Revista de Estudios Andaluces (REA) | Núm. 49, febrero (2025) | e-ISSN: 2340-2776
https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49 | © Editorial Universidad de Sevilla 2025
https://editorial.us.es/es/revistas/revista-de-estudios-andaluces
https://revistascientificas.us.es/index.php/REA
CC BY-NC-SA 4.0.
Editorial Universidad de Sevilla

Cartographie et l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf (BV de l'Ouèd Inaouène) à l'aide du modèle PAP/CAR et des outils SIG

Mapping and assessment of water erosion in the Ouèd Bou Lajraf basin (Ouèd Inaouène BV) using the PAP/CAR model and GIS tools

Mapeo y evaluación de la erosión hídrica en la cuenca del Ouèd Bou Lajraf (Ouèd Inaouène BV) utilizando el modelo PAP/CAR y herramientas SIG

Mohamed Benaissa
mohamed.benaissa1@usmba.ac.ma 0009-0004-6716-6512
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès. Laboratoire Espace, Histoire, Dynamique et Développement durable. Faculté Polydisciplinaire Taza Route d'Oujda–B.P. 1223, Taza, Maroc.

Jaouad Gartet
jaouad.gartet@usmba.ac.ma
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès. Laboratoire Milieux naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-spatiales. FLSH Sais-Fès. Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs-Fés. BP 59 Route Immouzer. 30000 Fès, Maroc.

Fouad Sahi
fouad.sahi@usmba.ac.ma 0009-0002-7763-8603
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès. Laboratoire Milieux naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-spatiales. FLSH Sais-Fès. Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs-Fés. BP 59 Route Immouzer. 30000 Fès, Maroc

Mustapha Hamdach
mustapha.hamdach@usmba.ac.ma 0009-0005-1168-1045
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès. Laboratoire Espace, Histoire, Dynamique et Développement durable. Faculté Polydisciplinaire Taza Route d'Oujda–B.P. 1223, Taza, Maroc.

INFO ARTÍCULO

Reçu: 25/08/ 2024
Revu: 04/12/2024
Accepté: 12/12/2024

MOTS CLÉS

Érosion hydrique
Méthode PAP/CAR
SIG
Bassin versant Bou Lajraf
Badlands

RÉSUMÉ

L'étude de l'érosion hydrique dans les sous bassins versants d'Inaouène représente un phénomène dynamique au fil du temps, avec le changement d'un ou plusieurs facteurs responsables.

Dans le bassin versant Bou Lajraf qui représente un sous bassin versant d'Inaouène, la fragilité des sols, les pentes élevées et la succession des années sèches favorisent de plus l'exposition des versants vers la dégradation de la couche superficielle, plus particulièrement dans la partie amont du BV.

Utilisation de l'approche PAP/CAR pour une étude descriptive de l'érosion hydrique dans le BV Bou Lajraf fournira une connaissance géomorphologique de l'état des versants.

La méthode d'approche adoptée, basée sur l'observation systématique de divers phénomènes sur le terrain. Ainsi pour chaque type de milieu défini composant le bassin versant, nous avons relevé toutes les manifestations morphogéniques. Les interprétations sont basées sur l'analyse des éléments du milieu physique et humain (modes d'exploitation du sol).

L'analyse qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf par la méthode PAP/CAR, permis de donner des résultats sur la situation géomorphologique de la surface au niveau de l'érosion hydrique. L'approche prédictive montre que 75% du BV présentent un état érosif élevé et très élevé.

La fragilité des matériaux et leur sensibilité à l'érosion hydrique revêtent d'autant plus d'importance que la plupart des terrains sont dénudés et directement exposés aux effets morphogéniques des évènements pluviométriques.

DOI: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12
Formato de cita / Citation: Benaissa, M., Gartet J., Sahi, F., & Hamdach, M. (2025). Mapping and assessment of water erosion in the Ouèd Bou Lajraf basin (Ouèd Inaouène BV) using the PAP/CAR model and GIS tools. *Revista de Estudios Andaluces,*(49), 228-256. https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12
Correspondencia autores: mohamed.benaissa1@usmba.ac.ma (Mohamed Benaissa)

L'apparition des formes d'érosion hydrique en nappe et linéaire dans la partie amont du BV Bou Lajraf reste une forme morphogénique et de dégradation majeure des sols. Cette dynamique porte préjudice à la population locale, les terres agricoles et les infrastructures.
L'analyse de la carte des formes d'érosion hydrique montre que le bassin versant de Bou Lajraf est influencé par un taux très élevé de dégradation des versants, avec une grande superficie de badlands.

KEYWORDS

Water erosion
PAP/RAC method
GIS
Bou Lajraf watershed
Badlands

ABSTRACT

The study of water erosion in the Inaouène sub-watersheds represents a dynamic phenomenon over time, with the change of one or more responsible factors.
In the Bou Lajraf watershed, which represents a sub-watershed of Inaouène, the fragility of the soils, the high slopes and the succession of dry years further promote the exposure of the slopes to the degradation of the surface layer, particularly in the upstream part of the watershed.
Using the PAP/RAC approach for a descriptive study of water erosion in the Bou Lajraf watershed will provide geomorphological knowledge of the state of the slopes. The approach method adopted, based on the systematic observation of various phenomena in the field. Thus for each type of defined environment making up the watershed, we noted all the morphogenic manifestations. The interpretations are based on the analysis of the elements of the physical and human environment (modes of exploitation of the soil).
The qualitative analysis of water erosion in the Bou Lajraf watershed by the PAP/RAC method, allowed to give results on the geomorphological situation of the surface at the level of water erosion. The predictive approach shows that 75% of the watershed has a high and very high erosive state.
The fragility of materials and their sensitivity to water erosion are all the more important since most of the land is bare and directly exposed to the morphogenic effects of rainfall events.
The appearance of sheet and linear water erosion forms in the upstream part of the watershed Bou Lajraf remains a morphogenic form and major soil degradation. This dynamic is detrimental to the local population, agricultural land and infrastructure.
Analysis of the water erosion forms map shows that the Bou Lajraf watershed is influenced by a very high rate of slope degradation, with a large area of badlands.

PALABRAS CLAVE

Erosión hídrica
Método PAP/CAR
SIG
Cuenca de Bou Lajraf
Badlands

RESUMEN

El estudio de la erosión hídrica en las subcuencas del Inaouène representa un fenómeno dinámico en el tiempo, con el cambio de uno o más factores responsables.
En la cuenca del Bou Lajraf, que representa una subcuenca del Inaouène, la fragilidad de los suelos, las fuertes pendientes y la sucesión de años secos también favorecen la exposición de las laderas a la degradación de la capa superficial, más particularmente en aguas arriba. parte del BV.
La utilización del método PAP/CAR para un estudio descriptivo de la erosión hídrica en el BV Bou Lajraf proporcionará conocimientos geomorfológicos del estado de las laderas.
El método adoptado, se basó en la observación sistemática de diversos fenómenos en el campo. Así, para cada tipo de ambiente definido que constituye la cuenca, anotamos todas las manifestaciones morfogénicas. Las interpretaciones se basan en el análisis de los elementos del entorno físico y humano (modos de uso del suelo).
El análisis cualitativo de la erosión hídrica en la cuenca de Bou Lajraf mediante el método PAP/CAR permitió proporcionar resultados sobre la situación geomorfológica de la superficie al nivel de la erosión hídrica. El enfoque predictivo muestra que el 75% del BV presenta un estado erosivo alto y muy alto.
La fragilidad de los materiales y su sensibilidad a la erosión hídrica son tanto más importantes cuanto que la mayor parte de la tierra está desnuda y directamente expuesta a los efectos morfogénicos de las precipitaciones.
La aparición de formas laminares y lineales de erosión hídrica en la parte superior del BV Bou Lajraf sigue siendo una forma morfogénica y una importante degradación del suelo. Esta dinámica es perjudicial para la población local, las tierras agrícolas y la infraestructura.
El análisis del mapa de formas de erosión hídrica muestra que la cuenca del Bou Lajraf está influenciada por un ritmo muy elevado de degradación de las laderas, con una gran superficie de badlands.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

1. INTRODUCTION

La morphologie des versants est influencée par une dynamique complexe, elle dépend de plusieurs paramètres: la fragmentabilité et la dégradabilité des roches, la forme et la pente des versants, le comportement des facteurs climatiques, l'occupation des sols et le taux de recouvrement végétal, pratiques culturales des sols et les activités anthropiques. Ainsi il apparait clair, que l'analyse et l'interprétation de la dynamique des versants font appel à des facteurs bien déterminés selon leur degré d'intégration.

