulements granulaires dans lesquels l'interaction entre les blocs joue un rôle important avec un basculement de toute la masse instable. Ces instabilités sont généralement précédées d'un glissement ou écroulement du massif rocheux concerné. Les éléments décrochés ont une taille avec un volume pouvant aller de quelques décimètres cubes à plusieurs mètres cubes, mais généralement, nous pouvons les diviser en trois catégories: chute de pierres pour des diamètres ø <1 dm^3, chute de blocs pour des diamètres ø >1 dm^3 et éboulement pour des volumes allant de 100 à 1 million de m^3 (***Flageollet, 1989***).

L'étude de ce type de mouvement nécessite l'analyse du comportement de la masse rocheuse qui commence par de hauts affleurements de roches dures et résistantes à l'érosion qui deviennent instables pour diverses raisons. La taille de la chute de roche dépend de la géologie de la zone source (épaisseur du lit, pendage du lit et direction du pendage, dureté, orientation des joints/fractures), des intempéries, de la position et de l'inclinaison de la pente (***White & Greenman, 2008***).

Les chutes de pierres, de blocs et des éboulements rocheux figurent parmi les risques auxquels plusieurs zones du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) sont exposées. Ces mouvements de masse rocheuse présente différentes degré de risque (faible, moyen et importante), mais aussi au niveau du processus, de la localisation, ou du danger potentiel. Ils sont surtout très actifs sur la route amenant vers le mont de Gourougou, à la périphérie Nord-ouest de la ville de Zeghanghane au niveau de Jbel Azrou Hammar, mais par endroit sur le tracée routier Nador-Zeghanghane en partant de site à la sortie de Zeghanghane vers Beni Ansar à la sortie du quartier Tirakaa.

La zone affectée par les chutes de blocs est située au niveau de la ville de Zeghanghane à l'entrée de l'agglomération de la partie Nord-ouest au niveau d'Oulad Yahya. Cette zone constitue l'extension de la ville de Zeghanghane vers l'Ouest. Le Jbel Azrou Hammar est l'un des massifs satellites de stratovolcan du Gourougou qui forment une série shoshonitiques allant des absarokites aux trachytes et aux rhyolites (***Hernandez, 1975; Azdimousa et al.2003***). Au niveau de ce massif, les chutes de pierre et de blocs sont souvent catastrophiques et sans avertissement, il est difficile de prédire la fréquence des chutes de pierres au niveau de cette zone (Figure 76).

La ville de Zeghanghane et ses bordures au piémont du Gourougou sont exposées aux risques de chutes de pierres de la montagne voisine et de ses falaises. La paroi à partir de laquelle les chutes proviennent, est constituée d'une formation rocheuse volcanique altérée, (***Hernandez, 1975***). Dans cette section le détachement des blocs est fonction de déséquilibre

animé par les l'effet de l'érosion, mais aussi de la nature de substratum rocheux faillé ou jointé sur des pentes abruptes de sols rocheux qui sont sapées par l'érosion ou l'activité humaine.



Figure 64: Chute de pierre et blocs du Jbel Azrou Hammar au niveau de la ville de Zeghanghane

Le mont Gourougou et ses massifs montagneux situé au Nord de la plaine de Bou Areg, constitue l'ossature de la série montagneuse de la province de Nador. Ce stratovolcan formé de laves calco-alcalines potassiques liées à un volcanisme rhyolitique Messinien et de laves basiques d'âge Plio quaternaire (***Hernandez & Bellon, 1985***). L'évolution du volcan est complexe, des phénomènes de mélange et des processus hydrothermaux importants se superposant à un processus de cristallisation fractionnée. La présence de formations rocheuses en gros bancs de diaclases fissurés en position haute rend la situation favorable aux détachements des éléments rocheux de taille variable. Les chutes naissantes provoquent un risque tout au long de la route menant vers le mont du Gourougou. Ces chutes de blocs menacent aussi les habitants et les maisons situées en aval.

Les processus de chute de pierres et de blocs dans le bassin versant Zenaga malgré leur faible ampleur peuvent causer de réelle dommages structurelle voir même corporelle. En effet, ces milieux présente une dynamiques érosifs liée d'une part à l'action des facteurs naturels (Lithologie friable, nature des sols, pentes fortes, conditions climatiques variable...), mais aussi à l'impact humain très importante ce qui rend l'évolution des sections actives assez favorables. L'occurrence de tels mouvements de terrain rapide peu engendrée un désordre dans le site frappée. Pour cela, il demeure très important la mise en place d'un système de surveillance ou d'alerte spécialement pour les axes de communications qui connaissent l'activation de ces aléas.

Le tracée routier Nador-Zeghanghane est caractérisé par la présence des roches volcaniques en bancs. Celles-ci présentent par endroits des parois exposées aux différents facteurs de l'érosion à savoir physique et métrologique. La présence de fissurations en diaclases sur la série du magmatisme miocène calco-alcalin et potassique (Andésites basaltiques, andésites, dacites, rhyolites et granodiorites) recouvrent la série ignimbritique dans la base (***El Bakkali, 1995***) a favorisé le début de mouvement ce certains partie de cette série, un mécanisme assez complexe s'est déclencher exprimé par un glissement en bancs évoluant vers des éboulements rocheux et des chutes de blocs (Figure 77).

Vue l'importance du trafic routier passant par jour et qui dépasse les 7000 véhicules et peut même être doubler durant l'été avec la saison estivale et le retour des marocains résidents à l'étranger, ce qui présente une vraie menace.



Figure 65: Ecroulement et épandage rocheux sur le tracé routier Nador-Zeghanghane

- ***Les effondrements potentiels des cavités souterraines***

Les grands affaissements résultent des effondrements de cavités souterraines, qu'elles soient artificielles ou formées naturellement par l'écoulement de l'eau dans le massif soluble de la roche (***Caudron et al.2008***). Les différents impacts de ce phénomène se produisent sur l'ouvrage existant en surface (***Deck et al.2002 ; Vezole, 2002***). Les effondrements se fassent souvent de façon plus ou moins brutale et résultent de la rupture du toit ou des appuis d'une cavité souterraine, ce qui provoque l'apparition d'une dépression sphérique avec des abords escarpés ou verticaux qui montrent les signes de la rupture du terrain. Les établissements humains construits sur des dépôts de roches tendres sont souvent caractérisés par la présence de fouilles à ciel ouvert et, fréquemment, de carrières souterraines creusées depuis l'époque des premiers établissements. Celles-ci avaient le double objectif d'extraire le matériel nécessaire à la construction des villes et, en même temps, d'aménager des douves défensives, des abris et des passages souterrains sécurisés ou d'accès à la mer et aux agglomérations côtières (***Hatzor et al.2010; Esterhuizen et al.2011***).

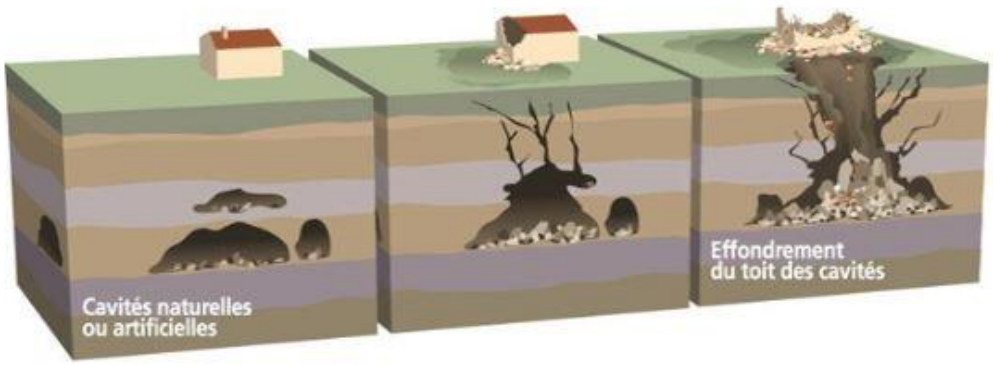


Figure 66: Création d'une cavité et effondrement (Sources : *Graphique **MEDDE***)

Dans la province de Nador au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), de nombreuses galeries souterraines ont été construites pendant la période coloniale. Le matériau excavé résultant de caractéristiques mécaniques appropriées a ensuite été utilisé pour la construction de structures urbaines. Cependant, à l'époque moderne, les matériaux de construction sont collectés dans de grandes carrières à ciel ouvert, généralement situées en dehors des limites de la ville. À la suite de l'expansion urbaine, des carrières et des cavités d'une extension extrêmement importante se sont formées, provoquant des conditions d'instabilité. Ils représentent un risque potentiel d'effondrement et constituent donc un danger notamment en milieu urbain. Ceci est évident dans les phénomènes de rupture qui se sont produits et dans les instabilités détectées dans les structures en béton armé posées sur le sol (Figure 78). Ce type de mouvement de terrain présente un risque potentiellement élevée pour une large population au niveau du bassin versant et du périmètre urbain de la province de Nador.

Le site des carrières d'Igounaf situées à la sortie de la ville de Nador à la direction Nord-Ouest a été choisi pour analyser le phénomène d'effondrement. Les terrains dans cette zone sont de fortes pentes avec la présence des structures plissée. L'ensemble de ces carrières sont actuellement délaissées, mais l'exploitation clandestine d'extraction des roches continue et constitue un risque permanent pour cette large population qui y travaille et qui est estimée à plus de 5500 habitants en 2014.

Ce type d'effondrement résultent de la rupture des appuis ou du toit de la cavité souterraine soudainement, rupture qui se propage jusqu'en surface de manière plus ou moins brutale, et qui détermine l'ouverture d'une excavation grossièrement cylindrique (***Dehousse et Arnould, 1971, Gartet, 2007***). Les dimensions de cette excavation dépendent des conditions géologiques, de la taille et de la profondeur de la cavité ainsi que du mode de rupture généré. Ce phénomène au niveau du site d'Igounaf peut être soit ponctuel (doline de 50 m) ou généralisé avec des superficies de plusieurs hectares. De légers mouvements d'ordre métrique ont été remarqués sur les extrémités de ces excavations provoqués par la circulation des eaux de provenance des agglomérations urbaines en amont.

L'évolution progressive des processus érosifs au niveau de ce site est susceptible de provoquer des effondrements et des dégâts de grande ampleur. Par conséquent, des relevés

précis sont obligatoires, comme le prévoit le récent projet d'urbanisme de la province de Nador, qui a été établi afin de prendre en compte l'instabilité causée par les grandes cavités et de concevoir des solutions de stabilité adéquates.

- ***Les coulées boueuses***

Les coulées de débris constituent un caractère important de mouvement de masse et un processus géomorphologique important dans les régions montagneuses, causant fréquemment de graves dommages que ça soit pour les habitations ou pour les infrastructures de transport (***Davies, 1997, Scott & Yuyi, 2004; Harris et al.2008; Korup & Clague, 2009, Takahashi, 2014***). Les coulées de débris sont généralement déclenchées par de fortes pluies et/ou la fonte des neiges, cependant, les coulées de grands volumes peuvent également se transformer à partir d'effondrements de barrages par glissement de terrain, d'avalanches ou de glissements de terrain dus à des ruptures de pente dans leur zone d'origine (***Wei et al.2019***). De tels événements peuvent avoir une vitesse inhabituellement élevée, une longue distance de déplacement et donc un potentiel plus destructeur que des événements plus petits (***Iverson et al.1997, Padilla et al.2014***). Il est depuis longtemps admis que les coulées de débris augmentent leurs volumes et augmentent leur pouvoir destructeur en entraînant les sédiments sous-jacents lorsqu'ils s'écoulent le long des pentes et des canaux abrupts (***Iverson, 2012***). Certaines zones sont plus susceptibles de subir des coulées de boue, notamment:

- Les zones où les incendies de forêt ou l'utilisation humaine des terres ont détruit la végétation ;
- Les zones où des glissements de terrain se sont déjà produits ;
- Pentes abruptes et zones en bas de pentes ou de canyons ;
- Les pentes qui ont été modifiées pour la construction de bâtiments et de routes ;
- Les canaux le long d'un ruisseau ou d'une rivière ;
- Les zones où le ruissellement de surface est dirigé.

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), les phénomènes des coulées de débris figurent parmi les mouvements de masse actifs qui marquent le paysage durant les périodes pluvieuses. Ce processus géomorphologique naturel est devenu plus grave à la suite de la dégradation de couvert végétale naturel, la dégradation des sols et l'urbanisation. Les cas les plus marquante à l'esprit sont ceux des années 2008, 2009 et 2015, 2016 au niveau de la province de Nador, surtout de Zeghanghane.

Au cours de ces périodes plusieurs coulée boueuses ou coulée de laves torrentielles ce sont déclenché avec un mélange d'eau, des débris rocheux, des sédiments et de la matière organique très importante s'écoulant à des vitesses plus au moins élevées dans les torrents de montagne (***Swanson et al.1982***; ***Coussot, 1996***).

Le torrent de Jaadar durant la journée du 24 et le 25 novembre 2008 a connu le déclanchement d'un mouvement de masse de type coulée boueuse. Les habitants de la ville de Zeghanghane ont été les témoins de ce phénomène aussi choquant que brutale. Un volume de matériaux composés de sédiments, de cailloux et blocs mélangés avec des eaux des crues s'est déposé dans le chenal torrentiel. Des écoulements de grande ampleur dépassant les 1 m de hauteur ont atteint les lotissements et logement située dans la partie aval avec un débordement

des matériaux rocheux et des sédiments limoneux argileux le long du chenal torrentiel qui a pris sa source en amont du massif de Gourougou. L'écoulement boueux tout au long de son parcours, a augmenté son volume et qui a accru son pouvoir destructeur et a occasionné de nombreux dégâts (Figure 79).

Un ensemble de matériaux hétérogènes composés de colluvions, d'argiles limoneux, de couches superficielles terreuses, mais aussi de roches schisteuses décomposées et d'autres débris ont été étalés sur les milieux urbain avec des surface drainée très importante. La durée de l'écoulement n'a pas dépassée les 20 minutes mais sont effet destructeur était inaperçue. Plusieurs dommages ont été remarqués à savoir dans les infrastructures routières, les logements, les voitures voir même des préjudices corporels pour un certain nombre d'habitants.



Figure 67: Lave torrentielle et écoulement boueux de Zeghanghane et Jaadar (Photo de 2008)

1. 4. Érosion par les cours d'eau

Ce type d'érosion hydrique est lié surtout à l'action de la turbulence des eaux active durant les crues torrentielles qui accomplissent le travail érosif des cours d'eau. L'érosion peut se manifester par le sapement des berges et l'ablation des fonds des chenaux. La capacité du cours d'eau à mobiliser sa charge solide (sédiment et débris rocheux) dépend de l'énergie et la vitesse du courant. Un chenal est considéré en équilibre lorsque toute l'énergie du courant est dépensée dans le transport des sédiments. Bien souvent les conditions d'équilibre ne sont pas réunies et la différence entre les apports de sédiments et la compétence du cours d'eau est la cause soit d'une érosion ou d'un dépôt (***Coque, 1977 ; Sundborg & Rapp, 1986***). Si la charge en sédiments est faible par rapport à la capacité de transport du cours d'eau, l'énergie

disponible est utilisée pour l'érosion des berges et du fond du lit conduit dans certains cas à la dégradation des infrastructures hydrauliques (Figure 80).



Figure 68: Sapement des berges et dégradation de l'infrastructure au niveau de l'aval du bassin versant

2. Carte des formes d'érosion

L'approche descriptive porte sur la description et la cartographie des formes de l'érosion réelle. Elle a été réalisée à partir des photographies aériennes et complétée et corrigée directement sur le terrain.

La présente approche a été faite conformément aux directives PAP/CAR. Selon la charte cartographique du modèle, la codification et la nomenclature des formes et processus de l'érosion au niveau des zones côtière et la méditerranée suggère pour chaque forme d'érosion une lettre (L, D, C, M, P...) et pour l'agressivité de chaque processus un chiffre (1, 2, 3, 4, X). Par exemple, l'érosion en nappe, il est codé "L", la différence réside au niveau du degré avec lequel l'érosion en nappe fonctionne, pour cela un chiffre est attribuée. Pour les rigoles « D », on a attribué les degrés 2 et 3, car il s'agit d'une forme très apparente, qui agit par un processus moyen et rarement faible. En effet, les directive du modèle PAP/CAR, pour les données d'entré sollicite qu'ils doivent être conforme à la particularité de la zone étudié, cette flexibilité proposée rend la méthode de plus en plus cohérente.

La répartition des formes d'érosion dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) a été cartographiée selon les directives du modèle classique PAP/CAR. Des lettres majuscules et des chiffres ont été utilisés pour décrire les schémas d'érosion et le degré atteint par chaque érosion traité. Il s'agit principalement d'une évaluation qualitative qui devrait être considérée comme complémentaire à la phase prédictive (Tableau 56).

Tableau 38 : Processus de l'érosion actuelle actif du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Code	Description	% de superficie
SP	Sites protégés	3.02
L1, L2, L3…..LX	Erosion en nappe de plus en plus intense	86.68
D	Rigoles et ravinement superficiel	2.02
C1, C2, C3….CX	Ravinement profond de plus en plus intense jusqu'au stade de ravinement généralisé CX (Badlands)	8.06
M	Glissement de terrain/ lave torrentielle et solifluxion	0.06
MX	Eboulis de gravité localisés/ milieux irrécupérables par affaissement	0.03
P2	Processus érosifs mixtes et interactifs	0.14

L'analyse des résultats montrent que la dégradation dans le bassin versant se manifeste par divers formes et processus de l'érosion avec une forte présence de l'impact humaine. Nous avons assistés à la dégradation des sols de différentes manières (Figure 81):

- Erosion en nappe et décapage (L1, L2, L3 et LX): affecte 86.68% de la surface totale du bassin versant. Elle se manifeste par une variation de la surface du sol qui prend les couleurs les plus claires, montrant que le sol est peu développé, ajoutant la faible présence de nutriments essentiel pour la croissance des plantes ;

- Erosion en Rigoles et ravinement superficiel (D): Apparaissent au début du période hivernale dans les sols labourés après chaque forte averse, ils disparaissent après l'action du labour. Affecte environ 2.02 % des terres annuellement ; la présence de tels formulaires sur des supports inutilisables la terre évolue généralement vers des formes plus grandes ;

- Ravinement profond de plus en plus intense jusqu'au stade de ravinement généralisé CX "Badlands"(C1, C2, C3, C4 et CX): Elle se développe au détriment des terres cultivées, des matériaux meubles à forte pente et sur les faciès des marnes à intercalation de calcaire à pentes abrupt, provoquant l'incision des ravins par ruissellement. Elle touche environ 8.06 % des terres du bassin versant ;

- Les sites protégés (SP) : Ces zones présentent les zones couvertes par les la végétation naturelle et les reboisements, il présente une superficie de 3.02% de la superficie du bassin ;

- Les glissements de terrain/lave torrentielle (M2) : Ces forme de l'érosion qui se déclenche suite aux évènements pluvieuse extrême présente à peu près 0.06% de la superficie du bassin, localisée au niveau Jaadar ;

- Eboulis de gravité localisés et les affaissements (MX) : produite sur les pentes fortes, le matériau boueux adouci par l'augmentation de leur teneur en eau liquide. Cela affecte 0,03 %;

- Les processus multiples (P2): Ces processus de l'érosion possèdent un aspect mixte lié d'une part à l'action des processus naturel et d'autre part à l'action anthropique, elle se localise au niveau des zones exploitée à des fins agricoles ou industrielles. Ces formes présentes 0.14% de la superficie du bassin versant.

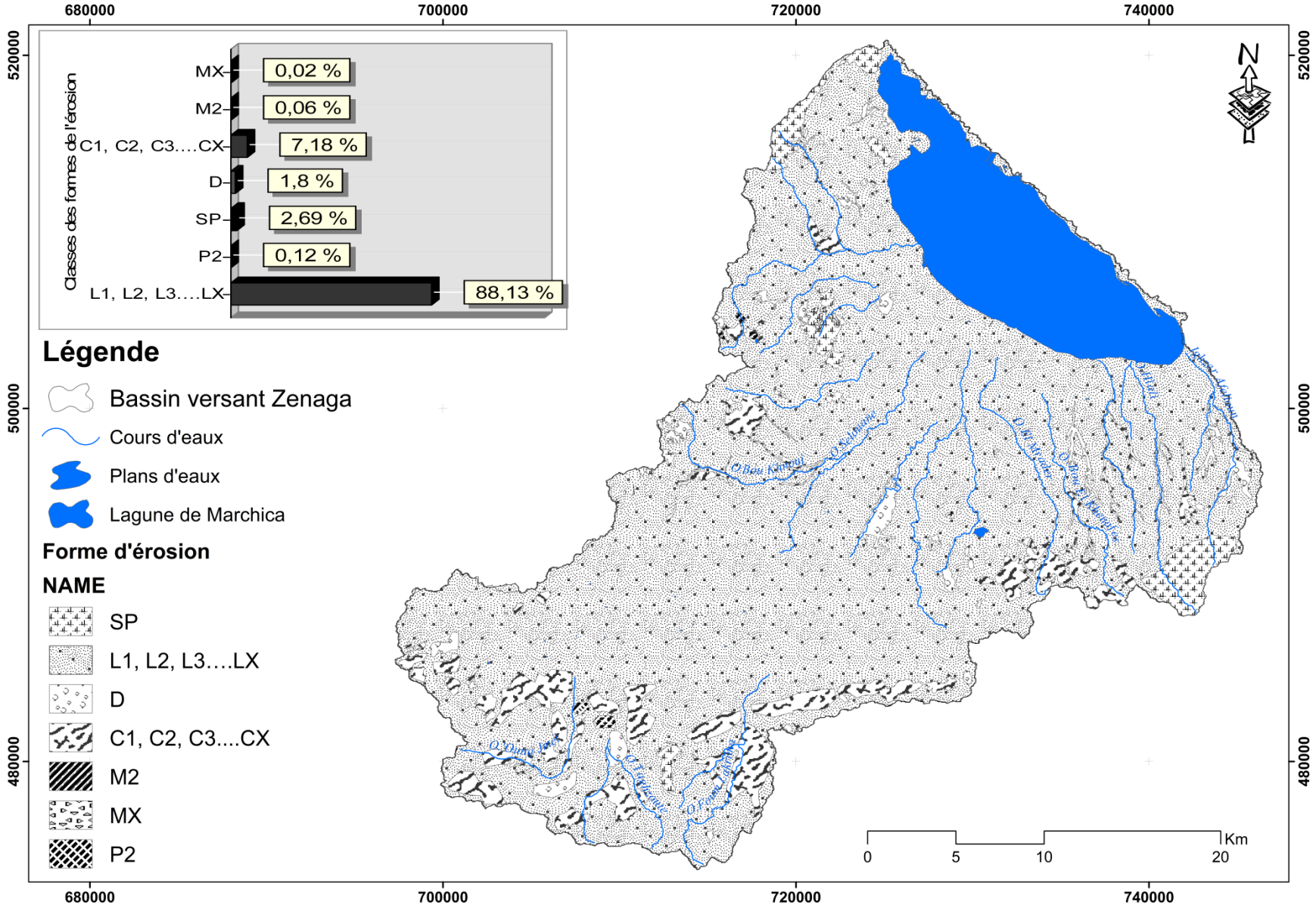


Figure 69: Carte des formes de l'érosion du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

III. Approche d'intégration

L’approche d’intégration consiste à combiné les résultats des deux approches prédictive et descriptive et d’en déduire la carte consolidée de l’érosion, qui contient des informations potentielles et probabilistes sur les différentes aspects des phénomènes de l’érosion. Selon les directives classiques PAP/CAR, les symboles d’intégration proposés s’avère délicate à interpréter. Elle propose une interprétation subjective des données de la susceptibilité, en superposant les polygones de chaque phase (Prédictive et descriptive) et en les interprétant à la sortie. La carte consolidée de l’érosion permettra d’estimer les tendances dans l’évolution futures des sols et donc déterminée la susceptibilité à l’érosion hydrique dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), ce qui va nous permettre de détecter les zones noires nécessitant des interventions d’urgence.

1. Carte consolidée de l’érosion hydrique

La carte consolidée de l’érosion hydrique est le résultat principal de l'approche d'intégration. C’est une carte qualitative combinant les données qualitatives issues des approches prédictives (états érosifs) et descriptives (formes de l’érosion) qui contient des informations complètes sur les différents aspects des processus d’érosion hydrique. Le traitement cartographique consiste à superposer les polygones des deux cartes en utilisant un dégradé de couleurs pour la carte des états érosifs prédictifs et des figurés avec un fond transparent pour les formes d’érosion hydrique réelles. Cette transparence permet de comparer les formes d’érosion existantes avec celles déduites à partir de l’influence des facteurs de l'érosion. La carte permet donc de déterminer deux types de zones.

A. Les zones où l'approche descriptives confirme le résultat de la phase prédictives. Les formes mineures de l’érosion coïncidente avec les états érosifs prédisant une érosion faibles et les zones où les formes d’érosion majeures comme les zones à Badlands ou des mouvements de masses importants coïncident avec les états érosifs élevés ou très élevés.

B. Les zones où se rencontrent une opposition dans les résultats. Ce sont les zones où les formes mineures de l’érosion hydrique coïncident avec les états érosifs prédisant une érosion forte et celles où les formes d’érosion réelle observées sont spectaculaires alors que celle prédite est plutôt faible.

Ces différentes zones observées nous conduisent à établir des scénarios sur la cause des coïncidences et celle des oppositions des états érosifs avec les formes réelles de l’érosion hydrique observées. Elles nous poussent à rechercher dans d’autres facteurs ceux responsable du freinage et de la diminution de l’intensité de l’érosion hydrique. Les facteurs étudiés paraissent insuffisants pour expliquer les oppositions observées.

Parmi les facteurs non étudiés, il y a l’agressivité climatique, l’exposition des versants, la longueur de pente et de pente (facteur LS), l'humidité et la température de surface ainsi que le type de sols avec ses différents constituants organique, minéralogique et géochimique (Pas seulement la friabilité des faciès lithologiques). C’est ce qui a été à l’origine du teste que nous ferons plus loin que nous avons appelé "PAP/CAR modifié".

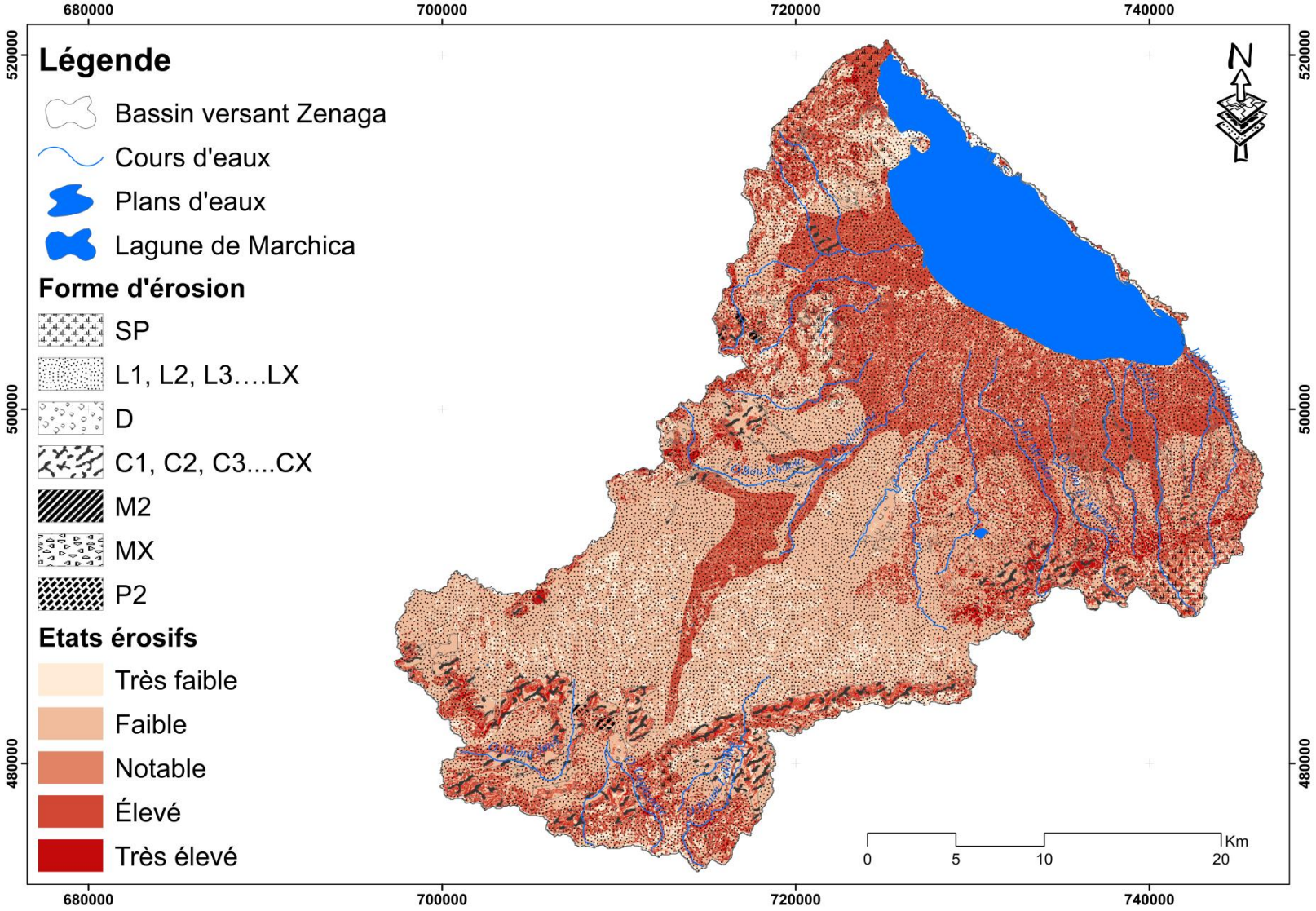


Figure 70: Carte consolidé de l'érosion du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

2. Carte des tendances de l'érosion hydrique

La carte des tendances « susceptibilité » à l'érosion contient des informations potentielles sur l'évolution probable des sols. Elle consiste à estimer l'évolution des formes de l'érosion hydrique sur les sols en cherchant si les facteurs causaux étudiés freineront ou aggraveront les processus qui se déroulent en appliquant la matrice (Tableau 57) générant les tendances probables de l'évolution. Les classes des tendances à l'aggravation de l'érosion ou à la stabilisation des sols sont exprimées par un indice allant de 1 pour les tendances localisées à la limitation de l'érosion, à 4 pour celles des tendances généralisées à la dégradation vers des situations irréversibles.

Tableau 39: Matrice générant des tendances d'érosion

Formes d'érosion	**Formes mineures d'érosion**	**Formes majeure d'érosion**
Etats érosifs	**SP, L &D**	**C1.... CX & P et MX**
Erosion très faible	1	3
Erosion faible	1	3
Erosion notable	2	4
Erosion forte	2	4
Erosion très forte	2	4

- 1 : Tendance à la stabilisation, à la régression ou à la limitation de l'expansion spatiale des processus d'érosion : Susceptibilité Faible.
- 2 : Tendance localisée à l'intensification des processus d'érosion : Susceptibilité Moyenne.
- 3 : Tendance généralisée à l'expansion ou à l'intensification des processus d'érosion : Susceptibilité Forte.
- 4 : Tendance de la dégradation généralisée vers une situation irréversible : Susceptibilité Extrême.

La figure 83 montre que 54.69% des terrains du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) présentent une tendance à la stabilisation et la régression de l'expansion spatiale des processus de l'érosion (Susceptibilité faible). Cette classes est localisée surtout dans les parties basse du bassin et au niveau des zones amont avec des pratiques antiérosifs. Cela signifie autrement l'existence d'autres facteurs que ceux étudiés qui ralentissent et s'opposent à l'érosion. La lutte sera donc d'autant plus efficace si les pratiques agricoles sont adéquates et tiennent en compte des phénomènes destructeur et sera moins couteuse si les interventions s'opèrent sur les formes mineures de l'érosion hydrique.

La classe des tendances localisée à l'intensification des processus d'érosion (Susceptibilité Moyenne) présente 36.89%. Cette classe répartie au niveau de tout le bassin avec des concentrations au niveau des parties NE-NW, WSE au niveau de la plaine de Bou Areg et en longeant l'oued Selouane. Elle est présente lorsque les états d'érosion faibles ou très faibles coïncident avec les formes d'érosion mineure ou secondaire proprement dite.

Les classes des tendances généralisées à l'expansion ou à l'intensification des processus d'érosion (Susceptibilité forte) ; et des tendances de la dégradation généralisée vers une situation irréversible (Susceptibilité extrême) présentent 3.9% et 4.52%. Ils ont situé dans les parties les plus élevée du bassin versant au niveau des massifs des Kebdana, du mont du

Gourougou et ces massifs à savoir le Jbel Azrou Hammar et dans les zones extrêmes amont Nord-ouest du bassin, au niveau de Tiztoutine et Zaïo. Dans ces zones la réhabilitation des sols est de l'ordre de l'impossible à l'échelle d'une vie humaine mais ce sont des zones très dangereuses qui participent activement à l'envasement et l'eutrophisation des ouvrages hydrauliques. Des interventions mécaniques comme les gabions dans les ravins sont donc urgentes.

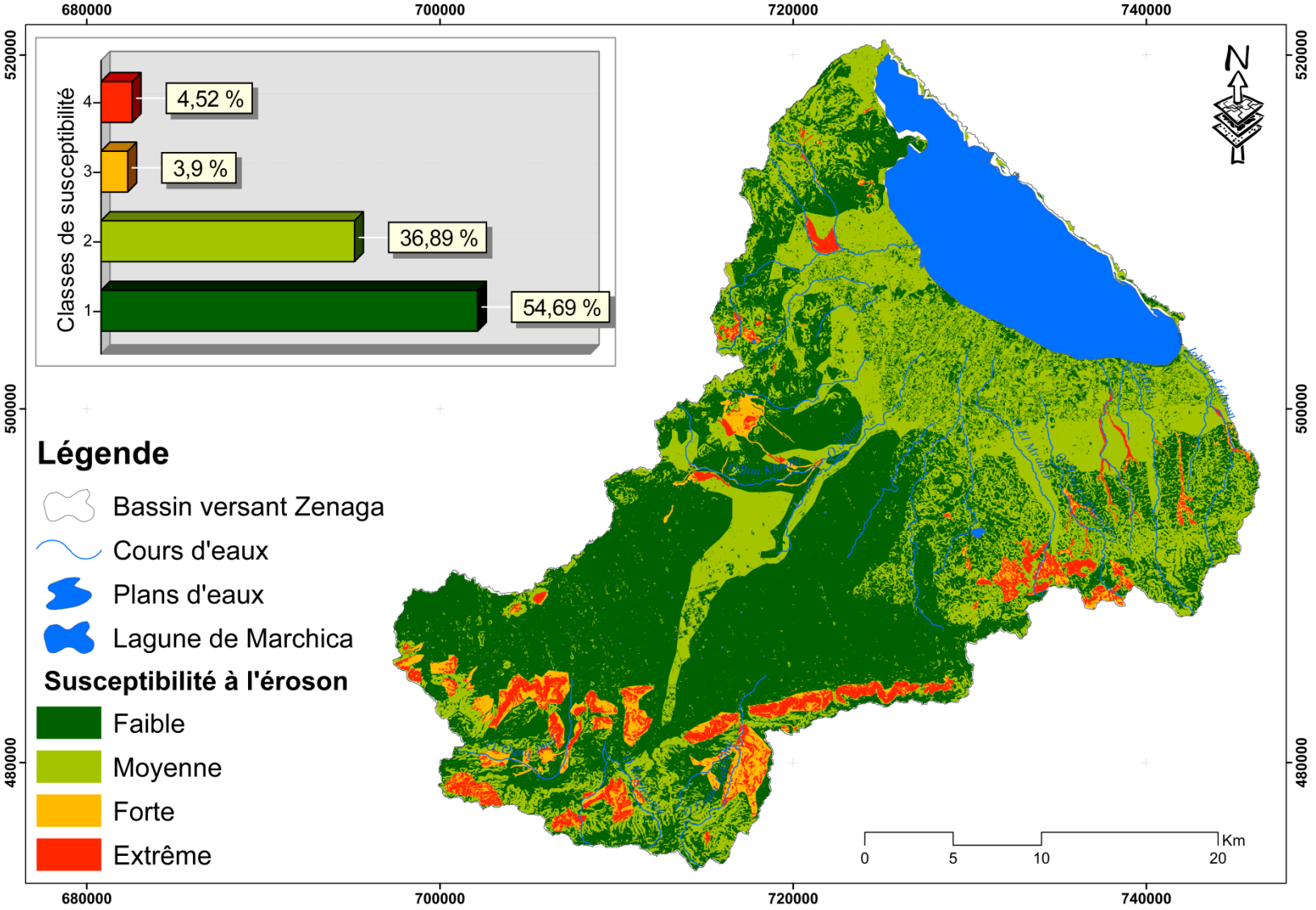


Figure 71: Carte des tendances à l'érosion du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Conclusion et discussions

L’étude, la mesure et la cartographie de l’érosion hydrique en se basant sur le modèle des directives PAP/CAR a permis de hiérarchiser la surface du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) en parcelles selon le degré de risque de l'érosion. La définition de la susceptibilité à l'érosion hydrique est une étape primordiale pour déterminer les zones susceptibles d’être emporté qui peuvent fournir des éléments mobilisables (matériaux d’altération) et donc la sédimentation dans les zones de dépôts. Cette étape est indispensable quant à la prise de décision, les résultats permettent d’identifier les facteurs et les domaines nécessitant une intervention rapide pour contrecarrer les effets de l'érosion des sols due aux processus actifs d'érosion hydrique, ainsi que de choisir le type de gestion et d’aménagement adéquat de façon efficace et durable.

L'approche prédictive fournit des informations sur l'état actuel de la dégradation des terres sur la base du degré d'influence de différents facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique (lithologie, pente, utilisation, protection des sols, degré de recouvrement de couvert végétale, etc.). Elle conduit à la cartographie d'unités homogènes d'états érosifs, fournissant le canevas pour la caractérisation des tendances générales de l'érosion des sols. Cinq états érosifs ont été déterminés. Il montre que 49.79% des terrains présentent une faible prédisposition à l’érosion hydrique. L’érosion très faible et notable enregistre respectivement 9.03% et 8.9%. L'érosion élevée touche 29.76%. La classe de l'érosion très élevée ne dépasse pas les 2.82%.

L’approche descriptive basée sur la description et la cartographie de l'érosion réelle a permis d’identifier les degrés atteints pour chaque forme et processus d'érosion hydrique et à faire une évaluation qualitative des processus actuels de l’érosion afin de déterminer la susceptibilité d’érosion. C’est pour cela qu’elle a été considérée comme complémentaire à la phase prédictive. La carte des formes de l’érosion est réalisée à la base de la carte des états érosifs prédictive, utilisée comme base cartographique de référence, mais aussi sur les observations et contrôle sur le terrain. Elle montre que la dégradation se manifeste par divers formes et processus de l'érosion avec une forte présence de la trace humaine. La dégradation des sols se fait de différentes manières :

- L’érosion en nappe et le décapage (L1, L2, L3 et LX), forme de l’érosion qui présente une forte menace car elle passe de façon inaperçue. Ce processus de l’érosion emporte les particules organo-minérales des sols nécessaires pour le développement de la végétation, affecte 86.68% de la surface totale du bassin versant ;
- L’érosion en rigoles et ravinement superficiel (D) apparaissent au début du période hivernale dans les sols labourés après chaque forte averse, ils disparaissent après l'action du labour. Affecte environ 2.02 % des terres annuellement ; la présence de tels formulaires sur des supports inutilisables la terre évolue généralement vers des formes plus grandes ;
- Le ravinement profond de plus en plus intense jusqu’au stade de ravinement généralisé CX "Badlands"(C1, C2, C3, C4 et CX): Elle se développe au détriment des terres cultivées, des matériaux meubles à forte pente et sur les faciès des marnes à

intercalation de calcaire à pentes abrupt, provoquant l'incision des ravins par ruissellement. Elle touche environ 8.06 % des terres du bassin versant ;

- Les sites protégés (SP) présentent des zones couvertes par la végétation naturelle et par des reboisements. Ils représentent une superficie de 3.03%.
- Les glissements de terrain/lave torrentielle et solifluxion (M2) se déclenchent suite aux évènements pluvieux extrêmes présents à peu près 0.06%.
- Les glissements de terrain, les éboulis de gravité localisés et les écroulements (MX) produits sur les pentes moyennes à forte, le matériau boueux adouci par l'augmentation de leur teneur en eau liquide. Cela affecte 0,03 % ;
- Les processus multiples (P2) possèdent un aspect mixte lié d'une part à l'action des processus naturel et d'autre part à l'action anthropique, elle se localise au niveau des zones exploitée à des fins agricoles ou industrielles. Ces formes présentes 0.14%.

La superposition de la cartographie prédictive et descriptive a permis de montrer les tendances de l'évolution des sols au niveau du bassin versant Zenaga. L'étude a pu mettre en évidence la coïncidence d'états très dégradés avec des formes d'érosion spectaculaires et d'autres états stables avec des formes d'érosion mineures ou des zones carrément stables.

L'approche d'intégration montre que les tendances à la stabilisation et à la régression de l'expansion spatiale des processus d'érosion (Susceptibilité faible) et les tendances localisée à l'intensification des processus d'érosion (Susceptibilité Moyenne) sont les plus évidentes avec 54.69% et 36.89% des terrains du bassin versant. À son tour, les tendances généralisées à l'expansion ou à l'intensification des processus d'érosion (Susceptibilité forte) et les tendances de la dégradation généralisée vers une situation irréversible (Susceptibilité extrême) ne dépassent pas les 8.42%. La carte des tendances montre l'avenir du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) en fonction de la dynamique des facteurs responsables et des processus d'érosion, ce qui signifie qu'au sein d'un même état, il existe un ordre de priorité des tendances.

L'état des ressources en sols dans le bassin versant Zenaga sont susceptibles à la dégradation. L'action mixte des facteurs naturels de l'érosion et l'action anthropiques ont engendré une altération des ressources à savoir la couverture pédologique et le couvert végétale. Des pertes considérables des sols seront engendrées, chose qui va provoquer l'envasement au niveau des plans d'eaux, des lacs de barrage, mais surtout une sédimentation massive au niveau de la lagune de Marchica. Un impact socio-économique va être ressentit. Pour ces raisons, il est indispensable d'intervenir pour contrecarrer l'effet de l'érosion hydrique par une approche intégrale et innovante, chose qui aidera à démêler les interactions des différents facteurs, à concilier les besoins importants d'une population en croissance constante avec des ressources limitées.

L'utilisation du modèle PAP/CAR a montré sa fiabilité, cependant compte tenu de l'influence de d'autres facteurs d'érosion, leur intégration peut enrichir la méthode, ce qui peut servir par la suite à réaliser un modèle cartographique cohérent qui peut être un outil de base pour le diagnostic de la dégradation des sols, la planification de l'utilisation des terres et d'aide à la décision pour prédire, gérer et contrôler la vulnérabilité à l'érosion des sols de manière efficace et durable.

- # Le modèle PAP/CAR modifié et facteurs de risque

La démarche classique du modèle PAP/CAR a été utilisée et ses résultats ont été évalués sur plusieurs bassins versants dont celui de Amzaz (***Mesrar et al.2013***); Larbaa (***Sadiki et al.2012***); Sahla (***Mesrar et al.2015***) et Asfalou (***Tahouri et al.2014; Tahouri et al.2016***). Ces études ont montré que de nombreuses lacunes persistent dans les paramètres d'entrée utilisés. Comme a été décrit par les directives PAP/CAR, le modèle omet l'influence des paramètres climatiques, ce qui aura un impact sur la fiabilité des résultats obtenus.

Des calibrations ont été réalisées, notamment sur celles des matrices d'érodibilité et des états érosifs (***Mansouri et Emanuele, 2005***). La carte d'érodibilité, dont la méthode classique PAP/CAR (***PAP/CAR, 1998 ; PNUE/PAM/PAP, 2000***) utilise la lithologie et la pente comme paramètres d'entrée pour déterminé l'érodibilité des sols ou susceptibilité des sols à fournir des matériaux au ruissellement.

Les essais ont été réalisés en modifiant les paramètres initiaux avec d'autres paramètres d'érosion plus significatifs puisque l'érodibilité des sols omet l'influence d'autre facteurs, en introduisant le type de sol à la place de la lithologie (***Tahouri, 2014***) et le facteur topographique "LS" de l'équation universelle des pertes en sol (***Wischmeier et Smith, 1978***) à la place des pentes (MI), parait plus significatif étant donné que le facteur topographique fait intervenir la pente et la longueur de pente selon l'équation de Wischmeier qui favorise l'accélération des éléments qui augmente l'agressivité de l'eau et le ruissellement (***Sadiki et al. 2012; Mesrar et al.2015***).

Compte tenu de l'influence d'autres facteurs de l'érosion, l'intégration des paramètres climatiques, à savoir l'érosivité des pluies "R" emprunté de l'équation révisée de Wischmeier (***Wischmeier et Smith, 1978***, ***Renard et al.1997***), l'exposition des versants, l'humidité du sol (SMI) et la température de surface (LST) ont montré leur fiabilité (***Tahouri et al.2022***) Ces matrices étaient cohérentes avec les matrices spécifiques aux recommandations du PAP/CAR M- III et M-IV (Tableau 58).

La matrice générant les facteurs climatiques dans ces deux catégories "a" (M-III), et "b" (M-IV) est largement basée sur les conditions climatiques méditerranéennes. Pour cela, nous avons utilisé la même logique gérant les matrices des directives PAP/CAR (M-III et M-IV). Dans notre cas, nous avons utilisé l'érodibilité du sol comme facteur déterminant compte tenu de son importance comme facteur décisif de la sensibilité à l'érosion.

