

Évaluation de l'érosion potentielle et suivi de la dynamique des ravins dans le Haut Ouergha (Rif Central, Maroc)

Assessment of potential erosion and monitoring of gully dynamics in the Upper Ouergha (Central Rif, Morocco)

Evaluación de la erosión potencial y monitoreo de la dinámica de cárcavas en el Alto Ouergha (Rif Central, Marruecos)

Khadija El Ouazani Ech-Chahdi

khadija.elouazaniechachahdi@usmba.ac.ma  0009-0000-2888-2998

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. Département de Géographie.

FLSH-Saïs, Fez. BP 59 Route Immouzer. CP 30000 Fès, Maroc.

Abdelaziz EL-Bouhali

a.elbouhali@uiz.ac.ma  0000-0003-2581-4580

Université Ibn Zohr. Laboratoire ESEAD, FLASH. Route Nationale N°10 cite d'Azrou. 80000 Ait Melloul, Maroc.

Mhamed Amyay

mhamedamyay@hotmail.com  0009-0004-4207-3539

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. Département de Géographie.

FLSH-Saïs, Fez. BP 59 Route Immouzer. CP 30000 Fès, Maroc.

INFO ARTÍCULO

Reçu : 15-03-2025

Révisé : 23-04-2025

Accepté : 25-04-2025

MOTS-CLÉS

Potentiel érosif
Formes d'érosion
Morpho-dynamique
Bassin versant de l'oued
Boumlal
Maroc

KEYWORDS

Erosive potential
Erosion forms
Morphodynamics
Boumlal watershed
Morocco

RÉSUMÉ

Dans le Rif marocain, l'érosion hydrique constitue un facteur majeur de dégradation des terres et des infrastructures. La fragilité des milieux naturels, associée à des pratiques anthropiques inappropriées, accentue ce phénomène. Dans cette étude, nous avons focalisé notre investigation sur l'évaluation du potentiel érosif et le suivi de la dynamique des ravins dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Haut Ouergha), par l'application de l'approche PAP/CAR et des mesures sur terrain. Les résultats obtenus révèlent que ce bassin versant est soumis à une forte intensité d'érosion hydrique, mettant en évidence sa fragilité qui peut entraîner la production d'une grande quantité de sédiments. L'analyse des états érosifs indique que les zones fortement affectées par les différentes formes d'érosion couvrent environ 31 % de la superficie totale du bassin. L'intersection des formes d'érosion avec les facteurs causaux a permis d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur la dégradation des sols. À la suite de cette superposition, nous avons estimé la superficie impactée par chaque forme d'érosion en fonction des formations lithologiques, des pentes, de l'exposition des versants et de l'occupation des sols. De plus, nous avons entrepris un suivi de la dynamique des ravins dans la zone d'étude afin de comprendre le rythme et les mécanismes intervenant dans leur évolution morphologique. Les résultats des campagnes de mesures sur le terrain indiquent que les caractéristiques morphologiques des ravins varient en fonction des interventions humaines et des conditions environnementales. Ainsi, la morphodynamique du ravinement dans la zone étudiée est régie par plusieurs processus, notamment l'érosion régressive, le creusement et l'affouillement du fond, l'élargissement par sapement des berges et le colmatage total par glissements.

ABSTRACT

In the Moroccan Rif, water erosion plays a significant role in the degradation of land and infrastructure. The susceptibility of natural environments, along with inappropriate human activities, amplifies this phenomenon. In this study, we focused our investigation on evaluating the erosive potential and monitoring the dynamics of gullies in the Boumlal watershed (Upper Ouergha) by applying the PAP/CAR approach



and field measurements. The obtained findings reveal that this basin experiences intense water erosion, highlighting its vulnerability, which can lead to the production of a large quantity of sediments. The analysis of erosive states indicates that areas severely affected by different forms of erosion cover approximately 31% of the total watershed area. The intersection of erosion types with causal factors allowed us to assess the influence of each parameter on soil degradation. Through this overlay analysis, we estimated the surface area impacted by each form of erosion based on lithological formations, slopes, slope exposure, and land use. Moreover, we conducted a monitoring study of gully dynamics in the research area to understand their morphological evolution and the mechanisms involved. The results from field measurement campaigns indicate that the morphological characteristics of gullies vary depending on human interventions and environmental conditions. Thus, gully morphodynamics in the study area is governed by several processes, including regressive erosion, deepening and scouring of the gully bed, widening due to bank undercutting, and complete infilling caused by landslides.

PALABRAS CLAVE

Potencial erosivo
Formas de erosión
Morfo-dinámica
Cuenca del Oued Boumlal
Marruecos

RESUMEN

En el Rif marroquí, la erosión hídrica constituye un factor importante en la degradación de tierras e infraestructuras. La fragilidad de los entornos naturales, combinada con intervenciones humanas inapropiadas, agrava este fenómeno. En este estudio, nos centramos en la evaluación del potencial erosivo y el seguimiento de la dinámica de los barrancos en la cuenca del Oued Boumlal (Alto Ouergha), mediante la aplicación del enfoque PAP/CAR y mediciones de campo. Los resultados obtenidos revelan que esta cuenca está sometida a una alta intensidad de erosión hídrica, lo que destaca su fragilidad y su potencial para generar una gran cantidad de sedimentos. El análisis de los estados erosivos muestra que las zonas fuertemente afectadas por las distintas formas de erosión cubren alrededor del 31% de la superficie total de la cuenca. La intersección de las formas de erosión con los factores causales permitió evaluar la influencia de cada parámetro en la degradación del suelo. Tras esta superposición, estimamos la superficie afectada por cada forma de erosión en función de las formaciones litológicas, las pendientes, la exposición de las laderas y el uso del suelo. Además, realizamos un seguimiento de la dinámica de los barrancos en la zona de estudio para comprender el ritmo y los mecanismos involucrados en su evolución morfológica. Los resultados de las campañas de medición de campo indican que las características morfológicas de los barrancos varían según las intervenciones humanas y las condiciones ambientales. Así, la morfo-dinámica del barranco en la zona estudiada está regida por varios procesos, entre ellos la erosión regresiva, el escarbado y aflojamiento del fondo, el ensanchamiento por desmoronamiento de las orillas y el colmatado total por deslizamientos.

68

1. INTRODUCTION

La région méditerranéenne est considérée parmi les zones qui enregistrent une grave dégradation des milieux naturels (Kosmas *et al.*, 2000; El-Bouhali *et al.*, 2024a; El-Bouhali *et al.*, 2024b) sous l'effet de la combinaison des facteurs naturels et anthropiques. Dans ces régions, l'érosion hydrique contribue largement à l'altération des terres, en raison des longues périodes de sécheresse suivies de précipitations intenses, ainsi que de la prédominance de pentes abruptes et de sols fragiles (El Ouazani Ech-Chahdi *et al.*, 2025a). La dégradation des terres se traduit par l'augmentation de l'intensité de l'érosion hydrique qui est une cause majeure de la perte de la productivité des terres et la désertification (Karamesouti *et al.*, 2015). La production de grandes quantités de sédiments par l'érosion hydrique a entraîné une détérioration préoccupante des terres (perte de fertilité des sols, baisse de la production...) et des infrastructures (routes, barrages...).

Au Maroc, 40 % des terres sont affectées par l'érosion hydrique (Ayt Ougougdal *et al.*, 2020). Ce phénomène a fait l'objet de plusieurs études (Moukhchane, 2002; Chaaouan *et al.*, 2013; Tribak *et al.*, 2015; El-Bouhali *et al.*, 2019; Hmamouchi *et al.*, 2020; El-Ommal & Tribak, 2023; El Ouazani Ech-Chahdi *et al.*, 2025a) par l'utilisation des différentes méthodes et approches (RUSLE, EPM, PAP/CAR, Simulation, ...). Ces dernières années, l'étude de l'érosion hydrique dans plusieurs régions s'est appuyée sur l'utilisation de méthodes d'analyse multicritère, telles que l'ANP (Analytic Hierarchy Process), qui intègre divers facteurs d'érosion (Kaddar *et al.*, 2025; Ziadi *et al.*, 2025). Les résultats obtenus indiquent que l'intensité de l'érosion varie selon les bassins,



en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque milieu et de la méthode appliquée. La quantité de sédiments issue de l'érosion hydrique diffère selon les régions, mais les montagnes du Rif se distinguent par les taux de sédimentation les plus élevés à l'échelle nationale (Sabir *et al.*, 2002; Iaaich *et al.*, 2016). Dans cette région du Maroc, l'érosion hydrique constitue une cause majeure de la perte des terres et d'envasement des barrages (El Mazi *et al.*, 2022). Selon le ministère de l'Aménagement du Territoire, les barrages perdent chaque année environ 125 millions m³ de leur capacité de stockage initiale (Ayt Ougougdal *et al.*, 2020).

Ce risque préoccupant, qui affecte à la fois les terres et les infrastructures dans les montagnes du Rif, est étroitement liée à la présence des pentes abruptes, à l'absence ou à l'insuffisance du couvert végétal, à la prédominance de formations lithologiques friables, la brutalité et à la concentration spatiotemporelle des précipitations. De plus, la surexploitation des versants par des activités anthropiques inadaptées (défrichement excessif, agriculture sur pentes raides, surpâturage) aggrave le phénomène de l'érosion hydrique. L'interaction de ces facteurs favorise le développement des différentes formes d'érosion hydrique, à savoir l'érosion en nappe, le ravinement, le ravinement généralisé, les glissements de terrain et les éboulements rocheux. Parmi les processus érosifs les plus répandus dans les milieux rifains, l'érosion par ravinement émerge comme un indicateur de la dégradation des terres (Naimi *et al.*, 2002).

L'érosion par ravinement constitue un risque environnemental préoccupant, qui menace de nombreuses régions à travers le monde (Ionita *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015). C'est un signe important de la dégradation des terres, suite à la forte production des sédiments (Poesen *et al.*, 2003). Torri *et al.* (1994) indiquent que les pertes en sol produit par les ravines peuvent atteindre 100 à 200 t/ha⁻¹ an⁻¹. Ces pertes en sol peuvent atteindre 800 t/ha⁻¹ an⁻¹ en haute province en France (Mathys *et al.*, 2003). En Tunisie, le ravinement peut générer 10 à 50 fois plus de sédiments que l'érosion diffuse à l'échelle du versant (Rebai *et al.*, 2013). Au Maroc, Naimi *et al.* (2002) indiquent que l'érosion par ravinement dans le bassin versant de Nakhla (Rif occidental) entraîne une perte totale de sols de 187 tonnes, soit 35,95 tonnes par hectare, pour la période du 28/11/1997 au 12/06/1998. Le suivi de l'évolution spatio-temporelle des ravins dans le temps est essentiel pour mettre en œuvre des mesures de conservation des sols. En outre, comprendre leur dynamique temporelle est essentiel pour identifier les causes et les conséquences de la dégradation des terres (Frankl *et al.*, 2013). Dans ce contexte, de nombreuses études ont examiné l'évolution des ravins, en mettant l'accent sur l'analyse de leur morphologie et des processus qui influencent leur dynamique (Tribak, 1998; Naimi *et al.*, 2002; Frankl *et al.*, 2013; Achim, 2019; Rebai *et al.*, 2013).