Le contenue de l'article suivant s'articule sur un axe géomorphologique principale, l'érosion hydrique, qui reste une problématique environnementale géomorphologiques internationale, plus particulièrement dans les régions méditerranéennes à climat semi-aride. Il dégrade les sols, provoque une modification des versants, une régression des terres fertiles, et par conséquent une réduction de leurs capacités de production agricole.

Les méfaits de l'érosion ont donc été observés très tôt, mais les recherches sur les divers processus d'érosion et les moyens de les contrecarrer ne commencèrent que vers les années 1950 (Gréco, 1966). Dans l'ensemble du Maghreb, les colons et les agronomes ont rapidement constaté la dégradation des sols surpâturés ou labourés. Faisant confiance aux études effectuées aux USA (Bennett, 1939).

Au Maroc, (Ruellan, 1967) a décrit les processus d'encroûtement calcaire et d'érosion, tandis que les géomorphologues et géographes «physiciens» ont consacré une partie au moins de leurs travaux à la géodynamique actuelle (Raynal, 1957; Avenard, 1965; Maurer, 1968; Beaudet *et al*., 1964; Robert, 1970; Nafâa, 1997; El Harradji, 1997; Gartet, 2010). En 1990, Avenard a produit une cartographie de la répartition des divers processus d'érosion et analysé la sensibilité des versants aux mouvements en masse.

Plusieurs études locales ont été menées pour évaluer et quantifier le risque d'érosion, notamment dans les régions du Rif et du Pré-Rif, montrant des taux d'érosion dépassant parfois 80 tonnes par hectare et par an (Dhman *et al.*, 1997; Rahhou, 1999 **;** Sadiki *et al.*, 2004; Faleh, 2004; Karkouri & Zahnoun, 2019).

Des études menées dans le cadre du Plan national d'aménagement des bassins versants (A.E.F.C.S, 1999) ont montré que la capacité totale actuellement perdue par les barrages est d'environ un milliard de m^3, soit l'équivalent du réservoir de cinq barrages existants, correspondant également à la quantité d'eau nécessaire pour irriguer 5000 à 6000 ha/an.

Chaque bassin versant du Maroc est caractérisé par des conditions géomorphologiques particulières. Nous avons choisissez le bassin versant Bou Lajraf à cause de la présence de plusieurs paramètres géomorphologiques qui favorisent la dynamique des versants.

Dans le bassin versant Bou Lajraf, l'utilisation des sols est très diversifiée et dépend des conditions topographiques, lithologiques, morphologiques et climatiques. Cette diversité d'occupation des sols conditionne souvent le mode de dégradation des sols et provoque d'énormes problèmes, dont les retombés socio-économiques et environnementaux sont très négatifs.

Chaque année, avec le mode des précipitations, le bassin versant Bou Lajraf subit la disparition d'une partie de ces bonnes terres par le ruissellement. La fertilité de ses sols étant en régression, les irrégularités climatiques viennent accentuer la dynamique de surface par l'irrégularité des pluies et des températures. Les terrains d'Inaouène connaissent soit le prolongement de la saison sèche, qui prépare le sol à une dynamique plus importante, soit l'agressivité des pluies qui favorise le ruissellement et par conséquent l'érosion hydrique concentrée.

L'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf offre une perspective géomorphologique, présente un cas spécifique et réunit la plupart des causes de ce phénomène.

2. TERRAIN D'ETUDE: BASSIN VERSANT DE L'OUED BOU LAJRAF

Le bassin versant de Bou Lajraf a été étudié en raison de l'absence d'études géomorphologiques (dynamique des versants) sur ce bassin versant, qui ne regroupe ni les caractéristiques physiques du moyen Atlas ni du Rif. La répartition qualitative des degrés des formes de l'érosion hydrique et des mouvements de terrain

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

dans le bassin versant de l'Ouèd Inaouène nous a permis de nuancer le comportement des terrains du bassin d'Inaouène en trois domaines: les bassins versants prérifains, les bassins versants moyen atlasiques et le bassin versant de Bou Lajraf (Benaissa, 2024).

La zone du bassin versant d'Ouèd Bou Lajraf est située entre le Moyen Atlas et le Prérif, il est considéré comme l'un des affluents principaux du bassin versant Inaouène, situé à l'Est de la ville de Taza entre les coordonnées géographiques longitudinales de 34.20° et 34.05° à l'Est et entre 3.50° et 3.59° au Nord de l'équateur. Le bassin versant de Bou Lajraf s'étend sur une superficie de 291 km², administrativement il appartienne à la province de Taza (Commune rural de Gueldamane) et une petite partie à l'Est de Guercif (Commune rurale de Taddart). Les cartes topographiques qui couvrent le bassin versant de Bou Lajraf sont formées par Ain Bou Kellal et Ain El Behira.

De point de vue topographique, la zone d'étude est caractérisée par une variation altitudinale allant de 400m à 1900m dans la partie amont du bassin versant (figure 2). Il présente dans l'ensemble une lithologie formée essentiellement par des formations sédimentaire (marnes et calcaires).

> La morphologie du bassin versant Bou Lajraf est marquée par des versants de pentes fortes et altitues élevées, ce qui entraîne une superficie très limitée réservée aux pratiques agricoles. Les problèmes créés par ces pratiques sont particulièrement frappants dans les zones montagneuses et les zones où les terres agricoles sont soumises à des conditions environnementales défavorables, telles que des altitudes élevées, des pentes raides, des sols peu profonds et des conditions climatiques sèches avec de fortes précipitations (MacDonald *et al*., 2000).