Les paramètres introduits ont fait l'objet d'analyses statistiques pour quantifier la relation entre les facteurs mise en jeu, pour augmenter l'efficacité de la méthode utilisée, et donc les résultats obtenus (***Tahouri et al.2022***). L'utilisation de ces nouveaux paramètres tente de rediriger les directives traditionnelles.

Tableau 40: Les matrices PAP/CAR classiques et modifiée

M-I: Matrice générant le degré d'érodibilité

Facteur topographique (LS)	*Classes des sols*				
	1	2	3	4	5
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

M-II: Matrice générant le degré de protection du sol

Utilisation des terres	*Densité de couverture*			
	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

M-III: Matrice générant le Facteur climatique (a)

Exposition des versants	*Érosivité des précipitations (facteur R)*				
	1	2	3	4	5
1 Sud	1	1	2	3	3
2 Est	1	1	2	3	3
3 Nord-Est	2	2	3	4	4
4 Nord	3	3	4	4	5
5 Nord-Ouest	3	4	4	5	5

M-IV: Matrice générant le Facteur climatique (b)

Humidité du sol	*Température de surface du sol*				
	1 Faible	**2 Moyen**	**3 Elevé +**	**4 Elevé ++**	**5 Elévé +++**
1 Très élevé	1	1	2	3	3
2 Elevé	1	1	2	3	3
3 Moyenne	2	2	3	4	4
4 Faible	3	3	4	4	5
5 Très faible	3	4	4	5	5

M-V: Matrice générant des états érosifs

Degré de protection du sol	*Degré d'érodibilité*		
	1	2	345
1	1	1	122
2	1	1	234
3	1	2	344
4	2	3	355
5	2	3	455

M-VI: Matrice générant des états érosifs

Facteur climatique	*Érodibilité du sol*				
	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

M-VII: Matrice générant des tendances d'érosion

Formes d'érosion	*Formes mineures d'érosion*	*Formes majeure d'érosion*
Etats érosifs	*SP, L & D*	*C1.... CX & MX*
Erosion très faible	1	3
Erosion faible	1	3
Erosion notable	2	4
Erosion forte	2	4
Erosion très forte	2	4

Tableau 41: Classifications des paramètres de sortie

Érodibilité		**Protection des sols**		**Facteur climatique**		**États érosifs**	
Classes	**États**	**Classes**	**États**	**Classes**	**États**	**Classes**	**États**
1	Faible	1	Très élevé	1	Très faible	1	Erosion très faible
2	Modéré	2	Elevé	2	Faible	2	Erosion faible
3	Moyenne	3	Moyen	3	Moyen	3	Erosion notable
4	Forte	4	Faible	4	Elévé	4	Erosion élevé
5	Extrême	5	Très faible	5	Très élevé	5	Erosion très élevé

Nous avons adopté l'approche méthodologique présentée dans le schéma cartographique de du modèle PAP/CAR modifié (Figure 84); nous avons d'abord opté pour l'utilisation de l'approche classique du modèle PAP/CAR impliquant la pente et la lithologie d'une part, et l'occupation des sols et la densité de couverture d'autre part. Deuxièmement, l'introduction du facteur topographique (LS) au lieu de la pente et le type de sol au lieu de la lithologie. Troisièmement, les paramètres climatiques ont été introduits dans deux sections a et b, impliquant l'érosivité des précipitations (Facteur R) et l'exposition des versants pour le facteur climatique (a) d'une part, et l'indice d'humidité du sol (SMI) et la température de surface (LST) pour le facteur climatiques (b), d'autre part.

La carte finale de sensibilité à l'érosion sera vérifiée en comparant les résultats qui ont été obtenus selon le modèle conventionnel et le modèle modifié (M-V). Les paramètres de sortie (Tableau 58), en particulier l'érodibilité et la protection des sols, le facteur climatique et les états érosifs sont répartis en 5 classes allant d'un état bas avec une sensibilité minimale à un état à risque extrême qui reflète une forte sensibilité à l'érosion.

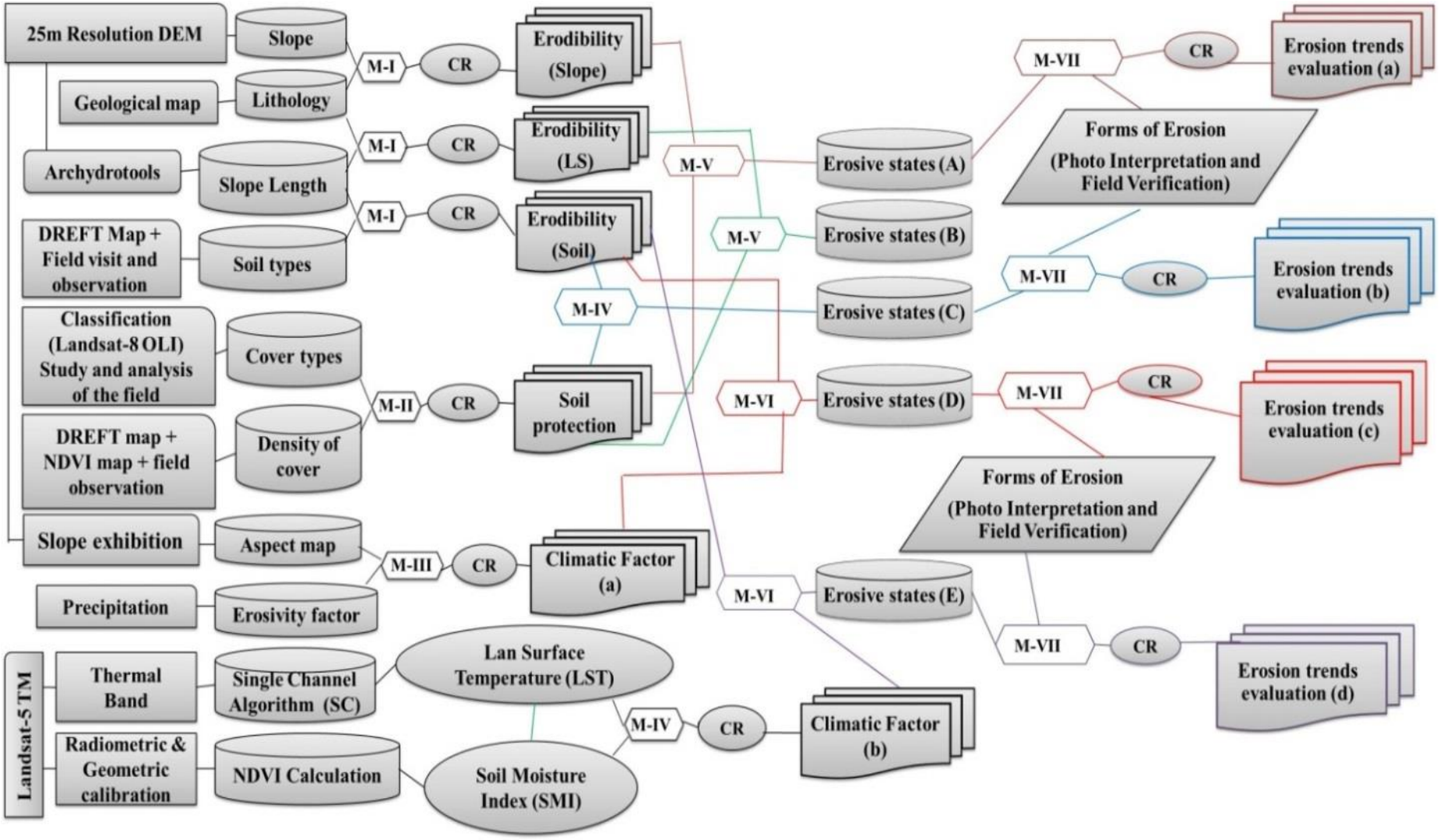


Figure 72: Modèle conceptuel de la méthodologie PAP/CAR modifiée (d'après ***Tahouri et al.2022***)

NB : **25m resolution DEM** : DEM à haute résolution de LiDAR (***Wolock and McCabe, 2000; Liu, 2008***)

• I. Résultats et discussion

1. Facteurs causaux du risque d'érosion hydrique

L'utilisation de la méthode cartographique PAP/CAR modifiée (Figure 84) nous a permis de déterminée les différentes facteurs causaux du risque de l'érosion hydrique après l'arrangement des paramètres concernés mis en jeu selon les classes adoptées par la présente méthode (Tableau 60).

Tableau 42: Classes et pourcentage de superficie des facteurs impliquée selon la méthode PAP/CAR modifié

Classes	Etats	types	% de Superficies
Pentes	**Angle**	**%**	
1	Faible	0-3%	51.18
2	Modéré	3-12%	29.4
3	Abrupte	12-20%	11.61
4	Très abrupte	20-35%	5.95
5	Extrême	>35%	1.86
Facteur topographique (LS)			
1	Très faible	0.001 – 0.472	80.13
2	Faible	0.472 – 1.626	11.97
3	Moyen	1.626 – 3.358	5.15
4	Fort	3.358 – 5.720	2.04
5	Extrême	5.720 – 13.381	0.7
Lithofaciès		**Résistance**	
1	Très faible	Roches compactes non altérées	53.36
2	Faible	Roches fracturées modérément altéré	8.44
3	Moyen	Roches et ou sol faiblement ou moyennement	1.47
4		compactées	
5	Fort	Roches et ou sol peu résistante est fortement altérée	12.39
	Très forte	Roches ou sols meuble non cohésives et matériaux détritiques	24.34
Sols	**Résistance**	Types de sols	
1	Très faible	Sols Isohumiques	0.55
2	Faible	Sols Vertisols	23.79
3	Moyen	Sols Calcimagnésiques	6.44
4	Forte	Sols peu évolué	59.35
5	Très forte	Sols peu évolué minéraux bruts	9.88
Occupation des sols	**Protection**	**Type de couverture**	
	Très faible	Cultures sèches, terrains nus et zones bâtis	26.42
	Faible	Culture en ligne (arbres fruitiers, vignobles)	30.85
	Moyen	Arboriculture en périmètre irrigués	4.97
	Fort	Forêts et reboisements	9.1
	Très forte	Arbustes et matorrals à couvert denses	9.51
	Extrême	Arbustes et matorrals à couvert claires	19.15
Densité de couverture	**Densité**	**% de recouvrement**	
1	Faible	Végétation éparse (<25%)	0.64
2	Moyenne	Végétation de densité moyenne (25% -50%)	73.99
3	Fort	Végétation dense (50% -75%)	18.48
4	Extrême	Végétation très dense (> 75%)	6.9
Erosivité des pluies (R)		**R (MJ mm ha-1 h-1 yr-1)**	
	Très faible	127,70 – 136,16	20.97
	Faible	136,16 - 144,84	19.29
	Moyennes	144,84 – 153,30	34.59
	Forte	153,30 – 164,59	17.18

	Extrême	164,59 – 183.03	7.98
Exposition des versants		**Exposition**	
1	Très faible	Sud	28.34
2	Faible	Est	12.07
3	Moyen	Nord-Est	14.08
4	Fort	Nord	23.66
5	Extrême	Nord-Ouest	21.85
Humidité du sol		**Humidité**	
	Très faible	0,0058 - 0,1921	20.99
	Faible	0,1921 - 0,2862	32.97
	Moyenne	0,2862 - 0,3921	27.64
	Elevé	0,3921 - 0,5372	15.16
	Très élevé	0,5372 - 0,8789	3.24
Température de surface des Terre (LST)		**LST en °C**	
	Faible	21,94 - 25,10	0.07
	Moyenne	25,10 - 31,92	2.61
	Élevé	31,92 - 36,51	25.70
	Très élevé	36,51 - 39,79	44.73
	Extrême	39,79 - 43,75	15.66

L’analyse des résultats de traitement montre que les pentes faibles (0-3%) sont les plus distinguées avec un pourcentage de 51.18%, suivies des pentes modéré (3-12%) avec 29.4% de la surface totale, ces deux classes apparaissent dans la partie centrale et méridionale caractérisant les parties basses du bassin versant Zenaga. Les pentes abruptes (12-20%) sont apparentes sur les parties de passage vers les zones les plus élevés, avec 11.61%. Par contre, les pentes très abrupte (20-35%) et extrême (>35%), ne présentent que 7.81% du totale des superficies des classes de pente.

Le facteur topographique (LS) montre que la classe la plus représentative et celles des classes très faible avec 80.13%. La classe faible arrive en deuxième position avec 11.97%. La classe moyenne avec 5.15%. Les classes forte et extrême ne dépassent pas 2.74%, marquant les zones amont du bassin versant.

Le faciès lithologique est classé selon le degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion hydrique. Elle montre que la classe présentant un degré de résistance très faible et un risque élevé est la plus dominante caractérisant les roches compactes non altérée, avec 53.36%, suivies des faciès lithologiques de degré de résistance très fort, caractérisant les roches ou sols meuble non cohésives et matériaux détritiques avec 24.34%. Ces unités figurent au niveau de la partie centrale, la zone aval du bassin et dans les zones amont de la partie nord-ouest. La classe de degré de résistance fort présentant les roches et ou sol peu résistante est fortement altérée avec 12.39%. Les classes faible et moyen résistance, caractérisant les roches fracturées modérément altéré et les roches ou sols moyennement compactées présentent respectivement 8.44% et 1.47%.

Les sols sont classés selon leur degré de résistance; la classification montre que les classes de sols de forte résistance sont les plus dominantes au niveau du bassin versant avec 59.35%. Il s'agit des sols peu évolués. Les sols de faible et très forte résistance présentée par les vertisols et les sols peu évolué à minéraux bruts enregistre respectivement 24.16% et 18.01%.

Les sols de moyenne résistance caractérisant les sols calcimagnésiques avec 6.44%. Les sols de très faible résistance représentant les sols isohumiques ne présente que 0.55%.

L'occupation des sols montre une forte présence des classes de risque très fort (Culture en ligne) et extrême (Cultures sèches, terrains nus et zones bâtis) avec respectivement 30.85% et 26.42%. La classe de risque très faible (Arbustes et matorral à couvert dense) et faible (Arbustes et matorrals à couvert dense et clairs) occupent respectivement 9.51% et 19.15%. La classe fort (Forêts et reboisements) et moyenne (Arboriculture en périmètre irrigués) occupent respectivement 9.1% et 4.97%.

Le degré de recouvrement végétal, en relation directe avec la proportion de végétation est un facteur décisif pour maintenir la résistance du sol. La protection du sol est importante si le degré de couverture végétale est élevé indiquant une action érosive faible des pluies. La classe la plus fréquente est celle de moyenne densité (25-50%) avec 73.99%, située dans les parties nord amont et central. La densité forte (50-75%) avec 18.48%, suivie de la densité extrême (>75%) avec 6,9%. L'état de densité faible (<25%) ne représente que 0,64% de la superficie totale, localisé sur les pentes délimitant les cours d'eaux et la zone qui encercle la lagune de Marchica.

L'érosivité des précipitations pour les états moyens, très faibles, faibles et forts représentent respectivement 34.59%, 20.97, 19.29% et 17.18% de la superficie totale. L'érosivité extrême ne présente que 7.98% de la superficie totale, localisé au niveau des sommets des zones amont à savoir le mont Gourougou, le massif des Kebdana, Jbel Kerker et les monts de Bni Oukil Oulad M'Hand.

L'exposition des versants montre que les versants exposés au Sud, Nord et Nord-Ouest sont les plus représentés avec respectivement 28.34%, 23.66% et 21.85%. Les versants Nord-Est et Est présentent respectivement 14.08% et 12.07% de la superficie totale.

La température de surface terrestre (LST) est un paramètre important dans la description des conditions thermiques et peut être récupérée à partir des images satellitaires (***Li et al.2013; Xi, 2013; Wang et al.2013; Zhang et al.2013; Walawender et al.2014***). Il est utilisé pour estimer le bilan énergétique de surface pour l'évaluation des changements dans la couverture terrestre et d'autres caractéristiques de surface (***Hua et Ping, 2018***).

Les classes LST montrent que les températures du sol très élevé sont les plus représentées avec 44.73%, suivie des classes de température élevé avec 25.70%. Les températures extrêmes enregistrent 15.66%. Les classes moyennes et faible température de surface ne dépasse pas les 2.68% de la superficie totale du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

L'humidité du sol est un paramètre important en agriculture pour la production végétale et agricole; les classes d'humidité faible, moyenne et très faible sont les plus dominantes avec respectivement 32.97%, 27.64% et 20.99% de la superficie totale. La classe élevée enregistre 15.16% tandis que la classe très élevé ne présente que 3.24%.

2. Élaboration de la carte d'érodibilité

Le facteur "Erodibilité" présente la prédisposition d'un substrat à fournir des éléments mobilisables suite à l'action érosive des pluies. La pente quant à elle est le paramètre qui contrôle son évacuation du profil en fonction de sa raideur. Autrement dit, suivant le schéma cartographique établi (Figure 84), on met en relation la résistance d'un substrat avec l'inclinaison de la pente. La carte d'érodibilité selon l'approche PAP/CAR classique est le résultat de la superposition de la carte des pentes et de celle des lithofaciès. Les polygones résultants des deux paramètres de référence sont ordonnés selon la matrice M-I (Tableau 58).

La pente du sol est un facteur déterminant du ruissellement, et donc de l'érosion hydrique (***Chaplot & Le Bissonnais, 2000***). Le ruissellement augmente considérablement avec la longueur et l'angle de la pente. En effet, la charge solide résultant de l'érosion semble également augmenter avec la pente. Selon ***Duffa et Danic, 2006***, la probabilité de ruissellement est faible pour une pente inférieure à 2 %, entre 2 et 5 %, le ruissellement est possible en cas d'orage ou pour des sols peu perméable. Sur les sols avec une pente supérieure à 5%, il y a ruissellement. Le ruissellement s'accélère sur les sols avec des pentes supérieures à 10%. Deux hypothèses permettent d'expliquer ce phénomène (***Cerdan et al.2012***), l'accélération du ruissellement avec l'augmentation de la pente et l'absence d'une couche d'eau protégeant partiellement les particules de sol de «Effet Splash» sur un terrain à faible pente.

Lorsque la pente passe de 7,18 m à 54,4 m, le coefficient de ruissellement est multiplié par 8,6% (***Poesen & Bryan, 1990***). A cet égard, il semble que l'influence de la longueur des pentes soit d'autant plus importante que celle de la pente (***Mesrar, 2016***). Cela permet au ruissellement d'augmenter en taille et en concentration, un moyen qui augmentera l'intensité de l'érosion hydrique et en fait l'intensification des processus d'érosion.

Tester et montrer l'influence de la longueur de la pente (LS) sur la mobilisation des particules de sol s'est avérée utile (***Mesrar et al.2015; Tahouri et al.2022***). Le facteur longueur de pente (LS) a été introduit à la place de la pente (Figure 57). Le résultat obtenu montre deux cartes d'érodibilité. La première (Figure 83-a) est réalisée en superposant la pente et la lithologie selon la méthode classique PAP/CAR. La seconde (Figure 83-b) concerne la superposition de la longueur de pente (LS) et des types de sol au lieu de la pente et de la lithologie.

L'analyse des résultats de la modélisation classique montre que la répartition de l'érodibilité dans le bassin versant Zenaga est fonction de la pente et du degré de cohésion des faciès lithologiques. Selon l'approche classique PAP/CAR, l'érodibilité est toujours extrême dans les zones à fortes pentes et à faible résistance. Les classes fortes et très fortes érodibilité des sols sont situées dans les parties amont et Sud du bassin versant où la pente est supérieure à 35 %. Les classes de faible et très faible érodibilité occupent la partie médiane et la partie aval, là où la pente devient faible. Les classes les plus représentatives sont celles d'érodibilité faible, modérée et moyenne, avec respectivement 50.78%, 28.56% et 16.59% de la superficie totale. L'érodibilité fort et extrême ne présente que 3.75% et 0.33% respectivement (Figure 85).

Nous concluons que le degré de cohésion du sol et la nature des pentes contrôlent l'érosion au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Les zones à forte pente sont celles caractérisées par des lithologies à faible résistance et des érodibilités forte. Ces zones vulnérables sont situées à l'extrême Nord-Est (Mont Gourougou), Nord-Ouest (Tiztoutine et Afsou) et en aval en allant vers le Sud selon une direction NE-SW.

L'introduction de la longueur de la pente au lieu de la pente montre une distribution différente; les degrés d'érodibilité diminuent et suivent les longueurs de pentes faibles. Ceci est principalement dû au fait qu'une pente longue présente un risque plus élevé qu'une pente courte. Les classes d'érodibilité élevée et très élevée avec des pourcentages de 2.22% et 0.23% respectivement ont diminué alors qu'il était de 3.75% et 0.33%. On constate une augmentation de l'érodibilité faible avec 66.3% et une diminution de l'érodibilité modérée avec 24.44%. L'érodibilité moyenne à diminuée aussi avec un pourcentage du total de superficie de 6.81%, soit 9.78%.

L'introduction du facteur type de sol montre que plus de 72.91% des terres ont une érodibilité faible. L'érodibilité modérée présente 25.6%. On remarque que les érodibilités moyenne, forte et extrême ont diminué avec respectivement 1.23%, 0.21% et 0.05% des superficies totales du bassin versant.

L'analyse des résultats obtenus montre que le degré d'érodibilité est surestimé par la méthode classique PAP/CAR. D'autre part, l'introduction de la longueur de pente (LS) à la place de la pente montre une régression paisible des classes d'érodibilité modérée, moyenne, forte et extrême, avec une augmentation de la classe faible érodibilité. L'introduction du type de sol à la place de la lithologie entraîne en revanche une augmentation de la classe faible, et modérée avec une régression des classes forte et extrême d'érodibilité dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

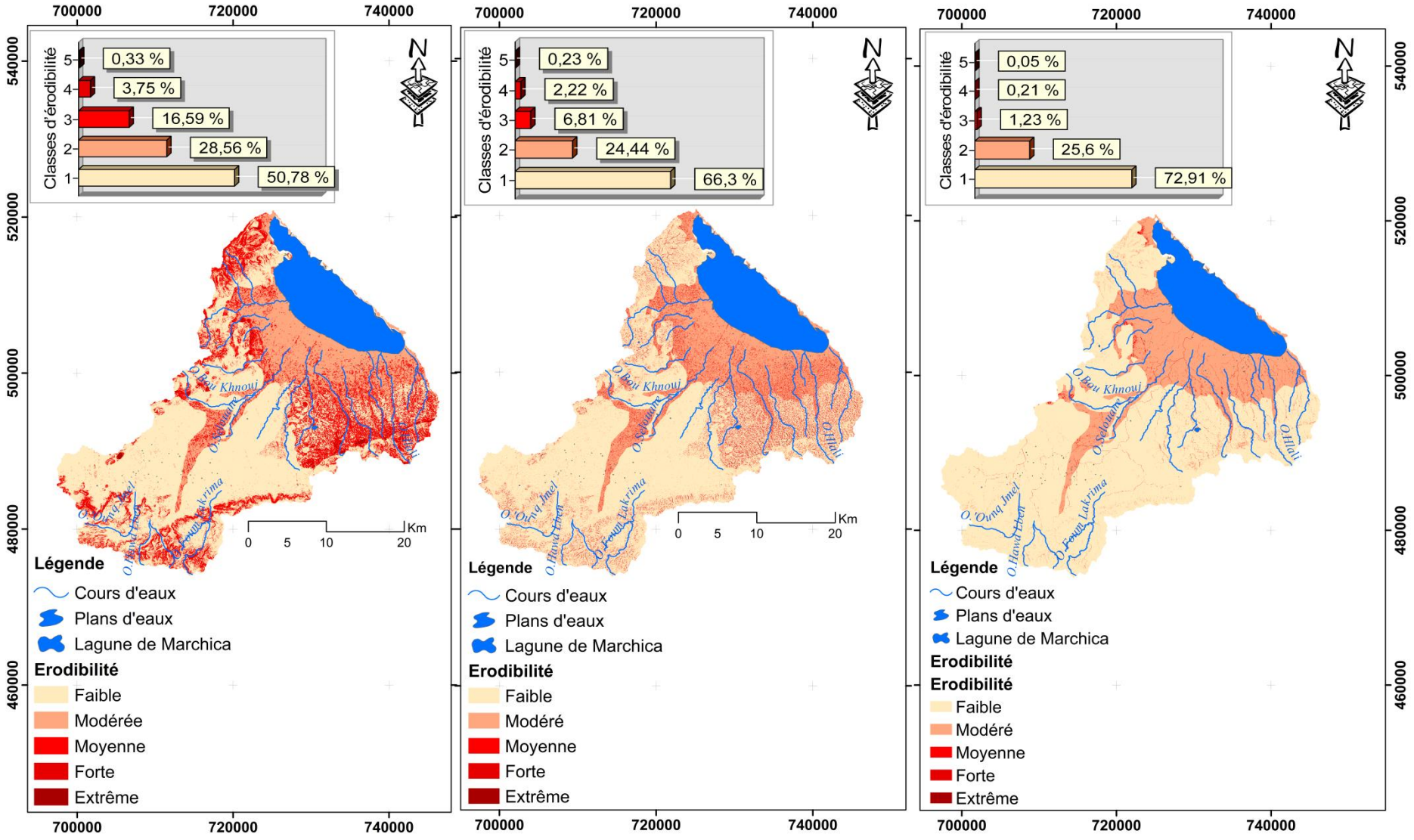


Figure 73: Cartes d'érodibilité : a : Approche classique PAP/CAR ; b : Introduction du facteur topographique (LS) ; c : Introduction du type de sol

3. Facteur climatique

La reconnaissance du facteur climatique nécessite l'illustration de la variation géographique des phénomènes sur lesquels il est influencé. Par exemple, les terrains sous climat méditerranéen, soumis à des précipitations souvent sous des formes orageuses, sont reconnus, comme les plus propices aux phénomènes de ruissellement des eaux, voire à l'érosion hydrique, en favorisant le départ de particules de sol. Selon (***Duffa et Danic, 2006***), l'intensité des précipitations a une influence directe sur les quantités d'eau qui s'écoulent sur le sol, lui-même responsable de l'érosion hydrique. En outre, la quantité de précipitations est largement influencée par la distribution du relief. Selon ***Daveau (1978)***, le versant au vent à l'obstacle montagneux est bien arrosé, contrairement au versant sous le vent qui est beaucoup plus sec.

Comme le montrent les résultats, les pentes évaluées au nord, au nord-est et au nord-ouest sont plus sujettes à l'action érosive des précipitations que celles exposées au Sud et à l'Est. De même, l'érodibilité est importante, si la pente est élevée et si la lithologie et à faible résistance. Sinon, l'augmentation des taux d'érosion est amplifiée par le travail du sol et l'érosion hydrique (***Quijano et al.2016b***). Les problèmes créés par ces pratiques sont particulièrement frappants dans les zones montagneuses et les zones où les terres agricoles accompagnent des conditions environnementales défavorables, telles que des altitudes élevées, des pentes abruptes, des sols peu profonds et des conditions climatiques sèches avec de fortes précipitations (***MacDonald et al.2000***). On peut dire que si l'action érosive des pluies est importante et si les pentes possèdent les expositions mentionnées (N, NE, et NW), alors le facteur climatique sera plus accentué.

Dans cette étude, nous avons proposé le facteur climatique dans deux types (a) et (b) (Figure 84). Le facteur climatique (a), concerne la superposition de l'érosivité des précipitations et l'exposition des pentes. L'humidité du sol (**SMI**) et la température de surface des sols (**LST**) ont été superposée pour avoir le facteur climatique (b). Ces facteurs ont été pris en considération vu l'importance qu'ils présentent autant comme facteurs décisif de l'érosion. L'humidité du sol est un paramètre clé qui influence directement ou indirectement le cycle de l'eau (***Brocca et al.2017***). La température de la surface des sols a un impact sur les anomalies d'humidité du sol (***Parinussa et al.2011***). Le changement climatique et la tendance à la hausse des températures ont un impact significatif sur la production agricole (***Potic et al.2017 ; Van Leeuwen et al.2015***). Elle est liée à divers phénomènes hydrologiques, tels que la sécheresse, le climat et la végétation.

Nous avons étudié la linéarité des paramètres (Erosivité des pluies et exposition des versants) et (Humidité et température de surface), décrivant le même ensemble de polygones ou d'unités afin de compléter nos observations. On suppose qu'il existe une relation entre les facteurs mise en jeu des deux facteurs climatiques (a) et (b). L'attribution des modalités des deux facteurs si ne se fait pas au hasard, c'est à dire si les valeurs de chaque facteur de chaque paramètre dépendent des valeurs de l'autre paramètre. Par exemple, si les valeurs de l'érosivité et de la température de surface dépendent respectivement des valeurs de l'exposition des versants et de l'humidité des sols, et vice-versa. C'est-à-dire si l'exposition

des versants et l'humidité des sols dépend de l'érosivité des pluies et la température de surface, signifie que la connaissance des valeurs précédente permet de prédire, dans une certaine mesure, les valeurs ultérieurs. En d'autres termes, si les facteurs antérieur dépend des facteurs postérieur, on peut trouver une des équations telle que :

- Equation du modèle (a)

$$R = 31{,}4190424025393 - 0{,}570852120126964 * Exposition\ des\ versants$$

- Equation du modèle (b)

$$LST = 20{,}2003647442403 + 0{,}117681762787985 * Humidité\ des\ sols$$

Les résultats de l'ajustement du modèle linéaire pour décrire la relation entre l'érosivité des pluies et l'exposition des versants et la température de surface et l'humidité des sols expliquent respectivement 54% et 72%.

L'ajustement à une loi de probabilité a été effectuée par le bais du Test du khi², Fisher-Tippett (2), Gamma, Gumbel, Logistique, Normale, Student et Weibull. Ces différentes test ont permet de visualiser les effectifs et les fréquences pour chaque intervalle, ainsi que les densités pour l'échantillon et la distribution choisie (Figure 86-a).

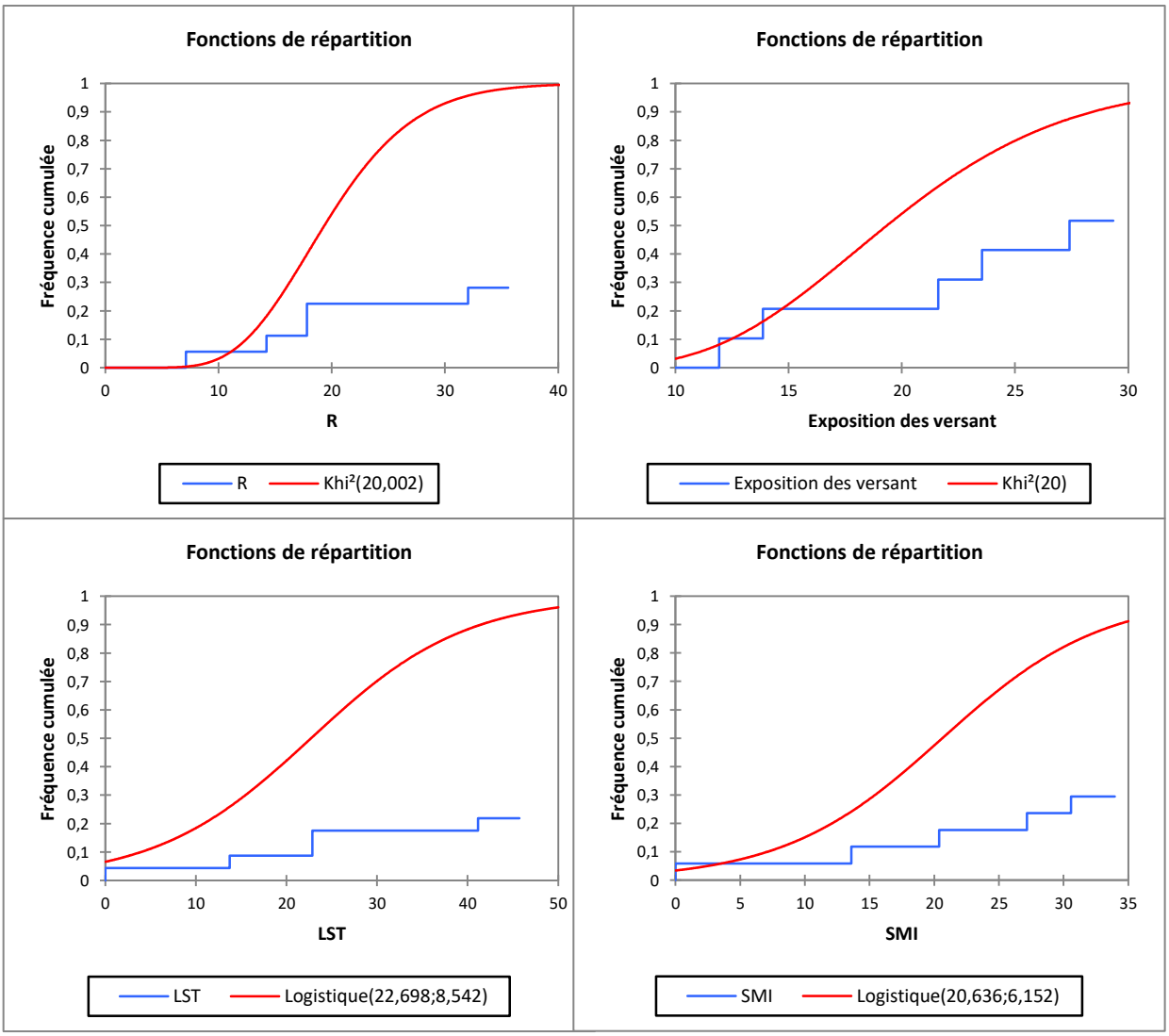


Figure 86-A : Test d'ajustement d'une loi de distribution **(**Traces de densité**)**

Les résultats montrent que la distribution qui s'ajuste le mieux aux données pour le paramètre climatique (a) qui mettent en relation l'érosivité et l'exposition des versants est le test d'ajustement de la distribution Khi² avec p-value = 0.96. La distribution qui s'ajuste le mieux aux données pour le paramètre climatique (b) qui mettent en relation la température de surface et l'humidité des sols est le test d'ajustement logistique avec p-value = 0.98.

La Figure 86-b montre le résultat du test de Kolmogorov- Smirnov pour comparer les distributions des deux paramètres. Ce test est réalisé par le calcul de la distance maximale entre les distributions cumulées des deux facteurs. Dans notre cas la distance maximale est de 1. Étant donné que la P- valeur est inférieure à 0,05, on peut conclure que les deux tests présents des différences significatives entre les deux distributions au niveau de confiance de 99% avec un p-value respectivement de 0,81 et 1.

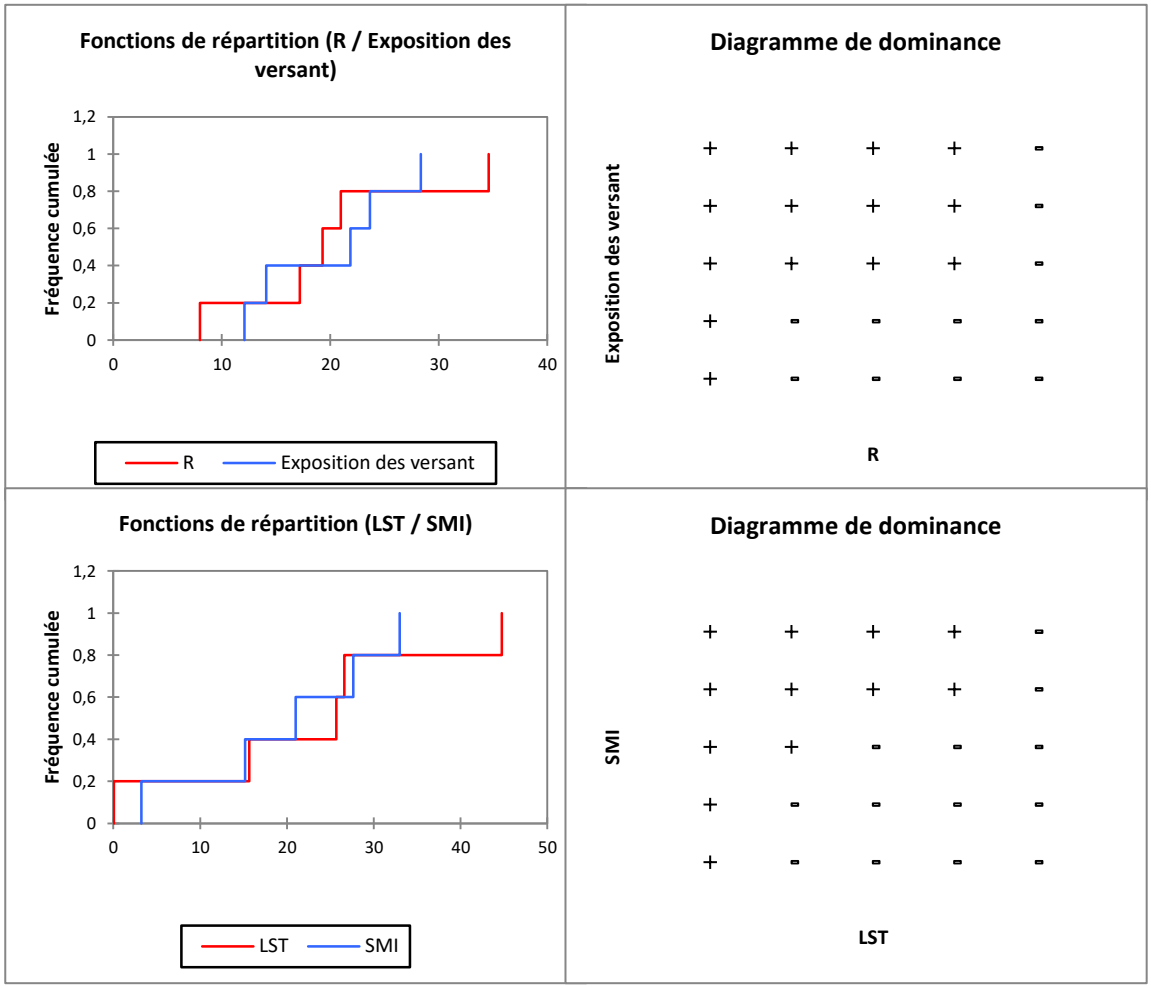


Figure 86-B : Test de Kolmogorov- Smirnov **(**Traces de densité**)**

Vu que les tests répondent positivement aux résultats solliciter. La matrice générant ce dernier est basée en grande partie sur les données climatiques qui règnent au Maroc, et les résultats de l'ajustement du modèle selon les tests statistiques établie. La carte des facteurs climatiques (Figure 87) et le résultat de la superposition de la carte de l'érosivité des pluies et de l'exposition des versants d'une part (Figure 87-a), et de l'humidité du sol et de la température de surface d'autre part (Figure 87-b). Les résultats obtenus ont été établis à partir de l'application des matrices M-III et M-IV (Tableau 58).

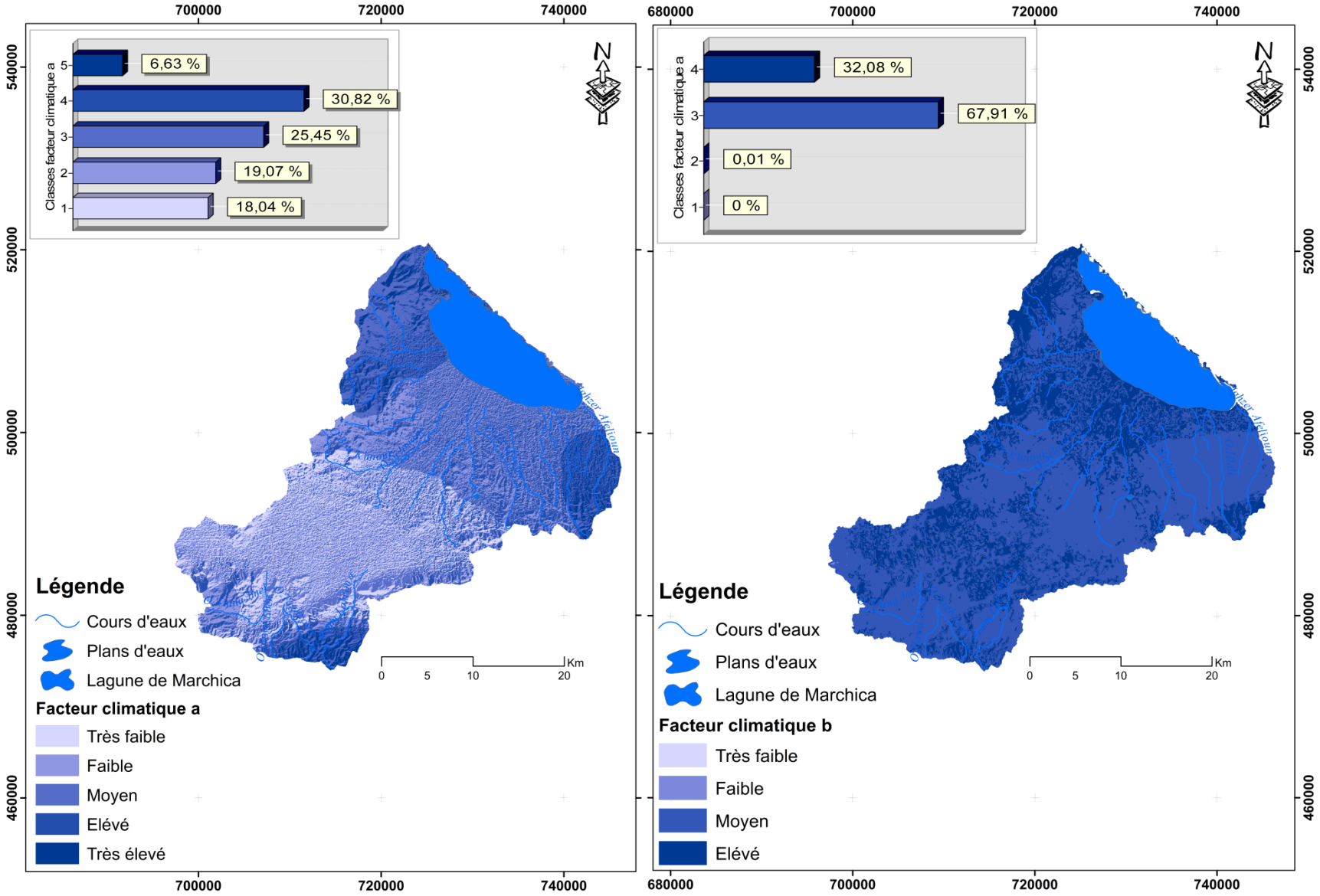


Figure 87: Carte des facteurs climatiques (a) et (b)

Le premier facteur climatique (a) (Figure 87-a) prédit que les pentes exposées au nord, au nord-est et au nord-ouest sont plus sujettes à l'action érosive et reçoivent la plus grande quantité de précipitations que celles exposées au sud et au nord. Les pourcentages de surface présentés d'après les résultats de la première manipulation cartographique montrent que 47.25% des terres ont une agressivité faible localisée dans l'ensemble du bassin mais avec une grande présence au niveau de la nappe de Gareb et Bou Areg, et la partie Nord-ouest du massif des Kebdana et en périphérie Sud, Nord, et Est caractérisant les zones amont du bassin versant. La classe d'agressivité très faible arrive en deuxième lieu avec 30.46%, éparpillé sur l'ensemble de la nappe de Gareb en allant vers les périphéries des zones amont NW et SW. Les classes d'agressivité élevé et très élevé représentent 5.8% et 4.83%, occupent respectivement la nappe de Bou Areg, le cordon dunaire et au niveau des zones amont (Mont Gourougou, le massif des Kebdana, Bni Oukil). La classe d'agressivité moyenne avec 11.65%, éparpillé dans tout le bassin versant Zenaga.

La carte issue du deuxième croisement cartographique (Figure 87-b) montre que les classes les plus représentative sont celle présentant des conditions d'agressivité moyen et élevé avec 67.91% et 32.08% respectivement, éparpillée sur l'ensemble du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) avec une forte présence au niveau des périmètres irriguées, que ça soit la nappe de Gareb ou Bou Areg, les zones présentant un couvert forestier et le porteur de la lagune de Marchica. Les classes très faible et faible sont absentes avec un pourcentage qui ne dépasse pas 1% de la superficie totale du bassin versant.

3. États érosifs

La carte des états érosifs est le produit final de l'approche prédictive résultant de la superposition de la carte d'érodibilité et la carte de protection des sols. L'objectif de la modélisation est de montrer les différentes combinaisons des degrés d'influence des facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique et de prioriser la surface du bassin versant en unités distinctes selon le degré d'érosion. La démarche consiste à tester les paramètres introduits en superposant la carte de protection des sols et les cartes d'érodibilité (Figure 82) en appliquant la matrice M-V générant l'aptitude du sol à l'érosion d'une part, et des cartes de facteurs climatiques en appliquant la matrice M-VI générant la capacité des sols à résister à l'agressivité climatique (Tableau 58). Chaque résultat de l'état érosif montre la signature du facteur introduit. Cela signifie que quatre tests seront effectués. Le premier concerne l'approche classique, le deuxième c'est l'introduction du facteur topographique (LS) au lieu de la pente, le troisième est le type de sol au lieu de la lithologie et enfin les facteurs climatiques. Le traitement analytique des résultats a permis de donner les constations suivante :

- La Modélisation classique (Figure 88-a): La classe représentative est celle de l'érosion très faible avec 47.82 %, suivie de l'état érosive notable avec 28.71% de la surface totale des états d'érosion. L'état érosif faible occupe 12.44%. Les classes élevé et très élevé occupent respectivement 8.21% et 2.82% des classes des états érosifs.