69

Dans l'étude des ravins, le suivi de l'évolution de leur morphologie constitue un indicateur essentiel pour comprendre leurs dynamiques. Les caractéristiques morphologiques des ravins sont influencées par les pratiques humaines (occupation des sols) et par les conditions environnementales, telles que le climat, le sol, la lithologie et la topographie (Conoscenti *et al.*, 2014; Deng *et al.*, 2015). Ce travail se focalise sur l'évaluation du potentiel érosif et le suivi spatio-temporel de la dynamique des ravins dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Haut Ouergha). Plus précisément, une cartographie de l'érosion potentielle et des différentes formes d'érosion dans le bassin sera établie, suivie d'une analyse de ces formes en lien avec les caractéristiques naturelles et anthropiques. Par ailleurs, le suivi de l'érosion par ravinement dans le bassin versant de l'oued Boumlal, à travers des mesures sur terrain, pour analyser le rythme et les processus de son évolution. La diversité des caractéristiques des milieux (topographie, climat, occupation des sols, lithologie, etc.) dans ce bassin constitue un élément important pour étudier l'évolution des ravins dans divers contextes.

2. ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'oued Boumlal, situé dans le Rif central, il occupe la partie sud-ouest du bassin versant d'Ouergha (figure 1) et s'étend sur une superficie d'environ 42 km². Administrativement, il fait partie des provinces de Taounate et d'Al-Hoceima. La dynamique des versants dans ce bassin est influencée par multiples facteurs interconnectés. Leur interaction engendre une diversité de formes d'instabilité des versants. Par ailleurs, un contraste marqué entre l'amont et l'aval du bassin, sur les plans bioclimatique, hydrologique, topographique et géologique, joue un rôle déterminant dans la répartition des différentes formes d'érosion.



Le contexte climatique, principal facteur de ruissellement et de transport des sédiments, se caractérise par des précipitations orageuses intenses, concentrées dans le temps et l'espace. De plus, la prédominance de formations lithologiques tendres et imperméables (marnes, argiles, flyschs, etc.), combinée à des pentes généralement moyennes à très fortes, favorise un déplacement rapide de grandes quantités de matériaux. Le couvert végétal, insuffisant pour protéger les versants sur plus de la moitié du bassin (El-Bouhali *et al.*, 2019) avec une tendance accélérée du défrichement pour la mise en culture du cannabis dans la partie amont. L'impact anthropique dans la zone d'étude aggrave la dégradation des terres, en raison de la forte densité de population (plus de 100 hab/km²) qui exerce une pression continue sur les ressources naturelles. Cette pression se manifeste par des pratiques inadéquates d'exploitation des versants, notamment le défrichement massif des forêts pour étendre les surfaces cultivables et le surpâturage intensif. Par ailleurs, les techniques d'aménagement des terres, souvent traditionnelles restent insuffisants et leur effet antiérosif est limité spatialement. En outre, les transformations socio-économiques impactent leur durabilité : l'absence de nouvelles initiatives d'aménagement, l'exode rural, la succession des années sèches et les changements de mode de vie réduisent l'extension et l'efficacité de ces techniques. L'analyse des facteurs générateurs, accélérateurs et régulateurs montre que le bassin versant de l'oued Boumlal réunit des conditions particulièrement propices au déclenchement de l'érosion hydrique (El Ouazani Ech-Chahdi *et al.*, 2025a) et à la désertification (El Ouazani Ech-Chahdi *et al.*, 2020).

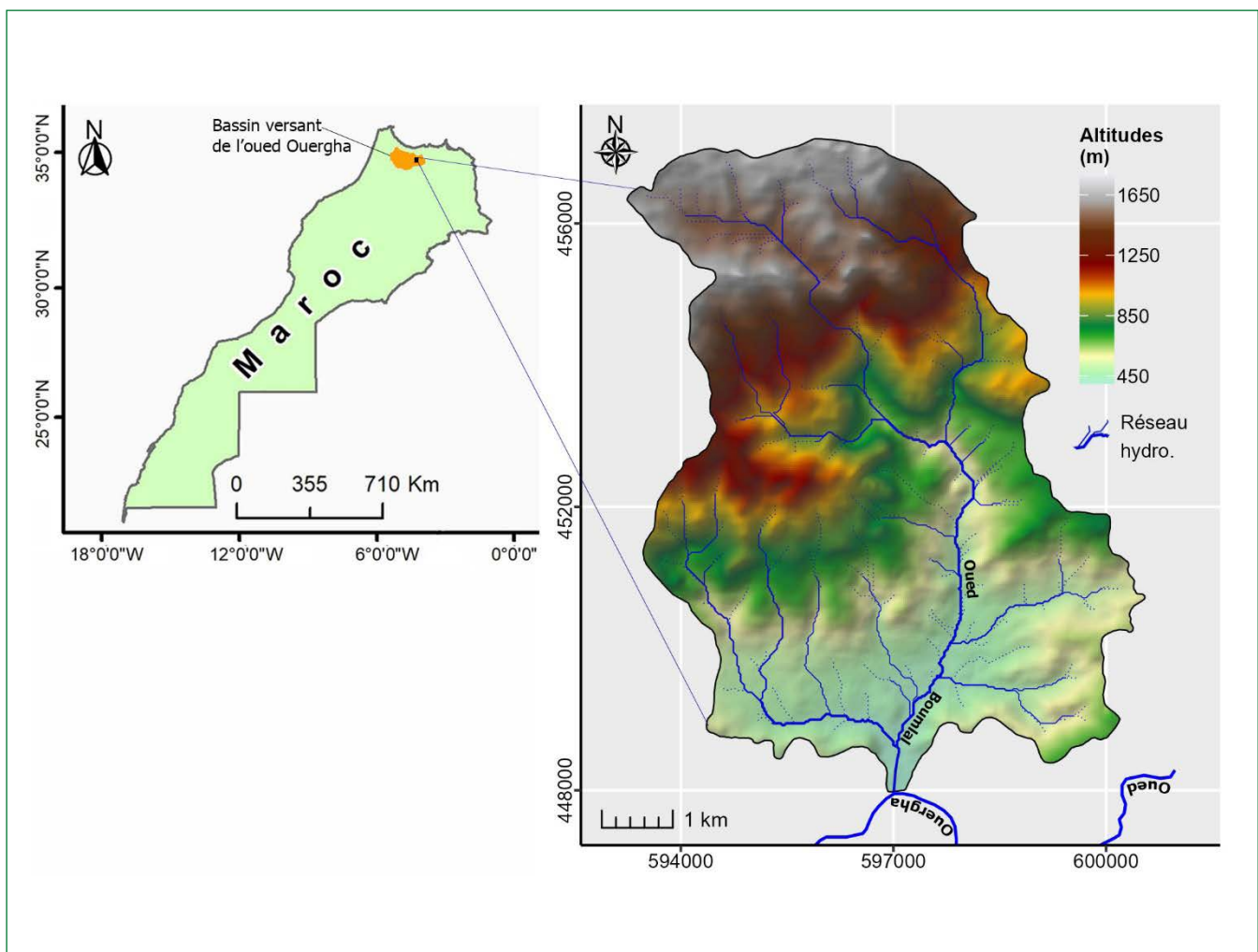


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude. Source : propre élaboration.



3. MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES

Les objectifs de cette étude reposent sur l'utilisation de données multi-sources, telles que les images satellites (Landsat 8 et les images Google Earth), le modèle numérique de terrain (MNT), la carte géologique et les observations/mesures de terrain, ainsi que sur une approche méthodologique pluridisciplinaire. Le traitement des données et l'application des étapes méthodologiques ont été réalisés à l'aide des systèmes d'information géographique (SIG) et du logiciel RStudio. L'exploitation de ces données issues de diverses sources a permis d'établir un diagnostic de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Haut Ouergha) et de fournir des informations essentielles sur les facteurs contribuant à la dégradation des terres.

3.1. Travail de terrain

Il est indéniable que le travail de terrain constitue une étape essentielle dans la recherche géographique, car il permet d'obtenir des informations précises sur la problématique étudiée. Cette démarche repose sur la réalisation de plusieurs missions sur le terrain afin d'analyser les caractéristiques de la zone d'étude, les types d'occupation du sol et les différentes formes de dégradation des milieux. Elle vise également à identifier les processus impliqués dans la dynamique des versants.

Afin d'illustrer de manière précise la dynamique érosive dans le secteur d'étude, des mesures ont été effectuées sur le terrain à différentes sections des ravins (figure 2). Ces relevés permettent de suivre l'évolution spatio-temporelle de la morphologie des ravins. L'objectif principal est d'apporter des réponses aux questions suivantes : quels sont les processus impliqués dans la dynamique des ravins ? Quel est le rythme de cette dynamique ? Est-ce que les ravins réagissent avec les processus d'érosion de la même façon ? Les mesures effectuées sur l'ensemble des ravins prennent en compte la variation des sites d'observation en fonction de l'occupation des sols, de la pente, de la lithologie, etc. Les dimensions mesurées (longueur, largeur et profondeur) sont immédiatement consignées sur une fiche technique. Bien que la modélisation offre une évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique et fournisse des informations importantes sur l'ampleur de la dynamique des versants, les relevés de terrain restent essentiels pour valider les observations obtenues et vérifier la fiabilité des modèles utilisés.

71

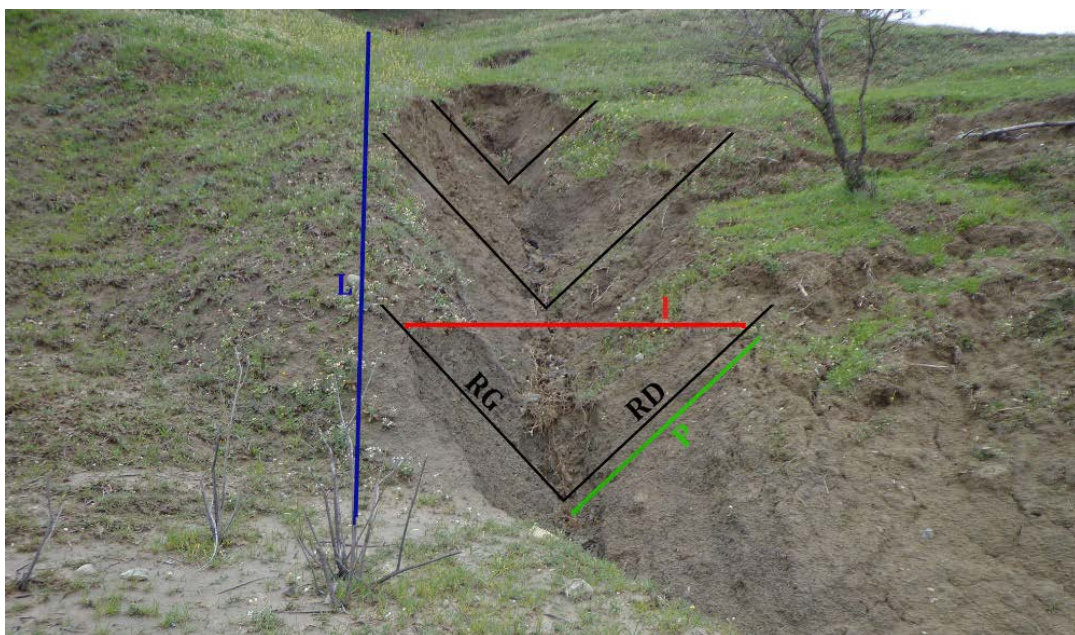


Figure 2. Illustration des sections mesurées des ravins étudiés pour mettre en évidence leur évolution morphologique.
L : Longueur (m), I : largeur (m), P : Profondeur. RG : Rive gauche, RD : Rive droite. Source : propre élaboration.