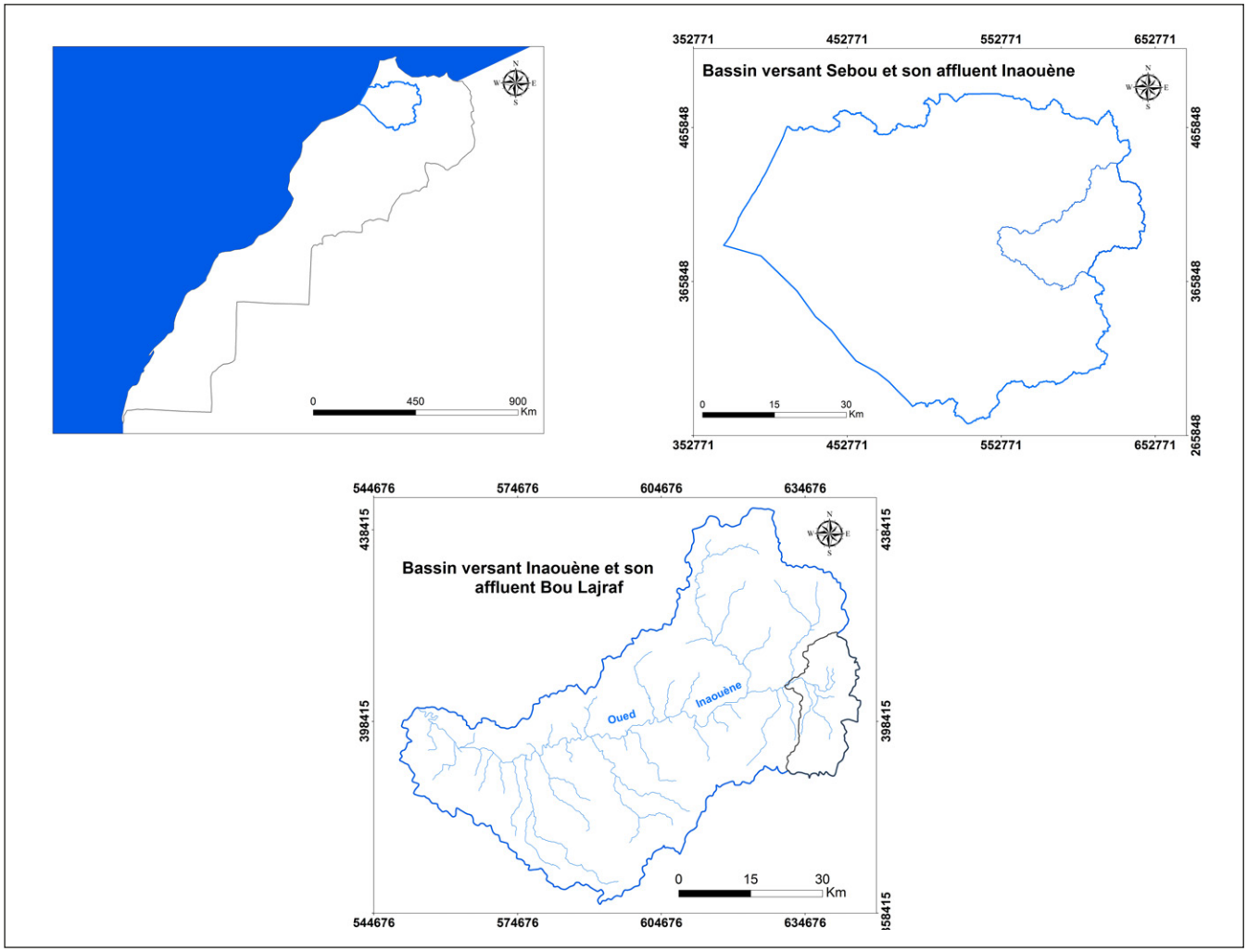

Figure 1. Localisation géographique du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur le modèle numérique de terrain et l'outil SIG.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

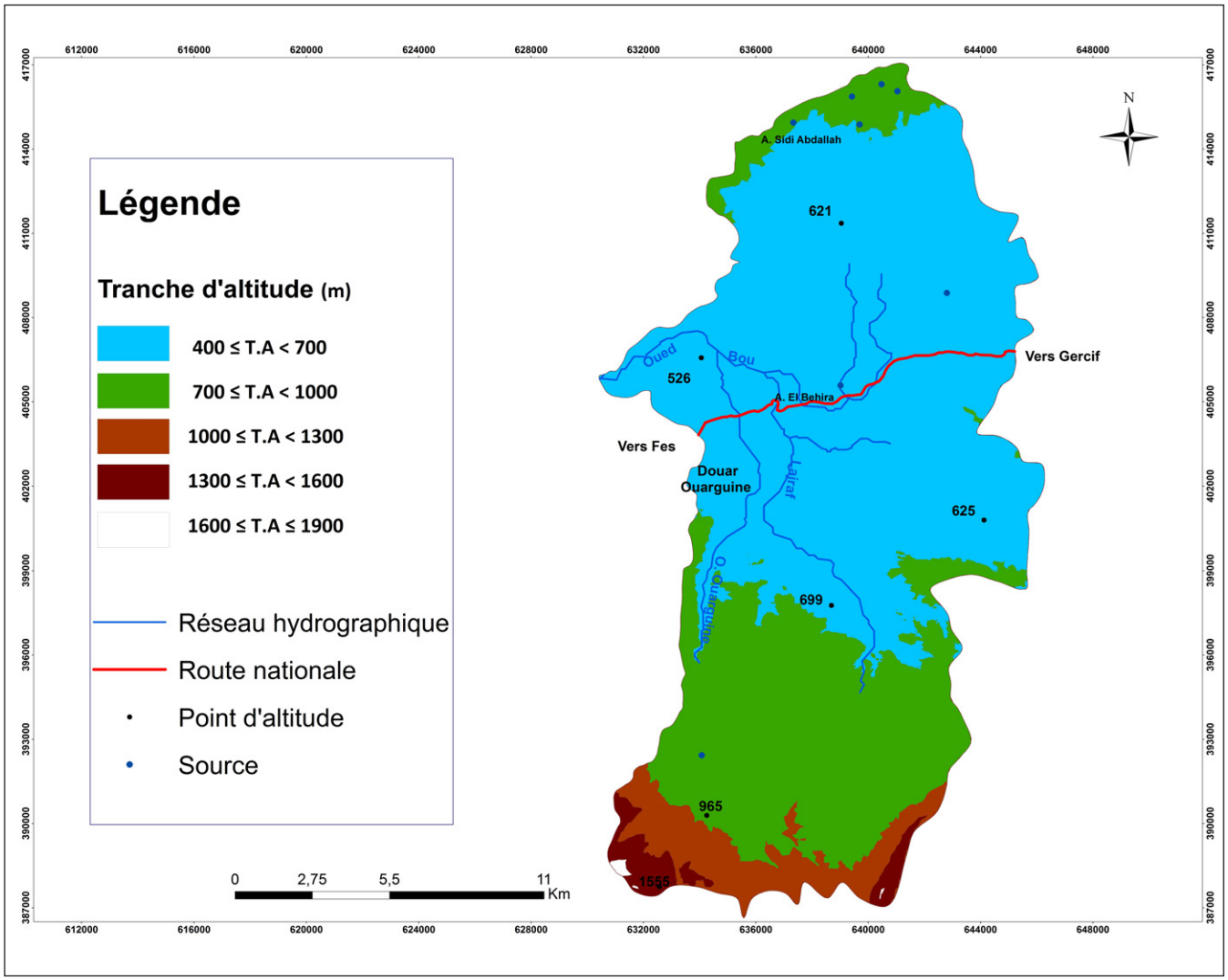

Figure 2. Carte hypsométrique du BV de l'O. Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur le modèle numérique de terrain et l'outil SIG

Les deux figures suivantes (figure 3 et figure 4) représentent la délimitation du BV Bou- Lajraf en arrière-plan des cartes topographiques, Ain EL Behira et Ain Bou kellal (1/50000). Ainsi, sur l'image satellitaire. Un relief caractérisé par des pentes de cultures sèches, labourées par une population locale distribuée sur le bassin versant.

Les images suivantes montrent un aperçu général des pentes du BV Bou Lajraf (photo 1) avec leurs aspects morphologiques (photo 2).

Le bassin versant Bou Lajraf est caractérisé par un climat semi-aride, un début de climat sec vers l'Est du Maroc, avec des précipitations intenses pendant l'automne.

La relation entre le climat et le relief est une équation qui change en fonction de l'évolution d'un acteur. La région méditerranéenne est considérée comme un «point chaud» avec des événements climatiques très agressifs en automne et en hiver (IPCC, 2012). Le changement climatique actuel a accentué les périodes de sécheresse qui ont affecté plusieurs secteurs des pays méditerranéens (Medejerab & Henia, 2011, Szczypta, 2012). 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 (Tahouri, 2016; FAO, 2019).

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

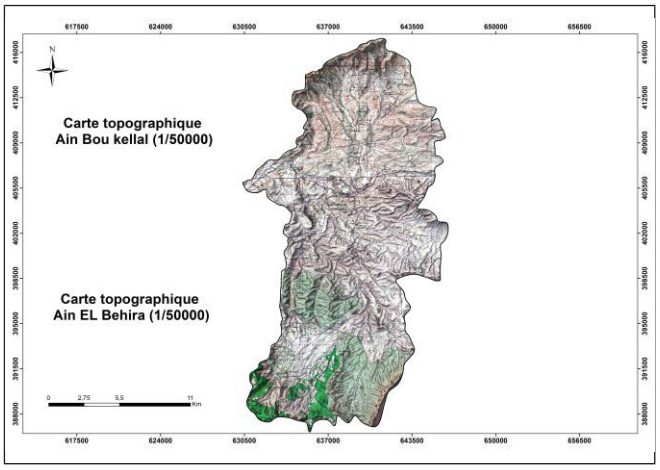

Figure 3. Délimitation du bassin versant Bou- Lajraf sur la carte topographique. Source: travail personnel basé sur les cartes topographiques et l'outil SIG.