- L'introduction du facteur LS (Figure 88-b): Les classes représentatives sont celles de des états érosifs faible et notable d'érosion avec respectivement 56.03% et 22.43% des classes de

superficie. L'état d'érosion faible occupe 16.07%. Les états érosifs élevé et très élevé ne présentent que 5.47%

- L’introduction de type de sol et facteur LS (Figure 88-c) : La classe représentative est celle de faible érosion avec 60.83% de la classe totale des états d'érosion. L'état d'érosion notable et très faible occupent respectivement 20.95% et 17.37%. Les états érosifs élevé et très élevé ne présentent que 0.85%.

- L’introduction du facteur climatique a (Figure 88-d) : Les classes représentatives sont celles de très faible et faible érosion avec respectivement 62.21% et 26.73% de la classe totale des états érosifs. L'état d'érosion notable occupe 10.08%. Les états érosifs élevé et très élevé ne présentent que 0.25%.

- L’introduction du facteur climatique b (Figure 88-e) : Les classes représentatives sont celles très faible et de faible érosion avec 52.68% et 35.78% de la classe totale des états érosifs. L'état d'érosion notable occupe 11.28%. Les états érosifs élevé et très élevé ne présentent qu’un faible pourcentage de 0.26%.

Les résultats obtenus pour les états érosifs montrent que le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est très vulnérable à l'érosion. Ceci s'explique par le fait que tous les facteurs agissent à leur degré le plus élevé, que ce soit pour l'érodibilité, la protection des sols et les facteurs climatiques (a) et (b). L'introduction du facteur topographique (LS), des types des sols et des facteurs climatiques inverse la situation des états érosive dans le bassin versant.

On constate que les états érosifs forts et très forts pour le modèle PAP/CAR classique sont représentés de manière exhaustive, ce qui est le cas inverse pour la nouvelle approche de modélisation mise en place. La situation actuelle des phénomènes d'érosion à l'échelle du bassin versant Zenaga n'est pas seulement due à l'action des facteurs naturelle, mais à l'action mixte des processus naturelle et anthropique.

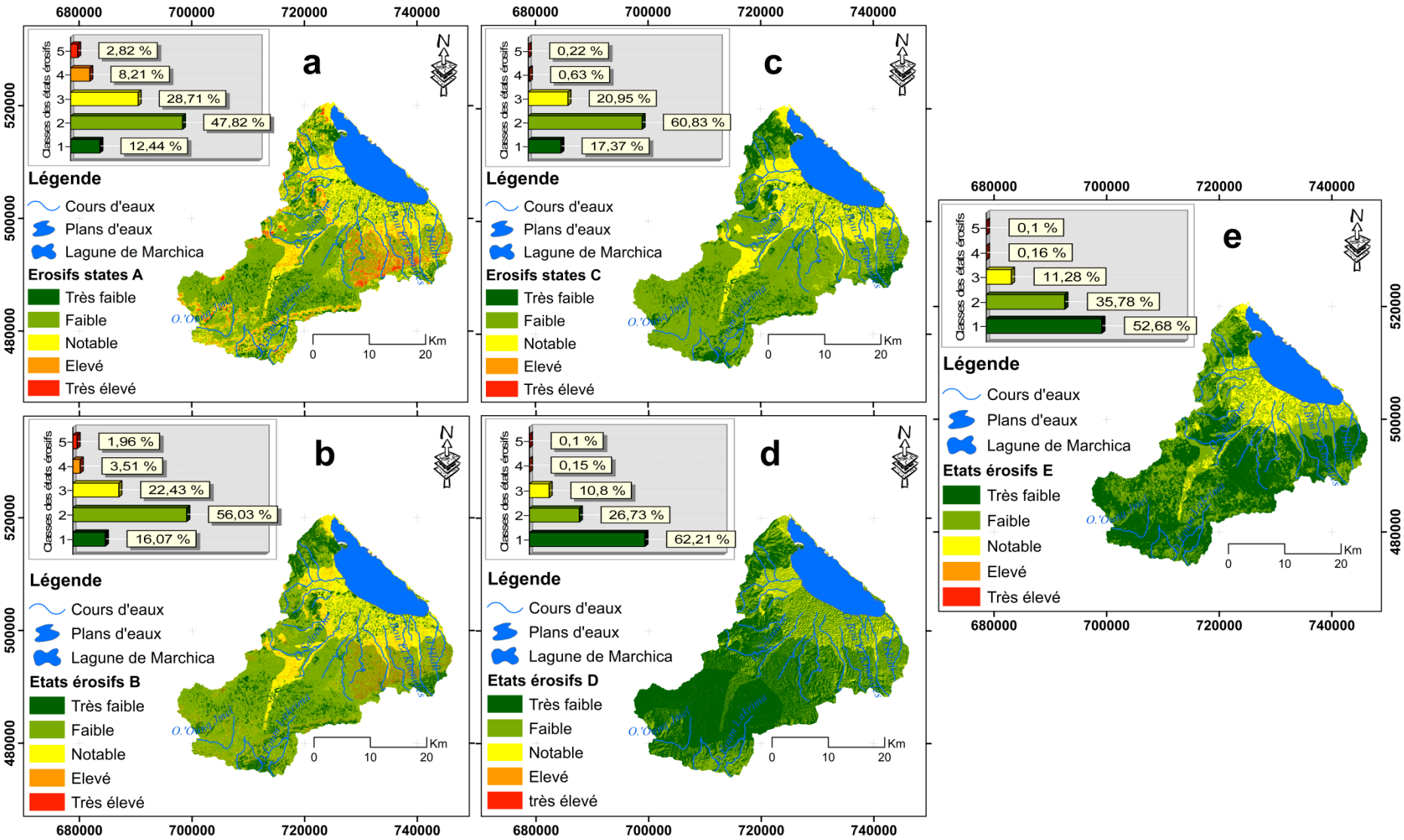


Figure 88: Cartes des états érosifs résultant de l'introduction des facteurs causaux de l'érosion**.**

4. Relations entre les facteurs causaux du risque de l'érosion hydrique et les états érosifs

4.1. Coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson

Le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson est une normalisation de la covariance par le produit des écarts-types des variables qui mesurent la force de la relation linéaire entre les variables (***Cohen et al.2009***). Le coefficient de corrélation est indépendant des unités de mesure des variables, ce qui permet des comparaisons. La mesure est normalisée ; il est défini entre -1≤ r ≤ 1. Lorsque r = 1, le lien entre les paramètres est linéaire, positif et parfait. Connaissant X nous donne la valeur de Y (et inversement), si r = -1, le lien est linéaire et négatif (Tableau 59).

Pour montrer et comparer l'influence des facteurs causaux étudiés sur les états érosifs, la corrélation de Pearson a été utilisée pour les facteurs (pente, exposition des versants, érosivité des pluies (R), longueur de pente (LS), types de sol, densité du couvert végétal, occupation du sol, température de surface des sols (LST) et l'humidité du sol (SMI)), les relations intrinsèque entre les différentes variables ont été calculées (Equation 42).

$$\boldsymbol{r} = \frac{\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} (\boldsymbol{xi}-\dot{\mathrm{x}})\times(\boldsymbol{yi}-\dot{\mathrm{y}})}{\sqrt{\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} (\boldsymbol{xi}-\boldsymbol{x})^2}\times\sqrt{\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} (\boldsymbol{yi}-\boldsymbol{y})^2}} \qquad \textit{Equation 42}$$

Où r est le coefficient de corrélation de Pearson ; xi mesure les valeurs de la variable x (Facteurs d'érosion), et yi mesure les valeurs de la variable y (états érosifs). L'étude de corrélation entres les facteurs de l'érosion (Tableau 60) pour les différents états érosifs résultant du schéma cartographique adopté montre que :

Les variables montrant des coefficients statistiquement significatifs à l'égard des états érosifs établis selon le schéma cartographique du modèle PAP/CAR modifiée indiquant une liaison linéaire positive respectivement de la pente (r = 0.288), l'occupation des sols (r = 0.506), la densité du couvert végétale (r = 0.802), le facteur topographique (r = 0.106), l'érosivité des pluies (r = 0.448), l'humidité des sols (r = 0.906) et la température de surface des sols (r = 0.374). Autrement dit, la connaissance de ces variables explique mieux les états érosifs. Au contraire, les paramètres, lithologie et type de sol montrent eux aussi des coefficients statistiquement significatifs, mais à l'inverse de la première, la relation et négative une avec des coefficients de 0.106, 0.090, 0.288, 0.260, 0.272 et 0.689 respectivement.

Tableau 43: Matrice de corrélation (Pearson r)

Variables	Etats érosifs A	Etats érosifs B	Etats érosifs C	Etats érosifs D	Etats érosifs E	Pentes	Lithofaciès	Occupation des sols	Densité de couvert	LS	Sol	Exposition des versants	R	SMI	LST
Etats érosifs A	**1**	**0,971**	0,957	0,191	0,404	0,288	-0,106	0,506	0,802	-0,106	-0,090	-0,825	0,484	0,906	-0,374
Etats érosifs B	**0,971**	**1**	**0,998**	0,325	0,540	0,423	0,028	0,686	0,844	0,028	-0,139	-0,718	0,321	0,856	-0,540
Etats érosifs C	0,957	**0,998**	**1**	0,363	0,575	0,460	0,069	0,723	0,841	0,069	-0,158	-0,684	0,290	0,842	-0,579
Etats érosifs d	0,191	0,325	0,363	**1**	**0,970**	**0,991**	0,954	0,751	-0,093	0,954	-0,510	0,345	0,198	0,407	-0,745
Etats érosifs E	0,404	0,540	0,575	**0,970**	**1**	**0,989**	0,855	0,863	0,145	0,855	-0,470	0,141	0,211	0,557	-0,808
Pentes	0,288	0,423	0,460	**0,991**	**0,989**	**1**	0,915	0,815	0,004	0,915	-0,430	0,272	0,204	0,491	-0,740
Lithofaciès	-0,106	0,028	0,069	0,954	0,855	0,915	**1**	0,584	-0,365	**1,000**	-0,472	0,599	0,100	0,161	-0,607
Occupation des sols	0,506	0,686	0,723	0,751	0,863	0,815	0,584	**1**	0,497	0,584	-0,185	-0,009	-0,144	0,487	-0,787
Densité de couvert	0,802	0,844	0,841	-0,093	0,145	0,004	-0,365	0,497	**1**	-0,365	0,013	-0,787	-0,092	0,485	-0,401
LS	-0,106	0,028	0,069	0,954	0,855	0,915	**1,000**	0,584	-0,365	**1**	-0,472	0,599	0,100	0,161	-0,607
Sol	-0,090	-0,139	-0,158	-0,510	-0,470	-0,430	-0,472	-0,185	0,013	-0,472	**1**	0,021	-0,231	-0,087	0,731
Exposition des versants	-0,825	-0,718	-0,684	0,345	0,141	0,272	0,599	-0,009	-0,787	0,599	0,021	**1**	-0,405	-0,602	0,041
R	0,484	0,321	0,290	0,198	0,211	0,204	0,100	-0,144	-0,092	0,100	-0,231	-0,405	**1**	0,721	0,084
SMI	0,906	0,856	0,842	0,407	0,557	0,491	0,161	0,487	0,485	0,161	-0,087	-0,602	0,721	**1**	-0,295
LST	-0,374	-0,540	-0,579	-0,745	-0,808	-0,740	-0,607	-0,787	-0,401	0,607	0,731	0,041	0,084	-0,295	**1**

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,01

Tableau 44: Coefficients de détermination (R^2)

Variables	Etats érosifs	Etats érosifs A	Etats érosifs B	Etats érosifs C	Etats érosifs d	Etats érosifs E
Etats érosifs	**1**	0,258	0,340	0,366	0,842	0,908
Etats érosifs A	0,258	**1**	0,944	0,916	0,037	0,163
Etats érosifs B	0,340	0,944	**1**	0,997	0,106	0,292
Etats érosifs C	0,366	0,916	0,997	**1**	0,132	0,331
Etats érosifs d	0,842	0,037	0,106	0,132	**1**	0,941
Etats érosifs E	0,908	0,163	0,292	0,331	0,941	**1**

L'analyse du coefficient de détermination (R^2) pour les différents états érosifs obtenus montre que les états érosifs suite à l'introduction des facteurs climatiques (a) et (b) expliquent respectivement 84.2% et 90.8% de la variabilité observée dans les états érosifs (Tableau 61). Les modèles d'états érosifs résultant de l'introduction des types de sols et de la longueur de pente (LS) expliquent 36.6% de la variabilité observée. Le modèle classique PAP/CAR n'explique que 25.8% de la variabilité des états érosifs. Les facteurs introduits pour calibrer la méthode, à savoir l'érosivité des précipitations, l'exposition des versants, le facteur topographique (LS), les types de sol, l'humidité et la température de surface des sols, expliquent mieux les variabilités observées dans les états érosifs.

L'étude et l'analyse des relations entre les différents facteurs de l'érosion permettent de montré les facteurs explicatifs des états érosifs, dont le contrôle peut être en faveur de la réduction de l'érosion. L'ordre d'influence des différents facteurs sur le risque d'érosion hydrique est : - Erosivité des pluies – humidité des sols (SMI) – densité de couvert végétale – température de surface des sols (LST) suivant une relation linéaire positive. L'ordre des paramètres qui sont en relation linéaire négative est lithofaciès – exposition des versants – occupation des sols – types de sol – longueur de pentes (LS) – pentes.

4.2. Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est très utile lorsque l'on est en présence d'une somme importante de données quantitatives à traiter et interpréter. C'est un outil extrêmement puissant de synthèse de l'information. L'axe horizontal porte la première dimension et l'axe verticale la deuxième dimension de l'ACP. L'angle aigue entre deux variable indique la corrélation qu'il soit positive ou négative. L'utilisation de l'ACP va permettre d'obtenir un petit nombre de combinaisons linéaires des variables représentatives.

Tableau 45: Valeurs propres (ACP)

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	7,451	4,895	1,606	1,048
Variabilité (%)	49,674	32,636	10,703	6,987
% cumulé	49,674	82,310	93,013	100,000

Le tableau 63 suivant et le graphique de regroupement des variables (Figure 89) correspondant sont liés à un objet mathématique, les valeurs propres, qui reflètent la qualité de la projection du tableau initial à N dimensions (N=4) vers un nombre inférieur de

dimensions. On constate que la première valeur propre est égale à 7,541 et représente 49,67% de la variabilité totale. Cela signifie que si nous représentons les données sur un seul axe, nous pourrons toujours voir le % de la variabilité totale des données.

Chaque valeur propre correspond à un facteur, et chaque facteur à une dimension. Un facteur est une combinaison linéaire des variables initiales, et tous les facteurs ne sont pas corrélés (r=0). Les valeurs propres et les facteurs correspondants sont triés par ordre décroissant de la part de la variabilité initiale qu'ils représentent (convertie en %). D'une manière générale, un facteur représente ma dimension de l'ACP.

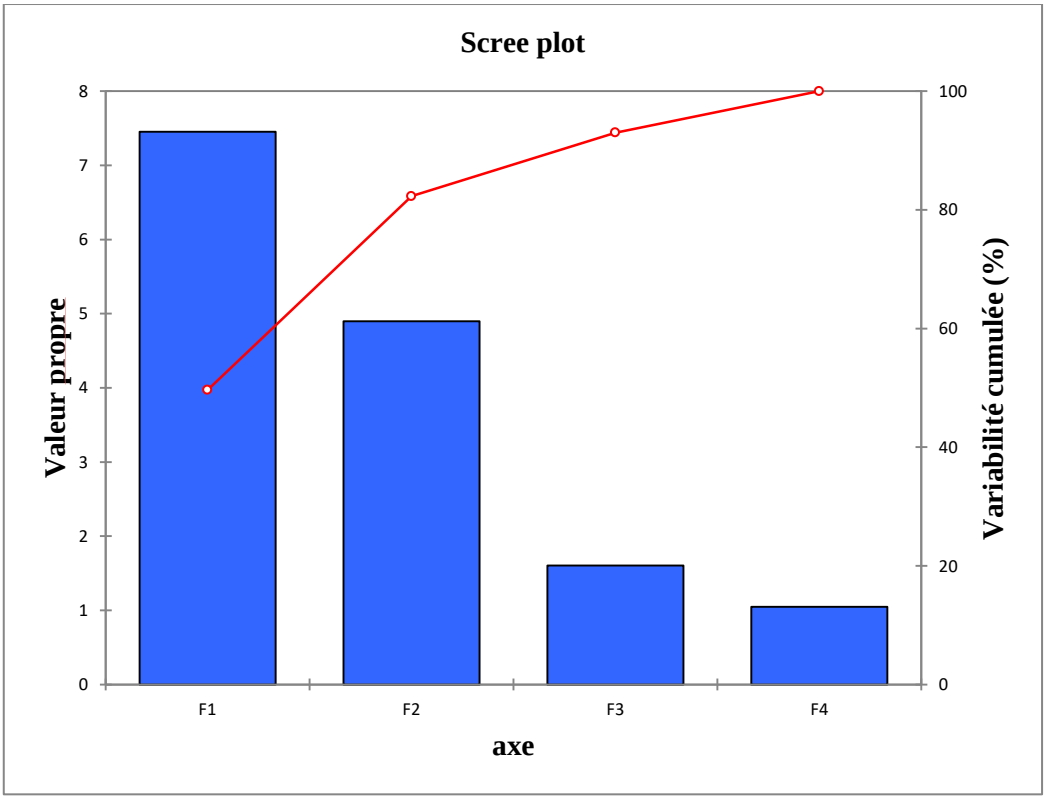


Figure 74: Valeurs propres

Idéalement, les deux ou trois premières valeurs propres correspondront à un pourcentage élevé de variance, garantissant que les cartes réalisée des états érosifs basées sur les deux ou trois premiers facteurs sont une projection de bonne qualité du tableau multidimensionnel initial. Les résultats montrent que les deux premiers facteurs permettent de représenter 84.89% de la variabilité initiale des données.

Le cercle de corrélation est utile pour interpréter la signification des axes de l'ACP. Dans notre étude l'axe horizontal est lié à la température de surface (LST) et l'occupation des sols, et l'axe vertical à l'exposition des versants. Ces tendances seront utiles pour interpréter la prochaine carte de l'ACP.

La figure 90 montre les résultats de l'analyse géostatistique des composantes principales (ACP), des différents facteurs de l'érosion et des états érosifs obtenue par différentes méthodes de croisement utilisée selon la méthode PAP/CAR modifiée.

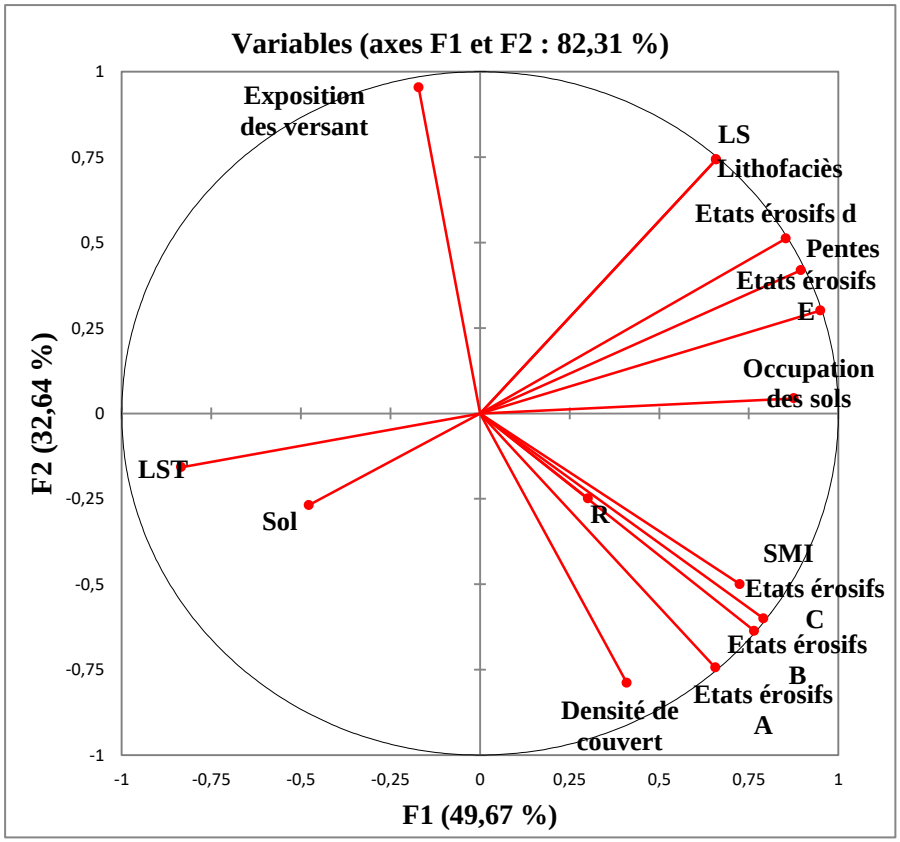


Figure 90: Graphique de regroupement des variables dans l'analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse du cercle de corrélation (Figure 90) montre que l'intensité de corrélation est importante pour les différents états érosifs et des facteurs de l'érosion, occupation des sols, pentes, Lithofaciès, LS et l'exposition des versants. La densité du couvert, l'indice d'humidité des sols (SMI) et l'érosivité des pluies (R) présentent aussi de bonne intensité de corrélation avec les états érosifs (a) et (b). La température de surface (LST) et les types de sol présentent des relations forte mais avec une corrélation négative avec les états érosif. Les sols et LS se trouve dans le même coté, confirmant leur relation forte. L'exposition est mal liée aux états érosifs (b) et (c).

Les tailles de vecteurs des différents états érosifs représentent une bonne représentation des variables étudiée sur dimension de l'ACP exploité (F1 et F2). Pour confirmer qu'une variable est bien liée à un axe, nous avons opté à l'utilisation du tableau des cosinus carrés (Tableau 21): plus le cosinus carré est grand, plus le lien avec l'axe correspondant est grand. Plus le cosinus carré d'une variable donnée est proche de zéro, plus il faut être prudent lors de l'interprétation des résultats en termes de tendances sur l'axe correspondant.

En regardant ce tableau, nous pouvons constater que les états érosifs seraient mieux visualisés sur une carte F1/F2 et que les facteurs causaux de l'érosion peuvent être représentés selon une carte F2/F3.

Tableau 64: Cosinus carrés des variables

	F1	F2	F3	F4
Etats érosifs A	0,431	**0,554**	0,013	0,002
Etats érosifs B	**0,586**	0,406	0,005	0,003
Etats érosifs C	**0,626**	0,360	0,011	0,003
Etats érosifs d	**0,729**	0,262	0,006	0,003
Etats érosifs E	**0,903**	0,090	0,000	0,006
Pentes	**0,802**	0,176	0,003	0,020
Lithofaciès	0,434	**0,552**	0,010	0,004
Occupation des sols	**0,767**	0,002	0,172	0,058
Densité de couvert	0,168	**0,622**	0,206	0,004
LS	0,434	**0,552**	0,010	0,004
Sol	0,228	0,072	0,012	**0,688**
Exposition des versants	0,029	**0,910**	0,012	0,049
R	0,091	0,062	**0,842**	0,004
SMI	**0,526**	0,250	0,181	0,043
LST	**0,696**	0,025	0,123	0,156

NB : *Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand*

5. Approche intégration et évaluation des tendances de l'érosion hydrique des sols (Susceptibilité à l'érosion)

Le produit final de l'approche d'intégration est la carte finale des tendances de l'érosion (Figure 91) qui fournit des informations probabilistes potentielles sur les différents aspects du processus d'érosion des sols par l'érosion hydrique (Susceptibilité à l'érosion). Cette carte est obtenue en consolidant toutes les données prédictives et descriptives. La carte des tendances est évaluée en superposant la carte des états érosifs et des formes d'érosion réelles selon la matrice M-VII. L'idée est de hiérarchiser la surface du bassin versant en unité en tenant compte de la résistance d'un milieu avec un état d'érosion donné à une forme d'érosion présentant une susceptible à l'érosion. Les tendances de l'érosion sont exprimées par un indice allant de 1 à 4 selon la matrice identifiable M-VI du tableau 58.

1) Tendances à la stabilisation ou la limitation de l'expansion spatiale du processus d'érosion (Susceptibilité faible).

2) Tendances localisée à l'expansion ou à l'intensification (Susceptibilité moyenne).

3) Tendances généralisée à l'expansion ou à l'intensification (Susceptibilité forte).

4) Tendances à la dégradation généralisée vers une situation irréversible (Susceptibilité extrême).

Le traitement analytique des résultats selon l'approche PAP/CAR modifié (Figure 91) a conduit aux résultats suivants

-**Tendances a** (Figure 91-a): Prédominance de classe de susceptibilité faible avec 56.28% occupant toutes les parties du bassin versant. La susceptibilité moyenne; représente 35.37%

de la superficie des tendances de l'érosion. Les susceptibilités fortes et extrêmes ne sont pas trop présentes au niveau du bassin versant, avec 3.95% et 4.4% respectivement, ces classes occupent les zones amont du bassin versant et au niveau des zones avec des formes d'érosion plus intensives. Lorsque les états d'érosion sont prédits en fonction des facteurs étudiés en faible érosion alors que l'érosion réelle est plus importante et se manifeste sous des formes plus spectaculaires. Dans ce cas, d'autres facteurs accélèrent la dégradation des sols.

-**Tendances b** (Figure 91-b): La présente carte montre que la susceptibilité faible a augmenté de préférence au dépend de la susceptibilité avec 65.48%. On constate de même une augmentation de la susceptibilité fort (6.65%) au dépend de la susceptibilité extrême (1.68%). Cela s'explique par l'introduction du facteur topographique et des types des sols qui inversent la situation des états érosifs au niveau du bassin versant de Zenaga (Gareb-Bouareg).

-**Tendances c** (Figure 91-c): résulte du croisement cartographique des états érosifs mettant en relation l'érodibilité (Sol_LS) et la protection des sols, avec les formes d'érosion réelles. Les résultats ont montré que la susceptibilité faible est la plus représentative dans le bassin versant Zenaga avec 70.71% de la surface totale, suivies des susceptibilités moyennes qui occupent 20.98%. Ces deux classes sont éparpillées sur l'ensemble du bassin versant. Les susceptibilités forte et extrême ne présentent que 8.31%.

-**Tendances d et e** (Figure 81-d et 81-e): Ces susceptibilités d'érosion résultent du croisement cartographique des états d'érosion résultant de l'utilisation du facteur climatique (a) et (b) et des formes d'érosion. Les résultats ont montré que les susceptibilités faibles sont les plus représentatives dans le bassin versant avec 80.99% et 80.35% successivement de la surface totale. Les susceptibilités moyennes pour les deux cartes résultantes n'occupent que 10.68% et 11.32%. Les susceptibilités fortes et extrêmes montre la même configuration pour les tendances d et e, avec respectivement des pourcentages qui ne dépassent pas 8.33% pour les deux facteurs climatiques occupant les parties délimitant les zones amont du bassin versant.

L'introduction du facteur topographique (LS), des types des sols et des paramètres climatiques a (Erosivité des pluies et exposition des versants) et b (Température de surface et humidité des sols) renverse la situation des états érosifs dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Les formes d'érosion les plus spectaculaires se retrouvent dans les zones au les états érosifs les plus élevées sont importante.

La superposition des données de l'approche prédictive et descriptive a permis de montrer les tendances globales de l'évolution de la surface du sol du bassin versant. L'étude permet de mettre en évidence la coïncidence d'états très dégradés avec des formes d'érosion spectaculaires et d'autres états plus stables avec des formes d'érosion moins développées ou des zones carrément stables. Il existe donc une corrélation positive entre les états érosifs et les formes d'érosion.

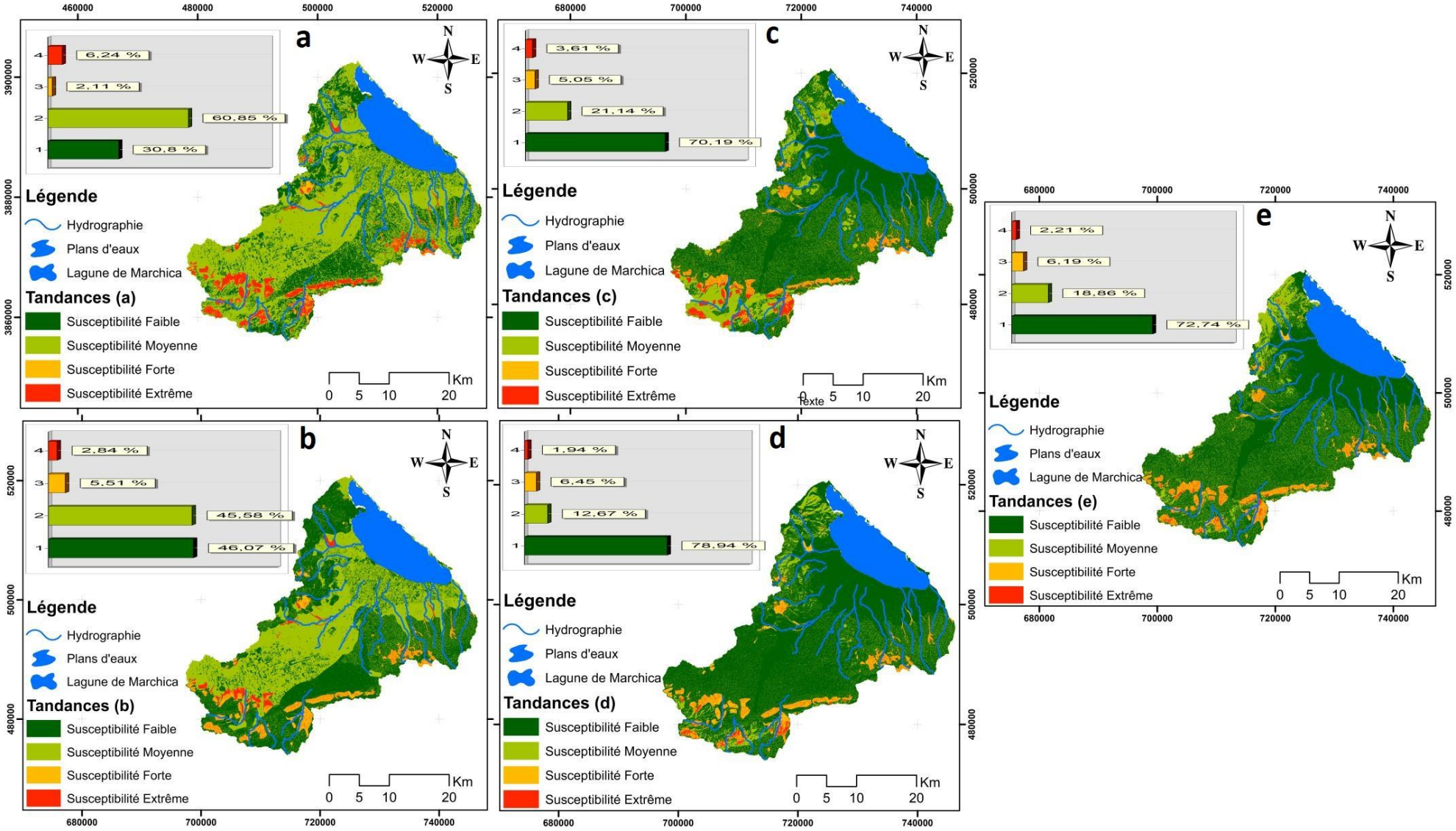


Figure 91: Cartes des tendances à l'érosion selon l'approche PAP/CAR modifiée

Conclusions et discussions

La modélisation de l'érosion des sols avec l'approche PAP/CAR modifiée a permis de hiérarchiser le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) en parcelles selon le degré de risque d'érosion hydrique, la détection des zones vulnérables et la détermination des facteurs qui contrôlent en grande partie les états érosifs. Les résultats ont identifié les facteurs et les domaines nécessitant une intervention rapide pour contrer les effets de l'érosion des sols due aux processus actifs d'érosion hydrique.

L'introduction de la longueur de la pente au lieu de la pente montre une distribution différente; les degrés d'érodibilité diminuent et suivent les longueurs de pentes faibles. Ceci est principalement dû au fait qu'une pente longue présente un risque plus élevé qu'une pente courte. Les classes d'érodibilité élevée et très élevée avec des pourcentages de 2.22% et 0.23% respectivement ont diminué alors qu'il était de 3.75% et 0.33%. On constate une augmentation de l'érodibilité faible avec 66.3% et une diminution de l'érodibilité modérée avec 24.44%. L'érodibilité moyenne à diminuée aussi avec un pourcentage du total de superficie de 6.81%, soit 9.78%. L'introduction du facteur type de sol montre que plus de 72.91% des terres ont une érodibilité faible. L'érodibilité modérée présente 25.6%. On remarque que les érodibilités moyenne, forte et extrême ont diminué avec respectivement 1.23%, 0.21% et 0.05% des superficies totales du bassin versant. L'analyse des résultats obtenus montre que le degré d'érodibilité est surestimé par la méthode classique PAP/CAR. D'autre part, l'introduction du facteur topographique (LS) à la place de la pente montre une régression paisible des classes d'érodibilité modérée, moyenne, forte et extrême, avec une augmentation de la classe faible érodibilité. L'introduction du type de sol à la place de la lithologie entraîne en revanche une augmentation de la classe faible, et modérée avec une régression des classes forte et extrême d'érodibilité dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

L'analyse de corrélation montre que suite à l'introduction des facteurs climatiques (a) et (b) expliquent respectivement 84.2% et 90.8% de la variabilité observée dans les états érosifs. Les modèles d'états érosifs résultant de l'introduction des types de sols et du facteur topographique (LS) expliquent 36.6% de la variabilité observée. Le modèle classique PAP/CAR n'explique que 25.8% de la variabilité des états érosifs. Les facteurs introduits pour calibrer la méthode, à savoir l'érosivité des précipitations, l'exposition des versants, le facteur topographique (LS), les types de sol, l'humidité et la température de surface des sols, expliquent mieux les variabilités observées dans les états érosifs et ont montré leur fiabilité sur la logique de l'érosion des sols qui prévaut dans le bassin versant. Les états les plus sévères de la modélisation PAP/CAR classique ont été convertis en états intermédiaires pour le modèle modifié. Les états érosifs forts et très forts du modèle classique sont représentés de manière exhaustive, ce qui est à l'opposé de la nouvelle méthodologie de modélisation établie.

L'étude et l'analyse des relations entre les différents facteurs de l'érosion permettent de montré les facteurs explicatifs des états érosifs, dont le contrôle peut être en faveur de la réduction de l'érosion. L'ordre d'influence des différents facteurs sur le risque d'érosion hydrique est : - Erosivité des pluies – humidité des sols (SMI) – densité de couvert végétale –

température de surface des sols (LST) suivant une relation linéaire positive. L'ordre des paramètres qui sont en relation linéaire négative est lithofaciès – exposition des versants – occupation des sols – types de sol – longueur de pentes (LS) – pentes.

Les états les plus sévères de la modélisation PAP/CAR classique ont été convertis en états intermédiaires pour le modèle PAP/CAR modifié. Les états érosifs forts et très forts du modèle classique sont représentés de manière exhaustive, ce qui est à l'opposé de la nouvelle approche proposé pour la modélisation qualitatif de l'érosion des sols.

L'approche d'intégration nous à permet d'exploiter cinq cartes de tendances à l'érosion avec différentes degrés de susceptibilité. Les tendances A résultant de suivant l'approche classique PAP/CAR (Tendances A), montre une prédominance de classe de susceptibilité faible avec 56.28%. La susceptibilité moyenne; représente 35.37% de la superficie des tendances de l'érosion. Les susceptibilités fortes et extrêmes ne sont pas trop présentes au niveau du bassin versant, avec 3.95% et 4.4% respectivement. Les tendances B montre que la susceptibilité faible a augmenté de préférence au dépend de la susceptibilité moyenne avec 65.48%. On constate de même une augmentation de la susceptibilité fort (6.65%) au dépend de la susceptibilité extrême (1.68%). Cela s'explique par l'introduction du facteur topographique et des types des sols qui inversent la situation des états érosifs au niveau du bassin versant de Zenaga (Gareb-Bouareg). Les tendances C résulte du croisement cartographique des états érosifs mettant en relation l'érodibilité (Sol_LS) et la protection des sols, avec les formes d'érosion réelles ont montré que la susceptibilité faible est la plus représentative dans le bassin versant Zenaga avec 70.71% de la surface totale, suivies de la susceptibilité moyenne qui occupe 20.98%. Ces deux classes sont éparpillées sur l'ensemble du bassin versant. Les susceptibilités forte et extrême ne présentent que 8.31%. Les tendances D et E résultantes du croisement cartographique des états d'érosion résultant de l'utilisation du facteur climatique (a) et (b) et des formes d'érosion ont montré que les susceptibilités faibles sont les plus représentatives dans le bassin versant avec 80.99% et 80.35% successivement de la surface totale. Les susceptibilités moyennes pour les deux cartes résultantes n'occupent que 10.68% et 11.32%. Les susceptibilités fortes et extrêmes montre la même configuration pour les tendances d et e, avec respectivement des pourcentages qui ne dépassent pas 8.33% pour les deux facteurs climatiques occupant les parties délimitant les zones amont du bassin versant.

L'utilisation du modèle PAP/CAR modifié peut être un outil de base pour le diagnostic de l'état des dégradations atteintes par les sols, voir aussi d'autres ressources (végétation, humidité des sols, température de surfaces des sols…), la planification de l'utilisation des terres et l'aide à la décision pour prédire, gérer et contrôler la vulnérabilité à l'érosion des sols de manière efficace et durable.

Chapitre VII : Le modèle RUSLE pour la quantification des pertes en sols

I. Équation universelle révisée de pertes en sol (RUSLE)

1. Facteur K: L'érodibilité des sols (t.h.ha.MJ^{-1}.mm^{-1})

Le facteur d'érodibilité du sol (K) est l'un des facteurs clés requis pour la prévision de l'érosion, qui influence fortement les pertes en sol (***Zhang et al.2010 ; Tejada et Gonzalez, 2006***). Représente une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. Communément, les roches consolidées (calcaire, grès, granites...) représentent un risque faible. Par contre, les roches cohésives ou friables (schistes, marnes, limons, molasses et les dépôts alluviaux ou glaciaires) à une prédisposition au risque fort (***Le Bissonais, 1998***).

La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer (Equation 43). Il s'agit de la perte de terre moyenne en tonnes par unité de superficie pour un sol particulier, dans un champ travaillé constamment laissé en jachère, qui possède une pente dont les caractéristiques ont été arbitrairement fixées à 72.6 pi (22,13m) pour la longueur et à 9 % pour l'inclinaison.

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{2.1}\boldsymbol{M}^{\mathbf{1.4}}\mathbf{.10^{-4}(12-}\boldsymbol{a}\mathbf{)+3.25(}\boldsymbol{b}\mathbf{-2)+2.5(}\boldsymbol{c}\mathbf{-3)}}{\mathbf{100}} \qquad \textit{Équation 43}$$

Avec :

K : l'érodibilité des sols
M : Le pourcentage des particules des sols, calculé par la formule M = (% sable fin +limon)*(100 – % argile),
a : est le pourcentage de matière organique, calculé par a = (% MO*1.724)
b : est le code de la structure (1 < b < 4) ;
c : est le code perméabilité (1 < c < 6).

Le facteur de d'érodibilité ajustée (K_{aj}) a été calculé pour pallier à certaines déformations liée à la réduction de l'énergie du ruissellement par les éléments grossiers (***Dumas, 1965; Sadiki, 2005***).

$$\boldsymbol{K_{aj}} = \boldsymbol{K}(\mathbf{0,983 - 0,0189}\,\boldsymbol{X} + \mathbf{0,0000973}\,\boldsymbol{X}^{\mathbf{2}}) \qquad \textit{Équation 44}$$

Avec :

X : est le pourcentage des éléments grossiers de taille > 2 mm en surface.
K : est le facteur calculé par Wischmeier et Smith 1978.

Les sites d'échantillonnage des sols ont été choisis sur la base de la carte des unités homogènes, élaborée à partir de la superposition de la carte géologique, la carte du couvert végétal et la carte hypsométrique. Pour chaque unité homogène est attribuée la valeur de K qui lui correspond.

Tableau 65 : Codes pour la structure et la perméabilité du sol (***Wischmeier et Smith, 1978***)

Code	Structure des sols
1	Très fine
2	Fine
3	Moyenne ou grossière
4	Massive

Code	Perméabilité
1	Rapide
2	Moyenne à rapide
3	Moyenne
4	Lente à moyenne
5	Lente
6	Très lente

L'évaluation du facteur K peut être établie selon le monographe de Wischmeier et al. (1971). C'est un abaque qui permet de lire la valeur du facteur K lorsqu'on dispose des éléments suivants :

- % en limon + sable fin (0.002 – 0.1mm) ;
- % en sable grossier (0.1 – 2 mm) ;
- % matière organique ;
- Codes des classes de structure et de perméabilité.

Les valeurs de K trouvé par Les américains variaient de 0.5 pour des sols instables riches en limons, à 0.1 pour des sols stables, riches en sable et en fragments grossiers.

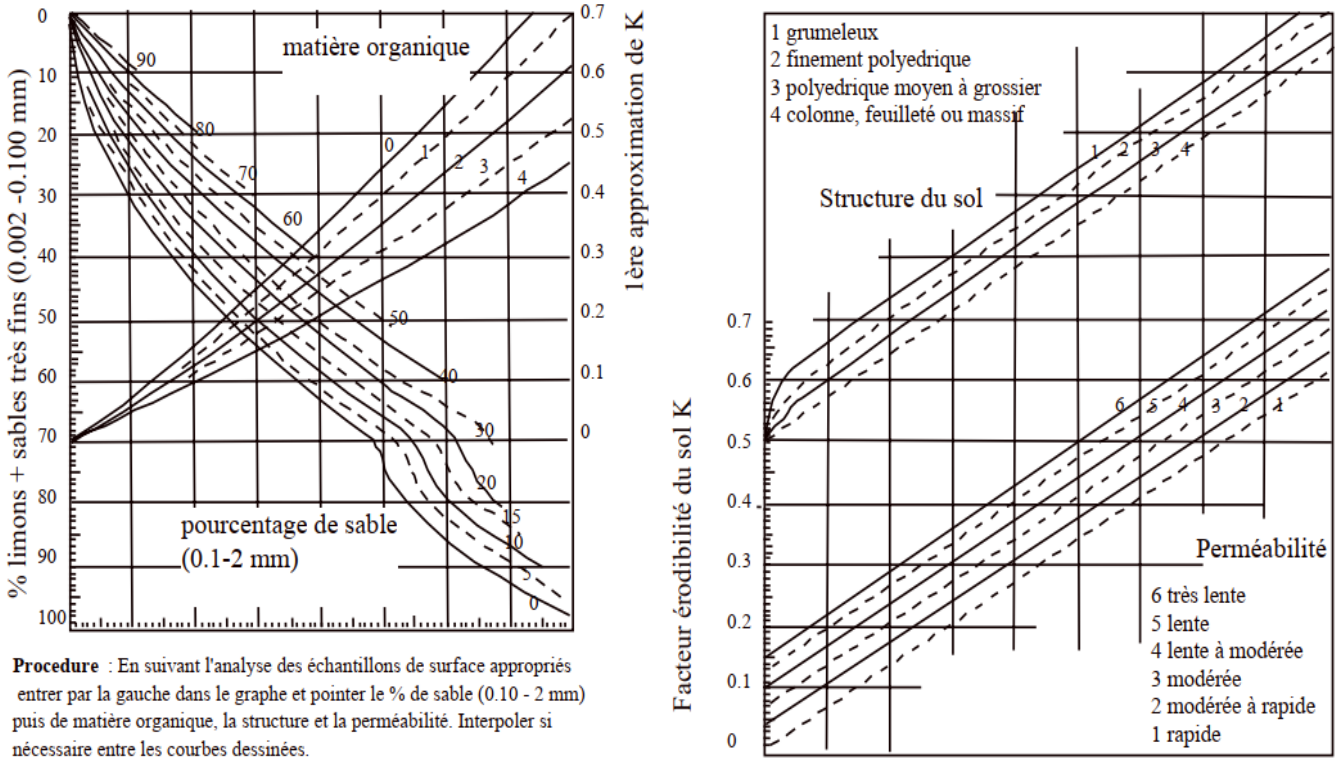


Figure 92: Nomographe permettant l'évaluation du facteur d'érodibilité du sol K (***Wischmeier et al. 1971***)

Keyrabi et Monnier (1968) ont mis en évidence l'influence de la composition granulométrique sur la stabilité structurale. Ils ont présenté les résultats sur un triangle structural où les sols limoneux sont apparus comme les plus instables au contraire des sols argileux.