3.2. Évaluation qualitative de l'érosion hydrique

Dans le Rif, l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique repose sur l'utilisation de divers modèles et approches, tels que USLE, RUSLE, EPM et PAP/CAR (Chaaouan *et al.*, 2013 ; Khali Issa *et al.*, 2016 ; El-Bouhali *et al.*, 2019 ; Tahouri *et al.*, 2022 ; El Ouazani Ech-Chahdi *et al.*, 2025a). Dans cette étude, l'évaluation du potentiel érosif du bassin versant de l'oued Boumlal est réalisée à l'aide de l'approche PAP/CAR. Cette approche poursuit un double objectif : à court terme, elle fournit un outil méthodologique et une source d'information pour la mise en œuvre de projets et de programmes de gestion et de lutte contre l'érosion et la désertification. À long terme, elle vise à mieux contrôler ces processus afin d'améliorer l'utilisation des terres et de rationaliser l'exploitation des ressources. L'intérêt de cette approche est de fournir pour chaque facteur de l'érosion, une quantification et une cartographie qui est un outil important pour le diagnostic des zones les plus sensibles à l'érosion. Les SIG ont été utilisés pour analyser et cartographier les différentes caractéristiques de la zone d'étude, en particulier celles influençant les processus érosifs, telles que la pente, la lithologie, le couvert végétal et l'occupation des sols (PAP/CAR, 1998).

L'approche PAP/CAR repose sur trois phases principales : la phase prédictive, qui consiste à identifier les états érosifs ; la phase descriptive, qui caractérise les formes d'érosion observées ; et la phase d'intégration, qui croise ces formes avec les états érosifs afin d'analyser leur interaction. Les étapes suivies pour l'application de cette approche sont résumées dans la figure 2. Toutefois, une description détaillée de la méthodologie, ainsi que des matrices utilisées pour la cartographie et la combinaison des facteurs déterminants de l'érosion, peut être trouvée dans les directives PAP/CAR (1998). En parallèle avec l'évaluation du potentiel érosif, nous avons croisé les formes d'érosion avec les formations lithologiques, les pentes, l'exposition des versants et l'occupation des sols afin d'analyser l'influence de chaque paramètre sur la dégradation des sols.

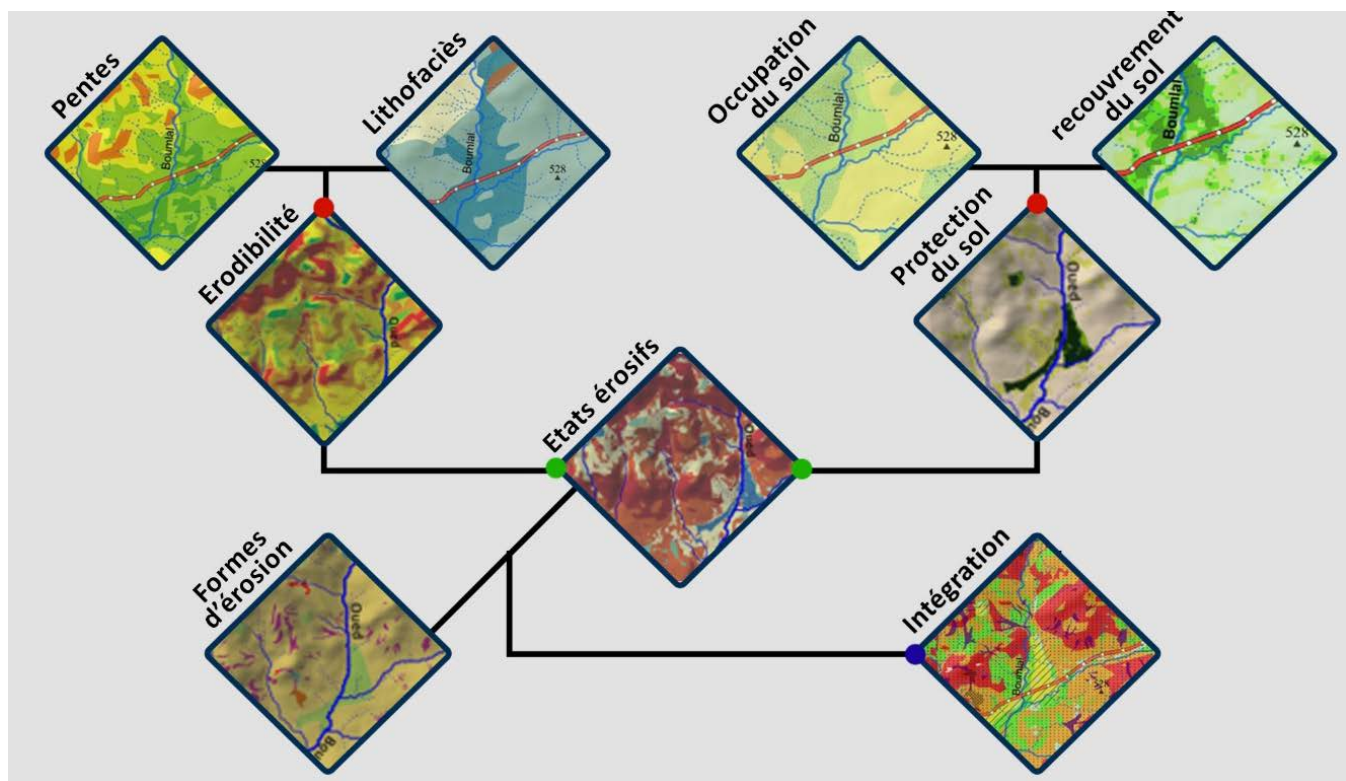


Figure 3. Schéma méthodologique adoptée pour l'approche PAP/CAR (PAP/CAR, 1998). Source : propre élaboration.



4. RÉSULTATS

4.1. Évaluation de l'érosion potentielle

L'application de l'approche PAP/CAR a permis d'évaluer l'érosion potentielle dans le bassin versant de l'oued Boumlal. Cette méthode permet de cartographier et d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique. L'intégration de plusieurs facteurs influençant ce phénomène constitue la base de l'élaboration de la carte de protection des sols et de la carte d'érodibilité. La superposition de ces deux cartes permet ensuite de produire la carte des états érosifs/ l'érosion potentielle.

4.1.1. Degrés d'érodibilité et de protection des sols

La carte d'érodibilité (figure 4a) montre que le bassin versant de l'oued Boumlal est marqué par la prédominance de classe d'érodibilité moyenne qui occupe 42 % de la superficie. Les classes d'érodibilité élevée et très élevée couvrent 40 % de la zone d'étude, principalement sur des terrains aux pentes très abruptes et aux formations lithologiques fragiles (marnes, flysch). En revanche, les sols présentant une érodibilité faible à très faible ne représentent que 18 % de la superficie totale du bassin. Ces derniers se localisent principalement dans les zones à faibles pentes, notamment en aval du bassin, ou dans des secteurs caractérisés par des formations lithologiques résistantes (calcaires). La carte montre que, malgré des pentes faibles dans la partie médiane du bassin, elle se caractérise par une érodibilité élevée en raison de la dominance des formations lithologiques fragiles.

La carte de protection des sols (figure 4b), obtenue par la combinaison de la carte d'occupation des sols et de celle de la densité de recouvrement, révèle que les classes de protection faible à très faible couvrent la majeure partie de la zone d'étude, représentant environ 86 % de la superficie totale. Ces zones sont caractérisées par un faible recouvrement, des plantations d'arbres clairsemées (oliviers, amandiers) et des terrains nus. Cela suggère qu'une partie importante du bassin est fortement exposée au risque de l'érosion hydrique. Les classes dont la protection du sol est considérée élevée à très élevée couvrent environ 10 % de la superficie totale du bassin et correspondent aux forêts de *Chêne Vert* et *Pin d'Alpe*, les zones irriguées et les zones d'arboriculture dense. La classe de protection moyenne s'étale sur environ 4 % de la superficie du bassin, dans des zones caractérisées par une densité végétale moyenne (matorral et cultures en linges).

4.1.2. L'érosion potentielle

La carte des états érosifs (figure 4c) représente le résultat final de la phase prédictive de l'approche PAP/CAR. Elle est élaborée par la superposition de la carte d'érodibilité et celle de la protection des sols, selon la matrice définie par les directives PAP/CAR, (1998). L'application de l'approche PAP/CAR révèle que le bassin versant de l'oued Boumlal subit une forte intensité d'érosion hydrique. Cela souligne sa fragilité, qui peut entraîner la production d'une grande quantité de sédiments. D'après la carte des états érosifs, trois zones à intensités d'érosion variables ont été distinguées.

Les zones stables correspondent à des milieux où l'érosion est faible à très faible. Elles représentent environ 12 % de la zone d'étude (figure 4c). Ces zones sont fortement protégées par un couvert végétal dense, assurant une protection élevée des sols. Elles se distinguent également par la présence des formations lithologiques très résistantes (calcaires) et par des pentes faibles. L'érosion en nappe est principalement observée dans ces zones.

Les zones instables concernent les milieux soumis à une érosion moyen à élevée, occupant une superficie significative d'environ 57 % de superficie de la zone d'étude. Elles se trouvent dans des milieux fragiles, caractérisés par des versants pentus, des terres cultivées (terres des cultures pluviales), des formations lithologiques imperméables (argiles, marnes, flyschs) et des sols insuffisamment protégés par la végétation.