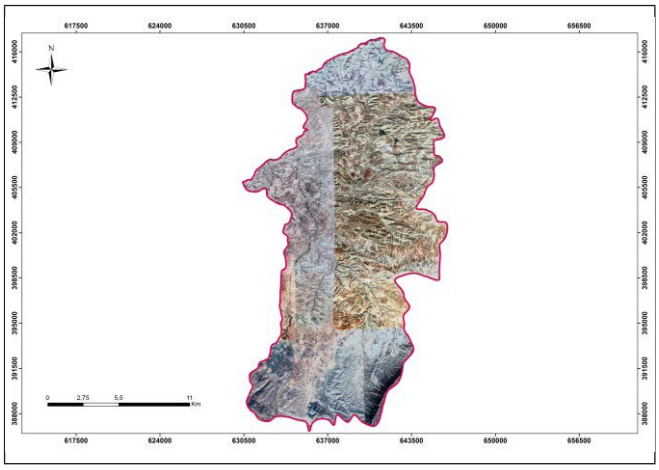

Figure 4. Délimitation du bassin versant Bou- Lajraf sur l'image satellitaire. Source: travail personnel basé sur les images satellitaires et l'outil SIG.

Photo 1 . Vue générale remontante sur les versants du bassin versant Bou Lajraf. Source: photographie personnelle (06/03/2021).

Photo 2 . Aspects des versants du bassin de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: photographie personnelle (06/03/2021).

3. METHODES ET DONNEES

L'étude de l'érosion hydrique d'un bassin versant débute par une recherche documentaire et une collecte des données existantes : cartes topographiques, cartes géologiques, images satellitaires multi-dates, travaux de thèses précédentes, articles scientifiques, coupures de presse, etc. Ses différentes sources d'information permettant de décrire les caractéristiques du site et renseignent sur les éventuels évènements passés.

La collecte de données nécessite également leur critique et la sélection des résultats qui sont obtenus à l'aide d'une méthodologie bien définie.

3.1. Problematique

L'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf reste une problématique qui explique la dynamique des versants. Il provoque une multitude de formes d'érosion hydrique. Le cadre général de la recherche engagée est structuré autour de trois grandes questions:

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

- Quelles sont les données nécessaires et indispensables pour une cartographie raisonnable et représentative de la réalité du terrain face à l'érosion hydrique ?
- Comment analyser la situation géomorphologique du bassin versant Bou Lajraf par rapport au risque d'érosion hydrique ?
- Quelles sont les zones les plus exposées à l'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf?

3.2. Methodologie

L'un des plus grands problèmes environnementaux qui entravent le développement durable est la dégradation des sols par l'érosion hydrique (Tahouri *et al*., 2016). Un certain nombre d'approches et de méthodes complémentaires visant à expliquer les interdépendances des facteurs causaux du risque d'érosion ont été utilisées pour étudier, analyser et modéliser les processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes (Wischmeier & Smith, 1978; Rounsevell *et al*., 1998; Bhuyan *et al.,* 2002; Flanagan *et al.,* 2007).

Plusieurs méthodes et outils ont été utilisés et développés pour l'estimation de l'érosion hydrique (PAP/CAR, USLE, RUSLE, EPM,...). Après un diagnostic géomorphologique et géographique, nous avons opté pour la méthode PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire / Centre d'Activité Régionales). Cette approche semble plus adaptée pour étudier l'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf. Elle a été proposée et testée sur des bassins versants du climat méditerranéen.

Le Programme d'Actions Prioritaires du Centre d'Activités Régionales «PAP/CAR», agissant dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée «PAM» du Programme des Nations Unis pour le Développement «PNUD» et du Programme des Nations Unies pour l'Environnement «PNUE», a entrepris depuis 1984 une action prioritaire intitulée «Promotion de la protection des sols en tant que composante essentielle de la protection de l'environnement dans les zones côtières méditerranéennes». (PNUE/PAM/PAP, 2000).

Cette méthode est innovante, elle permet de présenter les états érosifs, la dynamique des processus d'érosion hydrique et d'évaluer les tendances du risque à une échelle différente du bassin versant. De nombreuses publications sont consacrées à l'étude de l'érosion hydrique (Gazzolo & Bassi, 1966; Giordano & Marchisio, 1989; Attia *et al*., 2005; Sadiki *et al*., 2012; Tahouri *et al*., 2016). Ces études ont démontré leur fiabilité en utilisant l'approche consolidée PAP/RAC (PAP/CAR, 1998; PAM/PNUE, 2000, PNUE/PAM/PAP, 2000) qui vise à intégrer le paramètre anthropique, en analysant son comportement par rapport à son environnement.

Les Directives ont été préparées sur la base des résultats du projet de coopération «Cartographie et mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes» réalisé par le Programme d'actions prioritaires du plan d'action pour la Méditerranée–PNUE et la Direction générale de la conservation de la nature (DGCONA)–Madrid, en collaboration avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), (PAP/CAR, 1998).

Les directives PAP/CAR, en tant qu'une méthode d'étude qualitative de l'érosion hydrique, se basent sur la hiérarchisation de la surface d'un bassin versant en unités distinctes selon la vulnérabilité à l'érosion hydrique. Et cela dans le but de déterminer les zones les plus fragiles et potentiellement pourvoyeuses de sédiments. (PAP/CAR, 1998).

Les méthodes de travail doivent respecter les caractéristiques environnementales du bassin versant, tant physiques que humaines. L'analyse des différents facteurs (lithologie, héritage morphologique, environnement humain,...) permettront de mettre en évidence plusieurs types de milieux d'homogénéité géographique qui rassemblent des conditions physiques et humaines semblables a partir de l'outil SIG. Les SIG sont aussi un outil précieux pour spatialiser les risques d'érosion en prenant tout à la fois en compte les facteurs et les indicateurs de l'érosion (Tribak *et al*., 2008).

Le résultat cartographique du modèle FAO PAP/CAR est premièrement une spatialisation des zones selon leurs états érosifs (faible, moyen, élevé, très élevé), qui donne une idée sur la sensibilité à l'érosion pour tout le site, et deuxièmement une description qui donne une image réelle sur les différentes formes d'érosion ainsi que leur risque d'évolution (Faleh & Maktite, 2014).

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

Selon la description générale de la méthodologie, la démarche méthodologique fondamentale consiste en trois phases clairement définies:

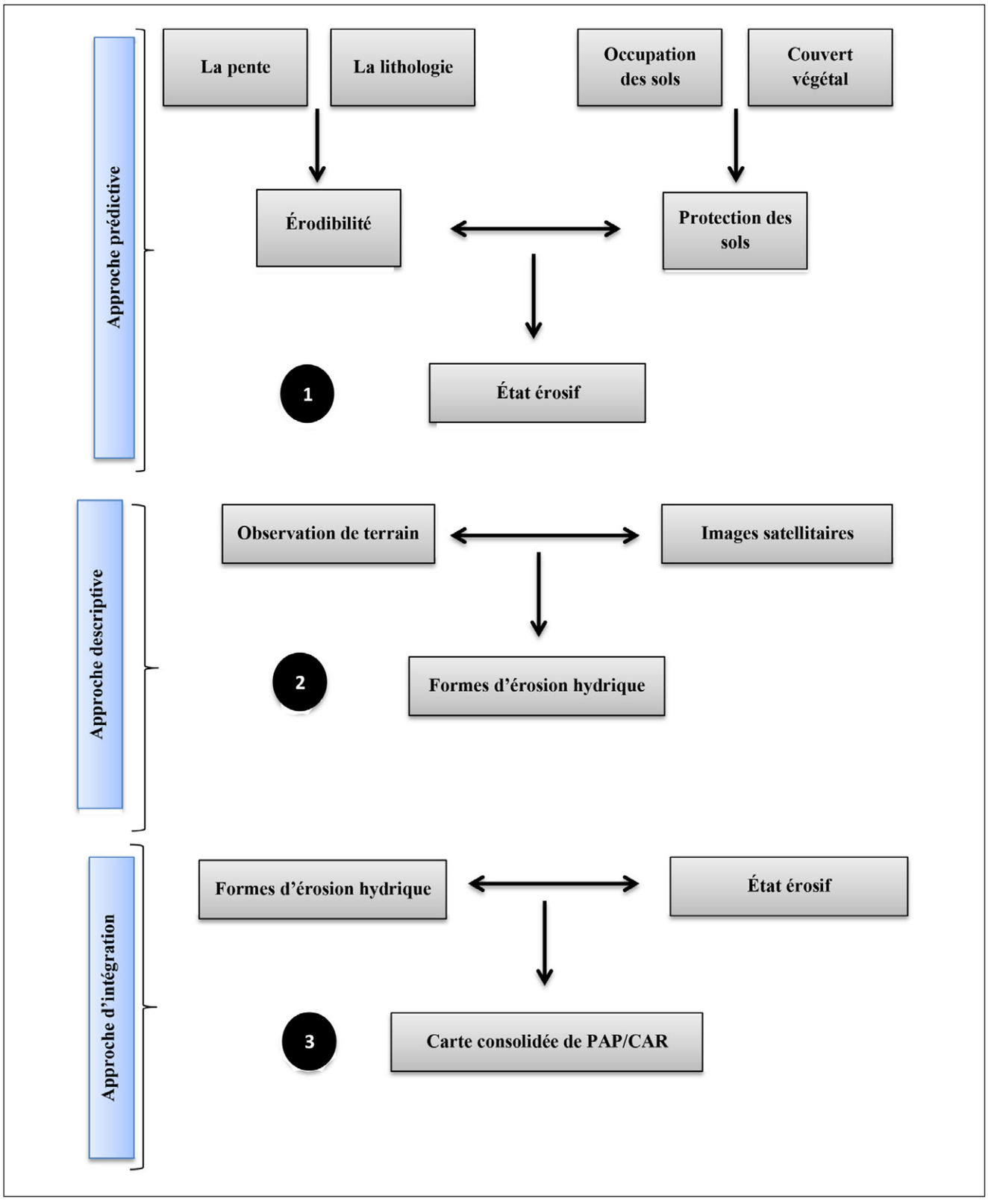

Figure 5. Organigramme de l'approche PAP/CAR. Source: Directives de l'approche PAP/CAR. (1998).

L'étude de l'érosion hydrique a été réalisé en trois étapes, la première est prédictive, basée sur l'analyse des facteurs naturels influençant l'érosion hydrique et le traitement des bases de données des cartes élaborées, la deuxième étape dite descriptive se base sur la cartographie de différents formes et processus des pertes en sol qui se manifestent sur la zone d'étude, La dernière étape, elle permet l'intégration et la combinaison

© Editorial Universidad de Sevilla 2024 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

des résultats des deux étapes précédentes. Son but est de fournir un produit cartographique précis qui reflète la réalité de l'état de dégradation du sol et l'évolution futur de l'érosion hydrique.

La réalisation des cartes thématiques (facteurs d'érosion hydrique), la superposition de ces cartes dérivées dans un S.I.G (système d'information géographique) qui est dans notre cas l'ArcGIS, va permettre d'élaborer une carte résultante dite «carte consolidée» dans laquelle apparaîtra un zonage de l'espace du bassin versant Bou Lajraf, en fonction des degrés de risques.

3.2.1. La phase prédictive

Une phase d'évaluation et d'intégration de tous les paramètres érosifs, tels la pente, la lithologie, l'occupation des sols et le taux de recouvrement végétal, dans le but de tirer des hypothèses préliminaires concernant le risque d'érosion hydrique. Cette phase contienne le traitement des données selon une élaboration de sept cartes différentes:

- Les cartes des classes de pente et de lithofaciès.
- La carte d'érodibilité par la superposition des cartes de pente et de lithofaciès.
- Les cartes d'occupation des sols et de couvert végétal.

La carte de protection des sols par la superposition des cartes d'occupation des sols et de couvert végétal. L'utilité de cette étape s'avère nécessiare dans la mesure ou elle permet de détecter les zones à faible ou à forte protection et par conséquent les zones noires qui nécessitent des interventions urgentes et rapides par le reboisement pour fixer et stabiliser le sol (Faleh *et al*., 2014).

- La carte des états érosifs par la superposition des cartes d'érodibilité et de protection des sols.

Grâce à cette étape de cartographie, on dégage schématiquement la localisation probable des zones exposées à des risques d'érosion hydrique par une plage de couleurs différents. Ces couleurs correspondent chacune à un niveau du risque (très faible, faible, moyen, élevé, très élevé).

La carte des états érosifs est le produit final de la phase prédictive, résultant de la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte des degrés de protection des sols (PAP/CAR, 1998). Les tableaux suivants représentent l'étape de la superposition entre la carte d'érodibilité et la carte de protection des sols.

3.2.2. La phase descriptive (réalisation de la carte des formes d'érosion hydrique)

La phase descriptive est la seconde étape de cette approche, elle consiste à décrire et à évaluer qualitativement des processus actuels et actifs, réalisée par l'observation directe et l'utilisation des images satellitaires, en utilisant la carte prédictive des états érosifs comme modèle cartographique et thématique de référence afin de mettre en valeur les contraintes spécifiques et représentatives de l'érosion hydrique.

De manière systématique, la période de recherche et orientée par plusieurs programmes de visite des sous bassins versants a pour objectif d'effectué l'identification des signes visibles en surface qui pouvant traduire une instabilité. Ces visites visent à définir l'étendue des phénomènes et leur intensité. Il s'agit d'observer sur le terrain les manifestations en surface des formes d'érosion hydrique (érosion en nappe, rigoles, ravines, badlands).

Parmi les principaux avantages de la télédétection satellitaire est la possibilité de fournir des observations de la terre en fonction du temps. Il est ainsi possible de comparer un paysage à différentes dates, ou d'en suivre l'évolution à plus long terme.

Sur le terrain, le travail a été entamé par une prospection de la zone afin d'identifier les formes d'érosion hydrique et de reconnaitre les processus qui affectent les versants pour tenter d'en comprendre la genèse et

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

la répartition, cette étape a été appuyée par l'inventaire de tous les indices d'érosion hydrique observés au cours des dernières années sur les versants du bassin, toutefois, les obstacles suivants ont été rencontrés lors de sa réalisation:

- L'érosion aréolaire est difficile à détecter sur les images satellitaires, son identification et sa délimitation nécessitent de nombreuses vérifications sur le terrain.
- En relation avec l'échelle utilisée, les petites incisions de l'érosion concentrée sont difficiles à cartographier surtout lorsqu'elles sont isolées.
- Dans bien des cas, différentes formes d'érosion hydrique se juxtaposent ou s'imbriquent l'une dans l'autre ce qui ne permet pas de les représenter séparément.

3.2.3. La phase d'intégration

La carte finale consolidée d'érosion hydrique est le résultat de l'association et de l'intégration des données prédictives et descriptives qui utilise la carte des états érosifs comme canevas cartographique de référence et fournit une grille d'unités homogènes pouvant être affectées par une grande variété de processus d'érosion. La description et la cartographie de l'érosion active et des risques d'érosion plus spécifiques (mieux identifiables à travers leurs principaux facteurs causaux) sont complémentaires aux données fournies par la cartographie prédictive, ce qui implique que le diagnostic final d'érosion doit s'exprimer par un symbole unique et intégré. (PAP/CAR, 1998)

4. RESULTATS

4.1. La phase predictive

L'étude qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf nous a permis de découvrir et de comprendre les mécanismes d'évolution des versants qui le composent.

4.1.1. La carte Érodibilité

L'érodibilité dans le bassin versant Bou Lajraf donne des résultats significatifs sur l'érosion hydrique, en raison de la présence de versants de pentes élevées et de roches facilement ou modérément dégradables.

De nos jours, on ne peut pas parler de caractérisation morphologique d'une zone donnée sans faire intervenir la notion de modèle numérique du terrain (MNT), une représentation numérique d'une zone donnée par un champ d'altitudes. A partir de ce modèle on a réalisé les cartes des pentes (MNT, 30 m).

La réalisation de la carte des pentes permettra de lire l'impact des pentes des versants sur le degré de ruissellement, une pente élevée accélère la vitesse d'écoulement et par conséquent l'évolution des formes d'érosion hydrique. Selon les directives de l'approche PAP/CAR, la carte des pentes doive être réalisée selon la légende de cinq classes en pourcentage.

La carte des pentes du bassin versant Bou Lajraf donne des résultats hétérogènes entre l'amont, la médiane et l'aval du bassin versant. La figure suivante présente la répartition des classes de pente dans le BV Bou Lajraf (figure 6).