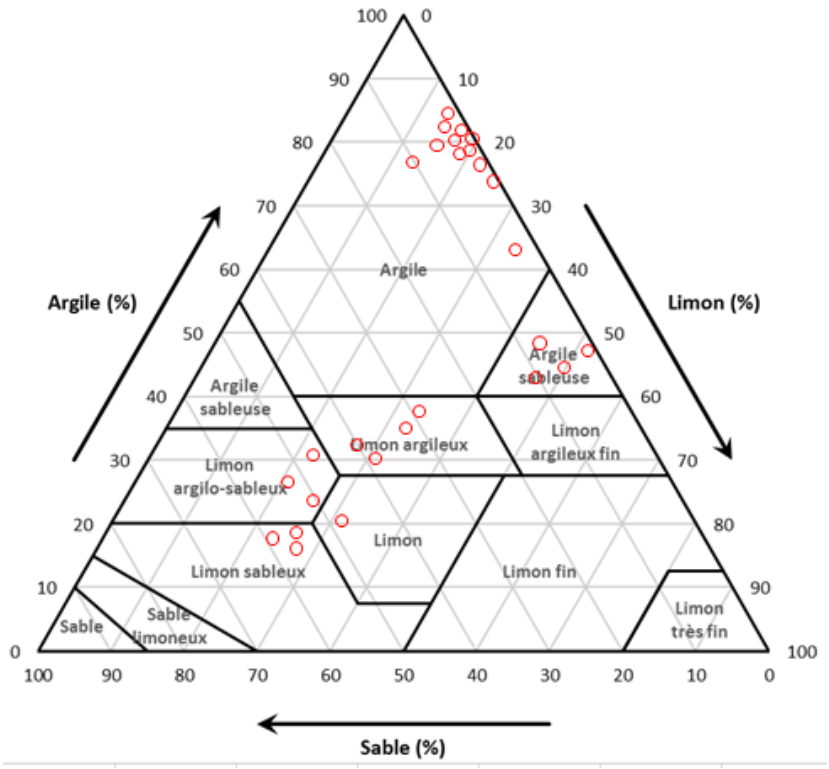


Figure 75: Diagramme ternaire de texture des sols

Pour le calcul de l'érodibilité des sols (K), des échantillons de sol ont été prélevés sur le terrain sous divers types d'occupation. La mesure de l'érodibilité a été effectuée sur 60 échantillons prélevés au niveau de 13 sites représentatifs du bassin versant Zenaga (Tableau 26 et figure 45). Les caractéristiques du sol ont été analysées au laboratoire, y compris la matière organique, la granulométrie et la sédimentométrie. On s'est référé à la méthode de ***Walkley et Black (1934)*** pour l'estimation de la texture et la structure (Figure 93). La carte de répartition et distribution spatiale d'érodibilité des sols (K) a été construite (Figure 94).

La spatialisation du facteur K nécessite une carte des sols portant les informations citées précédemment. Pour cela nous avons fait appel à la carte des sols réalisés dans le chapitre IV (Etude des sols et matériaux mobilisable par l'érosion hydrique), qui va constituer le canevas de la représentation cartographique de l'érodibilité des sols. La méthode de Krigeage a été aussi utilisée pour interpoler et estimer les valeurs du facteur K dans les différentes références d'échantillons de sol prélevés au niveau du bassin versant. Le tableau 55 montre les résultats d'analyse des paramètres mise en jeu.

Les sols riches en argile ont de faibles valeurs K, environ 0,05 à 0,15, car ils résistent au détachement. Les sols à texture grossière, comme les sols sableux, ont de faibles valeurs de K, environ 0,05 à 0,2, en raison du faible ruissellement, même si ces sols se détachent facilement. Les sols à texture moyenne, tels que les sols limoneux, ont des valeurs K modérées, environ 0,25 à 0,4, car ils sont modérément sensibles au détachement et produisent un ruissellement modéré. Les sols à forte teneur en limon sont les plus érodible de tous les sols. Ils se détachent facilement ; ont tendance à former une croûte et à produire des taux de ruissellement élevés. Les valeurs de K pour ces sols ont tendance à être supérieures à 0,4.

Les équations 43 et 44 qui ont été utilisé pour estimer le facteur d'érodibilité (K) et le facteur K ajustée. Les résultats montrent une variance de 0.08% pour la matière organique. La

fraction du sol pour les éléments grossier (>2 mm) et moins représentés par rapport à celle des éléments fins (<2 mm). La moyenne des pourcentages d'argile dépasse 50% avec 69.51%. En ce qui concerne les limons ils représentent 21.40%, les sables ne présentent que 9.39%.

Tableau 46: Résultats d'analyse et érodibilité (K ajusté (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) des sites

Réf. échantillon	X	Y	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	MO (%)	>2mm	<2mm	K	K Ajusté
OC1	714 329	506 430	7.6	17.39	79.37	1,03	36,6	63,4	0,2029	0,0855
OM3	716 919	504788	0.99	15.87	83.13	0,78	1	99	0,3350	0,3230
IC1	737 439	496751	44.4	29.55	26.35	0,87	54,5	45,5	0,2165	0,0523
IC2	706 865	489054	2.6	15.34	82.04	1,08	37	63	0,2776	0,1509
OM1	742 200	503286	2.59	32.7	64.69	0,84	5,8	94,2	0,3702	0,3245
NF1	722 590	505758	3.38	18.69	77.92	0,71	36,7	63,3	0,2794	0,1174
RA1	732 777	501277	3.62	20.2	76.17	0,68	30,7	69,3	0,2820	0,1394
DM1	726 607	494900	45.59	27.7	26.96	0,76	55,7	44,3	0,2141	0,2107
CA1	736 361	500447	3.46	20.15	76.12	0,7	48,4	51,6	0,2857	0,0846
DM2	723 478	514518	3.81	17.92	78.26	0,55	49,8	50,2	0,2658	0,0752
NF2	725 482	513887	2.02	19.42	78.54	1,61	16,1	83,9	0,3156	0,2221
RA2	704 046	485406	1.33	17.89	80.77	0,45	27	73	0,3364	0,1402
OM2	737 928	491335	0.76	25.42	73.42	0,84	2	98	0,4006	0,4388

Les valeurs de K trouvées varient entre 0.1452 et 0.4723 ($t^{-1}.ha^{-1}.an^{-1}$). Ces valeurs témoignent d'une érodibilité faible à moyenne. Il en sort en générale des valeurs de faible poids. Les sites OM et NF, situés au niveau des matorrals claire et des forêts de reboisement montre une forte érodibilité par rapport à IC, DM et CA localisés sur les cultures intensive, les matorrals dense et les cultures et arboricultures et les banquettes. L'analyse des paramètres du tableau 62 témoigne d'un sol fragile. Les caractéristiques étudiées sont importantes, les tenir en compte lors de l'étude de l'érosion hydrique des sols, va permettre de différencier entre l'influence des caractéristiques du sol et la nature géologique de la roche mère.

La carte de l'érodibilité des sols (Facteur K) montre que la partie centrale WNE et la partie NW à des valeurs de facteur d'érodibilité (K) plus faibles que les parties amont SW, SE et le porteur de la lagune Marchica (Figure 94) . Le facteur moyen d'érodibilité du sol a été estimé à 0,16 pour l'ensemble de la zone d'étude et environ 61.53% des sols (8 échantillons) ont un facteur d'érodibilité du sol allant jusqu'à 0,3. L'erreur type moyenne de la carte du facteur K interpolée était de 0,0084. L'analyse de la carte répartition des classes d'érodibilité a permet de déduire que la classe d'érodibilité (0.30-0.40) est la plus dominante au niveau du bassin versant avec 53.75%. La classe d'érodibilité (0.05-0.20) occupe 24.03%. L'érodibilité supérieur à 0.4 occupe 15.16% des terrains localisé au niveau des parties amont et aval. La classe d'érodibilité (0.20-0.25) ne présente que 6.51%, localisée au niveau des massifs de Kebdana et au niveau du cordon dunaire de Bokana. La classe d'érodibilité moyenne (0.25-0.30) ne présente que 0.55%. Selon l'importance du facteur K dans RUSLE et d'autres modèles d'érosion des sols connexes, cette carte a une implication significative dans la modélisation et la prévision de l'érosion et aide à déterminer l'emplacement et le type de pratiques de conservation des sols.

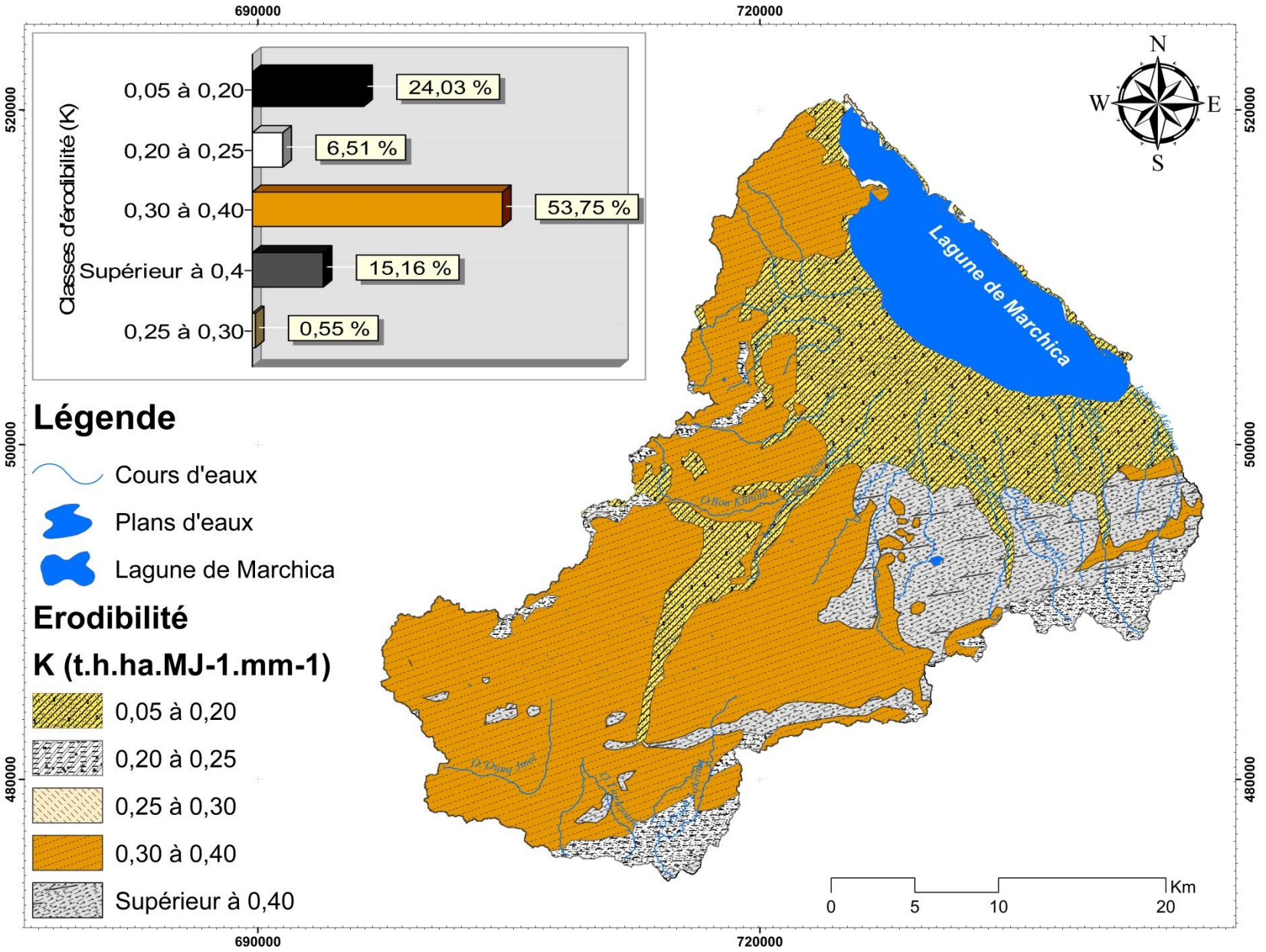


Figure 76: Carte d'érodibilité des sols : Facteur K (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1)

2. Facteur R: Érosivité des pluies (MJ.mm.ha-1.h-1.an-1)

La reconnaissance du facteur climatique nécessite l'illustration de la variation géographique des phénomènes sur lesquels il est influencé (***Tahouri et al.2022***). Les terrains sous climat méditerranéen sont souvent soumis à des précipitations sous formes orageuses, reconnus autant que milieux propices aux phénomènes de ruissellement des eaux, à l'érosion hydrique en favorisant le départ de particules de sol (***Sadiki, 2005***).

En premier lieu le modèle RUSLE s'appuie sur les conditions climatiques responsables de l'érosion. Le facteur d'érosivité des précipitations (R) reflète l'effet de l'intensité des précipitations se produit à travers différentes conditions sur l'érosion du sol et nécessite des données détaillées et continues sur les précipitations pour son calcul (***Wischmeier et Smith, 1978***). R est une indication des deux caractéristiques les plus importantes d'une tempête déterminant son érosivité, à savoir la quantité de précipitations et l'intensité maximale soutenue sur une période prolongée (***Ganasri & Ramesh, 2016***). Des études antérieures indiquent que l'intensité des précipitations a une influence directe sur les quantités d'eau qui s'écoulent sur le sol, elle même responsable de l'érosion hydrique et la perte des sols des champs cultivés (***Duffa et Danic, 2006***). La valeur du facteur d'érosivité des précipitations utilisée dans RUSLE doit quantifier l'effet de l'impact des gouttes de pluie et doit également refléter la quantité et le taux de ruissellement susceptibles d'être associés aux précipitations (***Ganasri & Ramesh, 2016***). Pour cela, le facteur R annuel est une fonction de l'EI30 annuelle moyenne qui est calculée à partir d'enregistrements détaillés et à long terme de l'énergie cinétique des tempêtes (E) et de l'intensité maximale sur trente minutes (I30) (***Morgan, 2005; Renard et al.1997***). Pour tenir compte de ces éléments, il est nécessaire de connaître la pluie totale de l'averse ainsi que les intensités maximales sur des intervalles de 30 minutes et le répéter pour chaque averse sur une longue période (21 ans pour ***Wischmeier et Smith 1978***).

En raison des exigences de données détaillées pour le calcul standard RUSLE de l'érosivité des précipitations, les études dans les zones avec des données moins détaillées ont utilisé des équations alternatives en fonction de la résolution temporelle et de la disponibilité des données de précipitations. Ces études compilées ont utilisé des ensembles de données à long terme avec une résolution temporelle au moins quotidienne pour construire leur équation du facteur R (***Renard et al.1997 ; Merritt et al.2004 ; Kim et al.2005*** ; ***Shamshad et al.2008 ; Bonilla & Vidal ; 2011; Naipal et al.2015 ; Panagos et al.2015d ; Sholagberu et al.2016 ; Panagos et al.2017)***

Les travaux d'***Arnoldus (1980)*** ont développé des équations du facteur R en Afrique de l'Ouest (Maroc) qui utilisent les précipitations mensuelles et annuelles. Cependant, ces équations présentent un problème en termes d'unités cohérentes, comme l'ont rapporté ***Renard et Freimund (1994)*** dans leur examen des travaux antérieurs sur le facteur R. Rango et Arnoldus, en 1987 ont modifié la formule établie par Arnoldus en 1980 qui est devenu plus crédible. Selon ***Klick et al. (2015)***, les précipitations mensuelles peuvent être agrégées aux précipitations saisonnières et utilisées dans l'équation du facteur R du modèle RUSLE, ce qui permet d'estimer la perte de sol à une échelle mensuelle ou saisonnière. Ce peut être utile dans les pays où la variation temporelle des précipitations est élevée tout au long de l'année. Des travaux similaires de ***Diodato (2004)*** ont indiqué que l'utilisation de données mensuelles sur l'érosivité était plus utile en ce qui concerne la gestion des cycles de croissance des cultures et

des pratiques de travail du sol, en particulier pendant les saisons où une forte érosivité des précipitations est attendue. Dans les endroits où il y a une grande variation temporelle des précipitations tout au long de l'année, l'approche saisonnière d'estimation de l'érosion des sols est plus importante pour la gestion durable des terres (***Ferreira & Panagopoulos, 2014***).

Les équations du facteur R les plus utilisées en milieux méditerranéens qui peuvent donner des estimations annuelles de l'érosivité des précipitations sont les équations d'***Arnoldus*** (1980) et d'Arnoldus modifiée (***Rango et Arnoldus, 1987***) développée au Maroc, de ***Klik et al. (2015)*** développés en Nouvelle-Zélande, de ***De Santos Loureiro et Coutinho (2001)*** et ***Ferreira et Panagopolous (2014)*** également développés au Portugal et au niveau de l'Équateur (***Ochoa-Cueva et al.2015***). En ce qui concerne les schémas saisonniers d'érosivité, ***Klik et al (2015)*** ont prédit que l'érosivité la plus élevée se produirait en été, mais la plus faible en hiver et au printemps. En revanche, ***De Santos Loureiro & Coutinho (2001)*** et ***Ferreira & Panagopolous (2014)*** ont prédit la plus forte érosivité au printemps et la plus faible en été. Ces différences soulignent l'importance de comprendre l'applicabilité régionale des équations d'érosivité des précipitations.

Tableau 47: Equations d'érosivité des précipitations (R) selon ***Arnoldus (1980)*** et ***Rango et Arnoldus (1987)*** développée au Maroc ; ***Klik et al. (2015)*** développés en Nouvelle-Zélande, ***Loureiro et Coutinho (2001)*** et ***Ferreira et Panagopolous (2014)*** développée au Portugal

Auteur	Emplacement d'origine	Résolution	Équation et exigences	Autres études
Wischmeier and Smith (1978) and Renard et al. (1996)	Etats-Unis d'Amérique	Sous-quotidien	$R = \frac{\sum_{i=1}^{j}(EI_{30})i}{N}$ $EI30 = E \times I_{30}$ $E = 916 + 331 \times \log_{10} I$ I= intensité (in/hr) $EI_{30i} = EI_{30}$ pour la tempête i J = nombre de tempêtes dans l'année N-année période <u>Unités</u> Impérial : Centaines de pieds à pouces acre-1 heure-1 année-1 Pour l'équivalence métrique (multiplier par 17,02) : Mégajoule millimètre hectare-1heure-1 année-1	Appliqué aux États-Unis
Arnoldus (1980) tel que cité dans Renard et Freimund (1994) **Rango et Arnoldus (1987)**	Maroc et autres localités d'Afrique de l'Ouest	Mensuel et annuel	Afrique de l'Ouest $R = 4.79MFI - 142$ $R = 5.44MFI - 416$ $MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{Pi^2}{P}$ MFI = Indice de Fournier modifié Pi = précipitations mensuelles P = précipitations annuelles	**Maroc** Turquie (Demirci & Karaburun, 2012) ; Maroc (Sadiki et al.2004) (Raissouni et al.2016)

			Utilisation de l'équation d'Arnoldus modifiée (1987) : $\mathrm{LogR} = 1.74 * \log \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i^2}{P}\right) + 1.29$ Pi= précipitations mensuelles P= précipitations annuelles Unités : R = Agressivité climatique en Megajoules.mm.hectares^{-1}.heure^{-1} an^{-1}	
De Santos Loureiro et Coutinho (2001) Portugal	Portugal	Quotidien	$R = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{m=1}^{12} EI_{30(mensuel)}$ $EI_{30(mensuel)} = 7.05 pluie_{10} - 88.92 jours_{10}$ Rain10 = précipitations mensuelles pour les jours ≥10,0 mm de pluie Days10 = nombre mensuel de jours avec précipitations ≥ 10,0 mm de pluie N = nombre d'années Unités : Mégajoule*millimètre*hectare^{-1}*heure-1*année	Espagne (López-Vicente, Navas et Machín, 2008)
Ferreira et Panagopoulous (2014), similaires à Loureiro et Coutinho (2001)	Portugal	Quotidien	$R = \sum_{i=1}^{12} 6.56 rain_{10} - 75.09 days_{10}$ Rain10 = précipitations mensuelles pour les jours ≥10,0 mm de pluie Days10 = nombre mensuel de jours avec précipitations ≥ 10,0 mm de pluie Unités : Mégajoule*millimètre*hectare-1*heure-1*année-1	Portugal (Ferreira & Panagopoulos, 2014)
Klik et al. (2015)	Nouvelle-Zélande	Annuel ou saisonnier	Annuel ou saisonnier : $R = aP^b$ $R = aP + b$ P = précipitations annuelles (mm) ou précipitations saisonnières (mm) a & b = constantes selon la région de la Nouvelle-Zélande L'équation utilisée dépendra de la région de la Nouvelle-Zélande et de la saison. Unités : Mégajoule • millimètre • hectare-1 • heure-1	

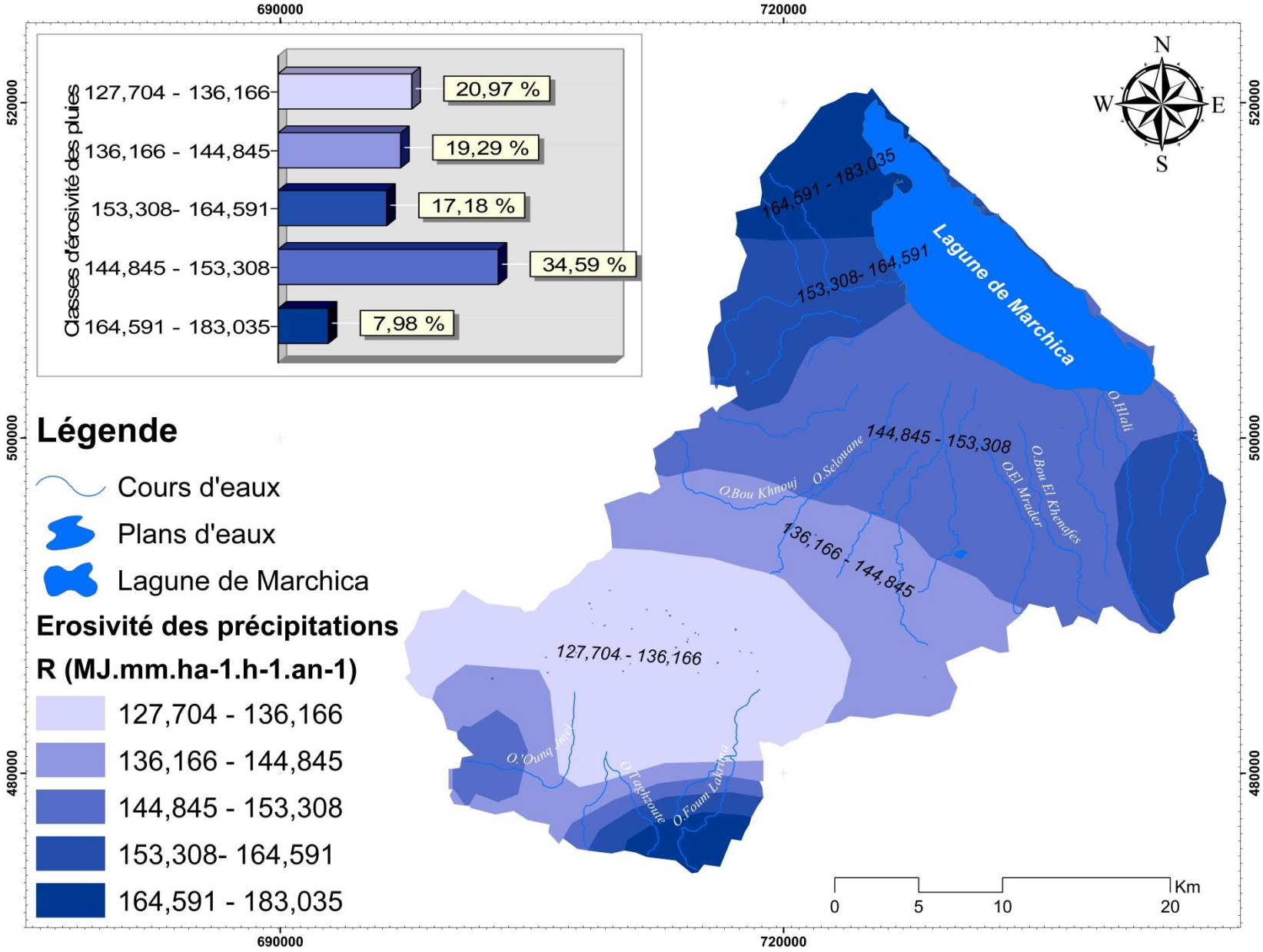


Figure 77: Carte d'érosivité des précipitations : Facteur R (MJ.mm.ha-1.h-1.an-1)

Les données de précipitations mensuelles issues des calculs faits à partir des données issues de la base de données TerraClimate (***Abatzoglou et al.2018***) pour une période de 32 ans (1985–2015) ont été utilisées pour calculer et estimer le facteur d'érosivité R dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

Selon ***Sadiki (2005),*** les recherches qui ont utilisé le module de Wischmeier et Smith pour la quantification de l'érosion hydrique au Maroc ont adopté, pour le calcul du facteur de l'agressivité climatique (R), l'équation d'Arnoldus sous ces deux formes (Tableau 63). Spatialiser le facteur R nécessite de connaître la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles (***Morschel et al.2004***). Sa réalisation implique l'utilisation des données pluviométriques des stations et leur interpolation au moyen de la méthode Krigeage (***Matheron, 1989***).

L'analyse de la carte du facteur d'érosivité des pluies (Figure 95) montre que l'érosivité au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) a tendance à augmenter en passant des zones de basses altitudes vers celles des hautes altitudes, des parties en aval vers les parties en amont du bassin. La moyenne enregistrée pour le facteur d'érosivité au niveau du bassin versant est 151.60 MJ.mm.ha-1.h-1.an-1, cette valeur est située dans l'intervalle de la classe d'érosivité moyenne (144,845 - 153,308) qui est la plus représentative avec 32.85% des terrains du bassin versant, suivie des classes très faible (127,704 - 136,166) et faible érosivité (136,166 - 144,845), avec des pourcentages respectifs de 23.43% et 21.53%. Les classes d'érosivité forte (153,308- 164,591) et extrême (164,591 - 183,035), occupent respectivement 14.94% et 7.25%, localisé au niveau des parties amont du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) au niveau du mont de Gourougou, les massifs de Kebdana et les Beni Oukil.

3. Facteur LS: Longueur (L) et d'inclinaison (S) de pente

Ce facteur de l'érosion affecte l'érosion en nappe, en rigole et aussi entre les rigoles sous l'effet combiné de la longueur (L) et d'inclinaison (S) de la pente par l'action érosive de l'eau. Selon ***Wischmeier & Smith (1978)***, ce facteur a été appliqué à l'origine à l'échelle de la parcelle unitaire et du champ, qui représente le rapport de la perte de sol attendue d'une pente de champ par rapport à la parcelle unitaire USLE d'origine. ***Wischmeier et Smith, (1978)*** proposent l'équation 45 pour le calcul du facteur topographique LS, qui sollicite en matière de données, la longueur et le degré d'inclinaison de la pente :

$$LS = \left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^{m} \times [(65.41 \times \sin^2\theta) + (4.56 \times \sin\theta) + 0.065] \quad \textit{Equation 45}$$

Avec :

λ : Longueur de la pente en m ;

θ : Angle de pente;

l : Longueur de la pente (m)

- 0,5 si pente > 5% ;
- 0,4 si la pente est comprise entre 3,5 % et 4,5 % ;
- 0,3 si la pente est comprise entre 1 % et 3 % ;
- 0,2 si la pente est inférieure à 1 %.

Le modèle révisée de l'équation universelle de perte en sol (*RUSLE*), l'a étendu à l'échelle de pente unidimensionnelle, avec des équations différentes selon que la pente soit supérieure à

9 % (***Wischmeier & Smith, 1978 ; Williams, 1983 ; Hession et Shanholts, 1988 ; Renard et al.1996 ; Auerswald et al.2014***).

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{m} \quad \textit{Equation 46}$$

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} \quad \textit{Equation 47}$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)}{[3.0\times(\sin\theta)^{0.8}+0.56]} \quad \textit{Equation 48}$$

- Si la pente est inférieure à 9 % : S = 10,8 × sin θ + 0,03 ;
- Si la pente est supérieure ou égale à 9 % : S = 16,8 × sin θ − 0,50 ;
- Mais si la pente est inférieure à 15 pieds : S = 3,0 × (sin θ)^{0,8} + 0,56 ;

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{m} \times S \quad \textit{Equation 49}$$

λ : Longueur de la pente en pieds

θ : Angle de pente

m : Dépend de la pente

- 0,5 si pente > 5% ;
- 0,4 si la pente est comprise entre 3,5 % et 4,5 % ;
- 0,3 si la pente est comprise entre 1 % et 3 % ;
- 0,2 si la pente est inférieure à 1 %.

Une étude antérieure étend le facteur LS en utilisant une méthode qui intègre la zone contributive et l'accumulation de flux à des unités topographiquement complexes (***Desmet & Govers, 1996 ; Sadiki et al.2004 ; Morgan, 2005***), proposent l'équation 50 qui nécessite comme donnée la longueur de pente et la pente en pourcent :

$$LS = \left(\frac{l}{22.13}^{m}\right) \times (0.065 + 0.045s + 0.0065s^{2}) \quad \textit{Equation 50}$$

Avec : s : inclinaison de la pente (%) ; m : Dépend de la pente.

Les méthodes USLE et RUSLE pratiquement, utilise la longueur de la pente, l'angle et un paramètre qui dépend de la pente en pourcentage pour le calcul du facteur LS (***Wischmeier & Smith, 1978***). Cependant, l'une des critiques de la méthode USLE classique de calcul du facteur LS est son applicabilité à une topographie plus complexe. Avec les nouvelles technologies de la géomatiques, la méthode de calcul du facteur LS en fonction de la zone de contribution à la pente ascendante ou de l'accumulation de débit et de la pente a gagné en popularité (***Moore & Bruch, 1986 ; Moore et Wilson, 1992 ; Mitasova et al.1996 ; Renard et al.1996 ; Desmet & Govers, 1996 ; Mitasova et al.2013***). Les données utilisée pour le calcul du facteur LS selon ces auteurs (Equation 51), nécessite l'utilisation de la surface contribuant à la pente ascendante par unité de largeur, qui peut être approximée par l'accumulation de débit, la taille des cellules et la pente.

$$LS = (m+1)\left(\frac{U}{L_0}\right)^{m}\left(\frac{\sin\beta}{S_0}\right)^{n} \quad \textit{Equation 51}$$

Avec :

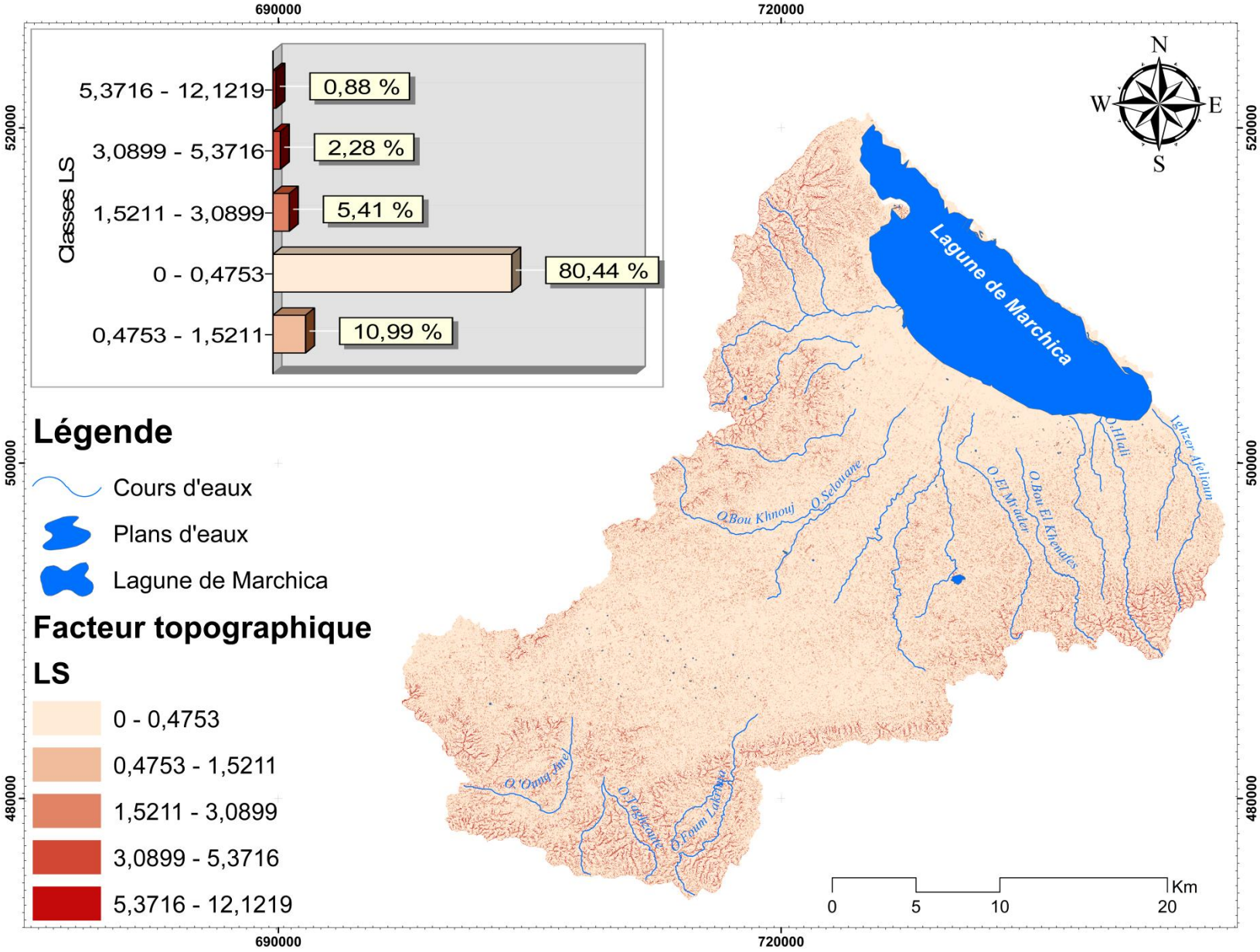


Figure 96: Carte du facteur topographique LS

- U (m^2m^{-1}) = surface contributive de la pente ascendante par unité de largeur comme approximation du débit ;
- $U=Flow\ Accumulation \times Cell\ Size$;
- L_0 : longueur de la parcelle unitaire (22.1) ;
- S_0 : pente de la parcelle unitaire (0,09) ;
- B : pente ;
- m (nappe) et n (rigole) dépendent du type d'érosion dominant (m= 0,4 à 0,6) et n (1,0 à 1,3).

Le facteur LS a été calculé en utilisant la calculatrice raster, liée à la boîte à outils algèbre spatial de l'outil "Spatial Analyst" du SIG en se basant sur les équations mentionnées ci-dessus (Equations 50 et 51). L'analyse de la carte réalisée du facteur topographique (Figure 51) montre des valeurs allant de 0 à 12.12 (Figure 96).

Le facteur LS selon la figure 96 présente des valeurs allant de 0 à 12.12. Selon cette classification, la grande partie du bassin versant (80.44 %) a des valeurs très faibles du facteur LS (0.001-0.4753). La classe faible (0.4753-1.5211) occupe 10.99%. La classe moyenne (1.5211-3.0899) avec 5.51%. Alors que les classes fort (3.0899-5.3716) et extrême (5.3716-12.1219) ne sont pas assez apparente au niveau du bassin versant Zenaga avec respectivement 2.28% et 0.88%.

Pour les résultats du facteur LS, 91.43% des terres du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) appartiennent à la classe de risque faible, 5.15 % des terres présentent un risque moyen et 3.16 % des terres présentent un risque élevé à très élevé. Les valeurs les plus élevées de LS se situent au niveau des parties les plus élevée du bassin versant Zenaga (Figure 96).

4. Facteur C : Conservation des sols

Le facteur de couvert végétal et de gestion (C) est défini comme le rapport de la perte de sol d'un champ avec une couverture et une gestion particulières par rapport à un champ travaillé constamment laissé en jachère avec labour propre (***Wischmeier & Smith, 1978***).

Le modèle RUSLE utilise une combinaison de sous-facteurs tels que les impacts de la gestion de culture, le type de couverture, la rugosité de surface et l'humidité du sol sur l'érosion potentielle pour produire une valeur pour le taux de perte des sols utilisé avec le facteur R pour produire une valeur pour le facteur C (***Renard, 1997***). Cette méthode nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques de la couverture de la zone d'étude, cependant, la surveillance de toutes ces caractéristiques à l'échelle du bassin versant peut ne pas être réalisable.

La méthode la plus simple pour la création d'une couche de facteur C consiste à référencer des études qui ont rapporté des valeurs pour une couverture terrestre similaire, ou à partir d'études réalisées dans la même zone ou région. ***Wischmeier & Smith (1987)*** incluent également l'effet du pourcentage de couverture du sol, rapportant les valeurs du facteur C pour le même type de couverture sur une plage de pourcentage de couverture et de condition. ***Morgan (2005)*** a rapporté des valeurs pour les différents stades de croissance des mêmes types d'arbres.

Il est important de prendre en considération la définition du type de couverture terrestre entre deux pays peut varier, ce qui implique l'utilisation des facteurs C de la littérature de

même pays ou même zone d'étude. Par exemple, les terres classées comme forêts dans un pays peuvent être variés en termes de couverture ou de type de végétation par rapport à la forêt dans un autre pays. Comprendre les différences entre les classifications de la couverture terrestre est crucial avant d'appliquer les valeurs du facteur C de la littérature.

Selon ***Van der Knijff et al. (2000)*** les grandes variations spatiales et temporelles de la couverture et des cultures sur une grande région est une autre raison pour ne pas adopter l'approche basée sur la table de recherche du facteur C.

Pour résoudre ce problème, une autre méthode de détermination du facteur C consiste à utiliser l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) qui permet de générer une image de biomasse relative estimé à partir d'images satellites Bien qu'il existe des couches MODIS NDVI réalisé par à 250 m disponibles, celles-ci sont limitées par : la couverture géographique, la date d'acquisition et la résolution (***Caroll et al.2004***). La NASA a produit un ensemble de données mondial de valeurs NDVI à une résolution de 1 degré pour la période de juillet 1983 à juin 1984, ce qui le rend approprié pour étudier l'érosion historique des sols mais pas nécessairement pour l'état actuel de la couverture terrestre (https://data.giss.nasa.gov/landuse/ndvi.html).

La réflexion différentielle due à l'absorption du pigment de chlorophylle dans la bande rouge et la réflectivité élevée du matériel végétal dans la bande du proche infrarouge (NIR) permet de surveiller la densité du couvert végétal et aussi l'intensité de la croissance de la végétation en utilisant la réflectivité spectrale du rayonnement solaire.

Les valeurs NDVI extrêmement faibles ou négatives représentent des zones sans aucune végétation, telles que des nuages, de l'eau ou de la neige. Les valeurs de NDVI très faibles représentent des zones avec peu ou pas de végétation, telles que des roches ou le sol nu. Les valeurs modérées de NDVI représentent les zones d'arbustes et de prairies. Les valeurs NDVI élevées représentent les zones forestières et la végétation feuillez. Les feuilles vertes montrent généralement une meilleure réflexion dans le proche infrarouge de longueur d'onde que dans des gammes de longueurs d'onde visibles.

Lorsque les feuilles sont en stress hydrique, malade, ou mort, elles deviennent plus jaunes et sensiblement moins dans le proche infrarouge. Les équations 52 et 53 montrent le calcule documenté de l'NDVI :

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad \textit{Equation 52}$$

$$NDVI = \left(\frac{NIR-RED}{NIR+RED}\right) \times 100 + 100 \quad \textit{Equation 53}$$

Dans les zones où les produits NDVI prêts à l'emploi ne sont pas disponibles, les auteurs ont utilisé des images satellites pour obtenir des NDVI tels que AVHRR ou Landsat ETM (***Van der Knijff et al.2000 ; De Asis & Omosa, 2007***). Ces chercheurs ont lié le facteur C et le NDVI par le travail de terrain et la classification des images ; déterminer le facteur C en plusieurs points de la zone d'étude à l'aide de l'approche RUSLE et le relier au NDVI par une analyse de corrélation de régression. Pour les zones d'étude plus vastes, cela peut ne pas être faisable. ***Van der Knijff et al. (2000)*** ont déterminé le NDVI à partir d'images satellitaires et ont créé une équation basée sur sa corrélation positive avec la végétation verte (tableau 6).

$$C = exp\left[-\alpha\left(\frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right)\right] \quad Equation\ 54$$

Avec : α & β sont les variables sans unité contrôlant la courbe NDVI–C, avec α = 2 et β =1

L'utilisation du NDVI permet de déterminer des facteurs C sous-annuels en se basant sur les images satellite, ce qui permet de comprendre la contribution de la couverture à l'érosion saisonnière du sol et d'identifier les périodes critiques de l'année où l'érosion du sol est un risque (***Ferreira et Panagopoulos, 2014 ; Durigon et al.2014; Kulikov et al.2016***).

Selon ***Jobin et al. (2018),*** le facteur C détermine l'influence des pratiques de gestion et de culture sur les taux de perte de sol et analyse les effets des potentiels de gestion et des plans de conservation. Cela identifie la quantité de perte de sol liée aux terres cultivées selon des paramètres typiques à la perte relative d'une jachère continue, labourée proprement (***Wischmeier et Smith, 1978***).

La détermination du facteur C repose sur la densité de la couverture de la surface du sol par la végétation et sur la hauteur des strates végétales (***Sadiki, 2005***). Ce travail a également utilisé des images de télédétection pour calculer le facteur C basé sur l'indice de végétation (NDVI) (***Van Der Knijff, 2000 ; Kulikov et al.2016***) et aussi par l'utilisation de la carte d'occupation des sols réalisées du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) qui a permis d'identifier les classes cité dans le tableau 68:

Tableau 48: Facteur C en fonction du type d'occupation du sol dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

Occupation des sols	Classes du facteur C	Conservation des sols
Culture sèche, terrain nu et zone bâtis	0,6524 – 1	Très Faible
Cultures en lignes	0,4962 - 0,6524	Faible
Cultures, arboricultures en périmètre irrigués	0,3947 - 0,4962	Moyen
Matorral à couvert claire	0,3283 - 0,3947	Forte
Matorral à couvert dense	0,21506 - 0,32831	Très forte
Forêts	0,0041 - 0,2150	Extrême

En comparaison avec les valeurs d'étude dans des environnements tels que le nôtre, notamment l'Oued Sahla (***Mesrar, 2016***) qui révèle des valeurs allant de 0.001 à 0.413 pour les forêts et de 0.894 à 1 pour les cultures sèches. Au niveau de l'Oued Tleta (***El Garouani et al. 2007***), des valeurs de 0.08 pour les forêts claire et de 0.75 pour les terrains incultes. ***Raissouni (2012***), évoque des valeurs allant de 0.001 pour les forêts claires et 1 pour les sols nus pour le bassin versant de l'Oued Khmiss. Les matorrals claire et dense, enregistrent des valeurs de 0.01 et 0.05 respectivement. Dans le bassin versant de l'oued Boussouab (***Sadiki, 2005***), le type de couvert le plus protecteur est celui des reboisements dense, suivi des forêts et matorrals. Les céréalicultures sont les plus dangereux avec une valeur de 0.70.

La carte du facteur C de conservation et de gestion (Figure 97) a été réalisée en se basant sur l'occupation des sols, les visites de terrain et l'indice NDVI. Les résultats montre la répartition géographique du facteur C au niveau de bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) que la classes facteur C très faible (0,0041 - 0,2150) et faible (0,21506 - 0,32831) se situent

dans les zones de forêts et des arbustes et matorral à couvert dense avec respectivement 9.1% et 9.51% du bassin versant.

Les Matorral à couvert claire (0,3283 - 0,3947) de la classe moyen du facteur C présente un pourcentage de 19.15%. Alors, que la classe forte du facteur C (0,3947 - 0,4962) présentée par des cultures, arboricultures en périmètre irrigués ne présente qu'un faible pourcentage (4.97%). La classe très forte (0,4962 - 0,6524) et extrême (0,6524 - 1) du facteur C pour le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) est associée à des cultures en lignes et des culture sèche, terrain nu et zone bâtis, avec respectivement des pourcentages de 30.85% et 26.42%.