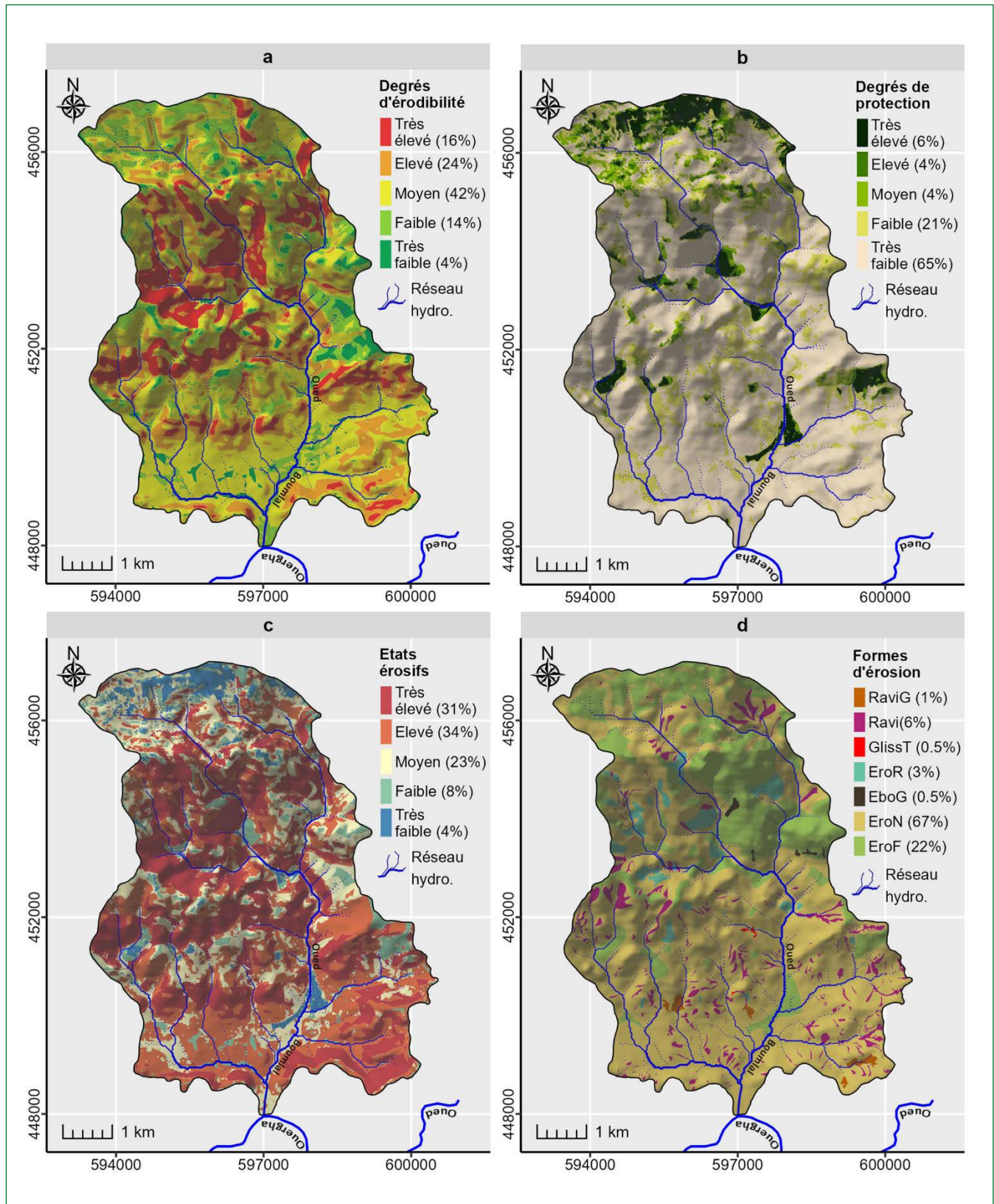


Figure 4. Évaluation du potentiel érosif et répartition des formes d'érosion dans le bassin versant de l'oued Boumlal. a) Degrés d'érodibilité. b). Degrés de protection. c) Etats érosifs. d) Formes d'érosion : RaviG (Ravinement généralisé), Ravi (Ravinement), GlissT (Glissement de terrain), EroR (Erosion en rigoles), EroN (Erosion en nappe), EroF (Erosion faible). Source : propre élaboration.



Les zones critiques englobent les terrains affectés par diverses formes d'érosion, telles que les glissements de terrain, le ravinement, le ravinement généralisé (badlands) et l'érosion par sapement des berges. Ces zones représentent environ 31 % de la superficie totale du bassin. La vulnérabilité de ces milieux est accentuée par la présence de formations argileuses et marneuses, qui sont particulièrement sensibles à l'érosion en raison de leur faible résistance mécanique. Ces terrains sont souvent le résultat de pratiques anthropiques mal entretenues, telles que des techniques agricoles inappropriées, une déforestation excessive et un manque de gestion des sols (manque d'entretien des techniques traditionnelles). Les sols de ces zones sont mal protégés par la végétation, ce qui permet aux processus érosifs de se développer rapidement, entraînant une dégradation des versants et une perte importante de sols. Ces milieux constituent une menace majeure pour la productivité des terres et pour la stabilité des infrastructures environnantes.

4.2. Diversité des formes d'érosion dans le bassin versant de l'oued Boumlal

Le bassin versant de l'oued Boumlal se caractérise par une forte dynamique d'érosion hydrique, résultant de plusieurs facteurs : des pentes abruptes, un couvert végétal incapable de protéger les sols, la prédominance de formations lithologiques tendres, des précipitations intenses et irrégulières, ainsi qu'une exploitation excessive des versants par des activités anthropiques inadaptées. Ces éléments favorisent le développement de diverses formes d'érosion hydrique, telles que l'érosion en nappe, le ravinement, le ravinement généralisé, les glissements de terrain et les éboulements rocheux. La carte (figure 4d) indique que l'érosion en nappe affecte environ 67 % de la zone d'étude. Cette forme de dégradation constitue une menace directe pour la productivité des terres. En revanche, les badlands (ravinement généralisé), qui représentent le stade ultime de la dégradation des sols, occupent environ 1 % de la superficie totale du bassin. Ils sont particulièrement visibles dans la partie médiane, où la présence de formations marneuses qui favorisent leur développement.

L'érosion linéaire (les rigoles, griffes et ravinelements) affecte environ 9 % de la superficie du bassin. Elle se développe principalement sur des terrains imperméables (marnes, flyschs...) et des versants pentus insuffisamment protégés par le couvert végétal. En revanche, les zones où l'érosion est faible couvrent environ 22 % de la zone d'étude. Elles se situent principalement sur les versants exposés au nord et au nord-ouest des hauts massifs, où la végétation, est relativement dense et joue un rôle protecteur. De plus, ces zones englobent les terrains irrigués situés le long de l'oued Boumlal et de ses affluents, les zones où les pentes faibles et la présence d'aménagements de lutte antiérosive. Les éboulis de gravité se localisent principalement sur les versants des hautes crêtes, avec une extension relativement restreinte, couvrant moins de 1 % de la superficie totale du bassin. Les glissements couvrent une superficie limitée d'environ 0.5 %, mais leur effet érosif est significatif sur les versants pentus, dénudés et fortement exploités par la population locale.

75

4.3. Intégration de la carte des états érosifs avec les formes d'érosion

L'intégration de la carte des états érosifs (données prédictives) et des formes d'érosion (données descriptives) permet d'obtenir des informations approfondies sur les différents aspects de l'érosion dans le bassin versant de l'oued Boumlal. L'analyse de ces données (figure 5) suggèrent une corrélation directe entre l'intensité des états érosifs et la gravité des formes d'érosion : plus la potentialité érosive est élevée, plus les processus érosifs sont marqués.

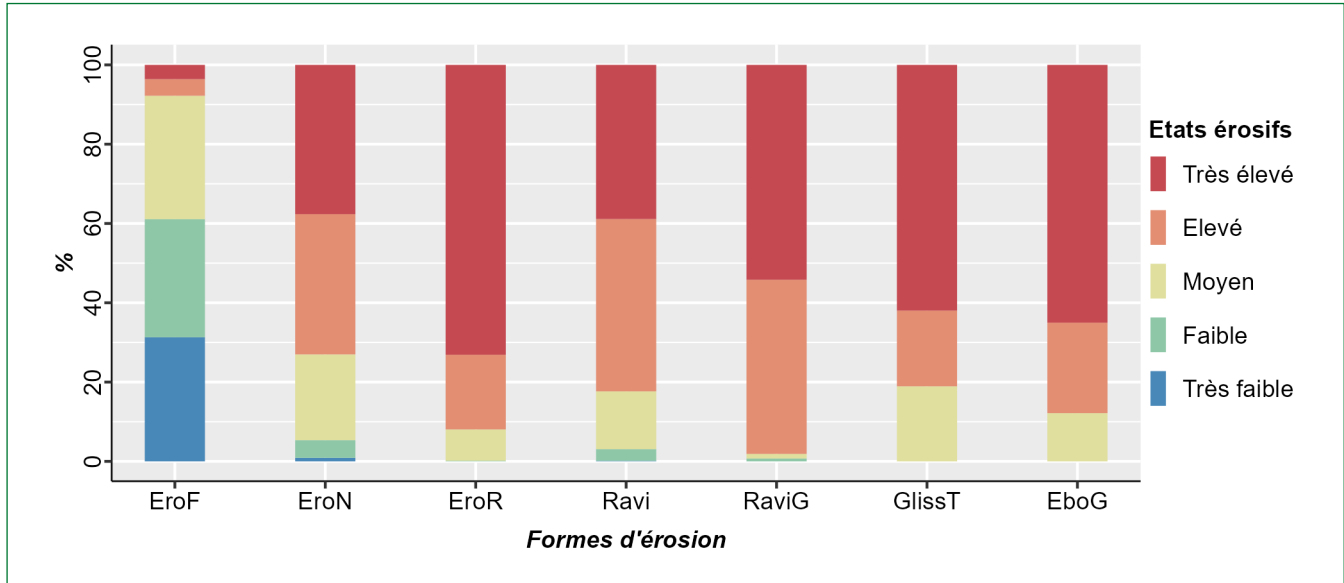


Figure 5. Intégration des formes d'érosion avec les états érosifs. RaviG (Ravinement généralisé), Ravi (Ravinement), GlissT (Glissement de terrain), EroR (Erosion en rigoles), EroN (Erosion en nappe), EroF (Erosion faible). Source : propre élaboration.

L'érosion en nappe est largement répandue dans l'ensemble du bassin versant étudié. Environ 77 % des surfaces touchées par ce type d'érosion se situent dans des zones classées à potentiel érosif élevé à très élevé. L'impact de l'érosion en nappe est d'autant plus préoccupant qu'elle entraîne une perte progressive de la couche fertile du sol, réduisant ainsi la productivité agricole et augmentant la vulnérabilité des sols à d'autres formes d'érosion plus sévères, telles que l'érosion en rigoles, le ravinement, le ravinement généralisé et les glissements de terrain. Ces différentes formes affectent principalement les zones où la potentialité érosive est élevée. En effet, plus de 80 % de ces processus se développent dans les secteurs classés en états érosifs élevés à très élevés, tandis qu'environ 20 % apparaissent dans les zones à érosion modérée. Enfin, plus de 90 % des milieux non affectés par l'érosion, ou où la probabilité d'occurrence de l'érosion est faible, se situent dans les classes des états érosifs allant de très faible à moyen. Ces milieux sont protégés par un couvert végétal dense et se distinguent par la dominance de formations lithologiques résistantes.

76

4.4. Intégration des formes de l'érosion en fonction des facteurs

Le bassin de l'oued Boumlal est soumis à une dynamique érosive très intense. L'intensité de l'érosion varie selon les zones, en fonction des facteurs causaux. Cet axe porte sur l'analyse et le traitement de la répartition spatiale des formes d'érosion en fonction de ces facteurs, à travers la superposition de la carte des formes d'érosion avec celles des formations lithologiques, des pentes, de l'exposition des versants et d'occupation des sols. Cette analyse nous a permis d'identifier le rôle de chaque facteur dans la dégradation des sols. À la suite de cette superposition, nous avons estimé la superficie affectée par chaque forme d'érosion en fonction des différents paramètres.

En fonction des formations lithologiques : le bassin versant de l'oued Boumlal présente une diversité lithologique marquée, dominée par les formations marneuses du Tertiaire, avec une prédominance des marnes tendres du Miocène. Ces formations renferment une forte proportion d'éléments fins, principalement des limons et des argiles. Le facteur lithologique joue un rôle déterminant dans la dynamique érosive et la répartition des différentes formes d'érosion au sein de la zone d'étude.

L'intégration des formes d'érosion en fonction de la lithologie (figure 6) montre que les éboulements sont localisés dans les formations calcaires. En revanche, les différentes formes d'érosion affectent les



marnes, les marno-calcaires, les pélites, les grès, les alluvions et le flysch. Le décapage et le ruissellement diffus impactent la majorité de ces formations. Cependant, les ravinements profonds, les badlands et les glissements sont plus fréquents sur les formations marneuses, particulièrement vulnérables à l'érosion. En outre, l'érosion faible se trouve dans les zones où les formations lithologiques sont plus résistantes, ou lorsque les formations tendres bénéficient d'une protection végétale suffisante ou se situent sur des pentes faibles. Généralement, le bassin versant de l'oued Boumlal se caractérise par un substrat imperméable, principalement constitué de formations marneuses, notamment dans sa partie aval. Ces conditions favorisent le développement du ruissellement superficiel, qui s'intensifie sur des terrains vulnérables et contribue ainsi de manière significative à la genèse et à la répartition des différentes formes d'érosion hydrique, en particulier les ravines, les rigoles, les griffes, les glissements et le ravinement généralisé.