La pente du sol est un facteur déterminant du ruissellement, et donc de l'érosion hydrique (Chaplot *et al*., 1999). La superficie des pentes très basses (inférieures à 3%) est de seulement 20.4 km^2, soit 7% de la superficie totale du bassin versant (figure 7). 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 filtrants.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

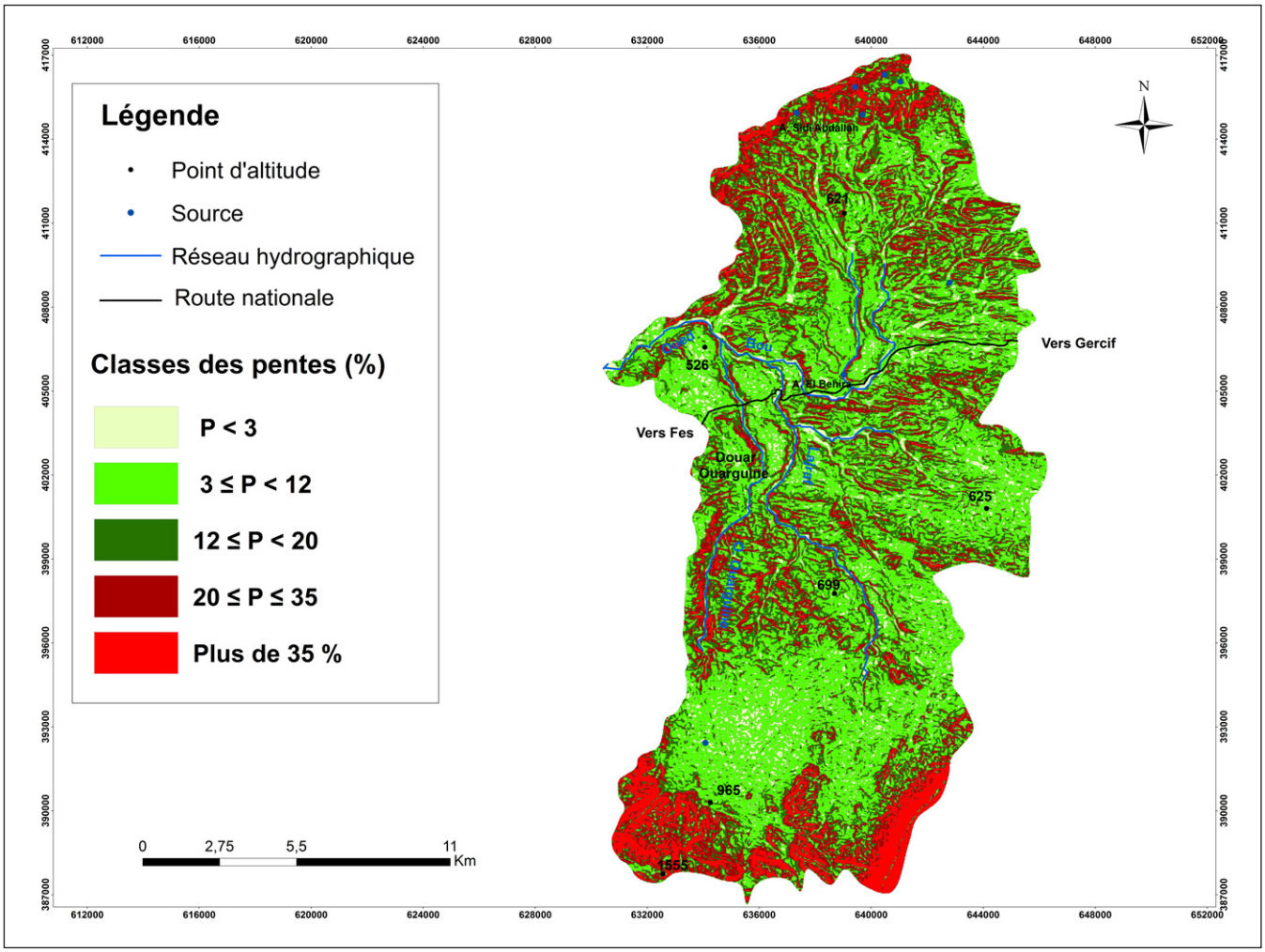

Figure 6. Carte des classes de pente dans le BV Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur les directives de PAP/CAR, MNT et l'outil SIG.

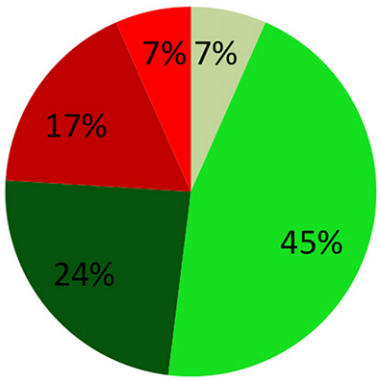

Figure 7. Répartition relative des classes de pente dans le BV Bou Lajraf.
Légende: même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

La classe modérée (3–12%) occupe 138.2 km^2, soit 45% du bassin versant, c'est la classe la plus représentée dans le bassin versant. La classe de pentes moyenne (12–20%) représente 24% de la surface totale, la classe des pentes élevée et très élevées représentent respectivement 17% et 7% de la superficie totale.

La pente accélère les processus érosifs selon la lithologie qui représente le comportement des roches et de la couche superficielle envers les facteurs érosifs (intensité de pluie et imperméabilité), sur le terrain, on

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

a des roches facilement dégradables, alors sont très influencées par les processus érosifs, d'autres sont très résistantes, capables d'augmenter la quantité d'eau absorber.

La carte des lithofaciès montre que le bassin versant Bou Lajraf est dominé par une lithologie de roches sédimentaires marneuses (figure 8).

Les marnes (impermebale en profondeur) représentent 48% de la surface totale, suivie par des roches carbonatées (calcaire) qui s'étalent sur une superficie de 52 km^2 (figure 9). À l'échelle du bassin versant, les taux d'infiltration plus faibles provoquent un déséquilibre dans le bilan hydrique du sol et augmentent le ruissellement (Sadiki *et al*., 2007).

Le bassin versant Bou Lajraf est caractérisé par une lithologie diversifiée, mais leurs résistances contre l'érosion hydrique reste faibles à cause de leurs caractéristiques intrinsèques. Les sols méditerranéens ont tendance à se dégrader une fois exposés, surtout en l'absence d'un apport continu de litière (Roose *et al.,* 2012). La zone d'étude représente un état géomorphologique vulnérable. L'imperméabilité des marnes en profondeur facilite l'écoulement superficiel, et par conséquent le déclenchement des processus d'érosion hydrique.