Tableau 49: Facteurs C pour les types généraux de couverture terrestre compilés à partir de diverses sources

Occupation des sols	*Mesrar (2016)*	*El Garouani et al. (2007)*	*Raissouni, (2012)*	*Sadiki (2005)*
Sol nu			**1**	
Culture sèche	**0.894 - 1**			
Céréaliculture		**0.26**		
Badlands/ Terrains incultes		**0.75**		
Steppes à alfa				**0.32**
Culture en ligne et irrigation	**0.725 - 0.894**			
Zone agricole			**0.1**	
Matorrals claires	**0.566 - 0.725**		**0.01**	
Matorral dégradé, parcours dense				**0,17**
Matorrals denses	**0.413 - 0.566**			
Matorral clair, parcours dense				**0,20**
Matorral très dégradé				**0,22**
Oliviers		**0.28**		
Forêts	**0.001 - 0.413**			
Forêts				**0,13**
Forêt claire		**0.08**		
Reboisement		**0.15**		
Reboisement dense				**0,058**
Reboisement clair				**0,18**
Céréaliculture				**0,70**
Céréaliculture / Arboriculture		**0.25**		
Eaux			**0**	

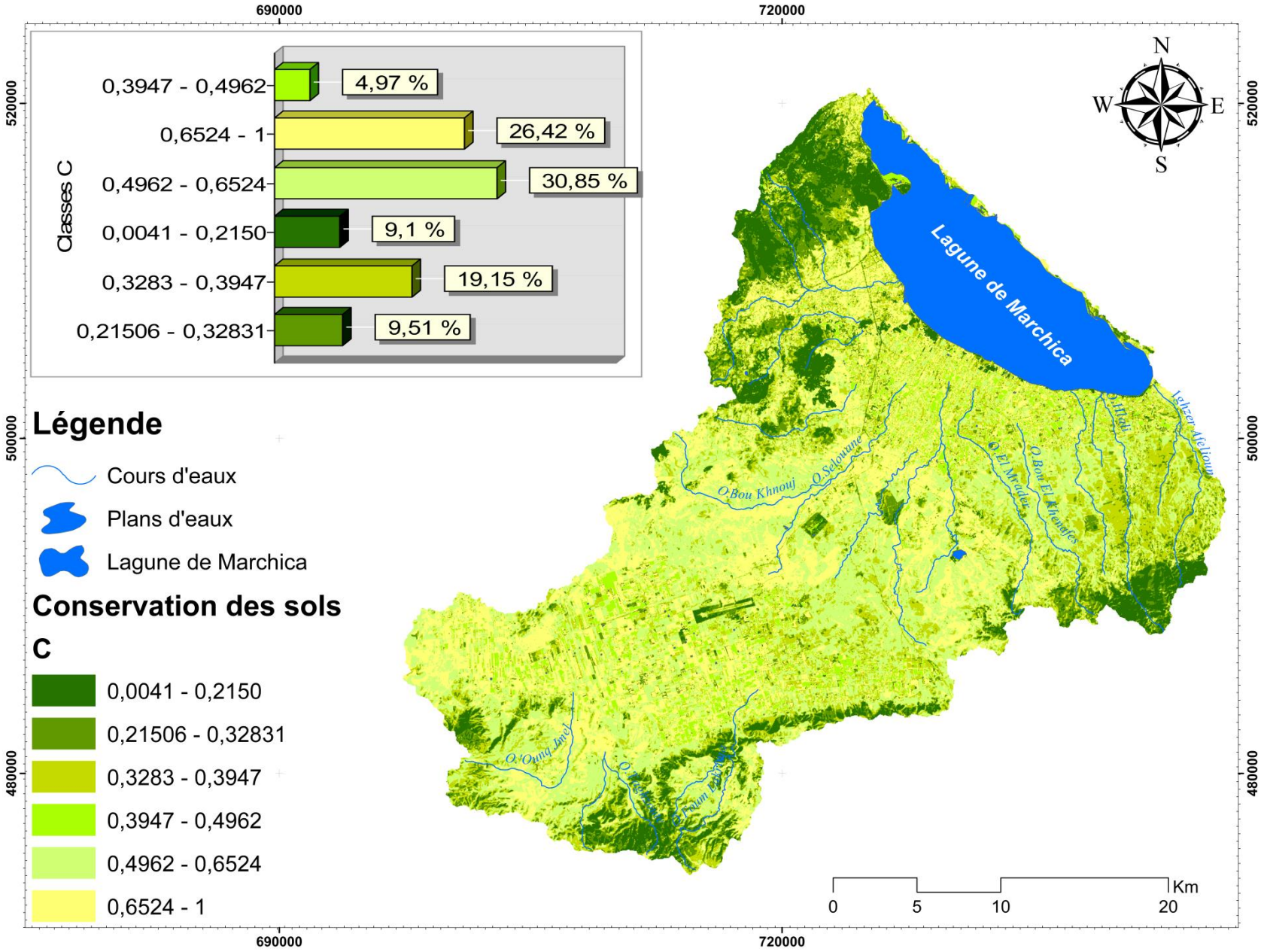


Figure 78: Carte de conservation des sols

La conservation faible et très faible est la plus apparente. Il s'agit des classes (0,4962 - 0,6524) et (0,6524 - 1) qui présentent les cultures en lignes et cultures sèches, terrain nu et zone bâties avec 57.27% du bassin versant. Les zones présentant un état de conservation moyen sont limités et ne présentent que 4.97% (Figure 97). Les zones à forte, très forte et extrême conservation sont située aux alentours des massifs forestiers, des plans d'eaux et des oueds, concentrées au niveau du pourteur de la lagune de Marchica et éparpillées à l'amont du bassin versant jalonnant les zones occupées par des matorrals et arbustes denses et claires sur des petites superficies. Ces classes qui enregistrent des conservations allant de 0.0041 à 0.3947 ne dépassent pas 37.76% du totale du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

5. Facteur P : Pratiques antiérosives et de soutien des sols

Le facteur des pratiques de conservation (P) du sol et de l'eau est définie comme le rapport de perte des sols sous pratiques de soutien spécifiques (contournage, terrassement...) à la perte sur un sol travaillé en pente (***Wischmeier et Smith, 1978; Renard et al., 1996; Sadiki et al.2004 ; Rabia, 2012; Pal et Chakrabortty, 2019***).

Le facteur P dans le modèle RUSLE tient compte des pratiques de gestion qui influent sur l'érosion du sol en modifiant le régime d'écoulement et en réduisant la vitesse de ruissèlement comme le profilage, la culture en bandes ou le terrassement (***Renard et al.1996; Sadiki, 2005 ; Mesrar, 2016***). Plus la valeur du facteur P est faible, plus les pratiques de conservation sont efficace pour atténuer l'érosion des sols (***Bagherzadeh, 2014***).

Le facteur P est comme le facteur C, ses valeurs peuvent être tirées de la littérature, mais il peut être également estimé à l'aide des sous-facteurs. La difficulté réside dans la cartographie avec précision les facteurs de pratique de soutien. Ne pas repérer ces pratiques au niveau du terrain conduit de nombreuses études à l'ignorer en donnant à leur facteur P une valeur de 1 (***Adornado et al.2009 ; Renard, 1997 ; Schmitt, 2009***). La nature du facteur C choisis peut négativement influencer le facteur P et donc l'ignorer, car ce facteur expliquent déja la présence de pratiques antiérosifs (***Morgan, 2005***). Bien que le facteur P soit généralement ignoré, un certain nombre d'études ont signalé des facteurs P possibles pour différents types de travail du sol, de terrassement, de contournage et de culture en bandes (***Panagos et al.2015***).

Dans la présente étude, vue l'absence de cartes du plan d'aménagement et la lutte antiérosif au niveau de la région de Nador, le facteur de pratique antiérosifs et de soutien des sols (P) a été calculé en se référant à la méthode de culture et à la pente (***Lufafa et al.2003 ;Terranova et al.2009; Panagos et al.2015***). Ce paramètre est calculé comme la relation entre le terrassement et la pente calculé sur la base de la relation entre le contour et la pente dans les champs cultivés (***Pan et Wen, 2014***).

Les valeurs de P selon cette approche sont comprises entre 0 et 1. La valeur 0 signifie que le champ n'est pas sensible à la perte de sol, tandis que la valeur 1 signifie que le site ne fait l'objet d'aucune mesure de conservation des sols ou des eaux. La formule utilisée pour la calcul du facteur P est donnée selon l'équation suivante:

$$P = 0.2 + 0.3 \times S \qquad \textit{Equation 55}$$

Où : P est la quantité de pratiques de conservation ; S désigne la pente en (%).

L’analyse de la carte des pratiques antiérosives (P) du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) montre des valeurs allant de 0.2000 à 1, la valeur 0.20 représentant une très bonne installation de résistance à l'érosion naturele et artificielle et la valeur 1 aucune installation de résistance (Figure 98). Les classes (0,2000 - 0,3019) et (0,3019 - 0,4459) du facteur P couvre elle couvre presque tout le bassin versant, surtout la partie aval avec quelques surfaces limitée éparpillées au niveau des parties amont avec 39.59% et 35.95% respectivement. Cette classe est considéré comme étant la classe des pratiques les plus adéquates au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Il s’agit en fait, de la présence des reboisements (Pin eucalyptus) et d’arboriculture sur des banquettes transversales qui réduisent l’érosion de 75%.

La classe (0,4459 - 0,6498) couvre 15.25%. Elle présente les zones de cultures et de végétation naturelle suivant les courbes de niveau, des traitement mécanique et biologique de ravins actifs par enrochement en pied d’ouvrage, par la pose de matelas de gabions en soubassement chose qui peut réduire l’érosion jusqu'à 50% (Figure 98). Il s’agit d’une technique efficace couramment utilisées sur les pentes pour freiner le processus de l'érosion et de glissement des sols.

La classe (0,6498 - 0.9197) est localisée sur des cultures en bandes alternantes et/ou la présence des aménagements antiérosifs peut réduire l’érosion jusqu'à 25%. Celle-ci est étalée sur 7.99% de la superficie. La classe des pratiques faiblement adéquate (0,9197- 1) et des pratiques non durable couvre des parties restreinte du bassin avec 1.22%. Ces zones sont marquée par des terrains de faible résistance à l’érosion combinée une utilisation des terres excessives, le travail du sol créent des bosses sur la pente qui cumule le produit de l’érosion.

À des échelles suffisamment détaillées et avec une connaissance suffisante des pratiques agricoles, l'utilisation du facteur P peut conduire à une estimation plus précise de la perte de sol. De plus, ce facteurs P peut être utilisés dans l'analyse de scénarios pour comprendre comment l'évolution des pratiques agricoles peut atténuer ou exacerber la perte de sol. Mais principalement dans le monde entier, la pratique de la conservation est considérée comme une unité en raison de l'absence de pratiques de conservation appropriées.

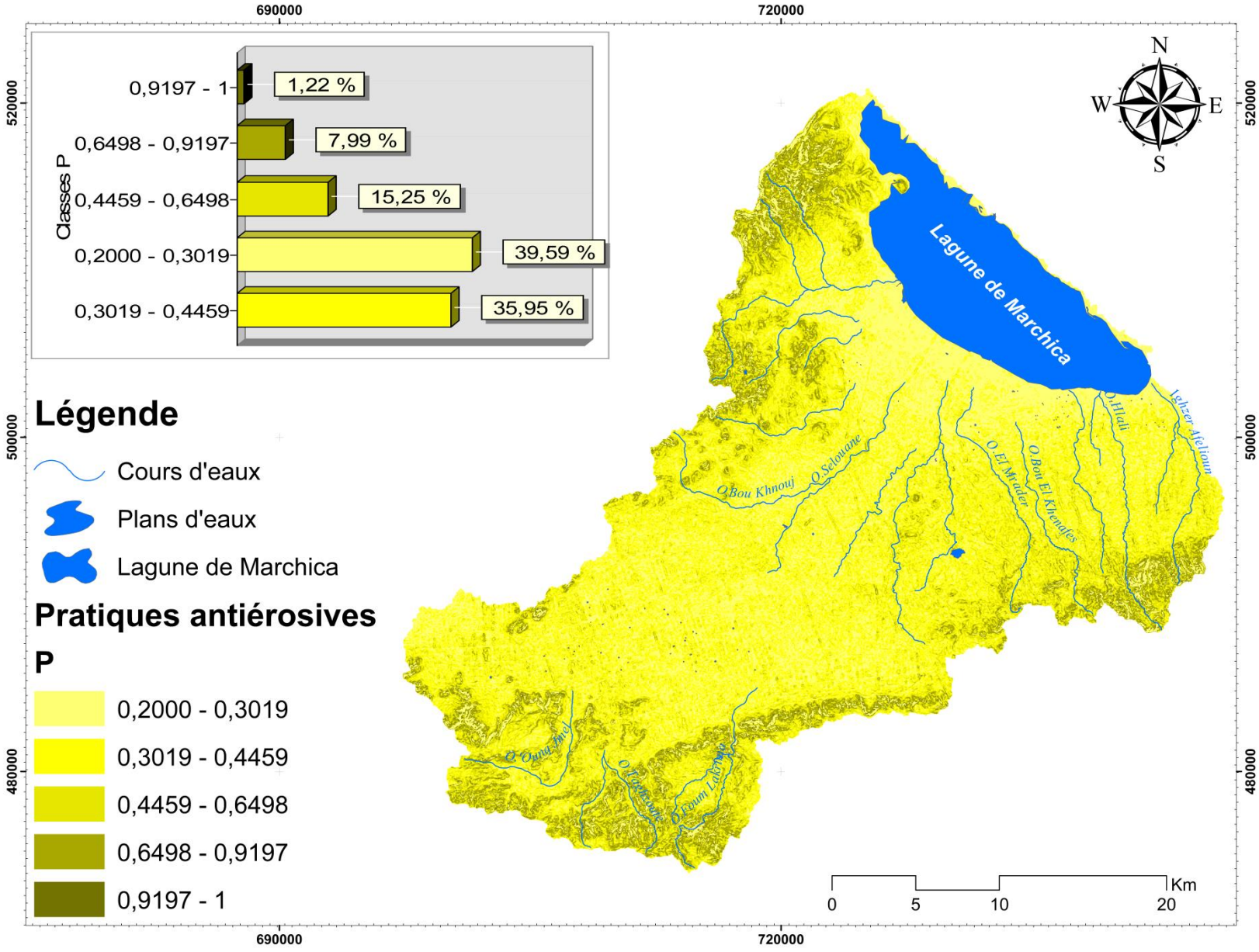


Figure 79: Carte des pratiques antiérosives

6. Pertes en sol dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg)

L'estimation des pertes en sol par érosion hydrique en nappe au niveau du bassin versant Zenaga a été obtenue par le croisement des cartes thématiques des principaux facteurs intervenant dans l'érosion hydrique des sols avec leur bases de données à l'aie du SIG. L'application de l'équation universelle du modèle RUSLE (***Wischmeier & Smith, 1978 ; Renard et al, 1996***), en tenant compte des valeurs numériques des cinq facteurs de l'érosion donne la perte en sol pour chaque point du bassin versant. Le traitement cartographique à permet de subdiviser le territoire du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) de 98052 hectares en 18753 unités d'une surface de 5,22 hectares en moyenne. Chaque unité possède des valeurs homogènes des principaux facteurs de RUSLE, avec une perte en sol moyenne de tous les pixels de l'unité exprimé en t/ha/an.

6.1. Répartition des pertes en sol par rapport à la tolérance du sol à l'érosion

Au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), les taux d'érosion est diffèrent d'une zone à l'autre selon l'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion. Plusieurs classifications ont été proposées pour la quantification des pertes en sol au Maroc.

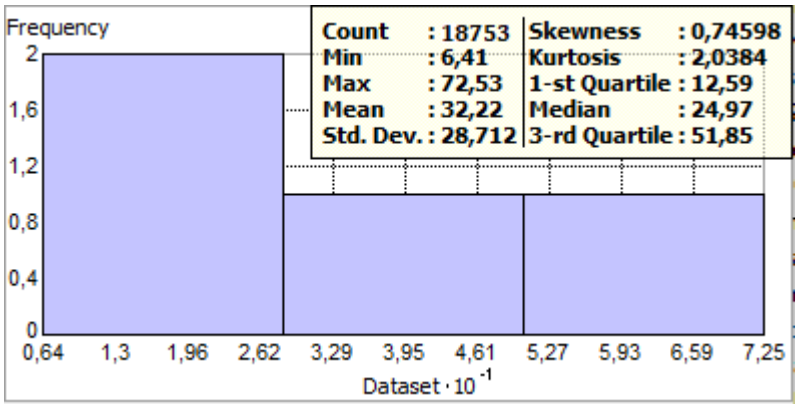


Figure 99: Diagramme de distribution de fréquence

Selon ***Sadiki (2005)***, la classification adoptée est une classification établie aux Etats Unis fondée sur la tolérance des sols à l'érosion. Cette classification considère que les sols peuvent supporter une perte allant jusqu'à 7,41 t/ha/an en moyenne tout en soutenant durablement un niveau élevé de production agricole. Au-delà de 20 t/ha/an, les pertes en sol peuvent devenir fortes avec des stades de dégradations irréversibles, ce qui peut altérer la production (Tableau 70).

Tableau 70: Classification américaine qui se base sur la tolérance des sols à l'érosion

Classes	Pertes en sol (t/ha/an)	Intensité de l'érosion
1	**Y** < 7,41	Faible
2	7.41 <**Y**< 19,77	Moyenne
3	19.77 <**Y**< 32.17	Forte
4	**Y**> 32.17	Très forte

On considère que les pertes sont faibles lorsqu'elles ne dépassent pas 7,41 t/ha/an, moyennes lorsqu'elles sont comprises entre 7,41 et 19,77 t/ha/an, forte lorsqu'elles ont des valeurs comprise entre 19,77 et 32,17 t/ha/an et très forte lorsque les pertes dépassent 32,17 t/ha/an (Tableau 70).

Les pertes en sol moyenne tolérée, par érosion hydrique en nappes ou en rigoles, pour l'ensemble des unités homogènes du bassin versant Zenaga est d'environ 32,22 t/ha/an. La médiane qui divise la série en deux est de 24,97 t/ha/an Les pertes maximales et minimales par parcelle sont respectivement de 398,96 t/ha/an et 7,82 t/ha/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de 16 041 t/an.

Il faut mentionner que certains endroits ont enregistré des valeurs de pertes en sols qui atteignent plus de 398,96 t/ha/an. Ces valeurs très localisées au niveau du bassin versant Zenaga ont été enlevées pour éviter d'altérés les interprétations des résultats. Le minimum et le maximum selon la transformation Box-Cox (***Box and Cox, 1964***) pour la nouvelle classification sont définis par les valeurs 6,41 et 72,53 t/ha/an avec un écart-type de 28,71 (Figure 99).

La carte des pertes en sol moyennes (Figure 96), montre que: La classes des pertes faible (Y < 7,41 t/ha/an) couvrent l'ensemble du bassin sur 90,58% avec un potentiel d'érosion des sols faible à nul. La classe des pertes moyennes (7.41 t/ha/an <Y< 19.77 t/ha/an) touche 7,01% du bassin. La classe des pertes forte (19.77 t/ha/an <Y< 32.17 t/ha/an) et très forte (Y> 32.17 t/ha/an) est éparpillée sur le bassin versant avec une forte présence au niveau des parties amont que ça soit au niveau de Tiztoutine (Iaasouten, Aasel, Oulad Mohammed ou Ammar…), le mont de Gourougou, le Jbel Afra et Iksane et le massif de Kebdana, mais aussi au niveau de certains parties des zones aval du bassin versant. Ces classes couvrent respectivement 2,04% et 0,38% des terrains du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

L'analyse des résultats montre que les pertes deviennent de plus en plus élevées vers les zones amont avec une stabilisation au niveau des zones aval. A ce niveau sont localisées des terrains fragiles avec une érodibilité élevé et des pentes longues. Cependant, des pertes importantes peuvent être observées au niveau des zones aval qui présentent des terrains fertiles, suite au processus extrême de l'érosion.

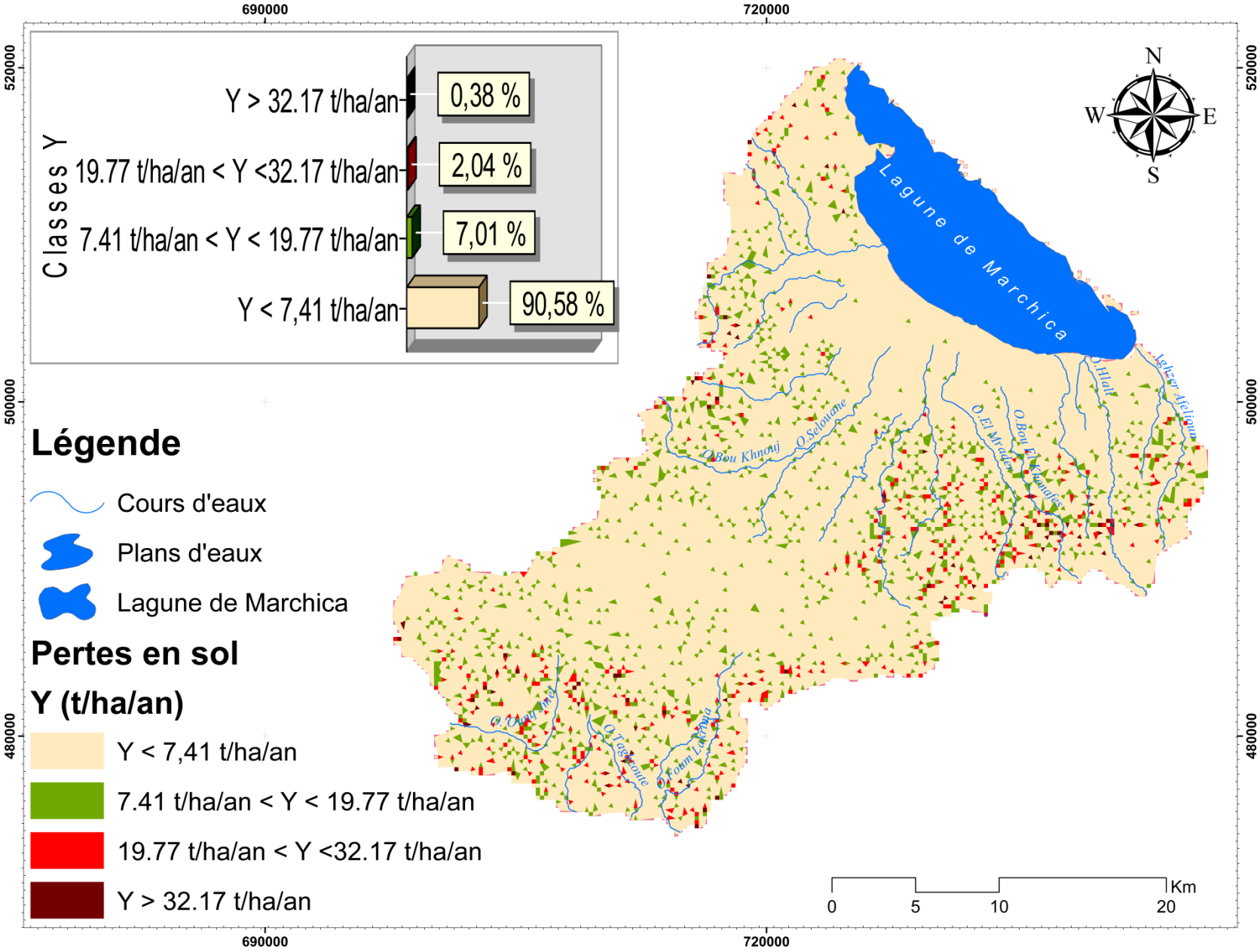


Figure 100: Carte des pertes en sol: Y (t/ha/an)

7. Études statistiques de données issues du modèle RUSLE

La distribution inégale des pertes en sol dans le bassin versant Zenaga résulte de l'impact variable dans l'espace des divers facteurs dans le processus d'érosion (***Sadiki et al.2004***). Les statistiques descriptives des variables pour chaque facteur du modèle RUSLE (R, K, LS, C et P) et les pertes en sol (Y) dans le bassin versant ont été exposées dans le tableau 71 et la figure 101. Il comprend des mesures de tendance centrale et des mesures de forme et de variabilité.

Tableau 50: Statistiques sommaires des variables de données A, R, K, LS, C et P

Statistique	Y(t/ha/an)	R(MJ.mm.ha-1.h-1.an-1)	K (t.h.ha.MJ-1.mm-1)	LS	C	P
N	18753	18753	18753	18753	18753	18753
Min	7,41	137,62	0,17	0,47	0,21	0,30
Max	72,53	198	0,56	12,12	0,65	1
1er Quartile	19,77	147,74	0,23	1,52	0,32	0,44
Médiane	32,17	157,54	0,24	3,08	0,39	0,64
3ème Quartile	55,14	168,79	0,27	5,37	0,49	0,91
Moy	32,22	161,93	0,29	4,51	0,41	0,65
Variance (n-1)	696,59	539,92	0,02	21,49	0,02	0,08
D.S (n-1)	26,39	23,23	0,15	4,63	0,16	0,29
C.V %	89,10	11,52	32,4	102,6	58,07	44,94

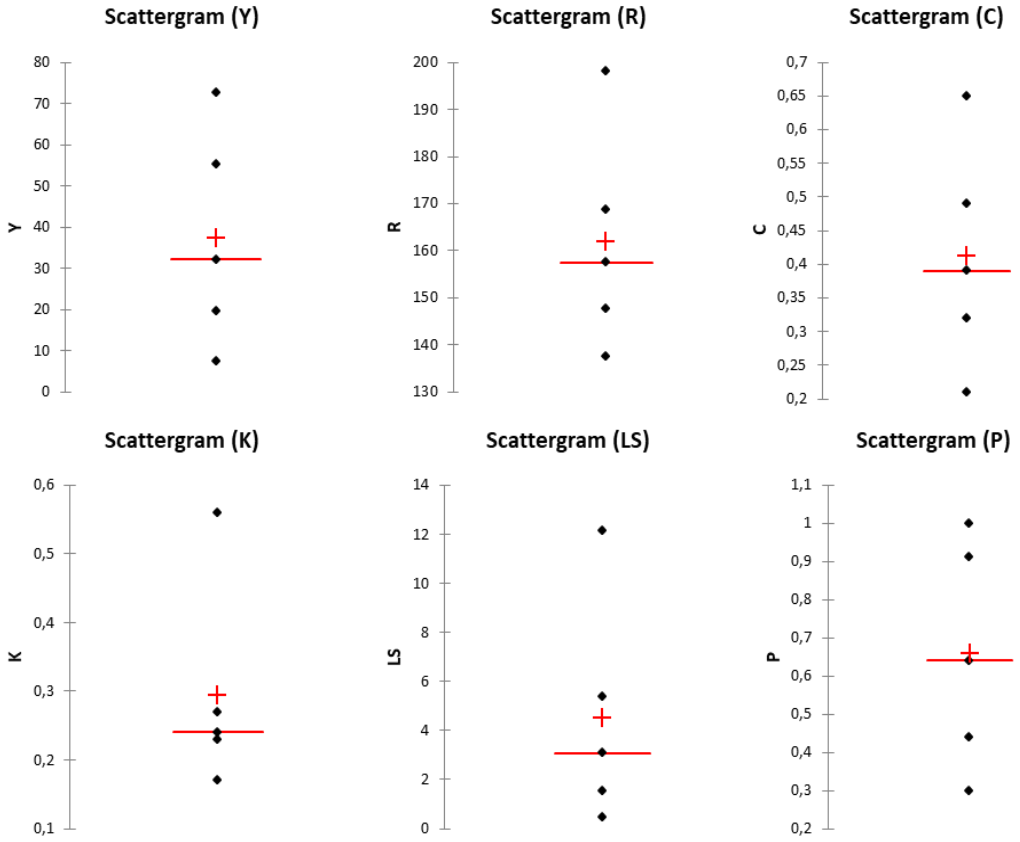


Figure 101: Scattergrams des variables RUSLE

L'érosivité des pluies (R : MJ.mm.ha-1.h-1.an-1), présente une moyenne de 161,93 MJ.mm.ha-1.h-1.an-1, les valeurs minimales et maximales sont de 137,62 et 198 MJ.mm.ha-1.h-1.an-1, avec un écart-type de 23,23. L'érodibilité des sols (K : t.h.ha.MJ-1.mm-1) présente une moyenne de 0,29 t.h.ha.MJ-1.mm-1, un écart type de 0,15 et des extrême de 0,17 et 0,56 t.h.ha.MJ-1.mm-1. Le facteur topographique (LS) dévoile une moyenne de 4,51, un écart-type de 4,63 et un maximum de 12,12. La conservation des sols et les pratiques antiérosifs et de soutien des sols montrent des moyennes de 0.51 et 0.66 avec un maximum de 1. Les pertes en sol (Y : t/ha/an) enregistrent une moyenne tolérée de 32,22 t/ha/an, les extrêmes sont de 7,41 et 72,53 t/ha/an. La déviation standard et les coefficients de variation enregistrent de bons résultats dans presque tous les facteurs.

7.1. Corrélation pour l'étude des relations entre les composantes de RUSLE

Le tableau 72 montre la matrice de corrélations de Pearson au niveau de signification de 1%. Les résultats du test statistique montrent que les pertes en sol (Y) suggèrent des relations positives presque parfaite avec l'érosivité des pluies (R), le facteur topographique (LS) et l'érodibilité des sols (K), la conservation des sols (C) et les pratiques antiérosifs (P) avec des corrélations de 0.975, 0.867, 0.949, 0.991 et 0.987 respectivement.

Tableau 51: Matrice de corrélation de Person du modèle RUSLE au niveau de signification 99% avec la P-value et le coefficient de détermination (R^2)

Variables	Y	R	K	LS	C	P
A	**1**	**0,975**	**0,867**	**0,949**	**0,991**	**0,987**
	0	**0,005**	**0,057**	**0,014**	**0,001**	**0,002**
	1	**0,950**	**0,752**	**0,901**	**0,982**	**0,974**
R	**0,975**	**1**	**0,954**	**0,992**	**0,989**	**0,932**
	0,005	**0**	**0,012**	**0,001**	**0,001**	**0,021**
	0,950	**1**	**0,910**	**0,985**	**0,987**	**0,868**
K	**0,867**	**0,954**	**1**	**0,976**	**0,906**	**0,781**
	0,057	**0,012**	**0**	**0,004**	**0,034**	**0,119**
	0,752	**0,910**	**1**	**0,953**	**0,822**	**0,610**
LS	**0,949**	**0,992**	**0,976**	**1**	**0,965**	**0,891**
	0,014	**0,001**	**0,004**	**0**	**0,008**	**0,034**
	0,901	**0,985**	**0,953**	**1**	**0,930**	**0,793**
C	**0,991**	**0,989**	**0,906**	**0,965**	**1**	**0,967**
	0,001	**0,001**	**0,034**	**0,008**	**0**	**0,007**
	0,982	**0,978**	**0,822**	**0,930**	**1**	**0,934**
P	**0,987**	**0,932**	**0,781**	**0,891**	**0.967**	**1**
	0,002	**0,021**	**0,119**	**0,043**	**0,007**	**0**
	0,974	**0,868**	**0,610**	**0,793**	**0,934**	**1**

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,01

NB : Corrélation ; P-Value ; Coefficients de détermination (R^2)

Ces relations montrent en effet les facteurs qui contrôlent le risque de l'érosion. Le facteur topographique (LS), l'érosivité des pluies (R), l'érodibilité des sols (K), le type de conservation des sols (C) et le facteur de pratiques antiérosif (P) avec des coefficients de détermination de 0.950, 0.752, 0.901, 0.982 et 0.974 respectivement. Ces facteurs montrent de

très bonnes corrélations avec les pertes en sol (Y), avec des niveaux de signification importantes. La matrice de nuages de points de dispersion (***Cleveland et McGill, 1988***), permet de montrer la relation entre les pertes en sol (Y) et les variables R, K, LS, C et P du modèle RUSLE. La matrice résultante (Figure 102), permet d'afficher les relations entre les variables pour mettre en évidence les relations susceptibles d'être importantes. La matrice montre que la corrélation entre les pertes en terres et l'érosivité des pluies, l'érodibilité et la pente topographique est significative, cela est figuré par le nuage de point que dessine la corrélation de ces variables. Par contre les pertes en terres montrent des corrélations significatives négatives avec la conservation et les pratiques antiérosifs.

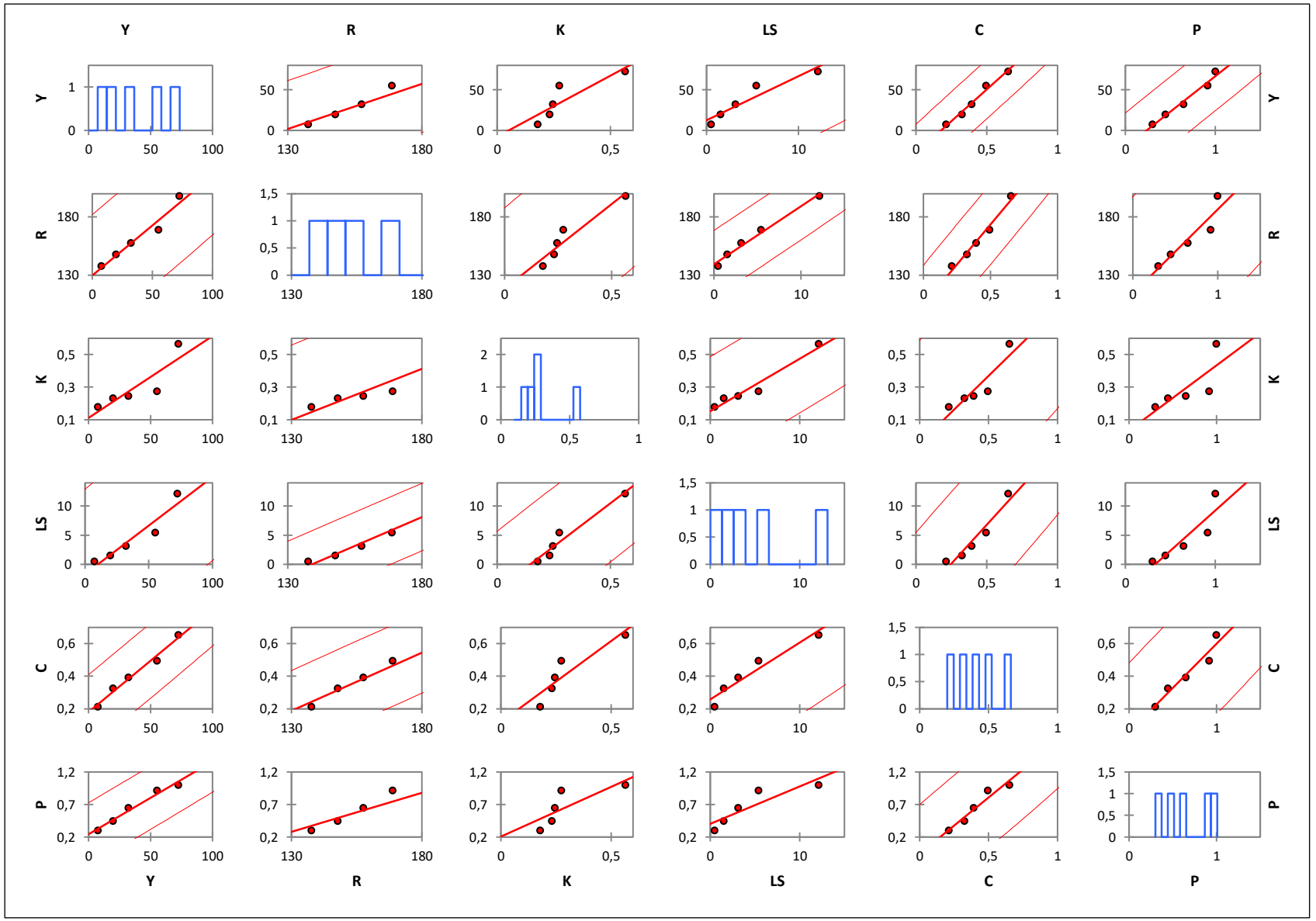


Figure 80: Matrice de corrélation de nuage de points du modèle RUSLE

7.2. Influence de chaque facteur du modèle RUSLE sur les pertes de sol (Y)

Afin de mieux concevoir la distribution inégale des pertes en sol dans le bassin versant Zenaga résultant de l'action variable dans l'espace des divers facteurs dans le processus de l'érosion hydrique. Les résultats obtenus des pertes en sol moyennes ont été confrontés aux valeurs de chaque facteur pour appréhender l'impact de ces derniers. Pour chaque facteur étudié seront présentés des graphiques qui illustrent les variations des pertes moyennes enregistrés (modèle de régression).

- ***Effet de l'érosivité des pluies***

Le calcul de l'érosivité des pluies (R : MJ.mm.ha^{-1}.h-1.an^{-1}) a donné une moyenne de 161,93 MJ.mm.ha^{-1}.h-1.an^{-1}, avec des valeurs variant entre 127,70 et 183,03 MJ.mm.ha^{-1}.h-1.an$^{-1.}$ Cette variation se traduit par les variations des pertes en sol qui vont dans le même sens de l'augmentation du facteur R (Figure 103). La corrélation entre les pertes moyennes en sol et les valeurs de l'érosivité des pluies est très forte avec un R² ajusté de 0,93. Les pertes en sol concordé la relation trouvée suit le schéma tracé par Wischmeier et Smith.

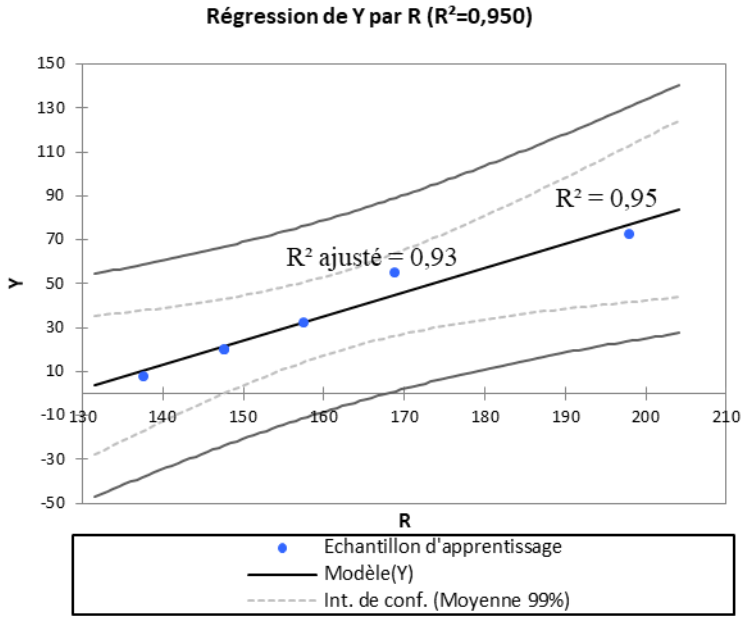


Figure 81: Evolution des pertes en fonction du facteur R

- ***Effet de l'érosivité de l'érodibilité des sols***

L'analyse des résultats de la régression des pertes en sol par le facteur K montrent que ces les pertes évoluent dans le même sens que l'accroissement des valeurs de K (Figure 104). Parallèlement à l'augmentation des valeurs de K, on a une augmentation des pertes en sol moyennes. Une certaine stabilité des pertes en sol est constatée au niveau des pertes moyennes, pour les valeurs de K comprises entre 0,23 et 0,27 mais cette stabilité n'atténue pas la tendance générale qui est celle d'une augmentation dans le même sens que la variation des valeurs du facteur K. Le facteur d'érodibilité des sols K présente une bonne corrélation

avec les pertes moyennes (R^2 = 0.75). On peut donc conclure que le facteur K joue aussi un rôle décisif dans le contrôle de l'érosion, mais à un moindre degré que l'érosivité de pluies et le facteur topographique.

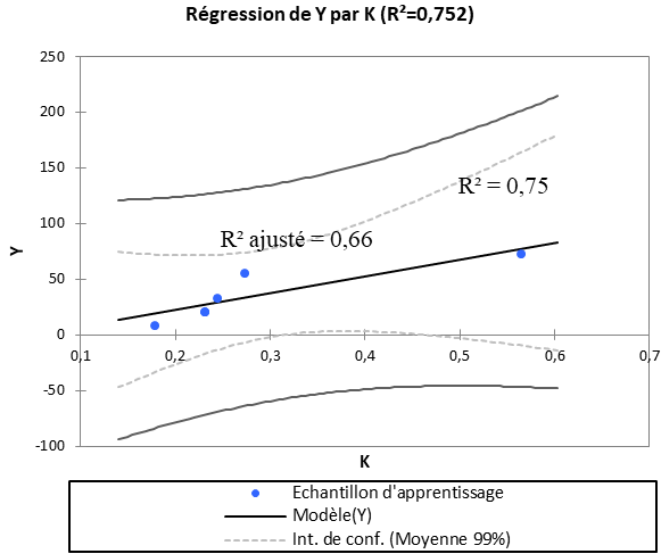


Figure 104: Régression des pertes en sol en fonction du facteur R

- ***Effet du facteur topographique***

La figure 105 montre que les pertes moyennes augmentent linéairement avec le facteur LS. Le coefficient de corrélation (R^2=0,90) atteste de l'importance de ce facteur dans le processus d'érosion en nappe dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg).

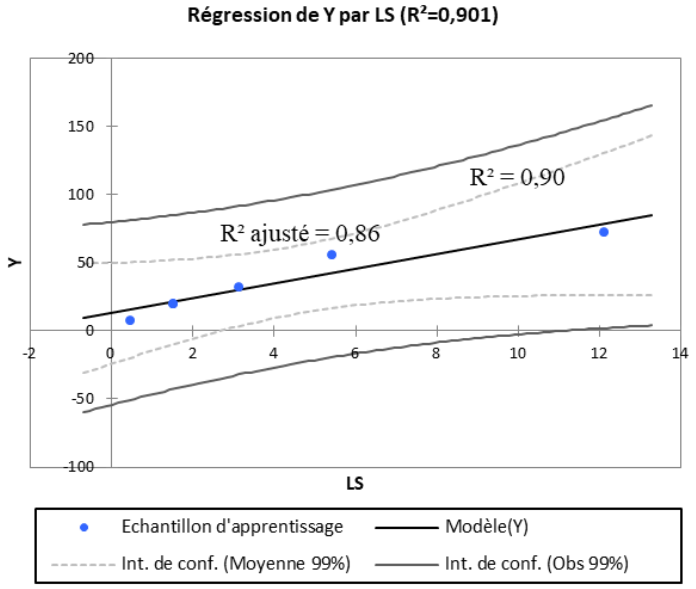


Figure 105: Régression des pertes en sol en fonction du facteur LS

- ***Effet du couvert végétal***

Le degré de protection des sols par le couvert végétal se traduit au niveau des pertes moyennes qui enregistrent une variation proportionnelle à la variation des classes de facteur de conservation des sols. La figure 106 montre la régression linéaire des pertes en sol en fonction de chacun niveaux du facteur C. L'analyse montre que la classe de conservation très faible (0.65-1) enregistre 72,53 t.ha-1.an-1. La classe 0.49-0.65 enregistre une hausse des pertes en sol ce qui perturbent un peu la tendance des pertes enregistré. La corrélation entre les pertes moyennes en sol et les valeurs du facteur de conservation est très forte (R^2 ajusté = 0,97).

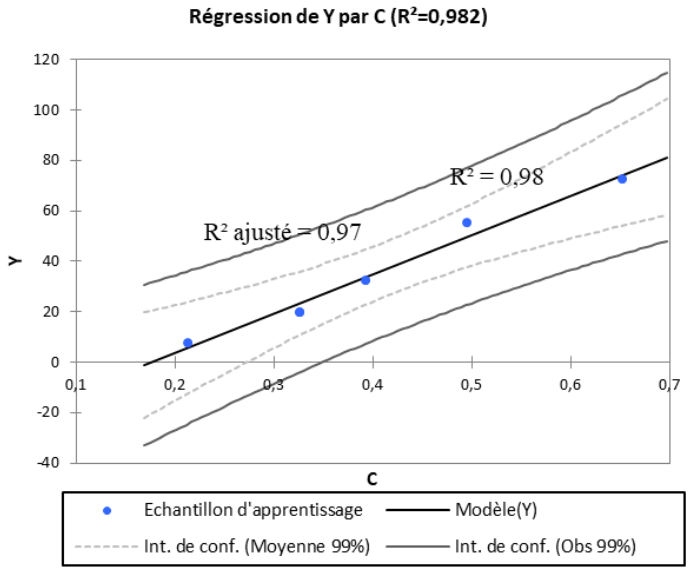


Figure 106: Régression des pertes en sol en fonction du facteur C

- ***Effet de pratiques antiérosives***

Les résultats de la régression des pertes en fonction des pratiques antiérosives montre aussi de bonne résultats avec une corrélation très importante (R^2 ajusté = 0,96). Les résultats obtenus montent que les pertes les moyennes de pertes en sol les plus importante ont été attribuée aux zones qui ne subissent aucune action de correction ou de pratiques pour lutté contre l'érosion hydrique des sols (Figure 107).

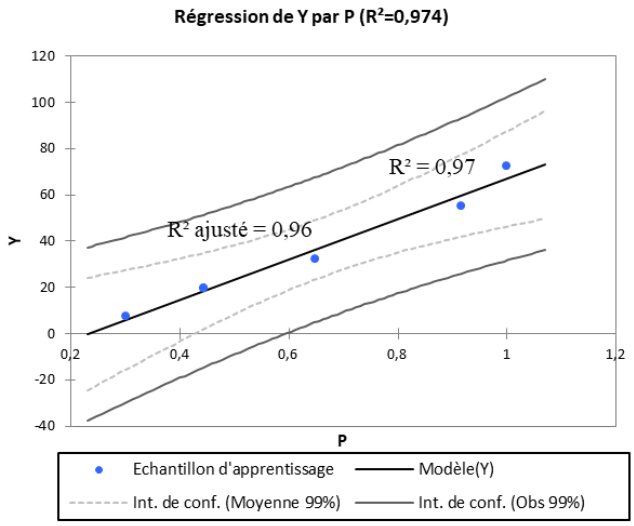


Figure 107: Régression des pertes en sol en fonction du facteur P

7.3. Régression linéaire multiple pour l'ajustement du modèle RUSLE

Pour approfondir leurs relations quantitatives, les variables R, K, LS, C et P du modèle RUSLE ont été sélectionnées comme échantillons pour établir une régression multiple linéaire afin de surveiller et expliquer les variabilités des pertes en terres (Y : t/ha/an) avec les cinq variables indépendantes (R, K, LS, C et P). La régression des variables de pertes en sol (Y) en fonction des variables RUSLE est présentée dans les tableaux 73.

Tableau 52: Statistiques relatives à la régression de la variable A et l'ajustement du modèle de régression

Coefficients d'ajustement (Y)	
Observations	18753
Somme des poids	18,000
DDL	12,000
R^2	**0,998**
R^2 ajusté	**0,971**
MCE	8,725
RMCE	**2,754**
MAPE	5,316
DW	0,737
Cp	6,000
AIC	43,692
SBC	49,034
PC	0,004

NB : DDL : Degré de liberté ; MCE : Moyenne des carrés des erreurs ; RMCE : Racine de la moyenne des carrés des erreurs ; MAPE : Erreur de pourcentage absolu moyen ; DW : coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 de Durbin-Watson ; Cp : Coefficient de Mallows ; AIC : Critère d'information d'Akaike (Akaike's Information Criterion) ; SBC : Critère bayésien de Schwarz (Schwarz's Bayesian Criterion) ; PC : Critère de prédiction d'Amemiya (Amemiya's Prediction Criterion).