En fonction des pentes : La pente constitue un facteur clé dans les processus morphogénétiques des versants et influencent directement la répartition des formes d'érosion. Dans la zone d'étude, la majorité des formes d'érosion se développent sur des pentes moyennes. En effet, l'érosion en nappe, qui représente le stade initial de la dégradation des sols, affecte 66 % de la surface érodée. La figure 7 indique que cette forme d'érosion est présente sur toutes les classes de pente, avec une répartition d'environ 28 % sur les pentes faibles et très faibles, 60 % sur les pentes moyennes et 12 % sur les pentes fortes à très fortes. En revanche, les formes d'érosion par ravinement, ravinement généralisé, glissements de terrain et érosion en rigole se manifestent principalement sur des pentes moyennes à très fortes, avec une superficie qui dépasse 55 % dans tous les formes. D'après la figure 7, il apparaît que les formes d'érosion linéaires et en masse se développent sur des pentes moyennes dans près de la moitié des cas. Cependant, leur présence est limitée sur les pentes fortes à très fortes, cela est lié à d'autres facteurs qui interviennent dans la répartition des formes d'érosion.

En fonction d'exposition des versants : L'exposition des versants joue un rôle déterminant dans les processus érosifs. L'analyse de la distribution des formes d'érosion en fonction de l'orientation indique que les pentes orientées vers le sud sont les plus affectées par les différentes formes d'érosion. À l'inverse, les versants exposés à l'est présentent une prédominance des processus de glissements de terrain. Cette variabilité des formes d'érosion selon l'orientation montre que les versants sud sont plus secs et donc moins protégés, tandis que les versants ouest bénéficient d'une humidité plus importante ce qui offre une meilleure protection contre l'érosion.

77

D'après la figure 8, 75 % de la superficie couverte par les badlands (ravinement généralisé) se situe sur les versants sud, 15 % sur les versants ouest et 10 % sur les versants nord. Une tendance similaire est observée pour le ravinement, dont 56 % de la surface concernée se trouve sur les versants sud et est. L'érosion en rigoles est également majoritairement localisée sur ces versants (73 %), tandis que les éboulis y sont présents à 100 %. De plus, 68 % des glissements de terrain se concentrent sur les versants d'exposition est. L'érosion en nappe affecte l'ensemble des versants, bien qu'elle soit particulièrement marquée sur ceux orientés au sud (60 %). En revanche, les zones où l'érosion est faible sont fortement concentrées sur les versants sud, couvrant 69 % de leur superficie. De manière générale, la relation entre la dynamique érosive et l'orientation des versants est bien établie dans la zone d'étude. Plus de 60 % des versants du bassin versant de l'oued Boumlal sont exposés au sud et connaissent une concentration significative des différentes formes d'érosion hydrique.

En fonction d'occupation des sols : L'homme, par ses activités inadaptées sur les versants, constitue le principal facteur qui amplifie l'intensité de l'érosion. Le défrichement des forêts et des parcours naturels, le surpâturage, la mise en culture des terres en pente, les incendies et la construction d'infrastructures, notamment routières, contribuent à l'augmentation de la susceptibilité des sols à la dégradation. L'analyse de la répartition des formes d'érosion en fonction de l'occupation des sols (figure 9) révèle que l'érosion est particulièrement concentrée dans les terrains cultivés, les zones de culture en ligne ainsi que dans les zones où les arbustes clairsemés et les pâturages dégradés. À l'inverse, les zones irriguées et les forêts denses sont moins affectées par l'érosion.

La dynamique érosive varie selon l'occupation des sols dans le bassin versant de l'oued Boumlal. Dans les zones de culture en ligne, plusieurs formes d'érosion sont prédominantes, avec des proportions significatives de leur surface totale : ravinement généralisé (80 %), ravinement localisé (54 %), glissements de terrain (72 %) et érosion en nappe (58 %). Ces formes d'érosion sont également bien représentées dans les terres cultivées et les parcours, où elles occupent des superficies importantes.

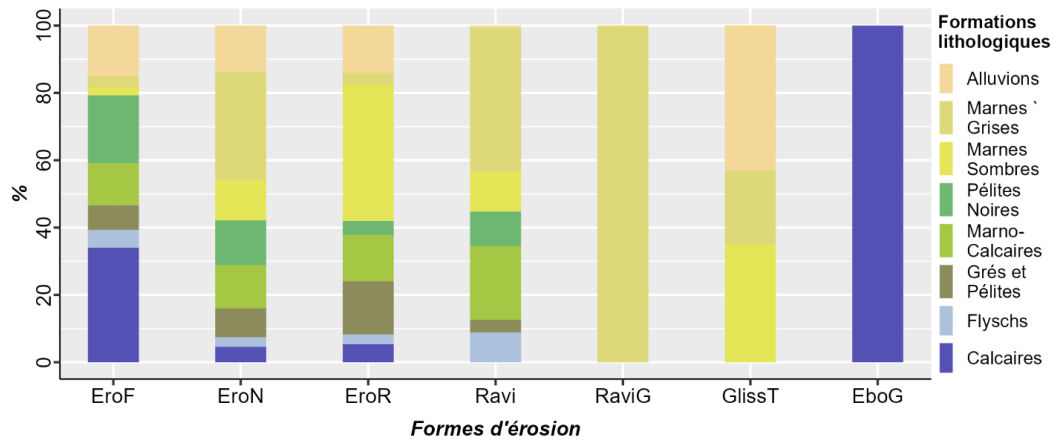


Figure 6. Distribution des formes d'érosion en fonction des formations lithologiques. Source : propre élaboration.

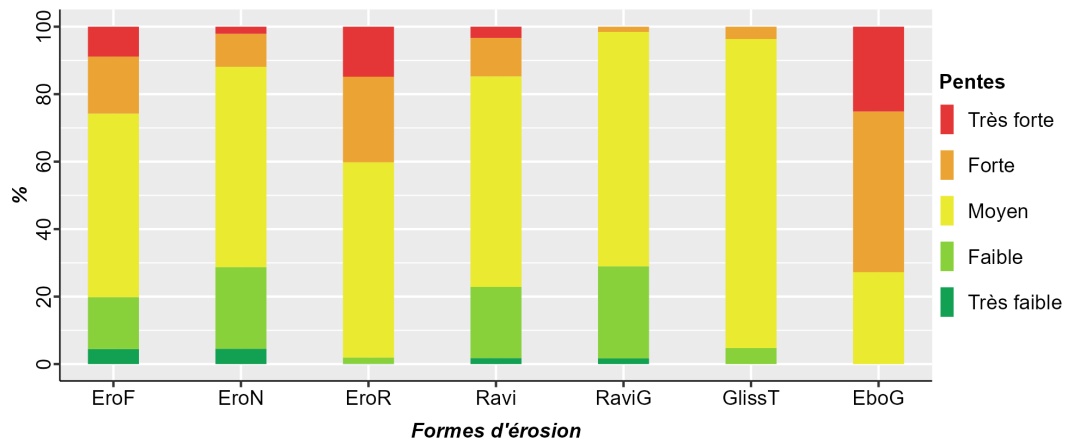


Figure 7. Distribution des formes d'érosion en fonction des pentes. Source : propre élaboration.

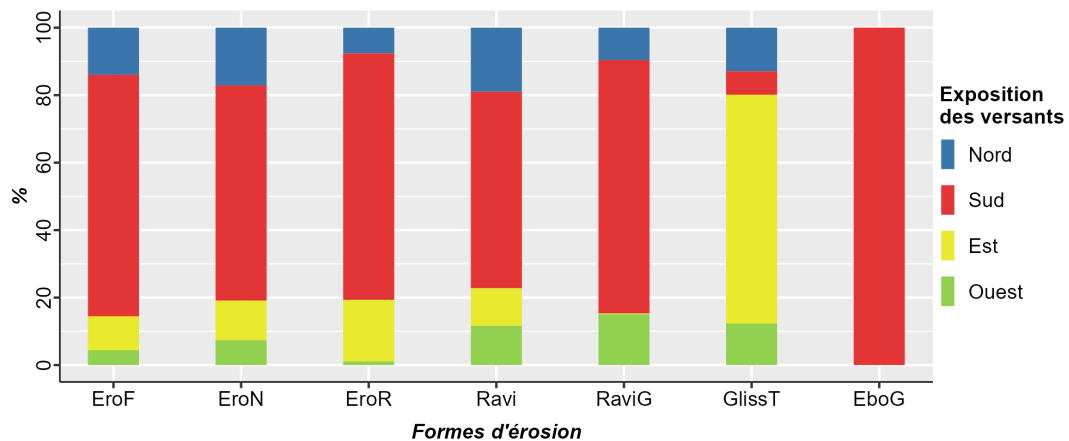


Figure 8. Distribution des formes d'érosion en fonction de l'exposition des versants. Source : propre élaboration.

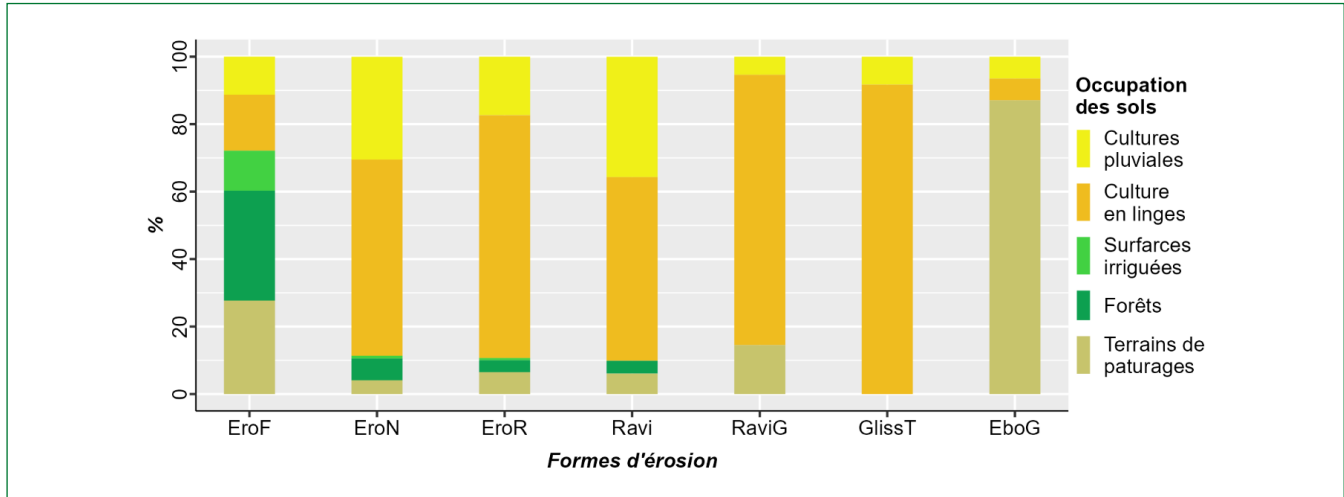


Figure 9. Distribution des formes d'érosion en fonction d'occupation des sols. Source : propre élaboration.

4.5. La dynamique des ravins : mesures et processus

Lorsque le ruissellement devient abondant, il se structure en un réseau hiérarchisé, acquiert suffisamment d'énergie pour éroder les sols et favorise la formation de griffes et de rigoles qui peuvent évoluer en ravines. Une ravine se forme lorsque l'incision du sol dépasse 50 cm de profondeur et devient irréversible par le labour (Roose, 2010). Selon la classification de Roose (1994), les ravines diffèrent en taille et en forme. En fonction de leur taille, on distingue les petits ravins, les ravines de taille moyenne et les grandes ravines torrentielles, qui peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres, avec un canal central tapissé de blocs rocheux, témoins d'un important charriage de pierres. D'un point de vue morphologique, deux types de ravines peuvent être distingués : les ravines en forme de V, qui se développent sur des matériaux tendres et homogènes (marnes, argilites, schistes tendres, grès tendres), et les ravines en forme de U, qui apparaissent sur des matériaux cohérents et hétérogènes. Dans le bassin versant de l'oued Boumlal, les ravines se caractérisent majoritairement par une forme en V, ce qui s'explique par la prédominance de formations lithologiques homogènes et tendres, notamment les marnes et les flyschs.