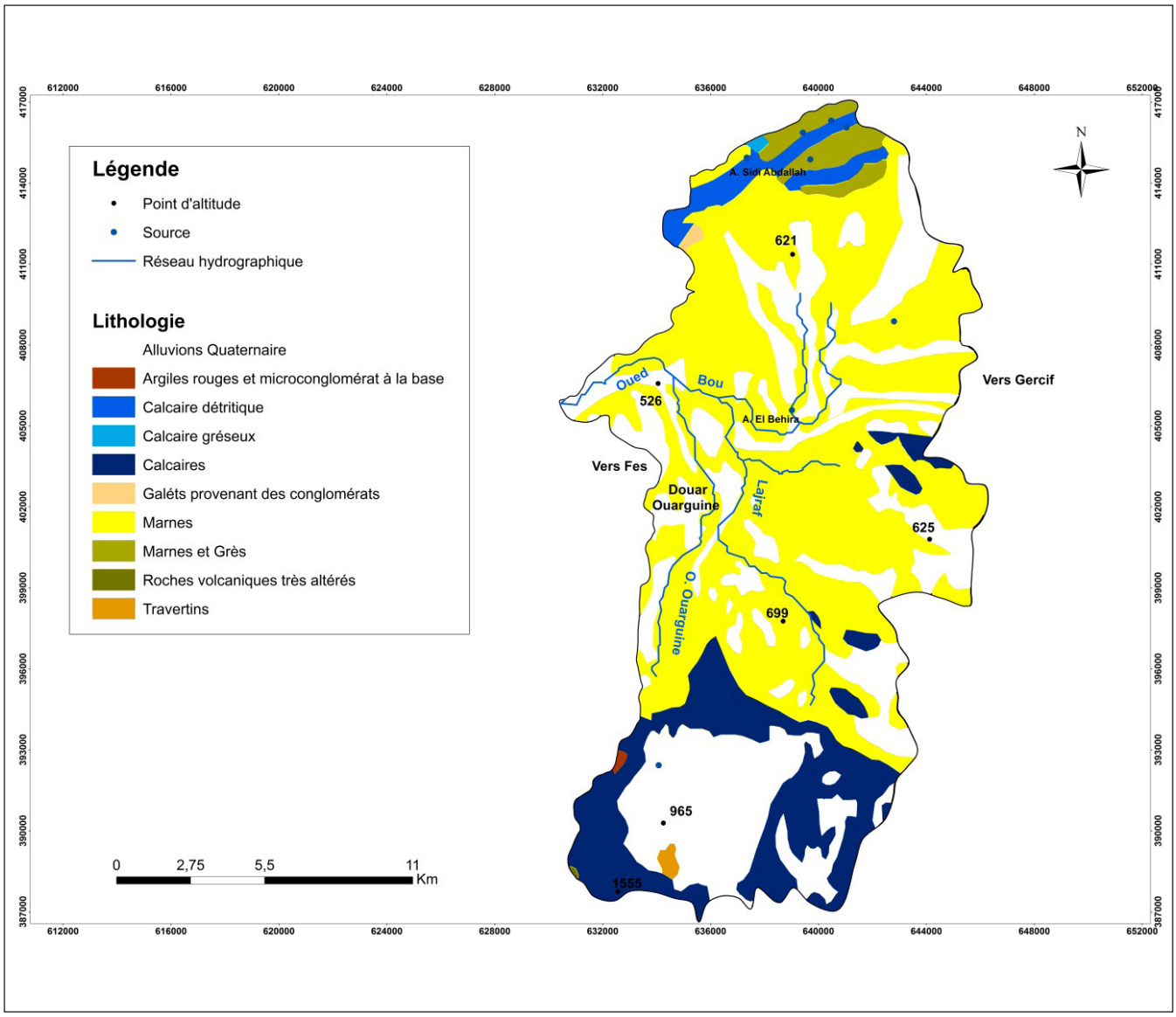

Figure 8. Carte lithologique du bassin versant Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur la carte géologique de la chaîne Rifaine (1/500000) et l'outil SIG.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

La répartition spatiale des différentes classes d'érodibilité montre que presque 45% du bassin versant est d'érodibilité forte à très forte. La figure suivante présente les degrés de la carte d'érodibilité dans le BV Bou Lajraf (figure 10). Cependant, les classes d'érodibilité faible et très faible ne couvrent que 13% du bassin versant.

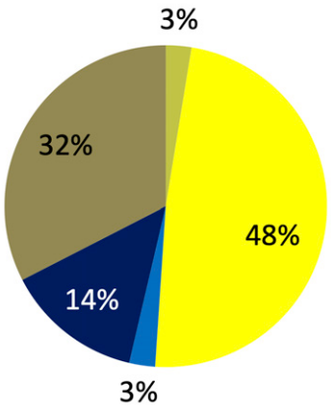

Figure 9. Répartition relative des classes lithologiques dans le BV Bou Lajraf.
Légende: même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

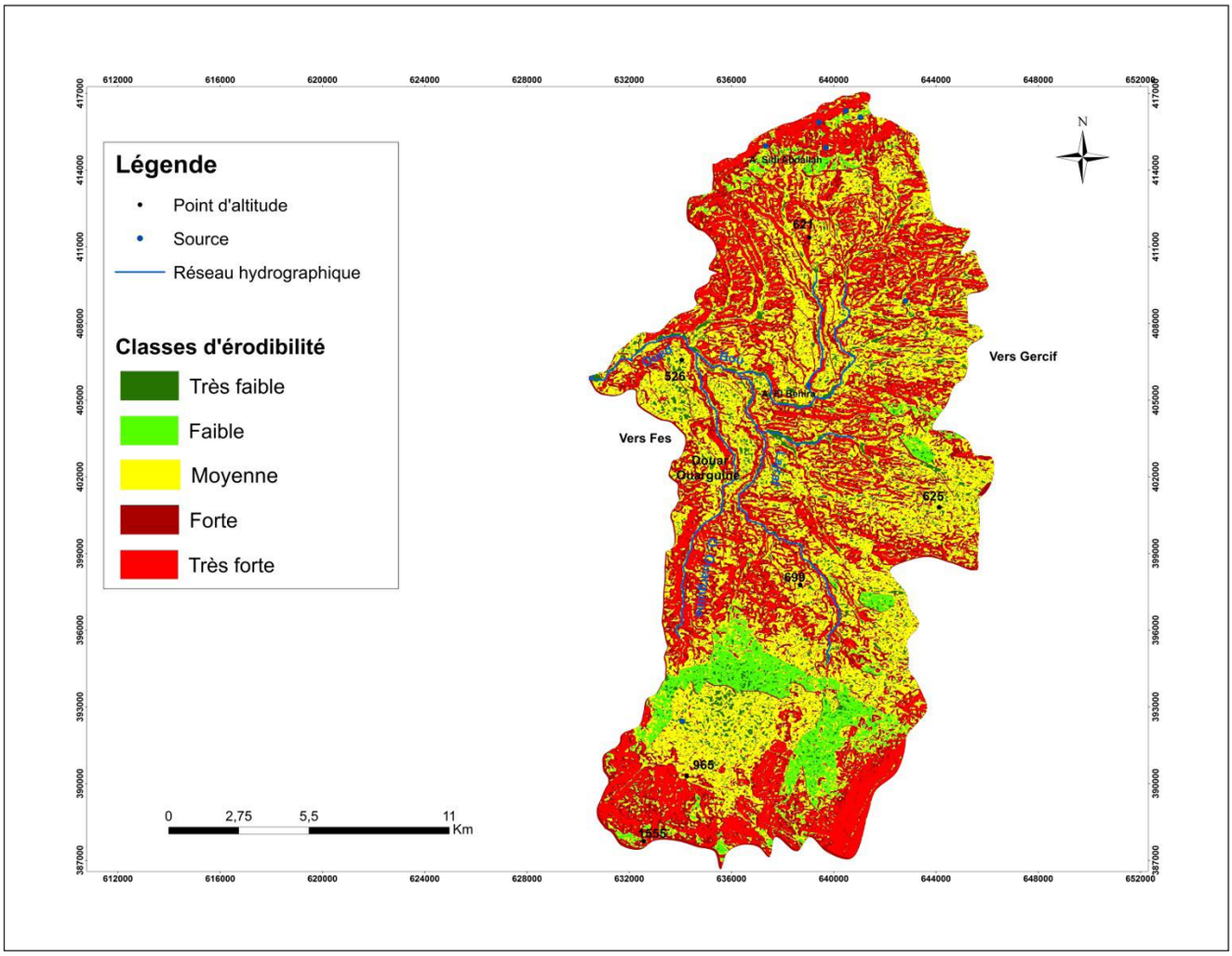

Figure 10 . Carte d'érodibilité du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur les directives de PAP/CAR et l'outil SIG.

© Editorial Universidad de Sevilla 2024 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

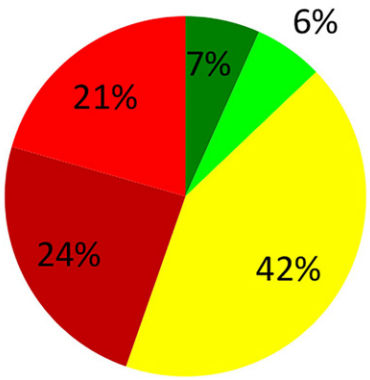

Figure 11. Répartition relative des classes d'érodibilité des sols dans le BV Bou Lajraf.
Légende: même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

L'abondance des terrains à érodibilité forte et très forte est expliquée par la présence d'une morphologie de pente élevée à très élevée sur une lithologie marneuse et carbonatée (résistance faible à moyenne).