Tableau 53: Analyse de la variance (ANOVA)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	5	57614,090	11522,818	1320,738	**< 0,0001**
Erreur	12	104,694	10,832		
Total corrigé	17	57718,784			

NB : Calculé contre le modèle Y=Moyenne(Y)

Tableau 54: Analyse type I SS : Analyser la somme de type I des carrés (Y)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
R	1	56850,748	56850,748	6516,198	**< 0,0001**
K	1	363,682	363,682	41,685	**< 0,0001**
LS	1	21,221	21,221	2,432	0,145
C	1	254,465	254,465	29,167	**0,000**
P	1	123,973	123,973	14,210	**0,002**

NB : Influence de l'ajout progressif des variables explicatives sur l'ajustement du modèle

Tableau 55: Analyse type III SS : Analyse de la somme de type III des carrés (Y)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
R	1	1,917	1,917	0,220	0,648
K	1	2,501	2,501	0,287	0,602
LS	1	0,103	0,103	0,012	0,915
C	1	15,248	15,248	1,748	0,211
P	1	123,973	123,973	14,210	**0,002**

NB : Influence du retrait d'une variable explicative sur l'ajustement du modèle

Tableau 56 : Paramètres du modèle (Y)

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > |t|	Borne inférieure (99%)	Borne supérieure (99%)
Constante	-146,251	179,909	-0,813	0,432	-695,791	403,289
R	0,727	1,551	0,469	0,648	-4,011	5,465
K	130,188	243,174	0,535	0,602	-612,598	872,974
LS	0,418	3,852	0,108	0,915	-11,348	12,184
C	-40,049	30,294	-1,322	0,211	-132,583	52,484
P	166,989	44,299	3,770	**0,002**	31,676	302,302

L'analyse de variance a permet d'évaluer le pouvoir explicatif des variables (R, K, LS, C et P) sur les pertes en sol (Y). On constate à la lecture du tableau que selon la valeur F obtenue pour le modèle, que la valeur de 208,52 est significative à $p < 0,0001$, ce qui indique que le modèle linéaire basée sur les variables RUSLE étudiée s'adapte à l'ensemble des données et contribue à mieux prédire les pertes des sols. Les statistiques relatives à

l'ajustement du modèle de régression indiquent que le modèle est significatif à 99% avec une moyenne d'erreur de 2.75.

Le tableau des Type I SS (Tableau 75), permet de visualiser l'influence de l'ajout progressif des variables explicatives sur l'ajustement du modèle, au sens de la somme des carrés des erreurs (SCE), de la moyenne des carrés des erreurs (MCE), du F de Fisher, ou de la probabilité associée au F de Fisher. Les résultats montrent que la probabilité est faible pour l'érosivité, l'érodibilité et la conservation des sols, ce qui indique que la contribution des variables R, K et P au modèle est important, sachant que toutes les autres variables étant déjà dans le modèle. Le tableau des Type III SS (Tableau 76), permet de visualiser l'influence du retrait d'une variable explicative sur l'ajustement du modèle. Les résultats obtenus montrent que la probabilité est faible pour la pente topographique (LS) et la conservation du sol (C), ce qui indique que plus est faible la probabilité, plus la contribution des variables au modèle est importante sachant que toutes les autres variables étant déjà dans le modèle. En considérant toujours que lorsque la P-valeur est inférieur à 0,01, la relation entre les variables est statistiquement significative, au niveau de confiance de 99,0%. L'équation du modèle ajusté est:

$$A\left(\frac{\mathrm{t}}{\mathrm{ha}}_{\mathrm{an}}\right) = -155{,}46 + 0{,}80 \times \mathrm{R} + 125{,}05 \times \mathrm{K} + 0{,}20 \times \mathrm{LS} - 40{,}71 \times \mathrm{C} + 166{,}66 \times \mathrm{P} \qquad \textit{Equation 56}$$

La régression R^2 indique que le modèle explique 98,41% de la variabilité des pertes en terres (Y : t/ha/an). La R^2 ajusté est qui est plus approprié pour comparer les modèles avec différents nombres de variables indépendantes, est 98 %. L'erreur type de l'estimation montre l'écart type des résidus est de 2,95, un écart acceptable pour juger la fiabilité du modèle. Cette valeur peut être utilisée pour construire les limites de prévision pour de nouvelles observations.

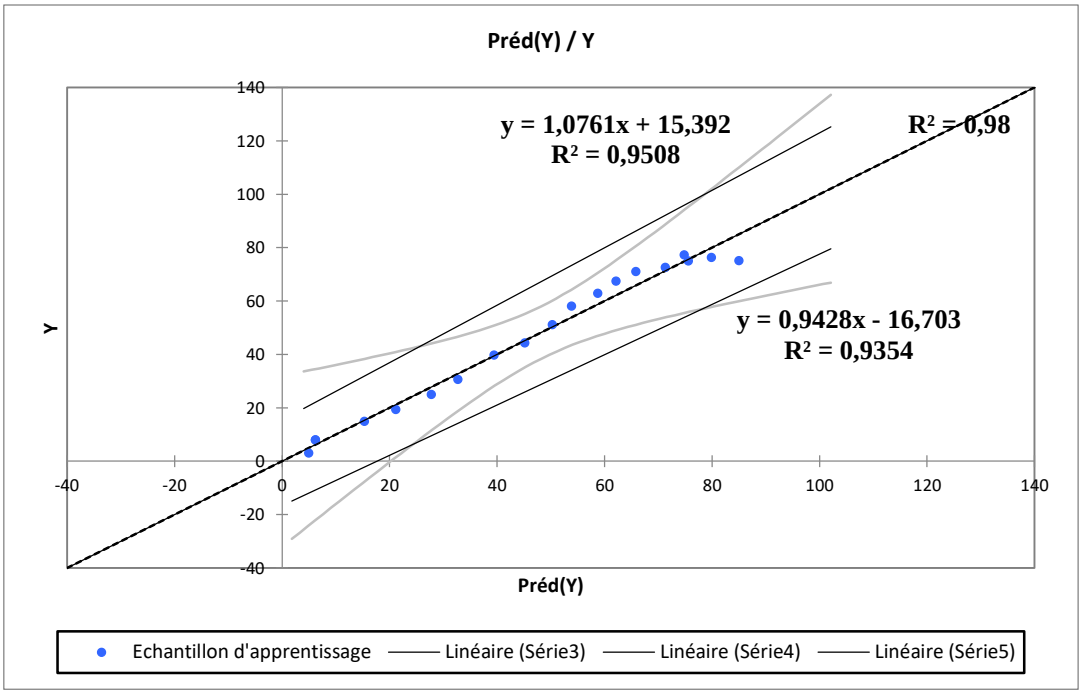


Figure 82: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sol en fonction des facteurs de risque

Conclusions et discussions

Ce chapitre expose les résultats de la quantification des pertes en sol dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) moyennant le modèle empirique RUSLE. Le traitement cartographique à permet de subdiviser le territoire du bassin versant de 98052 hectares en 18753 unités d'une surface de 5,22 hectares en moyenne.

Les pertes en sol moyenne tolérée, par érosion hydrique en nappes ou en rigoles, pour l'ensemble des unités homogènes du bassin versant Zenaga est d'environ 32,22 t/ha/an. La médiane qui divise la série en deux est de 24,97 t/ha/an Les pertes maximales et minimales par parcelle sont respectivement de 398,96 t/ha/an et 7,82 t/ha/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de 16 041 t/an. Les valeurs de pertes qui atteignent plus de 398,96 t/ha/an ont été enlevées pour éviter d'altérés les interprétations des résultats vue leurs présence très localisées. Les extrêmes selon la transformation Box-Cox sont de 6,41 et 72,53 t/ha/an. La déviation standard et les coefficients de variation enregistrent de bons résultats dans presque tous les facteurs.

La valeur de perte en sol enregistré correspond à une érosion très élevée non tolérée par les sols qui subissent un climat tempéré avec de faibles précipitations à caractère orageux, localisées dans le temps et dans l'espace, qui ne permettent pas une évolution pédogénétique pour compenser la perte en sol.

La carte des pertes en sol moyennes montre que une dominance de la classe des pertes faible (Y < 7,41 t/ha/an) avec 90,58%, présentant un potentiel d'érosion des sols faible à nul. La classe des pertes moyennes (7.41 t/ha/an <Y< 19.77 t/ha/an) touche 7,01%. La classe des pertes forte (19.77 t/ha/an <Y< 32.17 t/ha/an) et très forte (Y> 32.17 t/ha/an) couvrent respectivement 2,04% et 0,38%, éparpillée sur le bassin versant avec une forte présence au niveau des parties amont, mais aussi au niveau de certains parties aval.

Les pertes en sol deviennent de plus en plus élevées vers les zones amont ou l'érosion atteint ces valeurs maximales avec une stabilisation au niveau des zones aval. A ce niveau sont localisées des terrains fragiles avec une érodibilité assez élevé caractérisant des formations très friables (riches en limon et argile), avec une agriculture intensive et des longueurs de pentes importantes. Cependant, des pertes importantes peuvent être observées au niveau des zones aval qui présentent des terrains fertiles, suite au processus extrême de l'érosion. Les classes des pertes extrêmes présentent des superficies faibles.

La variabilité des caractéristiques des facteurs de risque impliqués dans les processus d'érosion explique la distribution inégale de l'érosion des sols dans le bassin. L'équation universelle de perte en sols révisée (RUSLE) donne une estimation des pertes en sols attendue sur le long terme, et elle prédit seulement l'érosion diffuse et en rigoles. La comparaison des résultats obtenus avec des travaux similaires réalisée au Maroc et plus précisément dans le Rif montre certaines corrélations, mais aussi des contradictions.

La quantification des pertes en sol en se basant sur le modèle RUSLE dans le bassin versant de l'Oued Sehla montre une moyenne de pertes en terres de 41.41 t.ha-1.an-1 (***Mesrar, 2016***), avec une tendances à l'augmentation tout en allant vers les zones aval.

L'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant de l'oued Boussouab a montré que le bassin versant perd en moyenne 55.35 t/ha/an des sols par érosion hydrique en nappes ou en rigoles (***Sadiki, 2005***). Cette situation grave est favorisée par les autres facteurs de l'érosion qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion (pentes fortes, sols très érodible, dégradation alarmante du couvert végétal…). Au niveau de l'oued Tlata, les zones à des pertes faible (>7 t.ha-1.an-1) sont surtout là où dominent le matorral à base de chêne vert et d'Olivier (***El Garouani et al.2007***), donc les reboisements en Olivier peuvent être des bons stabilisateurs, ce qui nous pousse à leur conférer une tendance érosive régressive, l'érosion élevée atteint 250 t/ha/an.

Dans le bassin versant de l'oued Lahdar qui fait par du bassin versant de l'Oued Inaouen. L'évaluation quantitative de l'érosion hydrique témoigne des pertes moyennes en sols de 31 t/ha/an soit un total de 2 328605 t/an pour l'ensemble du bassin (***Amhani & Tribak, 2021***). Ces chiffres traduisent une fragilité intrinsèque de ce milieu qui conditionne une accélération des processus érosifs. Dans le bassin versant de l'oued Khmiss qui fait partie du bassin versant de l'Oued Martil. L'évaluation de l'équation USLE montre que les pertes de sols faibles<12 t.ha-1.an-1occupe environ 26% de la superficie totale, qui est considérée comme relativement élevée, alors que les pertes entre 45 et 150 t.ha-1.an-1 couvrent 32%du bassin versant et sont réparties essentiellement sur dans des zones d'agricultures où le facteur topographique fort (***Khali Issa, 2011***). Concernant le bassin versant d'Oued Nakhla l'application de modèle USLE par (***Chafik, 2012***), montre que sur 50% du bassin versant les pertes en terres inférieures ou égales à 10 t.ha-1.an-1 alors que sur une importante partie on trouve des pertes (>100 t.ha-1.an-1).

A partir de la comparaison faite, on peut dire que les facteurs qui régissent l'érosion sont presque les mêmes dans tout le Rif ; des pentes généralement fortes, des roches tendres et un couvert en voie de disparition. En ce qui concerne les méthodes utilisées on remarque que tous les auteurs qui ont utilisé RUSLE ont accepté que les résultats ne soient pas tout à fait réels. Mais ce modèle permet de réaliser un bon diagnostic de l'état de l'érosion en déterminant à la fois des paramètres quantitatifs et qualitatifs et avec des données qui sont plus ou moins simple.

Ce travail passe en revue différents composants de l'équation universelle de perte de sol (USLE) et sa forme mise à jour, l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE). Il expose également différentes méthodes qui permettent d'adapté le modèle aux conditions locale et régionale en se basant sur la performance du SIG. Cependant, la difficulté est de trouver la méthode la plus appropriée pour calculer ses facteurs en fonction de l'emplacement, de la disponibilité des données et des études antérieures réalisées dans des régions proches ou similaires. Des réflexions seront nécessaires pour les équations qu'ils adaptent à leur zone d'étude et envisagent de tester plusieurs méthodes de calcul d'un facteur pour voir comment les résultats affectent les estimations de perte de sol.

Dans ce travail, nous avons exposé notre point de références au future chercheurs du sol en ce qui concerne les équations utilisé pour le calcul des facteurs RUSLE, des références pour les facteurs C et les facteurs P, et en trouvant des études antérieures qui pourraient être

pertinentes pour leur propre travail pour leur enquête plus approfondie et revue de la littérature.

En fin de compte, les choix faits concernant les applications du RUSLE dépendent du type de données disponibles pour une zone d'étude et de la manière dont ils peuvent adapter ou modifier les informations d'autres études en fonction du climat, du type de sol, de la topographie particuliers de leur zone et la couverture terrestre typique et les pratiques de soutien

Conclusion générale et perspectives

L'érosion des sols est l'un des défis mondiaux de la gestion des ressources en sols, qui est liée à la dégradation des terres, à la baisse de la productivité agricole et au déversement de sédiments dans les cours d'eau et les masses d'eau. L'érosion des sols due à l'eau, au vent et au travail du sol affecte plus d'un milliard d'hectares dans le monde et contribue à plus de 80 % de la dégradation mondiale des sols. Le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) occupe une position clés dans la province de Nador et la région orientale. Ce territoire est le siège d'une activité érosive importante, liée d'une part à l'accélération des processus de l'érosion, d'autre part à l'utilisation irrationnelle des ressources. L'érosion hydrique provoque des dégâts multiples. Elle freine la promotion de l'agriculture et empêche une gestion rationnelle des ressources naturelles en provoquant leur détérioration. Selon la nature des processus érosives, on assiste au développement de différentes formes d'érosion spectaculaires avec des stades d'évolution variables, qui se manifestent par un appauvrissement des capacités de rendement des sols à long terme, avec des dommages importants très prononcé sur les conditions socio-économiques et les infrastructures de base dans le bassin versant Zenaga (Gareb Bouareg).

L'objectif de la recherche est de cerner le risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Dans ce cadre, mettre en place un diagnostic de l'état de dégradation des sols, contribuera à comprendre et à cerner les causes de la dégradation de ce patrimoine pédologique par la caractérisation des paramètres responsables des différents processus de l'érosion hydrique, et sera mis à la disposition des acteurs locaux et gestionnaires des eaux et forêts dans ce territoire dans ce territoire.

Les résultats de l'étude du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant Zenaga ont permis d'éclaircir les influences de la combinaison des facteurs naturels (climat, géologie, occupation des sols, géomorphologie) et anthropiques sur la dégradation des ressources en sols et de la qualité de vie des habitants.

Parmi les facteurs naturels, le climat et la végétation ont subi des changements qui ont aggravé le phénomène de l'érosion hydrique. Le climat déjà agressif a changé aux cours de la période 1985-2017 pour devenir plus agressif. La combinaison entre la température et la précipitation par des différentes méthodes a montré que la station est sous un climat aride à semi-aride. L'étude de l'occupation des sols à permet de constater que le couvert végétal naturel du bassin versant a connu une évolution régressive de sa couverture végétale aussi bien par l'action anthropique que par le réchauffement climatique. Le couvert végétal naturel du bassin versant est constituée essentiellement par du matorral et steppe d'alfa avec 29.39%. La forêt naturelle ne présente que 5.93% de la superficie total. Les reboisements que ça soit feuillus et résineux avec 3.54% et 1.5% respectivement.

L'étude et l'analyse avec le soutien de la télédétection et du SIG de l'impact de l'évolution de l'occupation/ utilisation des sols (LULC) sur la température de surface (LST) dans la région de Nador indiquant que le LST a considérablement changé au cours des 10 dernières années. La distribution spatio-temporelle de la LST pour le mois de juin pour 2007

et 2017 a considérablement évolué avec des LST minimum et maximum respectivement de 15.91-39,84 °C et 15.48-47,63 °C.

La distribution des centroïdes LST sols a montré une variation spatiale apparente. Les résultats ont montré que l'action anthropique et les processus environnemental naturel ont entraîné des changements des centroïdes LST dans les positions relatives des différents types de LULC dans la région de Nador au cours de la période 2007-2017. De 2007 à 2017, ont enregistrant une forte régression de 25,63% pour la classe LST Très élevée et une forte augmentation de la classe LST extrême de 36,29 % respectivement.

L'évolution de la distribution spatio-temporelle des centroïdes LST indique que la région de Nador semble avoir un effet de réchauffement des sols mis en évidence par la distribution apparente des valeurs moyennes de la LST en milieu urbain, périurbain et rural. La tendance générale de la distribution des températures trace un système complexe d'utilisation/ occupation des terres (LULC). En revanche, une relation significativement négative a été observée entre LST et NDVI, LST et MNDWI, et LST et DEM. La relation entre MNDBI et LST avaient une relation significativement positive. L'analyse de régression multiple de la LST avec les indices NDVI, MNDWI, MNDBI et DEM à permet de surveiller l'environnement thermique en fonction des variations observes pour différentes types LULC.

Les relations couplées entre les modèles d'occupation/utilisation des sols (LULC) et la température de surface (LST), ainsi que d'autres paramètres devront être considérés pour étudiée l'impact des facteurs naturels et anthropiques. Celles-ci devraient être étudiées pour améliorer la précision de la réduction d'échelle des ensembles de données. Les données sur les caractéristiques du substrat et des sols et leur comportement thermique peuvent être utiles pour déterminer les relations entre la température de surface et les changements à grande échelle de LULC. En outre, la relation entre les précipitations et la température à la surface de la Terre est plus instantanée, ce qui la rend plus utile pour la réduction d'échelle des ensembles de données de précipitations hebdomadaires ou quotidiennes, ce qui est très important pour la recherche hydrologique, météorologique et écologique.

Le diagnostic du risque de l'érosion hydrique a nécessité l'évaluation et la modélisation de la susceptibilité à l'érosion en se basant sur le modèle qualitative de l'érosion hydrique des directives PAP/CAR a permis de déterminer les zones potentiellement vulnérables et la détermination des facteurs qui contrôlent en grande partie les états érosifs dans le bassin versant.

La carte de susceptibilité ou des tendances à l'érosion contient des informations complètes sur les différents aspects du phénomène de l'érosion hydrique. La superposition de la cartographie prédictive et descriptive a permis de montrer les tendances de l'évolution des sols au niveau du bassin versant Zenaga. La première est obtenue par la cartographie thématique, la deuxième est le résultat de la cartographie des formes et processus réels de l'érosion hydriques. Cinq états érosifs ont été déterminés. Il montre que 49.79% des terrains présentent une faible prédisposition à l'érosion hydrique. Les états érosifs très faible et notable enregistrent respectivement 9.03% et 8.9%. L'état érosif élevé touche 29.76%. La classe de l'érosion très élevée ne dépasse pas les 2.82%. La cartographie descriptive à montrer que la

dégradation se manifeste par divers formes et processus de l'érosion avec une prédominance de l'érosion en nappe (L) affectant 86.68% des terrains.

La superposition de la cartographie prédictive et descriptive a permis de montrer les tendances ou susceptibilités de l'évolution des sols au niveau du bassin versant Zenaga. L'étude a pu mettre en évidence la coïncidence d'états très dégradés avec des formes d'érosion spectaculaires et d'autres états stables avec des formes d'érosion mineures ou des zones carrément stables. L'approche d'intégration montre que susceptibilité faible moyenne sont les plus évidentes avec 54.69% et 36.89%. À son tour, les susceptibilités fortes et extrêmes ne dépassent pas les 8.42%.

La modélisation de l'érosion des sols avec l'approche PAP/CAR modifiée a permis de hiérarchiser le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) en parcelles selon le degré de risque d'érosion hydrique, la détection des zones vulnérables et la détermination des facteurs qui contrôlent en grande partie les états érosifs. L'introduction du facteur topographique (LS) au lieu de la pente montre une distribution différente, les degrés d'érodibilité diminuent et suivent les longueurs de pentes faibles. Les classes d'érodibilités élevée et très élevée ont diminué avec des pourcentages de 2.22% et 0.23% respectivement alors qu'il était de 3.75% et 0.33% pour le modèle classique PAP/CAR. L'introduction du facteur type de sol montre que plus de 72.91% des terres ont une érodibilité faible. L'érodibilité modérée présente 25.6%. Les érodibilités moyenne, forte et extrême ont diminué enregistrant des pourcentages de 1.23%, 0.21% et 0.05%.

L'analyse de corrélation pour les différents états érosifs montre que 84.2% et 90.8% de la variabilité observée dans les états érosifs est expliquer par l'introduction des facteurs climatiques (a) et (b). L'introduction des types de sols et de facteur topographique (LS) expliquent 36.6% de la variabilité observée des états érosifs résultants. Cependant, le modèle classique PAP/CAR n'explique que 25.8% des variabilités étudiée.

Les facteurs introduits pour calibrer la méthode, à savoir l'érosivité des précipitations (R), l'exposition des versants, le facteur topographique (LS), les types de sol, l'humidité des sols et la température de surface (LST, expliquent mieux les variabilités observées dans les états érosifs et ont montré leur fiabilité pour la caractérisation de l'érosion des sols dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg). Les états érosifs forts et très forts du modèle classique sont représentés de manière exhaustive, ce qui est à l'opposé de la nouvelle approche de modélisation qualitatif établie. L'approche d'intégration montre que les tendances ou susceptibilités sont en fonction de la dynamique des facteurs responsables et des processus d'érosion, ce qui signifie qu'au sein d'un même état érosifs, il existe un ordre de priorité des tendances.

L'utilisation du modèle PAP/CAR a montré sa fiabilité, cependant compte tenu de l'influence de d'autres facteurs d'érosion, leur intégration peut enrichir la méthode, ce qui peut servir par la suite à réaliser un modèle cartographique cohérent qui peut être un outil de base pour le diagnostic de la dégradation des sols, la planification de l'utilisation des terres et d'aide à la décision pour prédire, gérer et contrôler la vulnérabilité à l'érosion des sols de manière efficace et durable.

La quantification des pertes en sol dans le bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) moyennant le modèle empirique RUSLE. Le traitement cartographique à permet de subdiviser le territoire du bassin versant de 98052 hectares en 18753 unités d'une surface de 5,22 hectares en moyenne. Les pertes en sol moyenne tolérée, par érosion hydrique en nappes ou en rigoles, pour l'ensemble des unités homogènes du bassin versant est d'environ 32,22 t/ha/an. La médiane qui divise la série en deux est de 24,97 t/ha/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de 16 041 t/an. Les minima et maxima selon la transformation Box-Cox était de 6,41 et 72,53 t/ha/an.

La valeur de perte en sol enregistré correspond à une érosion très élevée non tolérée par les sols qui subissent un climat tempéré avec de faibles précipitations à caractère orageux, localisées dans le temps et dans l'espace, qui ne permettent pas une évolution pédogénétique pour compenser la perte en sol. Les pertes en sol deviennent de plus en plus élevées vers les zones amont ou l'érosion atteint ces valeurs maximales avec une stabilisation au niveau des zones aval. A ce niveau sont localisées des terrains fragiles avec une érodibilité assez élevé caractérisant des formations très friables (riches en limon et argile), ou se développe une agriculture intensive et des pentes importantes. Cependant, des pertes importantes peuvent être observées au niveau des zones aval qui présentent des terrains fertiles, suite au processus extrême de l'érosion.

Le modèle RUSLE donne une estimation des pertes en sols attendue sur le long terme, et elle prédit seulement l'érosion diffuse et en rigoles. La comparaison des résultats obtenus avec des travaux similaires réalisée au Maroc et plus précisément dans le Rif montre certaines corrélations, mais aussi des contradictions. A partir de la comparaison faite, on peut dire que les facteurs qui régissent l'érosion sont presque les mêmes dans tout le Rif; des pentes généralement fortes, des roches tendres et un couvert végétale en voie de disparition.

Tous les auteurs qui ont utilisé RUSLE ont accepté ce modèle permet de réaliser un bon diagnostic de l'état de dégradation des sols. Cependant, la difficulté est de trouver la méthode la plus appropriée pour calculer ses facteurs en fonction de l'emplacement, de la disponibilité des données et des études antérieures réalisées dans des régions proches ou similaires. En fin de compte, les choix faits concernant les applications du modèle dépendent du type de données disponibles pour une zone d'étude et de la manière dont ils peuvent adapter ou modifier les informations d'autres études en fonction du climat, du type de sol, de la topographie particuliers de leur zone et la couverture terrestre typique et les pratiques de soutien. Des réflexions seront nécessaires pour les équations qu'ils adaptent à leur zone d'étude et envisagent de tester plusieurs méthodes de calcul d'un facteur pour voir comment les résultats affectent les estimations de perte de sol.

L'étude des processus et facteurs causaux influençant l'état des ressources indique que le risque de l'érosion hydrique ne cesse de s'imposer son poids. Ce processus environnemental rendu accéléré par l'action anthropique et le changement climatique ces dernières années inquiète de plus en plus les autorités locales et les institutions en charges.

La région inspire une dégradation intense des ressources naturelles à savoir la couverture pédologique et le couvert végétale liées au risque de l'érosion hydrique et la

multiplication des facteurs de risque. Des pertes considérables des sols seront engendrées, chose qui va provoquer l'envasement au niveau des plans d'eaux, des lacs de barrage, mais surtout une sédimentation massive au niveau de la lagune de Marchica. Un impact socio-économique va être ressentit avec des contraintes au développement liées principalement à l'état des ressources fragilisées. Des dégradations sont ressenties au niveau des sols et de leur valeur foncière, de la perte de la biodiversité, de la qualité des eaux de surface et de l'infrastructure. Pour ces raisons, il est indispensable d'intervenir pour contrecarrer l'effet de l'érosion hydrique par une approche intégrale et innovante, chose qui aidera à démêler les interactions des différents facteurs, à concilier les besoins importants d'une population en croissance constante avec des ressources limitées.

Arrivant à la fin de ce projet de recherche basé sur un ensemble de travaux précédents, nous souhaitons que ce travail ouvre des perspectives raisonnable et sera un diagnostic de base à des recherches plus approfondies sur les risques de l'érosion des sols aussi bien du côté fondamentale sur l'évolution des affleurements rocheux et de leur manteau d'altération ainsi que du côté des méthodes d'étude de différents points de vue.

Nous proposons par la présente recherche l'élaboration d'un modèle d'évaluation de l'érosion hydrique propre aux particularités biogéographique marocaines en se basant sur les nouvelles techniques et méthodes de cartographie ; Cela ne peut se faire sans l'adaptation et l'exploitation du SIG, la télédétection et des NTIC pour la gestion et le contrôle de l'érosion et des facteurs causaux à court, moyen et long terme. L'utilisation des outils de prise de décision avancés, notamment les géostatistiques hautement adaptées à la caractérisation de l'information spatiale, les réseaux de neurones et bayésienne connus pour leur simplicité de regroupement de donnés, ainsi l'établissement de modèles fiables va dépendre en grande partie de la qualité des travaux réalisée au niveau du terrain et des analyses effectuées.

Références bibliographique

A. E. F. C. S. (1999).Plan National d'Aménagement des Bassins Versant (P. N. A. B. V.)[Rapport]. - [s.l.] : Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols (p. 17), 1999.

A.E.F.C.S. (2017). Évaluation du programme pays de la FAO en Maroc (P.N.A.B.V). .)[Rapport]. - [s.l.] : Ressources en eau, irrigation et gestion intégrée des bassins versants. Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols & Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO).

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*, *5*(1), 1-12.

Abernethy, B., & Rutherfurd, I. D. (2000). The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *25*(9), 921-937.

Aboulabbas, O., Benchekroun, F., & Merzouk, A. (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. *Programme d'Actions Prioritaires Centre d'Activités Régionales-Rabat*, 55.

Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote sensing*, *21*(5), 847-859.

Achhal, A., Akabli, A., Barbero, M., Benabid, A., M'Hirit, O., Peyre, C., ... & Rivas-Martinez, S. (1979). A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. Ecologia mediterranea, 5(1), 211-249.

Adornado, H. A., Yoshida, M., & Apolinares, H. A. (2009). Erosion vulnerability assessment in REINA, Quezon Province, Philippines with raster-based tool built within GIS environment. Agricultural Information Research, 18(1), 24-31.

AEFCS. (1996). Plan Directeur des Aires Protégées du Maroc. Rapport inédit, Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols/BCEOM/SECA/ISR/EPHE.

Agence Développement Sud (ADS), 2005. Synthèse hydrogéologique et SIG de la nappe de Gareb-Bouareg. MATEE, Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya - Oujda.

Ait Brahim, L. (1991). Tectonique cassante et états de contraintes récents au nord du Maroc; contribution à l'étude du risque sismotectonique. [Livre]. - [s.l.] : Ph. Doctoral Thesis, University of Rabat,, 1991. - p. 360.

Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*, *7*(3), 203-225.

Alexandersson, H., 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. J. Climatol., 6, 661-675.

Allison, R. J., Goodwin, S. P., Parker, R. J., De Grijs, R., Zwart, S. F. P., & Kouwenhoven, M. B. N. (2009). Dynamical mass segregation on a very short timescale. The Astrophysical Journal, 700(2), L99.

Alsac, C., Cornet, G., Destombes, J. P., Hentinger, R., & Lavigne, J. (1969). Etude géothermique du Maroc oriental. Rapport inédit BRGM, (69), 90.

Alsultan, S., Lim, H. S., MatJafri, M. Z., & Abdullah, K. (2005). An algorithm for land surface temperature analysis of remote sensing image coverage over AlQassim, Saudi Arabia. *From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week*, 16-21.

Amhani, Z., & Tribak, A. (2021). Cartographie de l'utilisation des sols et de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Lahdar (Prérif oriental-Maroc): Utilisation des données de la télédétection et du modèle RUSLE. Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia.

Ananda, J., & Herath, G. (2003). Soil erosion in developing countries: a socio-economic appraisal. Journal of environmental Management, 68(4), 343-353.

Andrieux, J., Fontbote, J. M., & Mattauer, M. (1971). Sur un modèle explicatif de l'Arc de Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, *12*(2), 191-198.

Argialas, D., Lyon, J., & Mintzer, O. (1988). Quantitative description and classification of drainage patterns. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *54*(4), 505-509.

Arnoldus, H. M. J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation., 127-132.

Asebriy, L., & Cherkaoui, T. E. (1995). Tectonique cassante et sismotectonique dans le Rif et son avant-pays (Maroc). *Africa Geosciences Review*, *2*(2), 181-188.

Atherton, J., Olson, D., Farley, L., & Qauqau, I. (2005). Watershed assessment for healthy reefs and fisheries. Final Report to the United States Department in Wild life Conservation-Society-South-Pacific.

Atterberg, A. (1911). Die plastizitat der Tone. Intern mitt. boden., 4-37.

Attia. R, Sadok. A, Hédi.H (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 l'Oued Rmel [Section du livre] / auteur du livre Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques Direction Générale de l'Aménagement et la Conservation des Terres Agricoles, Direction des Ressources en Sols. - Tunisie : [s.n.], 2005.

Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., & Elhaus, D. (2014). Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena*, *118*, 220-225.

Avwunudiogba, A., & Hudson, P. F. (2014). A review of soil erosion models with special reference to the needs of humid tropical mountainous environments. *European Journal of Sustainable Development*, *3*(4), 299-299.

Azdimousa, A., Bourgois, J., Asebriy, L., Poupeau, G., & Montigny, R. (2003). Histoire thermique et surrection du Rif externe et des nappes de flyschs associées (Nord Maroc). Travaux de l'Institut Scientifique, Rabat, 21, 15-26.

Azdimousa, A., Jabaloy, A., Asebriy, L., Booth-Rea, G., González-Lodeiro, F., & Bourgois, J. (2007). Lithostratigraphy and structure of the Temsamane unit (eastern external Rif, Morocco). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, *20* (3-4), 187-200.

Azdimousa, A., Poupeau, G., Rezqi, H., Asebriy, L., Bourgois, J., & Ait Brahim, L. (2006). Géodynamique des bordures méridionales de la mer d'Alboran; application de la stratigraphie séquentielle dans le bassin néogène de Boudinar (Rif oriental, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, *28*, 9-18.

Báčová, M., Krása, J., Devátý, J., & Kavka, P. (2019). A GIS method for volumetric assessments of erosion rills from digital surface models. *European Journal of Remote Sensing*, *52*(sup1), 96-107.

Bagarello, V., Di Stefano, C., Ferro, V., Giordano, G., Iovino, M., & Pampalone, V. (2012). Estimating the USLE soil erodibility factor in Sicily, South Italy. *Applied Engineering in Agriculture*, *28*(2), 199-206.

Bagherzadeh, A. (2014). Estimation of soil losses by USLE model using GIS at Mashhad plain, Northeast of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 7, 211-220.

Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1957, May). Les climats biologiques et leur classification. In Annales de géographie (Vol. 66, No. 355, pp. 193-220). Armand Colin.

Bai, Z., & Dent, D. (2009). Recent land degradation and improvement in China. Ambio, 150-156.

Bajocco, S., De Angelis, A., Perini, L., Ferrara, A., & Salvati, L. (2012). The impact of land use/land cover changes on land degradation dynamics: a Mediterranean case study. Environmental management, 49, 980-989.

Balling, R. C., & Brazel, S. W. (1988). High-resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *54*(9), 1289-1293.

Barathon, J. J. (1980). Sédimentation néogène, formes et dépôts quaternaires et néotectonique du Piémont NE de Kebdana (Maroc du NE). Géologie Méditerranéenne, 7(4), 299-306.

Barathon, J. J. (1989). Bassins et littoraux du Rif oriental (Maroc): évolution morphoclimatique et tectonique depuis le Néogene supérieur [Basins and coast of eastern Rif (Morocco): morphoclimatic and tectonic evolution sins superior Neogene age]. *Interuniversity Center of Mediterranean study. PhD, University of Poitiers, French (in French)*.

Barbant, J. C. (2008). « Années de la morale» 20. La complexité des situations sociales. In Mixité sociale et égalité des chances: actes du colloque, Université de Perpignan via Domitia, 15. XI. 2006, 6e Semaine de la coopération et de la solidarité internationale (p. 63). Presses Universitaires de Perpignan.

Barbier, E. B. (1997). The economic determinants of land degradation in developing countries. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 352(1356), 891-899.

Bardgett, R. D., Mommer, L., & De Vries, F. T. (2014). Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. Trends in Ecology & Evolution, 29(12), 692-699.

Barsi, J. A., Schott, J. R., Palluconi, F. D., & Hook, S. J. (2005, August). Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. In *Earth observing systems X* (Vol. 5882, pp. 136-142). SPIE.

Batista, P. V., Davies, J., Silva, M. L., & Quinton, J. N. (2019). On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough?. *Earth-Science Reviews*, *197*, 102898.

Beasley, D. B., Huggins, L. F., & Monke, A. (1980). ANSWERS: A model for watershed planning. Transactions of the ASAE, 23(4), 938-0944.

Beaulieu, C., Ouarda, T. B., & Seidou, O. (2007). Synthèse des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations. Hydrological sciences journal, 52(1), 18-37.

Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): with a view to increasing its global applicability and<? xmltex\break?> improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(11), 6059-6086.

Bendaanoun, M. (1991). Contribution à l'étude écologique de la végétation halophile, halohygrophile et hygrophile des Estuaires, Lagunes, Delta et Sebkhas au littoral atlantique et mediterranéen et du domaine continental du Maroc: Analyse climatique, pédologique et chimique; phytoécologique, phytosociologique et phytogéographique. Perspective de gestion, d'aménagement et de développement. Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, Marseille, France.

Benhoussa, A. & DakkI, M., avec la collaboration de HAMMADA S. & DAHBI A. (2003b).- Lagune de Nador : Cartographie des habitats et répartition des principaux taxons. Rapp. inédit, projet MedWetCoast-Maroc, PNUE/Secr. Etat Envir./Départ. Eaux & Forêts, Maroc, 35 pp.

Bennett, H. H. (1934). Soil Erosion--A National Menace. The Scientific Monthly, 39(5), 385-404. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/15812.

Benson, R. H., Rakic-El Bied, K., & Bonaduce, G. (1991). An important current reversal (influx) in the Rifian Corridor (Morocco) at the Tortonian-Messinian boundary: The end of Tethys Ocean. *Paleoceanography*, *6*(1), 165-192.

Bertrand Murielle. L'état de la protection juridique des sols dans l'Union européenne. [Rapport de recherche] université lyon III. 2015. hal-02862772.

Beuselinck, L., Steegen, A., Govers, G., Nachtergaele, J., Takken, I., & Poesen, J. (2000). Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. *Geomorphology*, *32*(1-2), 69-82.

Bewket, W., & Sterk, G. (2005). Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Processes: An International Journal*, *19*(2), 445-458.

Bharath, H. A., Chandan, M. C., Vinay, S., & Ramachandra, T. V. (2018). Modelling urban dynamics in rapidly urbanising Indian cities. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *21*(3), 201-210.

Bhatta, B. (2009). Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: a case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*, *30*(18), 4733-4746.

Bhatti, S. S., & Tripathi, N. K. (2014). Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. *GIScience & remote sensing*, *51*(4), 445-467.

Bhuyan, S. J., Marzen, L. J., Koelliker, J. K., Harrington, J. A., & Barnes, P. L. (2002). Assessment of runoff and sediment yield using remote sensing, GIS, and AGNPS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(6), 351-363.

Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., ... & Mehrotra, S. (2018). Impacts of 1.5° C of global warming on natural and human systems. IPCC: Geneva, Switzerland.

Bingner, R. L., & Theurer, F. D. (2001, March). AnnAGNPS: estimating sediment yield by particle size for sheet and rill erosion. In Proceedings of the 7th Interagency Sedimentation Conference.

Birot P. (1981) - Les processus de l'érosion à la surface des continents. Ed. Masson, Paris, 607p.

Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer Science & Business Media.

Boardman, J., & Evans, R. (2020). The measurement, estimation and monitoring of soil erosion by runoff at the field scale: Challenges and possibilities with particular reference to Britain. *Progress in physical geography: earth and environment*, *44*(1), 31-49.

Boardman, J., & Poesen, J. (2006). Soil Erosion in Europe: major processes, causes and consequences. Soil erosion in Europe. https://doi.org/10.1002/0470859202.ch36.

Bochet, E., Poesen, J., & Rubio, J. L. (2000). Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *25*(8), 847-867.

Bonilla, C. A., & Vidal, K. L. (2011). Rainfall erosivity in central Chile. Journal of Hydrology, 410(1-2), 126-133.

Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., ... & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494.

Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., ... & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(36), 21994-22001.

Botelho Da Costa, J. V.; Franco, E. P. C. & Ricardo, R. P. (1964). "Generalized soil map of Angola (2nd approx.)". 8th Intern. Congress of Soil Sci.,Bucarest, V, 18, page, 153-162.

Box, G. E., & Cox, D. R. (1964). An analysis of transformations. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 26(2), 211-243.

Bradford & Huang (1996): Splash and detachment by waterdrops. [Livre]. - [s.l.]: Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation, Books in Soils, Plants and the Environment, Chapitre 4, pages 61–76. Dekker, New York.1996.

Brethes, J. C. & Tesson M. (1978). - Observations hydrobiologiques sur la Sebkha Bou Areg (Lagune de Nador, Maroc), Bilan d'automne 1976 et d'hiver 1977. Trav. Doc. Inst. Pêches Marit., Casablanca, 24, pp.1-17.

Bridges, E. M., & Oldeman, L. R. (1999). Global assessment of human-induced soil degradation. *Arid soil research and rehabilitation*, *13*(4), 319-325.

Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil moisture for hydrological applications: Open questions and new opportunities. Water, 9(2), 140.

Brownlee, J. (2019). *Deep learning for computer vision: image classification, object detection, and face recognition in python*. Machine Learning Mastery.

Brunel, O. (1985).- Observations hydrologiques sur la lagune de Nador (mission du 30 mars 1984). Rapp. FAO, TCP MOR/2308.

Bruun, T. B., Elberling, B., de Neergaard, A., & Magid, J. (2015). Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. Land Degradation & Development, 26, 272e283.https://doi.org/10.1002/ldr.2205.

Butzer, K.W., 2005. Environmental history in the Mediterranean world: cross-disciplinary investigation of cause-and-effect for degradation and soil erosion. J. Archaeol. Sci., 32(12): 1773-1800.

Buyantuyev, A., & Wu, J. (2010). Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape ecology*, *25*, 17-33.

Callaud, M. J. (2004). Cours de mécanique des sols. Tome I: Propriétés des sols. Groupe EIERY ETSHER, 1Y137p.

Campy, M et Macaire, J. J. (1989) Géologie des formations superficielles (Géodynamique — faciès — utilisation). Masson, Paris, 433 p., 304 fig., 5 tabl., 17 x 24 cm, 78 $ can.

Carlier, P. (1971).- La plaine des Triffa. In : Ressources en eau du Maroc : 1. domaines du Rif et du Maroc oriental. Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc, 231, 301-315.

Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, *62*(3), 241-252.

Carroll, M. L., DiMiceli, C. M., Sohlberg, R. A., & Townshend, J. R. G. (2004). 250 m MODIS normalized difference vegetation index, collection 4. University of Maryland, College Park.

Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. Public roads, 13(8), 121-136.

Casagrande, A. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. Geotechnique, 8(2), 84 91.

Caudron, M., Heib, M. A., & Emeriault, F. (2008). Collapses of underground cavities and soil-structure interactions: influences of the position of the structure relative to the cavity. arXiv preprint arXiv:0810.5297.

Cerdà, A. (1998). The influence of aspect and vegetation on seasonal changes in erosion under rainfall simulation on a clay soil in Spain. *Canadian Journal of Soil Science*, 78(2), 321-330.

Cerdan, O., Delmas, M., Négrel, P., Mouchel, J. M., Petelet-Giraud, E., Salvador-Blanes, S., & Degan, F. (2012). Contribution of diffuse hillslope erosion to the sediment export of French rivers. Comptes Rendus Geoscience, 344(11-12), 636-645.

Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., ... & Dostal, T. (2010). Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. Geomorphology, 122(1-2), 167-177.

Cerdan, O., Lecomte, V., Couturier, A., & Le Bissonnais, Y. (1999). Modelling runoff and erosion processes within small cultivated catchments.

Cerema (2017) – Note d'information n°02 – Dimensionnement des épaisseurs de couche de forme pour PF2qs - Complément au GTR et au GTS.

Chafik H (2012) : Contribution au développement d'une application Web pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le cadre du Projet Arboriculture Fruitière-MAROC. [Rapport]. - [s.l.] : Management des Ressources en Sols et en Eaux, IAV Hassan II 2012, p.41, 2012.

Chakraborty, S. D., Kant, Y., & Mitra, D. (2015). Assessment of land surface temperature and heat fluxes over Delhi using remote sensing data. *Journal of environmental management*, *148*, 143-152.

Chalouan, A., & Michard, A. (2004). The Alpine Rif Belt (Morocco): a case of mountain building in a subduction-subduction-transform fault triple junction. *Pure and applied Geophysics*, *161*(3), 489-519.

Chalouan, A., Michard, A., El Kadiri, K., Negro, F., Frizon de Lamotte, D., Soto, J.I., Saddiqi, O., (2008). The Rif Belt. In: Continental Evolution: The Geology of Morocco (Ed. A. Michard), Stratigraphy and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction. Lectures and Notes in Earth Sciences 116, 203–302.

Chander G., & Markham, B. (2005). Revised Landsat 5 TM radiometric calibra- tion procedures and post-calibration dynamic ranges. USGS, USA.

Chander, G., & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, *41*(11), 2674-2677.

Chander, G., Helder, D. L., & Boncyk, W. C. (2002). Landsat-4/5 Band 6 relative radiometry. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, *40*(1), 206-210.

Chaplot, V., & Le Bissonnais, Y. (2000). Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 25(2), 145-153.

Cherkaoui, S. I., Hanane, S., Magri, N., El Agbani, M. A., & Dakki, M. (2015). Factors influencing species-richness of breeding waterbirds in Moroccan IBA and Ramsar wetlands: a macroecological approach. *Wetlands*, *35*(5), 913-922.

Chorowicz, J., & Fabre, J. (1997). Organization of drainage networks from space imagery in the Tanezrouft plateau (Western Sahara): implications for recent intracratonic deformations. *Geomorphology*, *21*(2), 139-151.

Christensen, J. H., Kanikicharla, K. K., Aldrian, E., An, S. I., Cavalcanti, I. F. A., de Castro, M., ... & Zou, L. (2013). Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 1217-1308). Cambridge University Press.

Christoï, R. (1961). Résultats obtenus à l'essai" EROSION" de la station de Niangoloko Haute-Volta.

Clarke JI (1966) Morphometry from maps. In: Dury GH (ed) Essays in geomorphology. American Elsevier publishing Co., New York, pp 235–274.

Cleveland William et McGill Marylyn (1988): Dynamic Graphics for Statistics, [Rapport]. - [s.l.] : Wadsworth., 1988.

Cohen, I., Huang, Y., Chen, J., Benesty, J., Benesty, J., Chen, J., ... & Cohen, I. (2009). Pearson correlation coefficient. *Noise reduction in speech processing*, 1-4.

Colazo, J. C., & Buschiazzo, D. (2015). The impact of agriculture on soil texture due to wind erosion. Land Degradation & Development, 26(1), 62-70.