Le suivi de la morphologie des ravins constitue un indicateur clé de leur dynamique. Leurs caractéristiques morphologiques sont influencées par les interventions humaines et les conditions environnementales (Conoscenti *et al.*, 2014). L'analyse de l'érosion par ravinement en lien avec les facteurs causaux montre que ce type d'érosion se développe principalement sur les terrains de cultures en lignes et sur des formations lithologiques peu résistantes (marnes grises et pélites noires). De plus, les ravines se forment principalement sur des pentes moyennes et des versants exposés au sud.

Dans la zone d'étude, le suivi des ravins a été réalisé à travers des mesures de terrain effectuées à trois niveaux : en amont, en zone médiane et en aval. Pour chaque section, nous avons analysé l'occupation des sols, la pente, l'altitude, l'exposition des versants ainsi que les caractéristiques lithologiques des sites étudiés, afin de mieux comprendre leur évolution et les processus influençant leur dynamique. L'analyse des ravins dans le bassin versant de l'oued Boumlal suggère différentes formes de morphodynamique : l'érosion régressive provoquant le recul de la tête du ravin, le creusement et l'affouillement du fond, l'élargissement par sapement des berges, le colmatage total par glissements, ainsi que des ravins stabilisés. La carte (figure 10) illustre la répartition des ravins mesurés dans la zone d'étude. Divers types de ravins ont été relevés, mais cette étude se focalise sur deux types spécifiques : Le ravin marqué par le creusement et l'affouillement du fond (R1) et celui affecté par l'érosion régressive (R2).

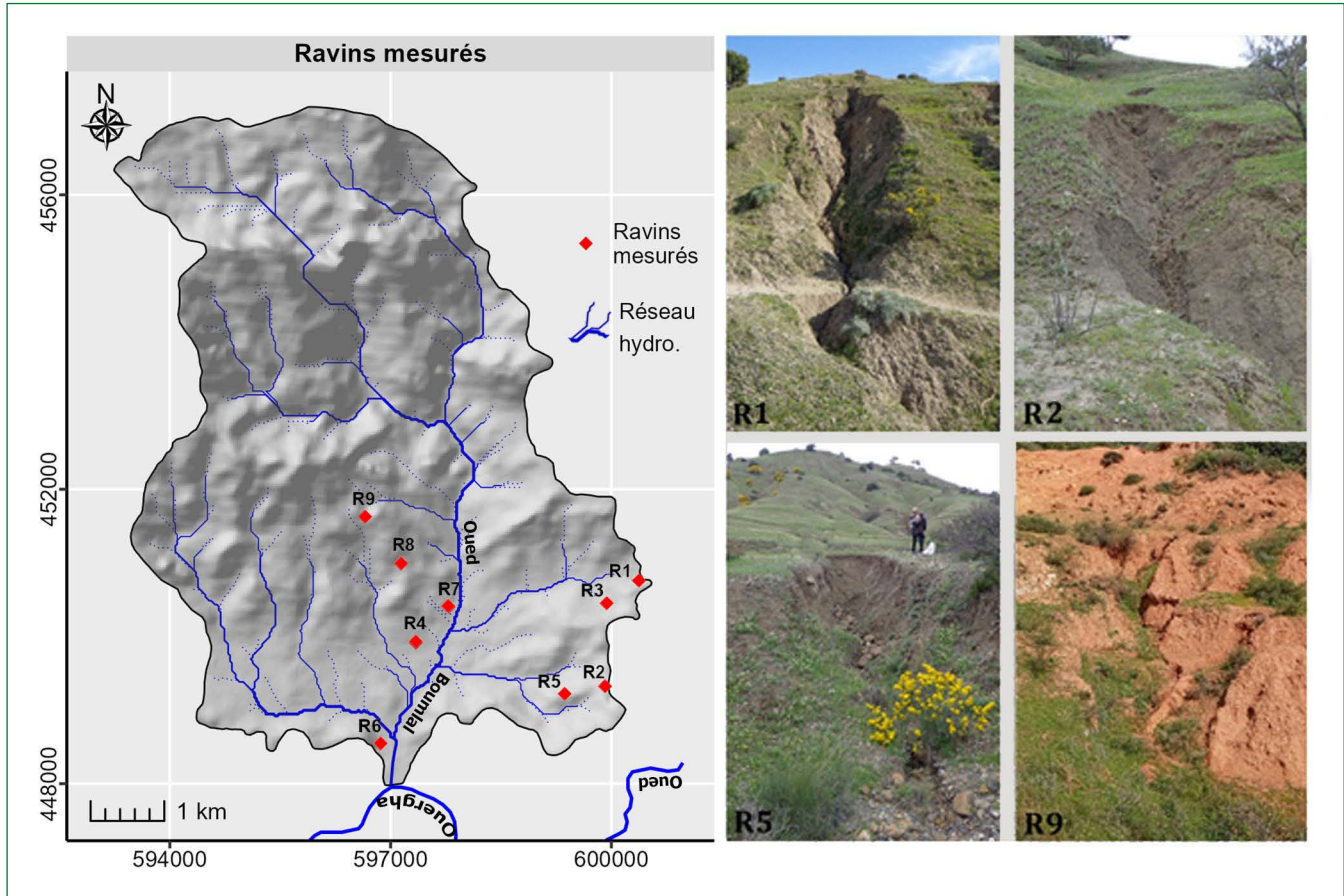


Figure 10. Localisation des ravins mesurés dans le bassin versant de l'oued Boumlal. Source : propre élaboration.

80

4.5.1. Dynamique des ravins par affouillement des berges (R1)

La dynamique des ravins caractérisée par un affouillement des berges (R1) se manifeste principalement sur les terrains marneux. Ce phénomène résulte de l'effet de la masse d'eau qui crée un tourbillon qui attaque progressivement le bas des berges du ravin. Ce type d'évolution est particulièrement observé dans la partie aval de la zone d'étude. Le ravin R1 est localisé sur un versant d'exposition nord-ouest, à une altitude de 565 m et avec une pente de 10°, ce ravin se développe sur un substrat de marnes grises du Messinien, une formation lithologique particulièrement vulnérable à l'érosion. Le terrain sur lequel il s'étend est utilisé pour le pâturage, parsemé de quelques oliviers, principalement situés en amont du versant. Cette localisation, combinée aux conditions morphologiques et lithologiques, favorise l'intensification du phénomène d'affouillement, contribuant à l'élargissement progressif du ravin (figure 11b).

Dans ce site, deux mesures ont été réalisées, la première le 02/04/2018 et la seconde le 17/03/2021, soit un décalage de 3 ans. Les résultats des deux mesures sont détaillés dans le tableau 1. La première observation est que la progression en longueur du ravin a été relativement faible, avec une augmentation de seulement 0.45 m en trois ans. Cette faible évolution peut être expliquée par la concentration du ruissellement dans le lit du ravin, ce qui a permis à l'eau de s'accumuler et d'attaquer principalement le bas des berges droites. Cette action a provoqué un développement notable de la profondeur des berges. En revanche, l'élargissement du ravin, qui touche toutes les sections mesurées (amont, médiane et aval), a été plus significatif. Dans la partie amont, la largeur a augmenté de 0.6 m, dans la section médiane de 0.8 m, et dans la partie aval de 0.6 m. Ces évolutions reflètent l'impact constant du ruissellement concentré au bas du ravin, qui favorise son élargissement progressif.



Figure 11. Dynamique du ravin R1 par affouillement des berges. a). État du ravin en 2018. b). État du ravin en 2021. Source : propre élaboration.

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques du ravin R1.

		Partie amont			Partie médiane			Partie aval			Occupation du sol	Lithologie
	L	I	P		I	P		I	P		Terrain de pâturages	Marnes grises Messinien
			RG	RD		RG	RD		RG	RD		
2018	15.55	2.4	2,65	1,58	3.3	2.7	1.8	2.2	2.2	1.4		
2021	16.00	3.0	2.10	1.90	4.1	2.7	2.5	2.8	2.2	1.4		

L : Longueur (m), l : largeur (m), P : Profondeur (m), RG : Rive gauche, RD : Rive droit. Source : propre élaboration.

4.5.2. Dynamique des ravins par l'érosion régressive (R2)

L'érosion régressive remontante, caractérisée par le recul de la tête du ravin, correspond à un phénomène d'agrandissement du ravin par propagation vers l'amont, c'est-à-dire dans le sens inverse de l'écoulement de l'eau. Dans la zone d'étude, cette dynamique s'observe principalement sur les terrains marneux riches en gypse, comme c'est le cas du site R2, situé dans la partie aval du bassin. Le ravin suivi dans ce site se développe sur un versant exposé au nord-ouest, à une altitude de 645 m et sur une pente de 13°. Il est localisé sur des terrains de pâturage parsemés de quelques oliviers clairsemés (figure 13).

Nous avons réalisé deux mesures de ce ravin : la première le 2 avril 2018 et la seconde le 17 mars 2021, soit un intervalle de trois ans. Le tableau 2 présente les résultats issus de ces mesures, mettant en évidence des modifications significatives de ses dimensions (longueur, largeur et profondeur). Le principal constat est la progression notable du ravin : sa longueur est passée de 11,50 m en 2018 à 16,60 m en 2021, soit une extension de 5,1 m. Son élargissement résulte du recul de la tête du ravin sous l'effet de la suffusion, ce processus affecte particulièrement les terrains marneux riches en gypse. En période pluviale, la dissolution des encroûtements gypseux favorise l'apparition de formes cylindriques minuscules (figure 12), créant des tunnels qui favorisent l'infiltration et la circulation interne des eaux de pluie (Tribak, 1998). Ce phénomène entraîne des effondrements successifs, et par conséquent l'élargissement du ravin.



Les résultats des mesures indiquent une dynamique d'élargissement au niveau de la largeur du ravin, observée dans ses trois sections (amont, médiane et aval). Dans la partie médiane, la largeur du ravin a augmenté de 1,9 m en 2018 à 3 m en 2021, soit un élargissement de 1,1 m. Ce phénomène est attribué au sapement de la rive droite du ravin dans cette section, provoqué par la concentration des eaux de ruissellement qui engendrent des petits glissements superficiels. La photo 13b illustre également un faible comblement des rives gauches dans les sections amont et médiane, dû à l'accumulation des sédiments produits par le sapement des berges. En revanche, les rives droites de ces parties connaissent un léger creusement. Les sédiments érodés sont ensuite transportés et déposés au fond du ravin.