Comas, M. C., Platt, J. P., Soto, J. I., & Watts, A. B. (1999). 44. The origin and tectonic history of the Alboran Basin: insights from Leg 161 results. In *Proceedings of the ocean drilling program scientific results* (Vol. 161, pp. 555-580).

Combes, F., Hurand, A., & Meunier, M. (1994). La forêt de montagne: un remède aux crues. In *Congrès de la société hydrotechnique de France Crues et inondations 23èmes journées de l'hydraulique, Nîmes, 14-15-16 septembre 1994* (p. 8).

Comel, A. (1931). "La "Terra Rossa" del carso a un vero terreno climatico?". J. du Ann. Agro., II, 4, 1931,277-287.

Coque R. (1977) - Géomorphologie Ed Armand Colin Collection U, 465p.

Corte, J. F., Fevre, A., Havard, H., Joubert, J. P., Kergoet, M., Morel, G., ... & Veysset, J. Réalisation des remblais et des couches de forme (fascicule I: principes généraux-fascicule II: annexes techniques).

Cosandey, C., Didon-Lescot, J. F., & Martin, C. (2000). Forêts et écoulements. Etude des processus responsables des modifications du bilan d'écoulement annuel à l'occasion d'une coupe forestière (résumé). *Forêt méditerranéenne*, *21*(2), 154-155.

Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. Earth-Science Reviews, 40(3-4), 209-227.

Crespo-Blanc, A., & de Lamotte, D. F. (2006). Structural evolution of the external zones derived from the Flysch trough and the South Iberian and Maghrebian paleomargins around the Gibraltar arc: a comparative study. *Bulletin de la Société géologique de France*, *177*(5), 267-282.

Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Ninyerola, M., & Pons, X. (2009). Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *114*(D8).

Crowell, J. C. (1999). Pre-Mesozoic ice ages: their bearing on understanding the climate system (Vol. 192). Geological Society of America.

Dakki, M. (2003). Diagnostic pour l'aménagement des zones humides du Nord-Est du Maroc: sebkha Bou Areg (lagune de Nador). MedWetCoast project Morocco, final report, UNEP/Secr. Etat Env./Départ. Eaux & Forêt, Maroc, 55pp.

Dakki, M., avec la collaboration de El Fellah B., Fekhaoui M. & Benhoussa A. (2003).- Diagnostic pour l'aménagement des zones humides du Nor-Est du Maroc : Embouchure de la Moulouya. Rapp. inédit, projet MedWetCoast-Maroc, PNUE/Secr. Etat Envir./Départ. Eaux & Forêts, Maroc, 53 pp.

Dash, P., Göttsche, F. M., Olesen, F. S., & Fischer, H. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of remote sensing*, *23*(13), 2563-2594.

Daveau Suzanne (1978): La Répartition des Précipitations en Fonction du Relief: Etude du Cas Portugais [Revue] // Geoforum, Vol. 9. Pergamon Press Ltd. Printed in Great Britain. doi:10.1016/0016-7185(78)90017-9. - 1978. - pp. 425-433.

Davies, T. R. (1997). Using hydroscience and hydrotechnical engineering to reduce debris flow hazards. *ASCE, NEW YORK, NY,(USA)*., 787-810.

Davranche, A., Lefebvre, G., & Poulin, B. (2010). Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series. *Remote sensing of environment*, *114*(3), 552-562.

Ddani, M., Meunier, A., Zahraoui, M., Beaufort, D., El Wartiti, M., Fontaine, C., ... & El Mahi, B. (2005). Clay mineralogy and chemical composition of bentonites from the Gourougou volcanic massif (northeast Morocco). *Clays and Clay Minerals*, *53*(3), 250-267.

De Asis, A. M., & Omasa, K. (2007). Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62(4), 309-324.

De Luca, P. (1984). Preuve de l'autochtonie de l'unité chaotique des Kebdana (Maroc oriental), équivalent oriental de l'olistostrome prérifain. Comptes-rendus des séances de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique-physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre, 299(7), 331-336.

De Ploey, J. (1990). Modelling the erosional susceptibility of catchments in terms of energy. Catena, 17(2), 175-183.

De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Ritsema, C. J. (1996). LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. Hydrological processes, 10(8), 1107-1117.

De Schutter, Olivier. Agroecology, a Tool for the Realization of the Right to Food. In: E. Lichtfouse (ed.), Agroecology and Strategies for Climate Change, Springer 2012, p. 1-16 http://hdl.handle.net/2078.1/105949-- DOI : 10.1007/978-94-007-1905-7_1.

De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., ... & Boix-Fayos, C. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand?. Earth-Science Reviews, 127, 16-29.

Dehousse, N. M., & Arnould, R. (1971). Les modèles réduits de structures en génie civil. Dunod.

Delang, C. O. (2018). The consequences of soil degradation in China: a review. GeoScape, 12(2), 92-103.

Deng, X., Huang, J., Rozelle, S., & Uchida, E. (2008). Growth, population and industrialization, and urban land expansion of China. Journal of Urban Economics, 63(1), 96-115.

Dercourt, J. E. A., Zonenshain, L. P., Ricou, L. E., Kazmin, V. G., Le Pichon, X., Knipper, A. L., ... & Biju-Duval, B. (1986). Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. Tectonophysics, 123(1-4), 241-315.

Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of soil and water conservation, 51(5), 427-433.

Dewey, J. F., Helman, M. L., Knott, S. D., Turco, E., & Hutton, D. H. W. (1989). Kinematics of the western Mediterranean. *Geological Society, London, Special Publications*, *45*(1), 265-283.4.

DGCL (2010) : Guide Juridique des Collectivités Locales (Tome 1-2). Direction des affaires Juridiques, des études, de la documentation et de la coopération. Service du Bulletin officiel des collectivités Locales. https://www.collectivites-territoriales.gov.ma/.

Didon, J., Durand-Delga, M., & Kornprobst, J. (1973). Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar. *Bulletin de la Societé géologique de France*, *7*(2), 77-105.

Diodato, N. (2004). Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. Hydrology and Earth System Sciences, 8(1), 103-107.

Direction Provinciale de l'Agriculture de Nador (1994). Étude pédologique de reconnaissance au 1/100 000 en vue de la mise en valeur agricole dans les cercles du Rif et de Driouch. Province de Nador. Rapport et Annexes, Bureau d'Études J.M. Coquant, Casablanca, Royaume du Maroc, Ministère de l'Agriculture et de la mise en valeur Agricole, 221 p.

Djokic, D., Ye, Z., & Dartiguenave, C. (2011). Arc hydro tools overview. Redland, Canada, ESRI,2011 ; 5.

Dragičević, N., Karleuša, B., & Ožanić, N. (2018). Modification of erosion potential method using climate and land cover parameters. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9(1), 1085-1105.

Duan, Z., & Bastiaanssen, W. G. M. (2013). Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, *134*, 403-416.

Duffa Céline et Danic François (2006) : Entraînement et redistribution des radionucléides sur le bassin versant de la Peyne [Revue] // Direction De L'environnement Et De L'intervention Service d'Etude et de Surveillance de la Radioactivité dans l'Environnement. - 2006. - p. 19.

Dumas, J. (1965). Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cahiers Orstom, 3(4), 307-333.

Dunne, T., Zhang, W., & Aubry, B. F. (1991). Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, *27*(9), 2271-2285.

Durand J. R., Dufour P., Guiral D., Zabi S.G.F., (1994), Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire, Tome II – Les milieux lagunaires, Éditions d'ORSTOM, Paris, 546 p.

Durand-Delga M. (1980) : Le Méditerranée occidentale: étapes de sa genese et problemes structuraux lies a celle- ci. [Livre]. - [s.l.] : Mém. h.-s. Soc. géol. Fr., 1980. - Vol. 10 : pp. 203–224.

Durand-Delga, M. (2006). Geological adventures and misadventures of the Gibraltar Arc. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 687-716.

Durigon, V. L., Carvalho, D. F., Antunes, M. A. H., Oliveira, P. T. S., & Fernandes, M. M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. International Journal of Remote Sensing, 35(2), 441-453.

Effat, H. A., & Hassan, O. A. K. (2014). Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt. *Urban Climate*, *10*, 171-188.

El Agbani, M.A., Qninba, A., Benhoussa, A., Hamidi, S. & Zine, N-E. (2004). - Site Ramsar du Maroc : Sebkha Bou Areg. Rapp. Inédit, Projet WWF Internationnal "Inscription de nouveaux sites marocains sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationnale". HCEFLD/Inst. Sci./WWF-LWP-SG.

El Bakkali S. 1995). Volcanologie et magmatologie du systeme du gourougou (rif oriental, maroc), Thesis, J.-L. Terre, océan, Espace Clermont-Ferrand 2, (1995), 285 P.

El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A. et 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) [Rapport]. - [s.l.] : Acte des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novemb, 2007.

El Garouani, A., & Aharik, K. (2021). Apport des images LANDSAT à l'étude de l'évolution de l'occupation du sol dans la plaine de SAÏSS au MAROC, pour la période 1987-2018. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 223, 173-188.

El Garouani, A., Tribak, A., & Abahrour, M. (2010). Assessment of the effects of land-use/land-cover changes on regional soil loss susceptibility using the RUSLE model and remote sensing data. IAHS-AISH publication, 340, 343-349.

Ellison W.D. (1944): Studies of raindrop erosion. [Livre]. - [s.l.] : Agric. Eng., 1944. - Vol. 25 : 13 : pp. 1-181.

El-Swaify, S. A., Dangler, E. W., & Armstrong, C. L. (1982). Soil erosion by water in the tropics.

Emberger, L. (1931). Et MAIRE R., 1941.- Catalogue des plantes du Maroc. 4. Supplément: 918. JAHANDIEZ et MAIRE (Ed.), 1941, 1-4.

ENVI. (2009). "Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide." *ITT VIsual Information Solutions*. Module Version, 44. Retrieved from. http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf .

Esterhuizen, G. S., Dolinar, D. R., & Ellenberger, J. L. (2011). Pillar strength in underground stone mines in the United States. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(1), 42-50.

Eurosion, (2004). Available online at: www.eurosion.org (accessed May 10, 2020).

Eurostat. (2022). LUCAS 2022 (Land Use/Cover Area Frame Survey).

Exelis Visual Information Solutions. (2017). Environment for visualizing images.

Fabre, D., & Hantz, D. (2019). Glissements et éboulements rocheux, une fatalité ?. encyclopédie de l'environnement. Grenoble Alpes.

Faleh, A., & Sadiki, A. (2002). Glissement rotationnel de Dhar El Harrag: exemple d'instabilité de terrain dans le Prérif central (Maroc). *Bulletin de l'Institut scientifique*, Rabat, (24), 41-48.

Fallot, P. (1937). Essai sur la géologie du Rif septentrional. Notes Mémoires du Serv. Géologique du Maroc 40, 553.

FAO (2010): Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la biodiversité : La cause et les processus d'érosion en nappe [Rapport].-[s.l.]: Département du développement durable, 2010.

FAO, 2015. World Fertilizer Trends and Outlook to 2018. Food Agriculture Organization United Nations, Rome, Italy.

FAO, 2020. State of Knowledge of Soil Biodiversity – Status, Challenges and Potentialities, Report 2020. Food Agriculture Organization United Nations, Rome, Italy, https://doi. org/10.4060/cb1928en.

FAO. (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – A scoping analysis for the LEAP work stream on soil carbon stock changes. Rome. 84 pp.Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

FAO. (2022). Global Soil Organic Carbon Map – GSOCmap v.1.6. Technical report. Rome. https://doi.org/10.4060/cb9015en

Fatorić, S., & Chelleri, L. (2012). Vulnerability to the effects of climate change and adaptation: The case of the Spanish Ebro Delta. Ocean & Coastal Management, 60, 1-10.

Favre, P. (1995). Analyse quantitative du rifting et de la relaxation thermique de la partie occidentale de la marge transformante nord-africaine : le Rif externe (Maroc). Comparaison avec la structure actuelle de la chaîne. Geodin. Acta 8, 59–81.

Ferreira, C. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. Science of the Total Environment, 805, 150106.

Ferreira, V., & Panagopoulos, T. (2014). Seasonality of soil erosion under Mediterranean conditions at the Alqueva dam watershed. Environmental Management, 54, 67-83.

Ferro, V., & Porto, P. (2000). Sediment delivery distributed (SEDD) model. Journal of hydrologic engineering, 5(4), 411-422.

Flageollet, J. C. (2012). Atlas du réchauffement climatique 1971-2010. Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 6).

Flageollet, J. C., Malet, J. P., & Maquaire, O. (2000). The 3D structure of the Super-Sauze earthflow: a first stage towards modelling its behaviour. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 25(9), 785-791.

Flanagan, D. C., Gilley, J. E., & Franti, T. G. (2007). Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. Transactions of the ASABE, 50(5), 1603-1612.

Fleming, G. (1977) - The sedimentation problème. Un. Strath Clyde. June 1977 pp. 10-81.

Flinch, J. F., Bally, A. W., & Wu, S. (1996). Emplacement of a passive-margin evaporitic allochthon in the Betic Cordillera of Spain. *Geology*, *24*(1), 67-70.

Floret, C., & Pontanier, R. (1984). Aridité climatique, aridité édaphique. Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques, 131(2-4), 265-275.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *science*, *309*(5734), 570-574.

Forbes, D., Smith, S., & Horner, M. (2008). Tools for selecting appropriate risk management techniques in the built environment. Construction Management and economics, 26(11), 1241-1250.

Fournier, F. (1969). Transport solides effectués par le cours d'eau, [Livre]. - [s.l.] : Bull. Assoc . Int. Hydrol.

Freschet, G. T., Roumet, C., Comas, L. H., Weemstra, M., Bengough, A. G., Rewald, B., ... & Stokes, A. (2021). Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: current understanding, pitfalls and future research needs. New Phytologist, 232(3), 1123-1158.

Frizon de Lamotte D., Andrieux J., Guezou J.-C., (1991) : Cinématique des chevauchements néogènes dans l'Arc bético-rifain : discussion sur les modèles géodynamiques, [Livre]. - [s.l.] : Bull. Soc. Geol. Fr., 1991. - Vol. 169 : pp. 611–626.

Fryrear, D. W., Bilbro, J. D., Saleh, A., Schomberg, H., Stout, J. E., & Zobeck, T. M. (2000). RWEQ: Improved wind erosion technology. *Journal of soil and water conservation*, *55*(2), 183-189.

Fu, P., & Weng, Q. (2016). Consistent land surface temperature data generation from irregularly spaced Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, *184*, 175-187.

Gaget, E., Le Viol, I., Pavón-Jordán, D., Cazalis, V., Kerbiriou, C., Jiguet, F., ... & Galewski, T. (2020). Assessing the effectiveness of the Ramsar Convention in preserving wintering waterbirds in the Mediterranean. *Biological Conservation*, *243*, 108485.

Ganasri, B.P. and Ramesh, H. (2016) Assessment of Soil Erosion by RUSLE Model Using Remote Sensing and GIS—A Case Study of Nethravathi Basin. Geoscience Frontiers, 7, 953-961. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007.

Garcia-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, *239*, 160-173.

Gariano, S. L., Rianna, G., Petrucci, O., & Guzzetti, F. (2017). Assessing future changes in the occurrence of rainfall-induced landslides at a regional scale. Science of the total environment, 596, 417-426.

Gartet Abdelghani, Jawad Gartet, Carmelo Conesa Garcia (2005) : Dégradation spécifique et transports solides dans le bassin de l'oued Lebène (Prérif central, Maroc septentrional) [Livre]. - [s.l.] : Papeles de Geografia, 2005. - Vol. 41-42 : pp. 85-100.

Gartet, A. (2007). Risques naturels, anthropiques et technologiques dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays : aménagement, gestion et prévention. Thèse d'Etat, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Saïs-Fès, 354 p

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 50(4), 1211-1250.

Gauché, E. (2002). Les campagnes des Beni Saïd (Rif oriental, Maroc): l'exemple de la crise d'une montagne et de son avant-pays (Doctoral dissertation, Paris 10).

Gaussen, H., Roux, G. & Bagnouls, M.F. (1959).- Carte des précipitations du Maroc. Dir. Agricult. Forêts, Rabat, feuille 2 (en dépôt à l'Institut Scientifique de Rabat).

Geddes, N., & Dunkerley, D. (1999). The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs. *Catena*, *36*(4), 303-313.

Gerard, L., Piriou, J. M., Brožková, R., Geleyn, J. F., & Banciu, D. (2009). Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma-scale operational weather prediction model. Monthly weather review, 137(11), 3960-3977.

Giandotti M (1934) Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua Memorie e studi idrografici,Servizio Idrografico Italiano, Report No 2.

Gibeau J, W. White, T. Hepner, R. Gutierrez, T. Tremblay, R. Smyth and J. Andres.....2000. Texas Shoreline Change Project: Gulf of Mexico Shoreline Change from Brazos River to Pass Cavallo. Texas Bureau of Economic Geology, Austin, Texas.

GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.

Giles, D. P. (2020). Chapter 1 Introduction to Geological Hazards in the UK: Their Occurrence, Monitoring and Mitigation. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 29(1), 1-41.

Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothern, J. S., Hook, S., & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, *36*(4), 1113-1126.

Giordano, A. (1994). L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne, Forêt méditerranéenne 15 (1994) 12–21.

Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. Global and planetary change, 63(2-3), 90-104.

Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. Sustainability, 8(3), 281.

Gourfi, A., Daoudi, L., & Shi, Z. (2018). The assessment of soil erosion risk, sediment yield and their controlling factors on a large scale: Example of Morocco. Journal of African Earth Sciences, 147, 281-299.

Gray, D. H., & Leiser, A. T. (1982). Biotechnical slope protection and erosion control. Van Nostrand Reinhold Company Inc.

Gregory, J. M., Stouffer, R. J., Raper, S. C. B., Stott, P. A., & Rayner, N. A. (2002). An observationally based estimate of the climate sensitivity. Journal of climate, 15(22), 3117-3121.

Gregory, K. J., & Walling, D. E. (1973). Drainage basin form and process.

Griffiths, P., Hostert, P., Gruebner, O., & van der Linden, S. (2010). Mapping megacity growth with multi-sensor data. *Remote Sensing of Environment*, *114*(2), 426-439.

GTR Fascicule I , LCPC/SÉTRA, (2000), Guide technique réalisation des remblais et des couches de forme.

Guelorget, O., Lefebvre, A., Orbi, A. & Shafee, M.S. (1994). - Etude de la lagune de Nador : résultats de la mission de juin 1993. Labo. Hydrobiol. marine Univ. Montpellier & ONP/ISPM, Casablanca, 88 pp.+annexes.

Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., García-Orenes, F., & Gómez, I. (2001). Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. Arid Land Research and Management, 15(2), 163-171.

Guillemin, M. & Houzay, J.-P., (1982). Le Néogène post-nappes et le Quaternaire du Rif nord- oriental (Maroc) : stratigraphie et tectonique des bassins de Melilla, du Kert, de Boudinar et du piedmont des Kebdana. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc 314, 7-238.

Guillemin, M., & JP, R. (1975). LE MIOCENE TERMINAL DU LITTORAL DE LA MER D'ALBORAN DU BAS KERT AU PIEMONT DES KEBDANA (RIF ORIENTAL, MAROC).

Guindon, B., Zhang, Y., & Dillabaugh, C. (2004). Landsat urban mapping based on a combined spectral–spatial methodology. *Remote sensing of environment*, *92*(2), 218-232.

Hadipriono, F. C. (1990). The development of a knowledge-based expert system for analysis of drainage patterns. *Photogrammetric Engineering and Remoto Sensing*, *56*(6), 905-909.

Hagen, L. J. (2008). Updating soil surface conditions during wind erosion events using the Wind Erosion Prediction System (WEPS). Transactions of the ASABE, 51(1), 129-137.

Haloui, B., avec la collaboration de Ibn Tattou, M. & Hammada, S. (2003b).- Flore de la Lagune de Nador. Rapp. inédit, projet MedWetCoast-Maroc, PNUE/Secr. Etat Envir./Départ. Eaux & Forêts, Maroc, 53 pp.

Hammada S. ; Dakki M. ; Ibn Tattou M. ; Ouyahya A. & Fennane M. (2004b). – Analyse de la biodiversité floristique des zones humides du Maroc. Flore rare, menacée et halophile. Acta Botanica Malacitana 29, Malaga, pp. 43-66.

Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, *48*(4).

Hao, P., Wang, L., & Niu, Z. (2015). Comparison of hybrid classifiers for crop classification using normalized difference vegetation index time series: A case study for major crops in North Xinjiang, China. *PloS one*, *10*(9), e0137748.

Harris, C., Smith, J. S., Davies, M. C., & Rea, B. (2008). An investigation of periglacial slope stability in relation to soil properties based on physical modelling in the geotechnical centrifuge. Geomorphology, 93(3-4), 437-459.

Hatzor, Y. H., Wainshtein, I., & Mazor, D. B. (2010). Stability of shallow karstic caverns in blocky rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(8), 1289-1303.

HCEFLCD. (2013). Plan National d'Aménagement des Bassins Versants. Retrieved from http://www.eauxetforets.gov.ma/SitePages/Index.aspx.

HCEFLCD. (2013). Plan National d'Aménagement des Bassins Versants. Retrieved from http://www.eauxetforets.gov.ma/SitePages/Index.aspx.

HCEFLCD. (2017) : Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. (2017) : [Livre]. - [s.l.] : http://www.eauxetforets.gov.ma/fr/index.aspx, 2017.

HCP (2012) : Monographie de la province de Nador [Rapport].-[s.l.]: https://www.hcp.ma/region-oriental/.

HCP (2017) : Monographie de la province de Nador [Rapport].-[s.l.]: www.hcp.ma/region-oriental.

HCP and CERED (2017), Projections de la population et des ménages 2014-2050, Haut-Commissariat au plan (HCP)-Centre d'études et de recherches démographique (CERED).

He, C., Shi, P., Xie, D., & Zhao, Y. (2010). Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. *Remote Sensing Letters*, *1*(4), 213-221.

Henin, S., & Gobillot, T. (1950). L'érosion par l'eau en France métropolitaine. *CR Acad. Sci. Paris*, *230*, 128-30.

Hernandez, J. (1975). Sur le caractere shoshonitique des Andesites du Gourougou, Rif Oriental (Maroc).

Hernandez, J., & Bellon, H. (1985). Chronologie K-Ar du volcanisme miocène du Rif oriental (Maroc): implications tectoniques et magmatologiques. Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique, 26(2), 85-94.

Hervouët, Y., & De Luca, P. (1980). Place de l'unité chaotique de Gareb-Kebdana dans l'orogene rifain; implications geodynamiques. Bulletin de La Société Géologique de France, 7(3), 305-310.

Hession, W. C., & Shanholtz, V. O. (1988). A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution. *Journal of Soil and Water conservation*, *43*(3), 264-266.

Heusch, B. (1970). L'érosion du pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-Rif occidental.

Horton, R. E. (1941). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity 1. *Soil science society of America journal*, *5*(C), 399-417.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, *56*(3), 275-370.

Hottinger et Suter (1962) : La structure de la zone prérifaine au Sud du moyen Ouerrha (Maroc septentrional) [Livre]. - 1962. - Vol. 254 : 1.

Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG bulletin*, *51*(11), 2246-2259.

Hrabalíková, M., & Janeček, M. (2017). Comparison of different approaches to LS factor calculations based on a measured soil loss under simulated rainfall. *Soil and Water Research*, *12*(2), 69-77. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72438-4.

Hu, L., & Brunsell, N. A. (2013). The impact of temporal aggregation of land surface temperature data for surface urban heat island (SUHI) monitoring. *Remote Sensing of Environment*, *134*, 162-174.

Hua, A. K., & Ping, O. W. (2018). The influence of land-use/land-cover changes on land surface temperature: a case study of Kuala Lumpur metropolitan city. *European Journal of Remote Sensing*, *51*(1), 1049-1069.

Hudson, N. W. (2015). *Soil conservation*. Scientific Publishers.

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Group EIER-ETSHER, Cours mécanique des sols, Tome 1, Propriétés des sols, 2004.

Institut National de la Statistique. (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014 (RGPH 2014).

IPCC (2022): In Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC, S. P. (2019). Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. International consensus regarding land system impacts of climate change as of.

IPCC. (2012). Meeting report of the intergovernmental panel on climate change expert meeting on geoengineering. IPCC Working Group III Technical Support Unit, Postdam Institute for Climate Impact Research.

Irzi, Z. (1987). *Etude sédimentologique et micropaléontologique de la lagune de Nador (Maroc oriental)* (Doctoral dissertation, Paris 6).

Irzi, Z. (2002). Les environnements du littoral méditerranéen oriental du Maroc compris entre l'oued Kiss et le cap des trois fourches dynamique sédimentaire et évolution Ecologie des Foraminiferes benthiques de la lagune de Nador. *Université Mohammed I, Oujda*.

Iverson, R. M. (2012). Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117(F3).

Iverson, R. M., Reid, M. E., & LaHusen, R. G. (1997). Debris-flow mobilization from landslides. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 25(1), 85-138.

Jain, S. K., & Singh, V. P. (2005). Isohyetal Method. In J. H. Lehr, & J. Keeley (Eds.), Water Encyclopedia. John Wiley & Sons, Inc.

Jarrah, M., Mayel, S., Tatarko, J., Funk, R., & Kuka, K. (2020). A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity. *Catena*, *187*, 104388.

Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of geophysical research: atmospheres*, *108*(D22).

Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of geophysical research: atmospheres*, *108*(D22).

Jimenez-Munoz, J. C., Cristobal, J., Sobrino, J. A., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X., and Pons, X. 2009. "*Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data*". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(1), 339–349.* doi:10.1109/tgrs.2008.200712 .

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, *11*(10), 1840-1843.

Jobin T, Sabu J, Thrivikramji KP (2018) Assessment of soil erosion in a monsoon-dominated mountain river basin in India using RUSLE-SDR and AHP. Hydrological Sciences Journal.

Jolivet, L., Augier, R., Faccenna, C., Negro, F., Rimmele, G., Agard, P., ... & Crespo-Blanc, A. (2008). Subduction, convergence and the mode of backarc extension in the Mediterranean region. *Bulletin de la Société géologique de France*, *179*(6), 525-550.

Kalaivanan, K., Gurugnanam, B., Pourghasemi, H. R., Suresh, M., & Kumaravel, S. (2018). Spatial assessment of groundwater quality using water quality index and hydrochemical indices in the Kodavanar sub-basin, Tamil Nadu, India. *Sustainable Water Resources Management*, *4*, 627-641.

Kanwar J.S. (1982): Managing soil ressources to meet the challenge to mankind. [Livre]. - [s.l.] : Presidential address of 12th Int. Congress of Soil Science, New Delhi, India. 8-16 February 1982. Plenary Session paper,, 1982. - pp. 1-32.

Karlen, D. PRODUCTIVITY. In Encyclopedia of Soils in the Environment; Hillel, D., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2005; pp. 330–336, ISBN 978-0-12-348530-4.

Karydas, C. G., Panagos, P., & Gitas, I. Z. (2014). A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, *7*(3), 229-250.

Keyrabi, D. & Monnier, C.G. (1968). Etude expérimentale de L'influence de La composition granulométrique des terres sur La stabilité structurale Ann. Agron. Vol. 19, no 2, pp. 129-152

Khali Issa L (2011) : La modélisation et la cartographie de l'érosion hydrique dans la région du Rif occidental (cas du bassin versant de l'oued Khmiss) [Rapport]. - [s.l.] : Thèse d'état. Faculté des sciences, p. 109, 2011.

Khatteli, H., Ramadan Ali, R., Bergametti, G., Bouet, C., Hachicha, M., Hamdi-Aissa, B., … Valentin, C. 2016. Sub-chapter 3.5.2. Soils and desertification in the Mediterranean region. In Moatti, J., & Thiébault, S. (Eds.), The Mediterranean region under climate change: A scientific update. IRD Éditions. doi:10.4000/books.irdeditions.23994.

Kiani-Harchegani, M., Talebi, A., & Kiani, S. (2021). Analysis of sheet erosion component variability on four complex hillslopes and consecutive storms under laboratory conditions. Hydrology Research, 52(4), 905-915.

Kikon, N., Singh, P., Singh, S. K., & Vyas, A. (2016). Assessment of urban heat islands (UHI) of Noida City, India using multi-temporal satellite data. *Sustainable Cities and Society*, *22*, 19-28.

Kim, J. B., Saunders, P., & Finn, J. T. (2005). Rapid assessment of soil erosion in the Rio Lempa Basin, Central America, using the universal soil loss equation and geographic information systems. Environmental Management, 36, 872-885.

Kim, J. P., & Guldmann, J. M. (2014). Land-use planning and the urban heat island. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *41*(6), 1077-1099.

Kim, K., & Jeong, Y. (1998). Hydrological variations of discharge, soil loss and recession coefficient in three small forested catchments. In *Environmental Forest Science: Proceedings of the IUFRO Division 8 Conference Environmental Forest Science, held 19–23 October 1998, Kyoto University, Japan* (pp. 431-438). Springer Netherlands.

Klik, A., Haas, K., Dvorackova, A., & Fuller, I. C. (2015). Spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in New Zealand. Soil Research, 53(7), 815-825.

Knisel, W. G., & Douglas-Mankin, K. R. (2012). CREAMS/GLEAMS: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 55(4), 1291-1302.

Korup, O., & Clague, J. J. (2009). Natural hazards, extreme events, and mountain topography. Quaternary Science Reviews, 28(11-12), 977-990.

Kruk, E., Klapa, P., Ryczek, M., & Ostrowski, K. (2020). Influence of DEM elaboration methods on the USLE model topographical factor parameter on steep slopes. *Remote Sensing*, *12*(21), 3540.

Kulikov, M., Schickhoff, U., & Borchardt, P. (2016). Spatial and seasonal dynamics of soil loss ratio in mountain rangelands of south-western Kyrgyzstan. Journal of Mountain Science, 13, 316-329.

La combe O., Jolivet L., Structural and kinematic relationships between Corsica and the Pyrenees- Provence domain at the time of the Pyrenean orogeny, Tectonics 24 (2005) TC1003 doi:10.1029/2004TC001673.

Lagacherie, P., Arrouays, D., Bourennane, H., Gomez, C., & Nkuba-Kasanda, L. (2020). Analysing the impact of soil spatial sampling on the performances of Digital Soil Mapping models and their evaluation: A numerical experiment on Quantile Random Forest using clay contents obtained from Vis-NIR-SWIR hyperspectral imagery. Geoderma, 375, 114503.

Lal, R. (1976). Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria: III. Effects of rainfall characteristics. Geoderma, 16(5), 389-401.

Landsat, N. A. S. A. (7). Science data users handbook. Availabe online http//landsathandbook. gsfc. nasa. gov/inst_cal/prog_sect8_2. html (7)(accessed 11 March 2011), 7AD.

Langhor R. (1990) - L'homme et les processus d'érosion des sols limoneux de Belgique et du nord-ouest de la France in Les celtes en France du Nord et en Belgique, VIe-Ier siècle avant J-C, Crédit Communal (Ed), 280p.

Laouina Abdellah. (1990) : Le Maroc nord-oriental, relief, modelés et dynamique du calcaire. [Livre]. - [s.l.] : Publication du rectorat de l'université Mohammed 1er, Oujda,, 1990. - Vol. 1 : p. 590.

Laouina, A. (2006). Prospective«maroc 2030»gestion durable des ressourcesnaturelles et de la biodiversite au maroc [rapport]. - [s.l.] : Haut-commissariatau plan, royaume du Maroc. Retrieved from https://www.hcp.ma/Gestion-durable-des-ressources-naturelles-et-de-la-biodiversite-au-Maroc_a845.html.

Lavabre, J., & Andreassian, V. (2000). La forêt: un outil de gestion des eaux?. *Forêt méditerranéenne*, *21*(2), 146-153.

Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Gleason, B. E., Williams, C. N., Wuertz, D. B., Vose, R. S., & Rennie, J. (2011). An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D19).

LCPC (2007) – Guide Technique – Portance des plates-formes : Mesure du module en continu par le Portancemètre**.**

LCPC, SETRA (1992) : Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule I : principes généraux. Guide technique, 98 p.

LCPC, SETRA (1992) : Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule II : annexes techniques. Guide technique, 102 p.

Le Bissonnais, Y. Y. (1988). Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies (pp. 216-p). Université d'Orléans.

Le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., & King, D. (2002). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. Catena, 46(2-3), 207-220.

Leborgne, P., & Weisrock, G. (1986). Rapport Général; Les lacs de retenue et leur gestion. Journées de l'hydraulique, 19(5), 1-9.

Lee, K. H., Isenhart, T. M., Schultz, R. C., & Mickelson, S. K. (1998). Nutrient and sediment removal by switchgrass and cool-season grass filter strips in Central Iowa, USA. *Agroforestry Systems*, *44*(2-3), 121-132.

Lefebvre, A., Guelorget, O., Perthuisot, J. P., & Dafir, J. E. (1997). Biogeological evolution of Nador lagoon(Morocco) over the 1982-1993 period. Oceanologica Acta, 20(2), 371-385.

Lefèvre, C., Balks, M., Nziguheba, G., & Poch, R. M. (2021). Guest editorial—Policies and practices in action to address soil erosion: A special issue from the Global Symposium on Soil Erosion 2019. Land Degradation & Development, 32(12), 3389-3392.

Li, S., Lobb, D. A., Lindstrom, M. J., & Farenhorst, A. (2007). Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using 137Cs technique and soil erosion models. Catena, 70(3), 493-505.

Li, S., Lobb, D. A., Lindstrom, M. J., & Farenhorst, A. (2008). Patterns of water and tillage erosion on topographically complex landscapes in the North American Great Plains. journal of soil and water conservation, 63(1), 37-46.

Li, X., Ding, J. L., Wang, G., Zhang, Z., Yan, X. Y., & Zeng, X. J. (2013). Study on the response of surface thermal environment to land use pattern changes in typical oasis of Turkmenistan. *Research of Soil and Water Conservation*, *20*(4), 200-202.

Li, X., Li, W., Middel, A., Harlan, S. L., Brazel, A. J., & Turner Ii, B. L. (2016). Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: Combined effects of land composition and configuration and cadastral–demographic–economic factors. *Remote Sensing of Environment*, *174*, 233-243.

Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., ... & Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. Remote sensing of environment, 131, 14-37.

Lin, Q., Steger, S., Pittore, M., Zhang, J., Wang, L., Jiang, T., & Wang, Y. (2022). Evaluation of potential changes in landslide susceptibility and landslide occurrence frequency in China under climate change. Science of the total environment, 850, 158049.

Liniger, H. & Critchley, W. (2007). Where the land is greener: Casestudies and analysis of soil and water conservation initiatives worldwide. CTA/CDE/FAO/UNEP/WOCAT.

Liu, B., Xie, Y., Li, Z., Liang, Y., Zhang, W., Fu, S., ... & Guo, Q. (2020). The assessment of soil loss by water erosion in China. International Soil and Water Conservation Research, 8(4), 430-439.

Liu, L., & Zhang, Y. (2011). Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong. *Remote sensing*, *3*(7), 1535-1552.

Lizaga, I., Quijano, L., Gaspar, L., & Navas, A. (2018). Estimating soil redistribution patterns with 137 C s measurements in a Mediterranean mountain catchment affected by land abandonment. Land Degradation & Development, 29(1), 105-117.

Lizaga, I., Quijano, L., Palazón, L., Gaspar, L., & Navas, A. (2018). Enhancing connectivity index to assess the effects of land use changes in a Mediterranean catchment. Land Degradation & Development, 29(3), 663-675.

Lobb, D. A., & Kachanoski, R. G. (1999). Modelling tillage erosion in the topographically complex landscapes of southwestern Ontario, Canada. *Soil and Tillage Research*, *51*(3-4), 261-277.

Lobb, D.A., McConkey, B.G. & Li, S. (2016). Soil erosion. Environmental sustainability of canadian agriculture, agri-environmental indicator report series, pp. 77–89. Agriculture; Agri-Food Canada, Ottawa, Ontario.

Long, F. (2013). Introduction to the resources status in China-Land resources. Jingchengnew. cn. http://www. jingchengw. cn/new/20130411/4927. htm. Accessed September, 9, 2014.

Loureiro, De Santos, N., & Coutinho, de Azevedo, M. (2001). A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. Journal of hydrology, 250(1-4), 12-18.

Lozano, I., Devoy, R. J. N., May, W., & Andersen, U. (2004). Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario. Marine geology, 210(1-4), 205-225.

Lufafa, A., Tenywa, M. M., Isabirye, M., Majaliwa, M. J. G., & Woomer, P. L. (2003). Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model. Agricultural systems, 76(3), 883-894.

Lyazidi, R., Hessane, M. A., Filali Moutei, J., Bahir, M., & Ouhamdouch, S. (2017). Système d'aide à la décision pour la gestion de la ressource en eau en zones semi-arides-Cas de l'aquifère Gareb-Bouareg (Rif, Maroc). Comunicaçõe Geológicas, 104.

Mabit, L., Laverdière, M. R., & Bernard, C. (2002). L'érosion hydrique: méthodes et études de cas dans le nord de la France. Cahiers agricultures, 11(3), 195-206.

MacDonald, D., Crabtree, J. R., Wiesinger, G., Dax, T., Stamou, N., Fleury, P., ... & Gibon, A. (2000). Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: environmental consequences and policy response. Journal of environmental management, 59(1), 47-69.

Mahjoubi, R., Kamel, S., El Moumni, B., Noack, Y., & Parron, C. (2003). Nature, origine et répartition de la phase argileuse de la lagune de Nador (Maroc nord oriental). Geologica belgica.

Mahmoodabadi, M., & Cerdà, A. (2013). WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. Geoderma, 204, 75-83.

Majhi, A., Shaw, R., Mallick, K., & Patel, P. P. (2021). Towards improved USLE-based soil erosion modelling in India: A review of prevalent pitfalls and implementation of exemplar methods. *Earth-Science Reviews*, *221*, 103786.

Mallet, C., & Michot, C. (2012). Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte. avec la collaboration de De la Torre Y, Lafon V, et Robin M, et Prevoteaux B (eds) Rapport BRGM/RP-60616-FR, 162.

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is statistically larger than the other.Ann.Math.Statist.,18,50-60.

Mansouri Cuccillato et Emanuele Farida (2005) : Expérience de l' application de la méthodologie PAP/RAC dans les gouvernorats de Kairouan, Siliana et Zaghouan dans le cadre du projet GCP/TUN/028/ITA [Rapport]. - Rome : Regional workshop to present PAP/RAC – FAO experiences in combating land degradation in Mediterranean coastal areas. ftp://ftp.fao.org/agl/agll/faopaprac, 2005.

Mansourian, S., & Berrahmouni, N. (2021). Review of forest and landscape restoration in Africa. Accra. FAO and AUDA-NEPAD. https://doi.org/10.4060/cb6111en.

Marçais, J., & Suter, G. (1966). Aperçu structural sur la région du Rif oriental. Notes et Mémoires du Service Géologique (Rabat), (198), 35-42.

Mariotti, A., Pan, Y., Zeng, N., Alessandri, A., 2015. Longterm climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. Clim. Dynam., 44:1437-1456.

Markham, B. L., and J. L. Barker. (1986). "Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectances and at-Satellite Temperatures." EOSAT Landsat Technical Notes 1: 3–8.

Martınez-Casasnovas, J. A., Ramos, M. C., & Ribes-Dasi, M. (2002). Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. Geoderma, 105(1-2), 125-140.

Matheron, G. (1989). The internal consistency of models in geostatistics. In Geostatistics: Proceedings of the Third International Geostatistics Congress September 5–9, 1988, Avignon, France (pp. 21-38). Springer Netherlands.

Maurer, G. (1959). Les pays rifains et prérifains. L'information Géographique, 23(4), 164-171.

McIvor, J. G., Williams, J., & Gardener, C. J. (1995). Pasture management influences runoff and soil movement in the semi-arid tropics. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *35*(1), 55-65.

MedECC. Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin—Current Situation and Risks for the Future; Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP: Marseille, France, 2020; p. 632.

Medejerab, A., & Henia, L. (2011). Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale.

Meinen, B. U., & Robinson, D. T. (2020). Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. *Remote Sensing of Environment*, *239*, 111666.

Mermut, A. R., & Eswaran, H. (2001). Some major developments in soil science since the mid-1960s. Geoderma, 100(3-4), 403-426.

Merritt, W. S., Croke, B. F. W., Jakeman, A. J., Letcher, R. A., & Perez, P. (2004). A biophysical toolbox for assessment and management of land and water resources in rural catchments in Northern Thailand. Ecological Modelling, 171(3), 279-300.

Mesrar Haytam (2016) : Modélisation, quantification et définition des facteurs qui contrôlent le risque de l'érosion hydrique. Cas du bassin versant de l'oued Sahla, Rif central, Maroc. [Livre]. - thèse de doctorat en Géologie, de l'Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Faculté des sciences Dhar El Mahraz, Fès: 71, 2016.

Mesrar, H., Sadiki, A., & Jabrane, R. (2013). Le risque de l'érosion hydrique." Etude et modélisation": Cas de la partie aval du bassin versant de l'Oued Amzaz (Rif, Maroc). Éditions universitaires européennes.

Mesrar, H., Sadiki, A., Navas, A., Faleh, A., Quijano, L., & Chaaouan, J. (2015). Soil erosion and causal factors modeling, case of the Sahla catchment, Central Rif, Morocco. *Zeitschrift für Geomorphologie*, *59*(4), 495-514.

Mesrar, H., Sadiki, A., Navas, A., Faleh, A., Quijano, L., & Chaaouan, J. (2015). Soil erosion and causal factors modeling, case of the Sahla catchment, Central Rif, Morocco. *Zeitschrift für Geomorphologie*, *59*(4), 495-514.

Meyer, L. D., Dabney, S. M., & Harmon, W. C. (1995). Sediment-trapping effectiveness of stiff-grass hedges. *Transactions of the ASAE*, *38*(3), 809-815.

Meylan, P., Favre, A. C., & Musy, A. (2012). Predictive hydrology: a frequency analysis approach. CRC Press.

Michard A., Chalouan A., Feinberg H., Goff´e B., Montigny R., How does the Alpine belt end between Spain and Morocco? Bull. Soc. G´eol. Fr. 173 (2002) 3–15.

Michard André. (1976) : Éléments de géologie marocaine. Notes & Mém. Serv. Géo Mar. n°252, 408p. [Rapport]. - 1976.

Michard, A., Hœpffner, C., Soulaimani, A., & Baidder, L., (2008). The variscan belt. In Continental evolution: The geology of Morocco. Springer Berlin Heidelberg, 65-132.

Michard, A., Negro, F., Saddiqi, O., Bouybaouene, M. L., Chalouan, A., Montigny, R., & Goffé, B. (2006). Pressure–temperature–time constraints on the Maghrebide mountain building: evidence from the Rif–Betic transect (Morocco, Spain), Algerian correlations, and geodynamic implications. *Comptes Rendus Geoscience*, *338*(1-2), 92-114.

Mitasova, H., Barton, C. M., Ullah, I., Hofierka, J., & Harmon, R. S. (2013). GIS-based soil erosion modeling. In Remote Sensing and GIScience in Geomorphology (pp. 228-258). Elsevier Inc.

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., & Iverson, L. R. (1996). Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. International journal of geographical information systems, 10(5), 629-641

Moatti, Jean-Paul (ed.) ; THIÉBAULT, Stéphane (ed.). The Mediterranean region under climate change: A scientific update. New edition [online]. Marseille: IRD Éditions, 2016 (generated 16 septembre 2022). Available on the Internet: <http://books.openedition.org/irdeditions/22908>. ISBN: 9782709922203. DOI: https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.22908.

Mokhtari, R. Mrabet, P. Lebailly, L. Bock(2014) : Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc [Rapport].-[s.l.]: Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. (2014) 2 (1):50-66, 2013.

Montanarella, L., & Rusco, E. (2008). Threats to soil quality in Europe (p. 151). G. Tóth (Ed.). Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, V., Baptista Costa, I. D. S., Mamo, T., Yemefack, M., ... & McKenzie, N. (2015). Status of the world's soil resources Main Report.

Moore I.D.et Wilson J.P. (1992) : Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. [Livre]. - [s.l.] : Journal of Soil and Water Conservation,, 1992. - Vol. 47 : 5 : pp. 423-428.

Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. Soil Science Society of America Journal, 50(5), 1294-1298.

Morel JL (1985) Les évenements tectoniques et volcaniques responsable de la régression messinienne dans le Maroc septentrional: example du bassin d'Iddouyine (Segangane—Rif oriental—Maroc) (Tectonic and volcanic events responsable of Messinien regression) in septentrional Morocco: example of bassin Iddouyine(Segangane—eastern Rif—Morocco). Instit Sci Bull 9:97–106.

Morel, A. (1988). Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters). *Journal of geophysical research: oceans*, *93*(C9), 10749-10768.

Morgan, R. P. C., & Duzant, J. H. (2008). Modified MMF (Morgan–Morgan–Finney) model for evaluating effects of crops and vegetation cover on soil erosion. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 33(1), 90-106.

Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., ... & Styczen, M. E. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group, 23(6), 527-544.

Morgan, R. P., & Quinton, J. N. (2001). Erosion modeling. *Landscape erosion and evolution modeling*, 117-143.

Morgan. (2005). soil erosion and conservation, third edition [Rapport]. - [s.l.] : National Soil Resources Institute, Cranfield University, 2005.

Morschel, J., Fox, D. M., & Bruno, J. F. (2004). Limiting sediment deposition on roadways: topographic controls on vulnerable roads and cost analysis of planting grass buffer strips. Environmental Science & Policy, 7(1), 39-45.

Morton, R. A. (1979). Temporal and spatial variations in shoreline changes and their implications, examples from the Texas Gulf Coast. Journal of Sedimentary Research, 49(4), 1101-1111.

Moussa, R., & Bocquillon, C. (1993). Morphologie fractale du réseau hydrographique. *Hydrological sciences journal*, *38*(3), 187-201.

Musy, A., & Higy, C. (2010). Hydrological regimes. In *Hydrology* (pp. 291-294). CRC Press.

Naipal, V., Reick, C., Pongratz, J., & Van Oost, K. (2015). Improving the global applicability of the RUSLE model–adjustment of the topographical and rainfall erosivity factors. Geoscientific Model Development, 8(9), 2893-2913.

Narmatha, T., Jeyaseelan, A., Mohan, S. P., Mahalingam, S., & Natchimuthu, S. (2013). Morphometric analysis of upper part of Pambar watershed, Ponnaiyar river basin, Tamil Nadu, India using Geographical Information System. *Journal of Academia and Industrial Research*, *1*(11), 726-729.

Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkner, S. C. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. Transactions of the ASAE, 32(5), 1587-1593.

Negro, F., Agard, P., Goffé, B., & Saddiqi, O. (2007). Tectonic and metamorphic evolution of the Temsamane units, External Rif (northern Morocco): implications for the evolution of the Rif and the Betic–Rif arc. *Journal of the Geological Society*, *164*(4), 829-842.

Neumann, H., de Boois, I., Kröncke, I., & Reiss, H. (2013). Climate change facilitated range expansion of the non-native angular crab Goneplax rhomboides into the North Sea. Marine Ecology Progress Series, 484, 143-153.

O'Loughlin, C. L., & Zhang, X. B. (1986, September). The influence of fast-growing conifer plantations on shallow landsliding and earthflow movement in New Zealand steeplands. In *18th IUFRO World Congress, Ljubljana (Yugoslavia), IUFRO*.

O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, *28*(3), 323-344.

Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J. A., & Boll, J. (2015). Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of southern Ecuador. Land degradation & development, 26(6), 565-573.

Oguz, H. (2013). LST calculator: A program for retrieving land surface temperature from Landsat TM/ETM+ imagery. *Environmental Engineering and Management Journal*, *12*(3), 549-555.

Olivier, P. (1984). Evolution de la limite entre Zones Internes et Zones Externes dans l'Arc de Gibraltar (Maroc-Espagne). Université Paul Sabatier, Toulouse.

Padilla, C., Onda, Y., Iida, T., Takahashi, S., & Uchida, T. (2014). Characterization of the groundwater response to rainfall on a hillslope with fractured bedrock by creep deformation and its implication for the generation of deep-seated landslides on Mt. Wanitsuka, Kyushu Island. Geomorphology, 204, 444-458.

Pal, S. C., & Chakrabortty, R. (2019). Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic model. Advances in Space Research, 64(2), 352-377.

Pal, S., & Ziaul, S. K. (2017). Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *20*(1), 125-145.

PAM/PNUE (2000) : Formulation et mise en oeuvre des projets du PAC: Guide pratique [Rapport]. - Athènes-Split. : CAR/PAP-PAM, 2000.

Pan, J., & Wen, Y. (2014). Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China. Natural Hazards, 71, 2187-2205.

Panagos, P., Ballabio, C., Poesen, J., Lugato, E., Scarpa, S., Montanarella, L., & Borrelli, P. (2020). A soil erosion indicator for supporting agricultural, environmental and climate policies in the European Union. Remote Sensing, 12(9), 1365.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Van Der Zanden, E. H., Poesen, J., & Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. Environmental science & policy, 51, 23-34.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Jae Lim, K., ... & Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific reports*, *7*(1), 1-12.

Pandey, A., Himanshu, S. K., Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*, *147*, 595-620.

Panov, D. Y., & Feodosiev, V. I. (1948). On the equilibrium and loss of stability of shallow shells in the case of large displacement. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, *12*, 389-406.

PAP/CAR (1989). Rapport de la Réunion d'experts sur la mise en oeuvre du Projet pilote de cartographie et de mesure de l'érosion dans les zones côtières méditerranéennes, [Rapport]. - Malaga : PAP-8/EM.8/1., 1989.

PAP/CAR (1992). Rapport du Séminaire sur les résultats du Sous-projet de cartographie des processus érosifs dans les zones côtières méditerranéennes [Rapport]. - Malaga : PAP-8/PP/SM.1/8., 1992.

PAP/CAR (1996). Rapport de l'Atelier sur les "Lignes directrices pour l'application d'une méthodologie commune et consolidée de cartographie des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes" et les "Lignes directrices pour la mesure des processu [Rapport]. - Barcelone : PAP-8/PP/W.2/1, 1996.

PAP/RAC (1997). Report of the Training Course on Mapping of Erosion Processes in Mediterranean Coastal Areas [Rapport]. - Murcia : PAP-8/PP/TC.1/1, 1997.

PAP/CAR (1998). Rapport de l'Atelier sur l'état de l'érosion des sols par la pluie dans les zones côtières méditerranéennes, [Rapport]. - Murcie : PAP-8/W.1/1, 1998.

PAP/CAR (1998a). Directives pour l'approche intégrée au développement, à la gestion et à l'utilisation des ressources en eau. PAP-3/1998/G.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires [Rapport]. - [s.l.] : PAP-3/1998/G.1. Split,, 1998a.

PAP/RAC (2000). National reports on problems and practices of erosion control management in the Mediterranean region [Rapport]. - [s.l.] : PAP/RAC, Split, 2000.

Paquet, H. (1970). Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux a saisons contrastées (Vol. 30, No. 1). Persée-Portail des revues scientifiques en SHS.

Parinussa, R. M., Holmes, T. R. H., Yilmaz, M. T., & Crow, W. T. (2011). The impact of land surface temperature on soil moisture anomaly detection from passive microwave observations. Hydrology and Earth System Sciences, 15(10), 3135-3151.

Paroissien, J. B., Lagacherie, P., & Le Bissonnais, Y. (2010). A regional-scale study of multi-decennial erosion of vineyard fields using vine-stock unearthing–burying measurements. Catena, 82(3), 159-168.

Parriaux, A., Bonnard, C., & Tacher, L. (2010). Glissements de terrain: hydrogéologie et techniques d'assainissement par drainage. Guide pratique: τffice fédéral de l'environnement Connaissance de l'environnement, 1023, 128.

Paul-Hus, A., Bouvier, R. L., Ni, C., Sugimoto, C. R., Pislyakov, V., & Larivière, V. (2015). Forty years of gender disparities in Russian science: A historical bibliometric analysis. *Scientometrics*, *102*, 1541-1553.

Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. Global ecology and biogeography, 12(5), 361-371.

Peterson, T. C., Easterling, D. R., Karl, T. R., Groisman, P., Nicholls, N., Plummer, N., ... & Parker, D. (1998). Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 18(13), 1493-1517.

Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, *28*(2), 126-135.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., ... & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, *267*(5201), 1117-1123.

PNUE/PAM/PAP (2000) : Directives pour la gestion de programmes de contrôle d'érosion et de désertification plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes. Split, Programme d'actions prioritaires. [Livre]. - 2000.

Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. Earth Surface Processes and Landforms, 43(1), 64-84.

Poesen, J., & Bryan, R. B. (1989). Influence de la longueur de pente sur le ruissellement: rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation. Cahier ORSTOM-Série Pédologie, (1), 71-80.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, *50*(2-4), 91-133.

Poncet, A. (1995). Restauration et conservation des terrains en montagne, Office national des forêts, Paris, France.

Portet, F., Noel, O., Nicaise, S., Portillo, C., & Vermeulen, M. (2011). La classification des sols. Aix en provence, 36p.

Potić, I., Bugarski, M., & Matić-Varenica, J. (2017, March). Soil moisture determination using remote sensing data for the property protection and increase of agriculture production. In Worldbank conference on land and poverty", The World Bank, Washington DC.

Pouquet J. (1951) - L'érosion. Collection Que sais-je ? Presses Universitaires de France, Paris.

Proffitt, A. P. B., Rose, C. W., & Hairsine, P. B. (1991). Rainfall detachment and deposition: Experiments with low slopes and significant water depths. Soil Science Society of America Journal, 55(2), 325-332.

Pu, R., Gong, P., Michishita, R., & Sasagawa, T. (2006). Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval. *Remote Sensing of Environment*, *104*(2), 211-225.

Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*, *22*(18), 3719-3746.

Qiu, X., Mao, Q., Tang, Y., Wang, L., Chawla, R., Pliner, H. A., & Trapnell, C. (2017). Reversed graph embedding resolves complex single-cell trajectories. *Nature methods*, 14(10), 979-982.

Quan, J., Chen, Y., Zhan, W., Wang, J., Voogt, J., & Wang, M. (2014). Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment*, *149*, 33-46.

Quattrochi, D. A., & Luvall, J. C. (1999). Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications. *Landscape ecology*, *14*, 577-598.

Quijano, L., Gaspar, L., & Navas, A. (2016b). Lateral and depth patterns of soil organic carbon fractions in a mountain Mediterranean agrosystem. The Journal of Agricultural Science, 154(2), 287-304.

Rabia, A. H. (2012, June). Mapping soil erosion risk using RUSLE, GIS and remote sensing techniques. In The 4th international congress of ECSSS, EUROSOIL, Bari, Italy (pp. 1-15).

Rafla Attia, Agrébaoui Sadok, Hamrouni Hédi (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 l'Oued Rmel [Section du livre] / auteur du livre Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques Direction Générale de l'Aménagement et la Conservation des Terres Agricoles, Direction des Ressources en Sols. - Tunisie : [s.n.], 2005.

Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., & Mishra, V. N. (2017). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, *7*, 217-232.

Raissouni A. (2012) : Modélisation et cartographie de la sensibilité et de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale par SIG et USLE (Rif Nord occidental, Maroc). [Rapport]. - [s.l.] : Thèse de Doctorat ès Sciences, Fac. Sci. Tech. Tanger, Maroc, 205p., 2012.

Rango et Arnoldus (1987) : Aménagement des bassins versants. [Livre]. - [s.l.] : Cahiers techniques de la FAO. , 1987.

Reich, P. F., Numbem, S. T., Almaraz, R. A., & Eswaran, H. (2019). Land resource stresses and desertification in Africa. In Response to land degradation (pp. 101-116). CRC Press.

Remaître, A., Maquaire, O., & Pierre, S. (2002). Analyse d'une lave torrentielle dans le torrent de Faucon (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence). Détermination des zones de déclenchement et de contribution. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 8(1), 71-84.

Renard KG., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool DK (1996): Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Agric. Handbook [Livre]. - [s.l.] : US Govt Print Office, Washington, DC, 1996.

Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Government Printing.

Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of hydrology, 157(1-4), 287-306.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. Journal of soil and Water Conservation, 46(1), 30-33.

Renard, K.G., Laflen, J. M., Foster, G. R., & McCool, D. K. (2017). The revised universal soil loss equation. In *Soil erosion research methods* (pp. 105-126). Routledge.

Rey, F., Ballais, J. L., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes rendus géoscience*, *336*(11), 991-998.

RGPH (2014) : Institut National de la Statistique. (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014 (RGPH 2014).

Rhazi, M. E., & Hayashi, K. I. (2002). Mineralogy, geochemistry, and age constraints on the Beni Bou Ifrour skarn type magnetite deposit, northeastern Morocco. *Resource Geology*, *52*(1), 25-39.

Richard, D., & Mathys, N. (1999). Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi. In *Les bassins versants expérimentaux de Draix laboratoire d'étude de l'érosion en montagne-actes du séminaire, Draix Le Brusquet Digne, 22-24 octobre 1997* (pp. 11-28). Cemagref Editions.

Richter, R. (1996). A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(6), 1201-1214.

Roche M., 1963. Hydrologie de surface. Edition Gauthier-Villars et ORSTOM, Paris.

Rodrigo Comino, J., Iserloh, T., Morvan, X., Malam Issa, O., Naisse, C., Keesstra, S. D., ... & Ries, J. B. (2016). Soil erosion processes in European vineyards: a qualitative comparison of rainfall simulation measurements in Germany, Spain and France. *Hydrology*, 3(1), 6.

Romanyà, J., & Rovira, P. (2011). An appraisal of soil organic C content in Mediterranean agricultural soils. Soil Use and Management, 27(3), 321-332.

Roose Eric (2010) : Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). [Livre]. - [s.l.] : Service des sols - ressources, aménagement et conservation. Division de la mise en valeur des terres et des eaux, FAO. ISBN 92-5-203451-X, 2010.

Roose, É. (2004). Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive--Vers la gestion conservatoire de l 'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Science et changements planétaires/Sécheresse, 15(1), 9-18.

Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., & Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature, 421(6918), 57-60.

Rouchy, J. M., & Martin, J. P. S. (1992). Late Miocene events in the Mediterranean as recorded by carbonate-evaporice relations. *Geology*, *20*(7), 629-632.

Rounsevell, M.D.A., Loveland, P.J., Mayr, T.R., Armstrong, A.C., de la Rosa, D., Legros, J-P., Simota, C., Sobczuk, H. (1996). ACCESS: a spatially-distributed, soil water and crop development model for climate change research. In: (R.J. Froud-Williams, R. Harrington, T.J. Hocking, H.G. Smith, T.H. Thomas, eds.). Implications of global environmental change for crops in Europe . Aspects of Applied Biology No. 45., pp. 85-92. ISSN 0265-1491.

Rouse, J. W. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. *NASA/GSFC, type III, final report, greenbelt, MD*, *371*.

Rovéra, G., Robert, Y., Coubat, M., & Nedjaï, R. (1999). Erosion et stades biorhexistasiques dans les ravines du Saignon (Alpes de Provence). Essai de modélisation statistique des vitesses d'érosion sur marnes. *Etudes de géographie physique*, (28), 109-115.

Sadeghi, S. H. R., Saeidi, P., Singh, V. P. & Telvari, A. R. (2019). How persistent are hysteresis patterns between suspended sediment concentration and discharge at different timescales? Hydrological Sciences Journal 64 (15), 1909–1917.

Sadiki .A, Mesrar .H, Faleh .A, Chaouan .J. (2012). Modélisation et cartographie des risques de l'erosion hydrique: cas du bassin versant de l'oued larbaa, maroc [Revue] // Papeles de Geografía. - 2012. - pp. 55-56, pp. 179-188.

Sadiki Abdelhamid (2005) : Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de Boussouab, Maroc nord oriental : Application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope 137Cs et de la susceptibilité magnétique. [Livre]. - thèse de doctorat d'état en Géologie, de l'Université Med Premier, Faculté des sciences Oujda: 96, 2005.

Sadiki Abdelhamid, Saïdati Bouhlassa, Jamal Auajjar, Ali Faleh, Jean-Jacques Macaire (2004) : Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab [Revue] // Bulletin n°26 de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre. - 2004. - pp. 69-79.

Sadiki, A., Faleh, A., Navas, A., & Bouhlassa, S. (2007). Assessing soil erosion and control factors by the radiometric technique in the Boussouab catchment, Eastern Rif, Morocco. Catena, 71(1), 13-20.

Sadiki, A., Faleh, A., Navas, A., & Bouhlassa, S. (2009). Using magnetic susceptibility to assess soil degradation in the Eastern Rif, Morocco. *Earth Surface Processes and Landforms*, *34*(15), 2057-2069.

Sahana, M., Ahmed, R., & Sajjad, H. (2016). Analyzing land surface temperature distribution in response to land use/land cover change using split window algorithm and spectral radiance model in Sundarban Biosphere Reserve, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, *2*, 1-11.

Sánchez-Arcilla, A., González-Marco, D., & Bolaños, R. (2008). A review of wave climate and prediction along the Spanish Mediterranean coast. Natural hazards and earth system sciences, 8(6), 1217-1228.

Santos, R., Silva, J., Alexandre, A., Navarro, N., Barrón, C., & Duarte, C. M. (2004). Ecosystem metabolism and carbon fluxes of a tidally-dominated coastal lagoon. Estuaries, 27(6), 977-985.

Schaeffner, M., Morel, G., & Quibel, A. (1992). Présentation du nouveau guide technique: Réalisation des remblais et des couches de forme. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (182).

Schmidt, J., Werner, M. V., & Michael, A. (1999). Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. Catena, 37(3-4), 449-456.

Schmitt, L. K. (2009). Developing and applying a soil erosion model in a data-poor context to an island in the rural Philippines. Environment, development and sustainability, 11, 19-42.

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, *67*(5), 597-646.

Scott, K. M., & Yuyi, W. (2004). Debris flows: geologic process and hazard, illustrated by a surge sequence at Jiangjia Ravine, Yunnan, China. US Department of the Interior, US Geological Survey.

SDAR (2015) : Etude de faisabilité de La mise en place d'une démarche intégrée de développement de l'écotourisme dans les provinces de Nador, Berkane et Driouch. Projet FEM/Banque Mondiale « Gestion Intégrée des Zones Côtières/ Côtes Méditerranéennes- région de l'Oriental. Rapport final de la première phase.

Selby, M. J. (1982). Controls on the stability and inclinations of hillslopes formed on hard rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7(5), 449-467.

Sétra-LCPC (2000) - Guide technique - Réalisation des remblais et des couches de forme Fascicule 1 : principes généraux et Fascicule 2 : annexes techniques (GTR).

Shafia, A., Nimish, G., & Bharath, H. A. (2018, April). Dynamics of Land Surface Temperature with Changing Land-Use: Building a Climate ResilientSmart City. In *2018 3rd International conference for convergence in technology (I2CT)* (pp. 1-5). IEEE.

Shamshad, A., Azhari, M. N., Isa, M. A., Hussin, W. W., & Parida, B. P. (2008). Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. Catena, 72(3), 423-432.

Shamsi, U. M. S. (2008). Arc hydro: a framework for integrating GIS and hydrology. Journal of Water Management Modeling.

Sholagberu, A. T., Ul Mustafa, M. R., Wan Yusof, K., and Ahmad, M. H: Evaluation of rainfall-runoff erosivity factor for Cameron highlands, Pahang, Malaysia. J. Ecol. Eng., 17(3), 1–8. https://doi.org/10.12911/22998993/63338, 2016.

Simonneaux, V., Cheggour, A., Deschamps, C., Mouillot, F., Cerdan, O., & Le Bissonnais, Y. (2015). Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco). Journal of Arid Environments, 122, 64-75.

Sivakumar, M. V., & Stefanski, R. (2007). Climate and land degradation—an overview (pp. 105-135). Springer Berlin Heidelberg.

Skea, J., Shukla, P., & Kılkış, Ş. (2022). Climate change 2022: mitigation of climate change.

Skokovic, D., Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., Soria, G., Julien, Y., Mattar, C., & Cristóbal, J. (2014). Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat 8–TIRS Sensor. *Land product validation and evolution, ESA/ESRIN Frascati (Italy)*, *6*(9), 28-30.

Small, C. (2003). High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. *Remote sensing of environment*, *88*(1-2), 170-186.

Smeeckaert, J., Mallet, C., David, N., Chehata, N., & Ferraz, A. (2013). Large-scale classification of water areas using airborne topographic lidar data. Remote sensing of environment, 138, 134-148.

Smith, H. J. (1999). Application of empirical soil loss models in southern Africa: A review. South African Journal of Plant and Soil, 16(3), 158-163.

Smith, J.R. 1914. Soil erosion and its remedy by terracing and tree planting. Science 39 (1015), 858-862.

Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International journal of remote sensing*, *21*(2), 353-366.

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, *90*(4), 434-440.

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Balick, L., Gillespie, A. R., Sabol, D. A., & Gustafson, W. T. (2007). Accuracy of ASTER level-2 thermal-infrared standard products of an agricultural area in Spain. *Remote Sensing of Environment*, *106*(2), 146-153.

Sobrino, J., Coll, C., & Caselles, V. (1991). Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5. *Remote sensing of environment*, *38*(1), 19-34.

Stefanidis, S., & Stathis, D. (2018). Effect of climate change on soil erosion in a mountainous mediterranean catchment (Central Pindus, Greece). Water, 10(10), 1469.

Stevens, J. (1982). Unified soil classification system. Civil Engineering—ASCE, 52(12), 61-62.

Stolte, J., Tesfai, M., Oygarden, L., Kvaerno, S., Keizer, J., Verheijen, F., ... & Hessel, R. (2016). Soil threats in Europe: status, methods, drivers and effects on ecosystem services: deliverable 2.1 RECARE project. European Commission DG Joint Research Centre.

Stott, T. (1997). A comparison of stream bank erosion processes on forested and moorland streams in the Balquhidder catchments, central Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, *22*(4), 383-399.

Strahler, A. N. (1950). Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis; Part 1. *American Journal of Science*, *248*(10), 673-696.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *38*(6), 913-920.

Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. *Handbook of applied hydrology*.

Streutker, D. R. (2002). A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, *23*(13), 2595-2608.

Suna, S., Tamer, C. E., Inceday, B., Sinir, G. Ö., & Çopur, Ö. U. (2014). Impact of drying methods on physicochemical and sensory properties of apricot pestil.

Sundborg, Å., & Rapp, A. (1986). Erosion and sedimentation by water: problems and prospects. Ambio, 215-225.

Suter G. (1980) : Carte géologique/structurale de la chaîne rifaine, échelle 1:500,000. [Livre]. - [s.l.] : Serv. Carte géol. Maroc, 1980. - Vol. 245.

Swanson, F. J., Gregory, S. V., Sedell, J. R., & Campbell, A. G. (1982). Land-water interactions: the riparian zone.

Symeonakis, E., Calvo-Cases, A., & Arnau-Rosalen, E. (2007). Land use change and land degradation in southeastern Mediterranean Spain. Environmental management, 40, 80-94.

Szczypta, C. (2012). Hydrologie spatiale pour le suivi des sècheresses du bassin méditerranéen. Thèse de doctorat : Institut National Polytechnique de Toulouse (France).

Tahouri et al. (2019). "GLOBAL SYMPOSIUM ON SOIL EROSION | FAO HQ | Rome , Italy , 15-17 May 2019 Using PAP / RAC Mod ***EI-Swaify*** and GIS Tools for Mapping and Study of Water Erosion Processes in the Mediterranean Environment : Case of the Asfalou Watershed (Oriental Rif , Morocco) I ." 2(May): 15–17.

Tahouri, J. (2014). Utilisation du modèle PAP/CAR pour la cartographie des processus d'érosion hydrique en milieu Méditerranéen : Cas du bassin versant de l'Oued Asfalou, Mémoire de licence (Géologie), Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz.

Tahouri, J., Karrat, L. and Mesrar, H. (2016) Utilisation du modèle PAP/RAC et des outils SIG pour la cartographie et l'evaluation des processus d'érosion hydrique en milieu méditerranéen cas du bassin versant de l'oued Asfalou-Maroc. https://www.academia.edu/22181609/.

Tahouri, J., Sadiki, A., Karrat, L. H., Johnson, V. C., weng Chan, N., 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*(2), 254-272.

Tan, K. C., Lim, H. S., MatJafri, M. Z., & Abdullah, K. (2010). Landsat data to evaluate urban expansion and determine land use/land cover changes in Penang Island, Malaysia. Environmental Earth Sciences, 60, 1509-1521.

Tchouani Nana J.M., avril 1999 et M.a.j. par M. Callaud, décembre 2004. Cours de mécanique des sols 1, Tome 1. Propriétés des sols.

Tebbs, E. J., Remedios, J. J., Avery, S. T., & Harper, D. M. (2013). Remote sensing the hydrological variability of Tanzania's Lake Natron, a vital Lesser Flamingo breeding site under threat. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *13*(2), 148-158.

Tejada, M., & Gonzalez, J. L. (2006). Crushed cotton gin compost on soil biological properties and rice yield. European journal of Agronomy, 25(1), 22-29.

Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R., & Iaquinta, P. (2009). Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: an application model for Calabria (southern Italy). Geomorphology, 112(3-4), 228-245.

Thiessen, A. H., & Alter, J. C. (1911). District no. 10, great basin. Monthly Weather Review, 39(7), 1082-1082.

Thorne, K., Markharn, B., Barker, P. S., & Biggar, S. J. P. E. (1997). Radiometric calibration of Landsat. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63(7), 853-858.

Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F. G., Wanner, H., & Luterbacher, J. (2010). Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(5), 1037-1050.

Torri, D., Sfalanga, M., & Del Sette, M. (1987). Splash detachment: runoff depth and soil cohesion. Catena, 14(1-3), 149-155.

Tribak, A., (2006) ; impacts des phénomènes pluviométriques exceptionnels sur les milieux montagnards marocains : cas du Prérif oriental, Actes du XIX colloque de l'association internationale de climatologie « les risques liés au temps et au climat »Epernay Septembre,2006 pp :526 – 531.

Tuomenvirta, H. (2002). Homogeneity testing and adjustment of climatic time series in Finland. Geophysica, 38(1-2), 15-41.

United Nations (UN). 2002. Global environement outlouk GEO 3.[Enligne].http://www.unep.org/geo/ge03/french/index.htm. Page consultée le 20 Janvier 2009.

Vaezi, A. R., Zarrinabadi, E., & Auerswald, K. (2017). Interaction of land use, slope gradient and rain sequence on runoff and soil loss from weakly aggregated semi-arid soils. *Soil and Tillage Research*, *172*, 22-31.

Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. Catena, 63(2-3), 132-153.

Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk: assessment in Europe.

Van Leeuwen, J. P., Lehtinen, T., Lair, G. J., Bloem, J., Hemerik, L., Ragnarsdóttir, K. V., ... & de Ruiter, P. C. (2014). An ecosystem approach to assess soil quality in organically and conventionally managed farms in Iceland and Austria. The Soil, 1, 201-237.

Van Oost, K., Cerdan, O., & Quine, T. A. (2009). Accelerated sediment fluxes by water and tillage erosion on European agricultural land. Earth Surface Processes and Landforms, 34(12), 1625-1634.

Vezole, P. (2002). Prise en compte des vides de dissolution de gypse dans les projets de construction. Revue française de géotechnique, (100), 71-74.

Vrieling, A. (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, *65*(1), 2-18.

Wackernagel, H. (2003). Multivariate Geostatistics, : An Introduction with Applications, [Revue] // Springer-Verlag, Berlin. - [s.l.] : Springer, 2003. - Vol. 3. - p. 387.

Walawender, J. P., Szymanowski, M., Hajto, M. J., & Bokwa, A. (2014). Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Krakow (Poland) derived from Landsat-7/ETM+ data. Pure and Applied Geophysics, 171, 913-940.

Walkley, A. and Black, I.A. (1934) An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Science, 37, 29-38. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.

Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., & Li, Z. L. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote sensing of Environment*, *83*(1-2), 163-180.

Wang, G., Gertner, G., Liu, X., & Anderson, A. (2001). Uncertainty assessment of soil erodibility factor for revised universal soil loss equation. *Catena*, *46*(1), 1-14.

Wang, M., Meng, H., & Bai, Y. (2013). Relationships between landscapes spa- tial pattern and surface temperature in shanghai. Ecology and Environmental Sciences 25(2):343–350 (in Chinese).

Wang, M., Zhang, Z., Hu, T., & Liu, X. (2019). A practical single-channel algorithm for land surface temperature retrieval: application to Landsat series data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(1), 299-316.

Wei, J., Zhao, Z., Xu, C., & Wen, Q. (2019). Numerical investigation of landslide kinetics for the recent Mabian landslide (Sichuan, China). Landslides, 16, 2287-2298.

Weigand, M., Staab, J., Wurm, M., & Taubenböck, H. (2020). Spatial and semantic effects of LUCAS samples on fully automated land use/land cover classification in high-resolution Sentinel-2 data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 88, 102065.

Weng, Q. (2003). Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, *69*(5), 555-566.

Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, *89*(4), 467-483.

Wernli, R. (1988). Micropaléontologie du Néogène post-nappes du Maroc septentrional et description systématique des foraminifères planctoniques. Notes et Mémoires du Service géologique, (331).

White, J. L., & Greenman, C. (2008). Collapsible soils in Colorado. Colorado Geological Survey Publications.

Wildi, W. (1983). La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, *24*(3), 201-297.

Williams, J. R., & Berndt, H. D. (1977). Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the ASAE, 20(6), 1100-1104.

Williams, J. R., Renard, K. G., & Dyke, P. T. (1983). A new method for assessing erosion's effects on soil productivity. Journal of Soil and Water Conservation, 38(1), 381-383.

Wischmeier W.H. & Smith D.D. (1965). Prediction rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains : a guide for selection of practices for soil and water conservation. U.S. Dept Agriculture. Agric. Handbook 282.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., & Cross, B. V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. (1971): 189-193.

Woolhiser, D. A., Smith, R. E., & Goodrich, D. C. (1990). KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual.

World Meteorological Organization WMO (2022). Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion:, GAW Report No. 278, 56 pp.; WMO: Geneva, 2022.

WRI, (2005). Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Well-Being: Desertification Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.

Xiao, Z., Xu, C., Huang, Y., He, X., Shao, X., Chen, Z., ... & Xu, X. (2023). Analysis of spatial distribution of landslides triggered by the Ms 6.8 Luding earthquake in China on September 5, 2022. *Geoenvironmental Disasters*, 10(1), 3.

Xiong, M., Sun, R., & Chen, L. (2019). Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, *43*(3), 391-409.

Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International journal of remote sensing*, *29*(14), 4269-4276.

Yahiaoui A (2012) Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès). Ph.D Dissertation, École Nationale Polytechnique.

Yahyaoui, A. M., Dakki, M., Hoepffner, C., & Demnati, A. (1997). Le bassin du Gareb-Bou Areg (Rif oriental): une région-clé pour l'interprétation de la structuration alpine de la chaîne rifaine. Géologie Méditerranéenne, 24(1), 73-92.

Yin, S., Nearing, M. A., Borrelli, P., & Xue, X. (2017). Rainfall erosivity: An overview of methodologies and applications. *Vadose Zone Journal*, *16*(12), 1-16.

Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., & Anderson, W. P. (1989). AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. Journal of soil and water conservation, 44(2), 168-173.

Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote sensing*, *6*(10), 9829-9852.

Zachar, D. (1982). *Soil erosion*. Developments in soil science. Elsevier Scientific.

Zaher, H., Zouhri, M., Benjelloun, H., Chikhaoui, M., Naimi, M., & Sabir, M. (2021). Impact du changement de l'occupation des sols sur l'érosion hydrique et le comportement hydrologique des sols: Cas du bassin Tleta au nord-ouest du Maroc. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 9(4), 643-650.

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing*, *24*(3), 583-594.

Zhang, F., Tiyip, T., Johnson, V. C., Kung, H. T., Ding, J. L., Sun, Q., ... & Chan, N. W. (2015). The influence of natural and human factors in the shrinking of the Ebinur Lake, Xinjiang, China, during the 1972–2013 period. *Environmental monitoring and assessment*, *187*, 1-14.

Zhang, L., Xiao, T., He, J., & Chen, C. (2019). Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River, China, in 2018. Landslides, 16, 1965-1979.

Zhang, N., Xing-Dong, H. E., Yu-Bao, G. A. O., Yong-Hong, L. I., Hai-Tao, W. A. N. G., Di, M. A., ... & Yang, S. (2010). Pedogenic carbonate and soil dehydrogenase activity in response to soil organic matter in Artemisia ordosica community. Pedosphere, 20(2), 229-235.

Zhang, R., Tian, J., Su, H., Sun, X., Chen, S., & Xia, J. (2008). Two improvements of an operational two-layer model for terrestrial surface heat flux retrieval. *Sensors*, *8*(10), 6165-6187.

Zhang, Y., Odeh, I. O., & Ramadan, E. (2013). Assessment of land surface temperature in relation to landscape metrics and fractional vegetation cover in an urban/peri-urban region using Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, *34*(1), 168-189.

Zordia, M. (1977). Lutte contre les inondations par la reforestation.

Listes des figures

Figure 1: État de l'érosion hydrique des sols estimée en t/ha/an (*FAO, 2010*) 9
Figure 2: État de fertilité des sols pour l'utilisation actuelle des terres - Rapport GLADIS (*FAO, 2010*) 10
Figure 3: Situation du bassin versant Zenaga (Gareb- Bouareg) dans le contexte de la province de Nador 18
Figure 4: Présentation des indices démographiques du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 25
Figure 5: Courbe des pluies moyennes annuelle (1985-2017) 28
Figure 6: Précipitations moyennes mensuelles (1985-2017) ; Min : Précipitations minimale mensuelles; Max : Précipitations maximale mensuelles 29
Figure 7: Résultats des tests d'homogénéité de Pettitt et SNHT d'Alexandersson pour les précipitations moyennes mensuelles des stations Nador- Melilla (1985-2017) 31
Figure 8: Carte des précipitations moyennes selon la méthode des isohyètes pour la période 1985–2017 ; P_{moy}: Précipitation moyenne sur le bassin (mm) ; BV : Bassin versant 34
Figure 9: Carte des polygones de Thiessen ; Pmoy: Précipitation moyenne sur le bassin (mm) ; BV : Bassin versant 36
Figure 10: Températures moyennes annuelles sur le bassin versant (mm) 38
Figure 11: Régime thermique (Courbe des maxima, minima et moyenne) des températures (1985 et 2017) 40
Figure 12: L'indice Xérothermique de Gaussen (1985 et 2017) 41
Figure 13: L'indice d'aridité de Martonne et les indices mensuels d'aridité entre 1985et 2017 42
Figure 14: Situation de la province de Nador à l'intérieur du climagramme d'Emberger entre 1985 et 2017 avec de *Mesrar (2016)* entre 1994 et 2012 et celle de *Sadiki (2005)* entre 1964 et 2000 43
Figure 15: Carte des bioclimats selon la classification d'Emberger (*Mokhtari et al, 2014*) 44
Figure 17: Contexte géoclimatique des bassins côtiers ouest et du bassin versant Zenaga selon les vents opérationnels pour les trois directions principales Ouest, Est-Nord-Est et Est 45
Figure 18: Distribution statistique des vents opérationnels pour les trois directions principales d'Ouest, Est-Nord-Est et Est «NWM » (source : mesures satellitaires ARGOSS) 46
Figure 19: Carte d'exposition des versants 47
Figure 20: Modèle d'évolution géodynamique de l'arc de Gibraltar du Jurassique supérieur au Miocène moyen (*Michard et al.2002*) 49
Figure 23: Carte d'occupation des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 62
Figure 24: Pinus Halepensis, Eucalyptus gonphocephala et Eucalyptus camaldulensis Végétation du mont de Gourougou, de Beni Bou Ifrour et d'Afra 64
Figure 25: Olea europea, Pistacia lentiscus (Massif Kebdana) 64
Figure 26: Juniperus oxycedrus, Pinus alepensis, Romarin 65
Figure 27 : Zostera noltii et Cymodocea nodosa de la lagune de Marchica 65
Figure 28: Arthrocnemum macrostachyum et Sarcocornia fruticasa, de la lagune de Marchica 66
Figure 29: Juncus rigidus, de la lagune de Marchica 66
Figure 30: Carte hypsométrique du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 74
Figure 31: Courbe des tendances d'altitudes du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 75
Figure 32: Classification de l'aspect général des courbes hypsométrique selon l'état d'érosion 77
Figure 33: Courbe hypsométrique du bassin versant Zenaga 78
Figure 34: Rectangle équivalent du bassin versant Zenaga (Province de Nador) 80
Figure 35: Carte du réseau hydrographique du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 84
Figure 36: Classification du réseau de drainage (*Gregory and Walling, 1973*) 85
Figure 37: Droite représentative du nombre de Thalwegs en fonction de l'ordre 86
Figure 38: Droite représentative des longueurs des Thalwegs en fonction de l'ordre 87
Figure 39: Caractéristiques dimensionnelles des sols pulvérulents et sols fins (https://coursgeologie.com/caracteristiques-dimensionnelles-des-sols-169/) 95
Figure 39: Limites d'Atterberg (https://www.btpdeutsch.com/) 95
Figure 41: Diagramme de Casagrande pour la classification des sols fins (*Casagrande, 1958*) 99

Figure 42: Carte Modèle conceptuel de la méthodologie adoptée ; DN : numéro numérique ; NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée ; NDBI : indice construit de différence normalisée ; MNDWI : indice de différence d'eau normalisé modifié ; MNDBI : indice construit de différence normalisée modifiée 107
Figure 43: Modèle conceptuel du modèle PAP/CAR classique (*PAP/CAR, 1998 ; 2000*) 116
Figure 44: Organigramme méthodologique RUSLE adopté 118
Figure 47: Courbes granulométriques des échantillons des sols (pourcentage du tamisât en fonction du diamètre des particules) 129
Figure 56 : Spatialisation de l'utilisation/occupation des sols (LULC) dans la région de Nador pour 2007 (a) et 2017 (b) par l'algorithme de classification supervisée basée sur l'estimation de vraisemblance maximale (MLC) ; A.D : dâte d'acquisition 159
Figure 57: Répartition spatiale de l'indice de végétation par différentce normalisé (NDVI) pour la région de Nador pour le mois de juin pour 2007 (a) et 2017 (b) 161
Figure 58: Répartition spatiale et pourcentages de chaque classe de l'indice MNDBI selon la méthode BAEM dans la région de Nador en 2007 (a) et 2017 (b) 163
Figure 59: Répartition spatiale des classes de l'indice MNDWI dans la région de Nador pour 2007 (a) et 2017 (b) 165
Figure 60: Carte de répartition spatiale de l'évolution de la température de surface et la tendance des centroïdes LST dans la région de Nador en 2007 (a) et 2017 (b) 168
Figure 61 (a) : Ligne de profil LST sur la ligne Est-Ouest de LULC en 2007 170
Figure 61 (b): Ligne de profil LST à la ligne Est-Ouest de LULC en 2017 171
Figure 62: Températures de surface moyennes pour les types d'utilisation/de couverture des terres (voir les abréviations dans le tableau 42) 172
Figure 63 : Les précipitations et températures annuelle dans la région de Nador (1985-2017) 174
Figure 64: La relation entre le LST et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice modifié de construction par différences normalisées (MNDBI) et l'indice modifié d'eau par différence normalisée (MNDWI) dans la zone d'étude pour 2007 (a) et 2017 (b). 176
Figure 65: Carte des pentes du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 185
Figure 66: Carte des lithofaciès du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 187
Figure 67: Carte d'érodibilité du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 190
Figure 68: Carte de couvert végétale du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 192
Figure 69: Carte de densité de couvert du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 194
Figure 70: Carte de protection des sols du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 196
Figure 71: Carte des états érosifs du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 198
Figure 72: Erosion en nappe ; a et b) érosion en nappe sur pente faible ; c) érosion en nappe sur pentes moyenne et forte avec polychromie de la surface sol rouge développé sur des colluvions encroûtées, l'encroûtement blanc affleure dans les zones érodées. 202
Figure 73: Formes de l'érosion concentré (linéaire) au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) ; a) Ravines ; b) Ravins ; c) Ravinement généralisé ; d) Griffes et rigoles 204
Figure 74: Glissement de terrain de Jbel Iksane 206
Figure 75: Glissement de terrain au niveau de la rocade méditerranéenne au niveau des massifs d'Afra 207
Figure 76: Chute de pierre et blocs du Jbel Azrou Hammar au niveau de la ville de Zeghanghane 210
Figure 77: Ecroulement et épandage rocheux sur le tracé routier Nador-Zeghanghane 211
Figure 78: Création d'une cavité et effondrement (Sources : *Graphique MEDDE*) 212
Figure 79: Lave torrentielle et écoulement boueux de Zeghanghane et Jaadar (Photo de 2008) 214
Figure 80: Sapement des berges et dégradation de l'infrastructure au niveau de l'aval du bassin versant 215
Figure 81: Carte des formes de l'érosion du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 217
Figure 82: Carte consolidé de l'érosion du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 219
Figure 83: Carte des tendances à l'érosion du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 222
Figure 84: Modèle conceptuel de la méthodologie PAP/CAR modifiée (d'après *Tahouri et al.2022*) 228

Figure 85: Cartes d'érodibilité : a : Approche classique PAP/CAR ; b : Introduction du facteur topographique (LS) ; c : Introduction du type de sol 234
Figure 89: Valeurs propres 245
Figure 93: Diagramme ternaire de texture des sols 255
Figure 94: Carte d'érodibilité des sols : Facteur K (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) 257
Figure 95: Carte d'érosivité des précipitations : Facteur R (MJ.mm.ha-1.h-1.an-1) 261
Figure 97: Carte de conservation des sols 269
Figure 98: Carte des pratiques antiérosives 272
Figure 102: Matrice de corrélation de nuage de points du modèle RUSLE 279
Figure 103: Evolution des pertes en fonction du facteur R 280
Figure 108: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sol en fonction des facteurs de risque 286

Listes des tableaux

Tableau 1: Données de la population actualisée à l'horizon 2014 20
Tableau 2: Projection de la population selon la préfecture et les provinces en 2014, 2020 et 2030 20
Tableau 3: Caractéristique démographiques des communes du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), province de Nador (*HCP, 2017*) 21
Tableau 4: (a) Répartition des ménages selon le type de logement occupé et le milieu (En %); (b) Répartition des types de logement pas commune (En%) 22
Tableau 5: Taux de pauvreté et de vulnérabilité (En %) selon les communes rurales et urbaines du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg), province de Nador (*HCP, 2017*) 24
Tableau 6: Coordonnées des stations pluviométriques 27
Tableau 7: Statistique basique des précipitations mensuelles 29
Tableau 8: Résultat du test de Pettitt 30
Tableau 9: Résultat du test SNHT d'Alexandersson pour l'homogénéité 30
Tableau 10: Homogénéité des groupes 31
Tableau 11: Moyennes pluviométriques des précipitations (Méthode des Isohyètes) 33
Tableau 12: Stations et moyenne pluviométrique selon la méthode de Thiessen 35
Tableau 13: Lame d'eau moyenne reçue au niveau du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 37
Tableau 14: Moyennes mensuelles des températures entre 1985 et 2017 39
Tableau 16: Fréquences et des pourcentages cumulés inversé 76
Tableau 17: Classification du relief selon l'indice Ig donnée selon L'ORSTOM 81
Tableau 18: Rapport de confluence bassin versant Zenaga 86
Tableau 19: Rapport des longueurs du bassin versant Zenaga 87
Tableau 20: Nature des sols en fonction de la valeur du VBS (Valeur de bleu de méthylène) 95
Tableau 21: Classification des sols grenus (*LCPC, 2007* ; *Cerema, 2017*) 96
Tableau 22: Classification GTR (*Sétra-LCPC, 2000*) 99
Tableau 23: Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (*LCPC & SETRA ; 2000*) 100
Tableau 24: Modèles couramment utilisés pour l'étude de l'érosion (FAO. 2022. Global Soil Organic Carbon Map – GSOCmap v.1.6. Technical report. Rome. https://doi.org/10.4060/cb9015en) 102
Tableau 25: Caractéristiques des données satellitaires Landsat-5 TM et Landsat-8 OLI utilisées dans l'étude (https://landsat.gsfc.nasa.gov) 106
Tableau 26 : Catégories de classification d'utilisation/couverture des terres (LULC) adoptées d'après le modèle LUCAS 108
Tableau 27: Classes et descriptions des gradients de température des centroïdes LST 112
Tableau 29: Localisation des sites d'échantillonnages 124
Tableau 38: Résultats de la classification de l'occupation des sols pour les images 2007 et 2017 montrant les changements de superficie de chaque classe 157
Tableau 39: Superficie et pourcentage de chaque classe d'indice NDVI 160
Tableau 40 : Superficie et pourcentage de chaque classe de l'indice MNDBI 162
Tableau 41: Superficie totale et pourcentage de chaque classe de l'indice MNDWI 164
Tableau 42 : Superficies et pourcentages pour chaque classe des centroïdes de l'indice LST 166
Tableau 43: Valeur LST maximale, minimale et moyenne dans différentes catégories LULC 172
Tableau 44: Corrélations entre LST et NDVI-MNDBI-MNDWI-DEM 173
Tableau 48: Classes du degré d'érodibilité 189
Tableau 54: Classes des états érosifs 197
Tableau 55: Types de mouvements selon les mécanismes de déstabilisation, source (*Cruden and Varnes 1996*) 208
Tableau 56 : Processus de l'érosion actuelle actif du bassin versant Zenaga (Gareb-Bouareg) 216
Tableau 57: Matrice générant des tendances d'érosion 220
Tableau 58: Les matrices PAP/CAR classiques et modifiée 226

Tableau 59: Classifications des paramètres de sortie 226
Tableau 60: Classes et pourcentage de superficie des facteurs impliquée selon la méthode PAP/CAR modifié 229
Tableau 61: Matrice de corrélation (Pearson r) 243
Tableau 62: Coefficients de détermination (R^2) 244
Tableau 63: Valeurs propres (ACP) 244
Tableau 66: Résultats d'analyse et érodibilité (K ajusté (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) des sites 256
Tableau 67: Equations d'érosivité des précipitations (R) selon *Arnoldus (1980)* et *Rango et Arnoldus (1987)* développée au Maroc ; *Klik et al. (2015)* développés en Nouvelle-Zélande, *Loureiro et Coutinho (2001)* et *Ferreira et Panagopolous (2014)* développée au Portugal 259
Tableau 68: Facteur C en fonction du type d'occupation du sol dans le bassin versant Zenaga 267
Tableau 69: Facteurs C pour les types généraux de couverture terrestre compilés à partir de diverses sources . 268
Tableau 71: Statistiques sommaires des variables de données A, R, K, LS, C et P 276
Tableau 72: Matrice de corrélation de Person du modèle RUSLE au niveau de signification 99% avec la P-value et le coefficient de détermination (R^2) 277
Tableau 73: Statistiques relatives à la régression de la variable A et l'ajustement du modèle de régression 283
Tableau 74: Analyse de la variance (ANOVA) 284
Tableau 75: Analyse type I SS : Analyser la somme de type I des carrés (Y) 284
Tableau 76: Analyse type III SS : Analyse de la somme de type III des carrés (Y) 284
Tableau 77 : Paramètres du modèle (Y) 284