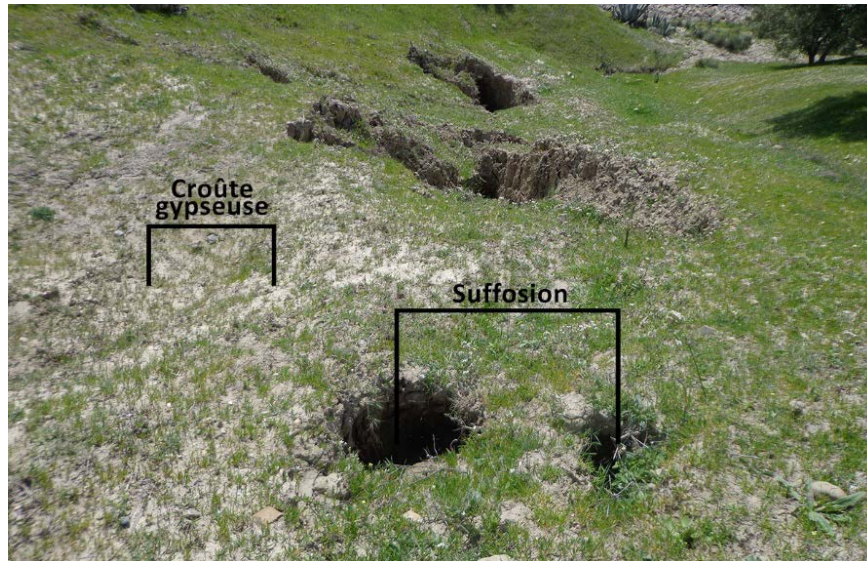


Figure 12. Le phénomène de suffosion observé au ravin R2 se caractérise par la présence d'encroûtements gypseux sous forme de taches blanchâtres. Leur dissolution entraîne la formation de tunnels, qui permettent la circulation interne des eaux pluviales. L'effondrement de ces structures contribue activement à l'élargissement et au développement du ravin. Source : propre élaboration.

82

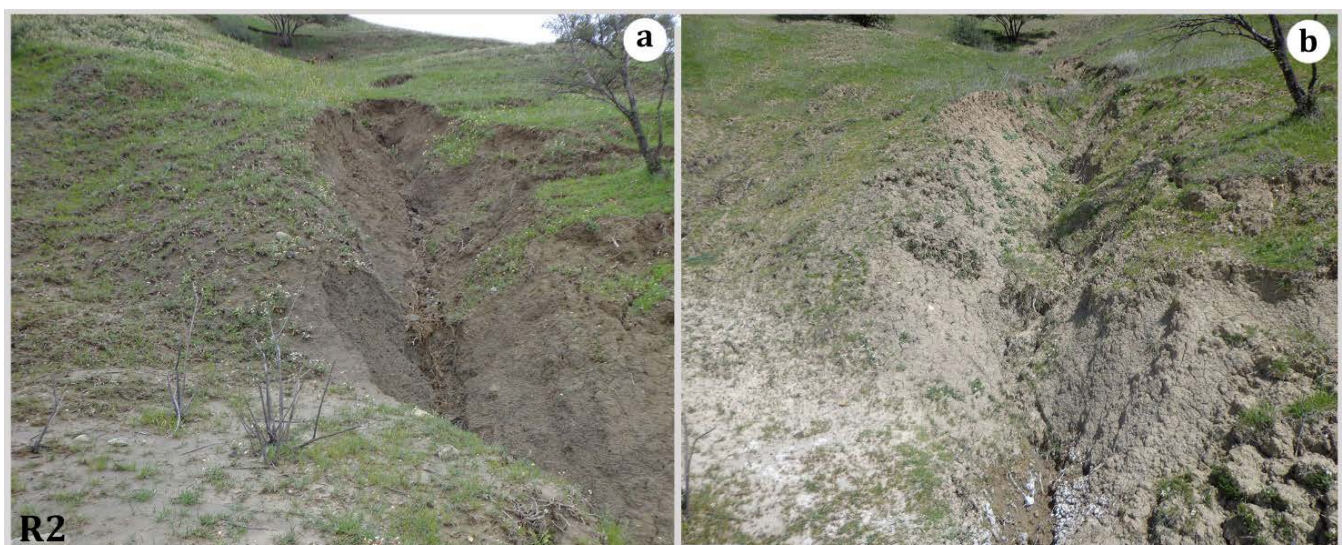


Figure 13. Dynamique du ravin R2 sous l'effet de l'érosion régressive. a). État du ravin en 2018. b). État du ravin en 2021. Source : propre élaboration.

**Tableau 2.** Caractéristiques morphologiques du ravin R2.

		Partie amont			Partie médiane			Partie aval			Occupation du sol	Lithologie
	L	I	P		I	P		I	P			
			RG	RD		RG	RD		RG	RD		
2018	11.5	1.3	1.36	1.3	1.9	1.76	1.3	1.7	1.24	1.1	Terrain de pâturages avec quelques arbres d'oliviers dispersés	Marnes
2021	16.6	2.2	1.10	1.5	3	1.60	2.1	2.5	2.4	0.8		

L : Longueur (m), I : largeur (m), P : Profondeur (m), RG : Rive gauche, RD : Rive droit. Source : propre élaboration.

5. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Au cours des dernières décennies, les bassins versants rifains ont fait l'objet de nombreuses études portant sur l'évaluation de l'érosion hydrique à travers l'application de diverses méthodes. Parmi celles-ci, la quantification de l'érosion en nappe par USLE/RUSLE (Universal Soil Loss Equation) a été couramment adoptée dans les bassins du Rif (Tahiri *et al.*, 2014; Tribak *et al.*, 2015; Khali Issa *et al.*, 2016, Belasri & Lakhouili, 2016). De même, le modèle de Gavrilovic (EPM) a été largement utilisé par les chercheurs pour évaluer l'érosion hydrique qualitativement et quantitativement (Chaaouan *et al.*, 2013; El-Bouhali *et al.*, 2019; Zahnoun *et al.*, 2020; Lakhili *et al.*, 2021). En parallèle à ces approches quantitatives, l'approche PAP/CAR a été appliquée pour évaluer le potentiel érosif dans les bassins situés dans le Rif et le Pré-rif (Ouallali *et al.*, 2016; Boukrim *et al.*, 2016; Tahouri *et al.*, 2022). Avec le développement des SIG, le nombre d'études basées sur la modélisation de l'érosion hydrique à l'aide des modèles USLE, RUSLE, PAP/CAR et EPM a considérablement augmenté, tandis que les méthodes traditionnelles ont connu une utilisation très limitée (El Ouazani Ech-Chahdi, 2023).

83

Les recherches menées dans le Rif marocain suggèrent que la dégradation des terres est un processus complexe dû à l'interaction entre les facteurs naturels et anthropiques (Sadiki *et al.*, 2009; El-Bouhali *et al.*, 2019; Boutallaka *et al.*, 2025). Les modifications continues d'occupation des sols ont conduit à l'accélération du rythme de dégradation des terres dans les milieux rifains. Les résultats obtenus par les chercheurs indiquent que cette partie du Maroc est parmi les zones méditerranéennes les plus vulnérables à l'érosion hydrique (Roose *et al.*, 2012; El-Ommal *et al.*, 2024). Heusch, (1970) a montré que 60 % des pertes en sol au Maroc proviennent du Rif, où les taux d'érosion atteignent parfois 30 à 60 t/ha/an dans certaines parties (Belasri & Lakhouili, 2016). La quantité de sédiments produite varie d'un milieu à l'autre en fonction des méthodes appliquées et en fonction des caractéristiques des bassins versants (El Ouazani Ech-Chahdi, 2023). Par ailleurs, plusieurs études soulignent que l'érosion hydrique constitue un facteur déterminant de la désertification, qui présente une forme avancée de dégradation des terres dans la région méditerranéenne (Karamesouti *et al.*, 2015). Dans ce contexte, notre étude a été focalisée sur l'évaluation de l'érosion potentielle (approche basée sur la modélisation) et le suivi de la morphodynamique des ravins (mesures sur terrain) dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Haut Ouergha).

Le bassin versant de l'oued Boumlal évolue dans un contexte climatique méditerranéen semi-aride, marqué par une répartition irrégulière et une concentration spatiotemporelle des précipitations durant la saison humide. Les averses orageuses d'automne coïncident avec des sols insuffisamment protégés par la végétation sur des pentes abruptes et des formations lithologiques friables. Ces facteurs favorisent l'intensification du ruissellement et le déclenchement des premiers stades de l'érosion (érosion en nappe et érosion en rigoles). À cela s'ajoute la forte densité de population qui exerce une pression continue sur les milieux, par le défrichement, le surpâturage, la mise en culture de terrains en forte pente et l'extension de la culture du cannabis. Ces activités aggravent la fragilité des sols et accélèrent leur dégradation par l'érosion hydrique.



L'application de l'approche PAP/CAR indique que ce bassin est très vulnérable à l'érosion hydrique, avec 57 % de sa superficie classée comme instable et environ 31 % considérée comme critique. En revanche, les zones stables occupent des surfaces limitées. Le fort potentiel érosif lié à la fragilité des milieux se manifeste par le développement de diverses formes d'érosion hydrique, notamment l'érosion en nappe, le ravinement, le ravinement généralisé, les glissements de terrain et les éboulements rocheux. L'analyse de la combinaison des formes d'érosion et des facteurs causaux met en évidence l'impact significatif de la lithologie, de l'exposition des versants, de la pente et de l'occupation des sols sur le développement et la répartition des différentes formes d'érosion qui déstabilisent les versants. De manière générale, la zone d'étude est marquée par la présence de l'érosion linéaire (rigoles, griffes et ravinements), qui affecte les terrains imperméables et les pentus versants mal protégés par le couvert végétal. L'érosion en nappe est largement répandue et représente une menace directe pour la fertilité des sols. Enfin, les mouvements de masse se produisent plus fréquemment sur les versants exposés vers l'ouest et caractérisés par une lithologie hétérogène.

Le suivi des ravins indique des variations significatives d'un site à l'autre. En effet, le rythme de leur évolution varie en fonction du type d'occupation des sols, des caractéristiques lithologiques et topographiques des sites de mesure. Sur le terrain, nous avons distingué plusieurs types de ravins et chacun présente une dynamique différente : recul de la tête du ravin, élargissement par sapement des berges, colmatage total par glissements et ravins stables. L'analyse de la dynamique des ravins, par affouillement (R1) et érosion régressive (R2), met en évidence des évolutions notables, avec des changements significatifs dans les dimensions des ravins entre 2018 et 2021. Ces observations soulignent l'aggravation progressive de l'érosion à long terme, en grande partie causée par les phénomènes de suffosion et le ruissellement concentré. La diversité des formes de dégradation des terres peut entraîner la production de quantités importantes de sédiments, ce qui accélère la détérioration des sols et des infrastructures.

La dégradation accélérée des milieux naturels dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Haut Ouergha) nécessite des interventions sous forme de programmes de gestion visant à garantir la durabilité des ressources naturelles. De plus, des initiatives de développement socio-économique sont cruciales pour améliorer les conditions de vie des populations et réduire la pression sur les ressources. Les observations sur le terrain montrent que les interventions traditionnelles jouent un rôle important dans la fixation des sols, bien qu'elles restent limitées spatialement (El Ouazani Ech-Chahdi *et al.*, 2025b). En effet, les terrains aménagés sont moins exposés à l'érosion hydrique, grâce à la mise en place de techniques de conservation des sols qui réduisent l'impact du ruissellement et contribuent à la stabilisation des versants. Ces aménagements incluent les terrasses, les cordons de pierres sèches, les talus, les plantations d'arbres, etc., qui permettent de ralentir l'écoulement des eaux, de favoriser l'infiltration et de limiter l'arrachement des particules du sol. La diversité de ces techniques dans la zone d'étude reflète le savoir-faire des agriculteurs et l'expérience qu'ils ont accumulée au fil du temps (Laouina, 2010). Il est donc essentiel de valoriser ces techniques et de les intégrer dans les programmes d'aménagement des bassins versants menés par les services de l'État (El Ouazani Ech-Chahdi, 2023).

Bien que cette étude fournisse des informations importantes sur la sensibilité des terres à l'érosion hydrique et sur les processus morphodynamiques des ravins dans le bassin versant de l'Oued Boumlal, l'intégration de méthodes d'analyse alternatives, telles que l'AHP (Analytic Hierarchy Process) et des algorithmes d'apprentissage automatique (Random Forest, XGBoost), dans d'autres bassins du Haut Ouergha, permettrait de fournir une évaluation plus précise et robuste de l'érosion hydrique.

Conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.



RÉFÉRENCES

- Achim, F. L. (2019). The dynamics of the ravination processes in Sălătrucel-Olt river basin. *Riscuri Şi Catastrofe*, XVIII(24), 69-80. https://doi.org/10.24193/RJC2019_4
- Ayt Ougougdal, H., Khebiza, M. Y., Messouli, M., Bounoua, L., & karmaoui, A. (2020). Delineation of vulnerable areas to water erosion in a mountain region using SDR-InVEST model: A case study of the Ourika watershed, Morocco. *Scientific African*, 10, e00646. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00646>
- Belasri, A., & Lakhouili, A. (2016). Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8, 98-107. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2016.81010>
- Boukrim, S., Lahrach, L., Midaoui, A., Benjelloun, F., Benabdelhadi, M., Lahrach, H., & Chaouni, A. (2016). Cartographie de l'érosion qualitative des sols du bassin versant de l'Aoudour (Rif-Maroc). *European Scientific Journal edition*, 12(11), 295-311. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n11p295>
- Boutallaka, M., Miloud, T., El Mazi, M., Hmamouchi, M., & El Hairchi, K. (2025). Assessment of current and future land sensitivity to degradation under climate change in the upstream Ouergha watershed (Morocco) using GIS and AHP method. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 10(1), 46-58. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1521350>
- Chaaouan, J., Faleh, A., Sadiki, A., & Mesrar, H. (2013). Télédétection, SIG et modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amzaz, Rif Central. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 203, 19-25. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2013.26>
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., & Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204, 399-411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>
- Deng, Q., Qin, F., Zhang, B., Wang, H., Luo, M., Shu, C., Liu, H., & Liu, G. (2015). Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology*, 228, 703-713. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.032>
- El Mazi, M., Hmamouchi, M., Saber, E., Bouchantouf, S., & Houari, A. (2022). Deforestation effects on soil properties and erosion: a case study in the central Rif, Morocco. *Eurasian Journal of Soil Science*, 11(4), 275 - 283. <https://doi.org/10.18393/ejss.1098600>
- El Ouazani Ech-Chahdi, K. (2023). *La dynamique des milieux naturels dans le Haut Ouergha (Rif Central- Maroc)*. [Thèse de doctorat]. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès.
- El Ouazani Ech-Chahdi, K., El-Bouhali, A., & Amyay, M. (2020). La cartographie et la caracterisation de la sensibilite a la desertification dans le bassin versant du haut ouergha (Rif central - Maroc) par l'approche medalus. *Geomaghreb*, 16, 1-13.
- El Ouazani Ech-chahdi, K., El-Bouhali, A., & Amyay, M. (2025a). Quantification of soil losses using RUSLE model in the Boumlal watershed (Central Rif, Morocco). *E3S Web of Conferences*, 607, 7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560704008>
- El Ouazani Ech-Chahdi, K., El-Bouhali, A., & Amyay, M. (2025b). Erosion hydrique et techniques de gestion conservatoire des sols dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Rif central, Maroc). *Espace Géographique et Société Marocaine*, 98, 71-81.
- El-Bouhali, A., Amyay M., & El Ouazani Ech-Chahdi, K. (2019). La cartographie du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Boumlal (Rif central-Maroc) à l'aide du modèle « EPM ». *Geomaghreb*, 13(1), 15 – 24.
- El-Bouhali, A., Amyay, M., & El Ouazani Ech-Chahdi, K. (2024a). Combined impact of drought and land use changes on water resources in the Tabular Middle Atlas, Morocco. *Revista de Estudios Andaluces*, (48), 202-220. <https://dx.doi.org/10.12795/rea.2024.i48.10>
- El-Bouhali, A., Amyay, M., & El Ouazani Ech-Chahdi, K. (2024b). Changes in water surface area of the Middle Atlas-Morocco lakes: A response to climate and human effects. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(2), 221-232. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1391957>
- El-Ommal, M., & Tribak, A. (2023). Hydrodynamic and Erosive Behavior of Vertisols in the Wadi Sra Catchment (Central Rif, Morocco) – Analysis of the Rainfall Simulation Results. *Journal of Ecological Engineering*, 24(5), 66-77. <https://doi.org/10.12911/22998993/161202>
- El-Ommal, M., Tribak, A., Amhani, Z., & Arari, K. (2024). Culture du Cannabis et dégradation des sols dans les montagnes du Rif Central (Maroc): cas du bassin de l'Oued Sra. *Revista de Estudios Andaluces*, (48), 93-109. <https://doi.org/10.12795/rea.2024.i48.05>



- Frankl, A., Poesen, J., Haile, M., Deckers, J., & Nyssen J. (2013). Quantifying long-term changes in gully networks and volumes in dryland environments: The case of Northern Ethiopia. *Revu Geomorphology*, 201, 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.025>
- Heusch, B. (1970). *L'érosion du pré-rif : une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-rif occidental*. Station de Recherches Forestières de Rabat. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010056569>
- Hmamouchi, M., El-Fengour, A., El-Fengour, M., & Houari, A. (2020). The assessment of erosion in Aoulai watershed (Central Rif mountains, Morocco) based on the PAP-RAC guidelines application. *Territorium*, 27(I), 17-23. https://doi.org/10.14195/1647-7723_27-1_2
- Iaich, H., Moussadek, R., Baghdad, B., Mrabet, R., Douaik, A., Derradji, A., & Bouabdli A. (2016). Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province –Northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.07.001>
- Ionita, I., Fullen, M. A., Zglobicki, W., & Poesen, J. (2015). Gully erosion as a natural and human-induced hazard. *Nat Hazards*, 79, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1935-z>
- Kaddar, R., Bourass, A., El Harche, S., Manaouch, M., & Aghad, M., et al. (2025). Spatialization of soil erosion and flood hazards using analytic hierarchy process modeling in northern Morocco. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(5), 257-275. <https://doi.org/10.12912/27197050/202823>
- Karamesouti, M., Detsis, V., Kounalaki, A., Vasiliou, P., Salvati, L., & Kosmas, C. (2015). Land-use and land degradation processes affecting soil resources: Evidence from a traditional Mediterranean cropland (Greece). *CATENA*, 132, 45–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.CATENA.2015.04.010>
- Khali Issa, L., Ben Hamman Lech-Hab, K., Raissouni, A., & El Arrim, A. (2016). Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche SIG/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *J. Mater. Environ. Sci.*, 7(8), 2778-2795.
- Kosmas, C., Danalatos, N. G., & Gerontidis, S. (2000). The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. *CATENA*, 40(1), 3–17. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00061-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00061-2)
- Lakhili, F., Chaaouan, J., Qadem, Z., Benabdelhadi, M., & Lahrach, A. (2021). Estimation de l'érosion des sols basée sur le SIG à l'aide de la méthode EPM dans le bassin versant de Beht. *EWASH & TI Journal*, 5(2), 588-596.
- Laouina, A. (2010). *Le contexte de la lutte antiérosive au Maroc. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. [Gestion durable des eaux et des sols au Maroc]. Edition IRD, (pp. 103-115). <https://books.openedition.org/irdeditions/326>
- Li, Z., Zhang, Y., Zhu, Q., He, Y., & Yao, W. (2015). Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 228, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.005>
- Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M., & Richard, D. (2003). Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). Calibration of the ETC rainfall-erosion model. *CATENA*, 50(2-4), 527–548. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00122-4)
- Moukhchane, M. (2002). Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin versant du Nakhla (Rif Occidental, Maroc). *Bulletin du Réseau Erosion*, 21, 255-266.
- Naimi, M., Tayaa, M., Ouzizi, S., Choukr-Ilah, R., & Kerby, M. (2002). Estimation du ravinement dans le bassin versant du Nakhla, Rif occidental, Maroc. *Bulletin du Réseau Érosion*, 21, 232-243.
- Ouallali, A., Moukhchane, M., Aassoumi, H., Berrad, F., & Dakir, I. (2016). The Mapping of the Soils' Degradation State by Adaptation the PAP/RAC Guidelines in the Watershed of Wadi Arbaa Ayacha, Western Rif, Morocco. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, 77-88. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.47009>
- PAP/CAR (1998). *Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes*. PAP-8/PP/GL.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/ PNUE), en collaboration avec la FAO, xii+72.
- Poesen, J.J., Nachtergale, J., & Verstrac, G. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA*, 50(2-4), 91-133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
- Rebai, H., Raclot, D., & Ben Ouezdou, H. (2013). Efficacité des aménagements de lutte contre le ravinement : cas du bassin versant d'El Hnach (Tunisie). *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1532-1541. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.824087>



- Roose, E. (1994). *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*. Bulletins pédologiques de la FAO.
- Roose, E. (2010). *La lutte antiérosive conventionnelle en fonction des processus et des facteurs de l'érosion hydrique. Gestion durable des eaux et des sols au Maroc*. IRD Éditions, 47-78. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.322>
- Roose, E., Sabir, M., Arabi, M., Morsli, B., & Mazour, M. (2012). Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo*, 6(1), 43-69. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2319>
- Sabir, M. (2002). Quelques techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosive dans le bassin versant de Sidi Driss, Haut Atlas Central, Maroc. *Bulletin Réseau Érosion*, 21, 224- 231.
- Sadiki, A., Faleh, A., Zêzere, J.L., & Mastas, H. (2009). Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'Oued Sahla Rif central Maroc. *Cahiers géographiques*, 6, 59 - 70.
- Tahiri, M., Tabyaoui, H., El Hammichi, F., Tahiri, A., & El Hadi, H. (2014), Evaluation et Quantification de l'Erosion et la Sédimentation à Partir des Modèles RUSLE, MUSLE et Déposition Intégrés dans un SIG. Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 125(2), 157-178
- Tahouri, J., Sadiki, A., Karrat, L., Carl Johnson, V., 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, 254-272. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.07.003>
- Torri, D., Colica, A., & Rockwell, D. (1994). Preliminary study of the erosion mechanisms in biancana badland (Tuscany, Italy). *CATENA*, 23(3-4), 281-294. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90073-6)
- Tribak, A. (1998). Fonctionnement actuel d'une ravine d'érosion dans une zone de marnes miocènes (région de Tarmast, Préfif oriental, Maroc) Modèle d'évolution et distribution saisonnière des processus. *Revue de Géographie Alpine*, 86(3), 37-48.
- Tribak, A., Arari, K., Abahrour, M., El Garouani, A., & Amhani, Z. (2015). Quantitative assessment of the hydric erosion and the deposition in a marly catchment of the eastern Rif (Case of Wadi Tarmast - Morocco). *Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series*, 15(2), 101-24.
- Zahnoun, A. A., Makhchane, M., Chakir, M., Al Karkouri, J., & Watfae, A. (2020). Estimation and cartography the water erosion by integration of the Gavrilovic "EPM" model using a GIS in the Mediterranean watershed: Lower Oued Kert watershed (Eastern Rif, Morocco). *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 5(6), 367 - 374. <https://www.ijariit.com/manuscripts/v5i6/V5I6-1298.pdf>
- Ziadi, K., Barakat, A., El Aloui, A., Ouayah, M., & Namous, M. (2025). Prioritization of the Tassaoute Watershed (Morocco) for soil erosion using analytical hierarchy process (AHP) and geospatial techniques. *Geosystems and Geoenvironment*, 4, 100389. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100389>