Les résultats obtenus par la carte d'érodibilité montrent la friabilité des terrains contre les processus érosifs pour le domaine du bassin versant Bou Lajraf, cela nécessite que la protection des sols contre les processus érosifs nécessite une couverture végétale intense.

4.1.2. La carte de protection des sols

Selon plusieurs études, le type d'occupation du sol et le taux de recouvrement végétal jouent un rôle crucial dans la préservation de la couche superficielle (Mahgoub *et al*. 2024). L'effet de la végétation peut être différent selon les formations végétales, cela peut dépendre du type de végétation ou de l'utilisation du sol (Kim & Jeong, 1998).

Le facteur climatique et le NDVI dans un bassin versant donne des résultats explicatifs. Les résultats confirment l'utilité du NDVI comme indice pour exprimer la variabilité de la végétation à l'échelle d'un bassin versant avec un climat continental à haute latitude et peu de précipitations (Fanghua *et al.*, 2011). En observant une corrélation entre le facteur climatique, le NDVI et la protection des sols dans le bassin versant.

La protection des sols contre le risque d'érosion hydrique demeure une caractéristique clé du BV de Bou Lajraf, selon les résultats de la première étape de l'approche PAP/CAR (carte d'érodibilité).

Le rôle des activités humaines et des modes d'occupation des sols constitue un élément important expliquant l'accélération ou la réduction des phénomènes érosifs et de leur répartition spatiale (Tribak *et al*., 2017). L'occupation des sols dans le BV Bou Lajraf rassemble une diversité au niveau d'utilisation des sols, la classe des forêts occupe une surface très faible, située dans la partie amont du bassin versant.

La végétation protège les sols de l'ablation d'une part en réduisant l'énergie des agents érosifs, et 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 contribue à lutter contre le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau (Cerdà, 1998).

Les terres incultes regroupent les terrains réservés aux parcours, correspondant à des portions de versants inutilisables dans l'agriculture, elles englobent des terrains franchement stériles qui correspondent soit à des badlands où l'érosion a atteint un stade très avancé soit à des versants rocheux ou des cônes rocailleux (Tribak, 2000).

La forêt s'étend sur une surface de 43 Km² (figure 13), soit environ 14% de la superficie totale, elle se rencontre généralement sur des terres à pente élevée et très élevée. La déforestation agricole est un problème environnemental local et mondial (Foley *et al*., 2005). Dans les environnements montagneux méditerranéens, l'élimination 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

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

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; Colazo & Buschiazzo, 2015; Romanyà & Rovira, 2011).

La classe des cultures sèches représente une surface de 174 km^2, soit 57% de la surface totale, la classe des cultures en ligne (oliviers) occupe 33 Km^2, soit 11% de la surface totale. Selon les observations de Masson (1971), en Tunisie, une plantation d'oliviers sur sol nu ne réduit l'érosion que de 10% ; par contre, dès que le sol est couvert de plus de 60% par une litière, un paillage ou des résidus de récolte, l'érosion est diminuée de 80%.

Les terrains incultes s'étendent sur une superficie importante qui représente 18% de la superficie totale (55 km^2), le facteur important de cette dégradation c'est l'appauvrissement de la couche superficielle par le risque d'érosion hydrique et la succession des années sèches.

L'abandon des terres, peut être considéré sans doute comme un indicateur qui exprime l'impuissance des paysans d'exploiter et de travailler la totalité de leurs terres, ainsi que, la détérioration et l'appauvrissement des parcelles devenues stériles ou peu productives et incapables de répondre aux besoins de la population, dont certaines sont laissées en jachère périodique pour le pâturage et d'autres retournent complètement en friche (Tribak, 2000).

La carte du taux de recouvrement (figure 14) montre que le bassin versant de Bou- Lajraf est modérément non protégé d'après les résultats obtenus.

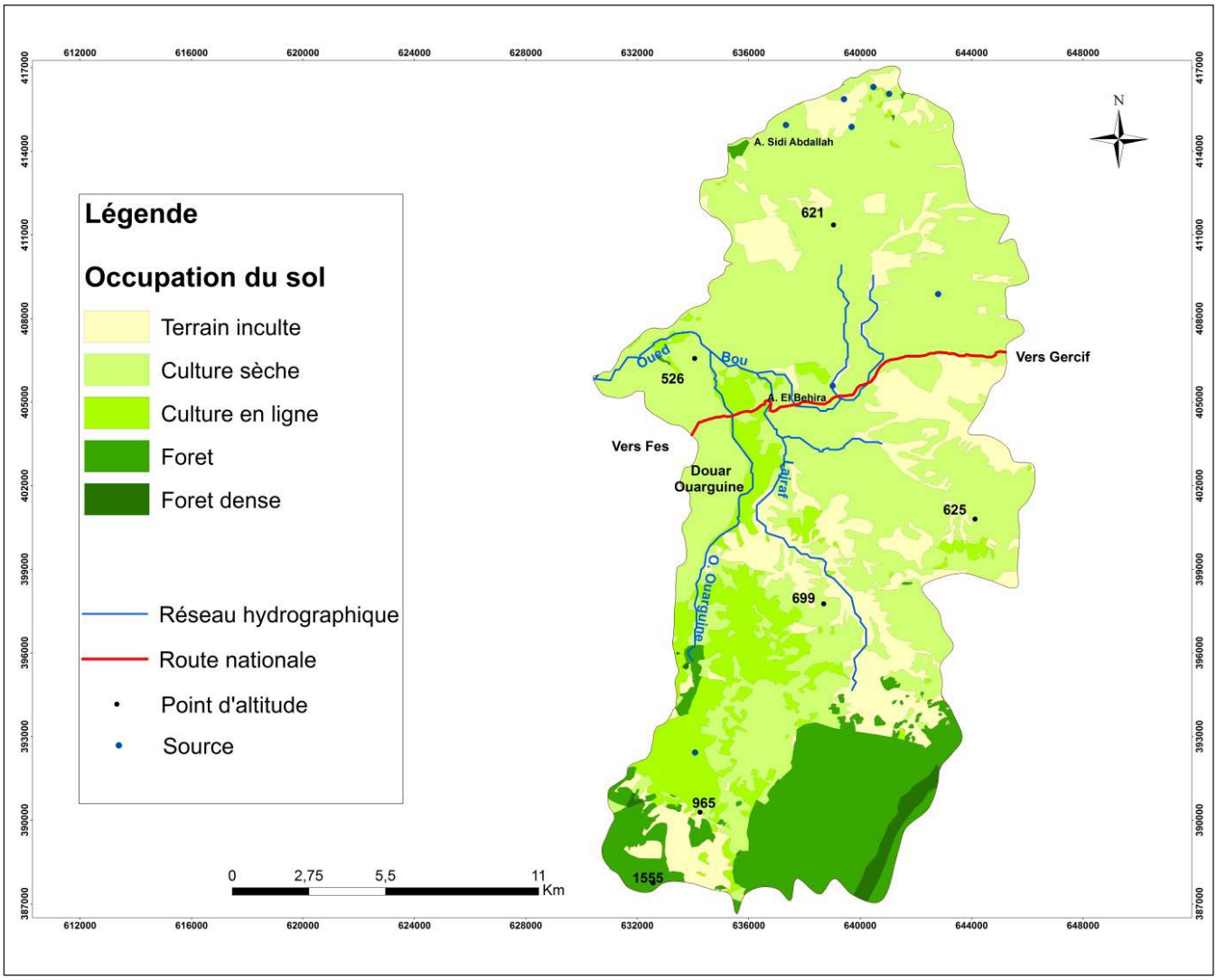

Figure 12. Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur les images satellitaires et l'outil SIG.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

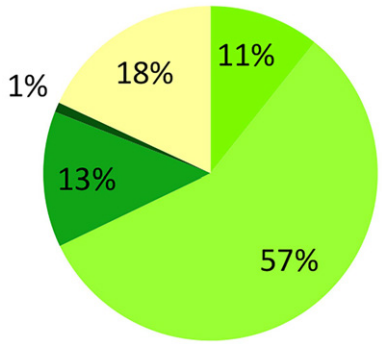

Figure 13. Répartition relative des classes d'occupation des sols dans le BV Bou Lajraf. Légende: même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

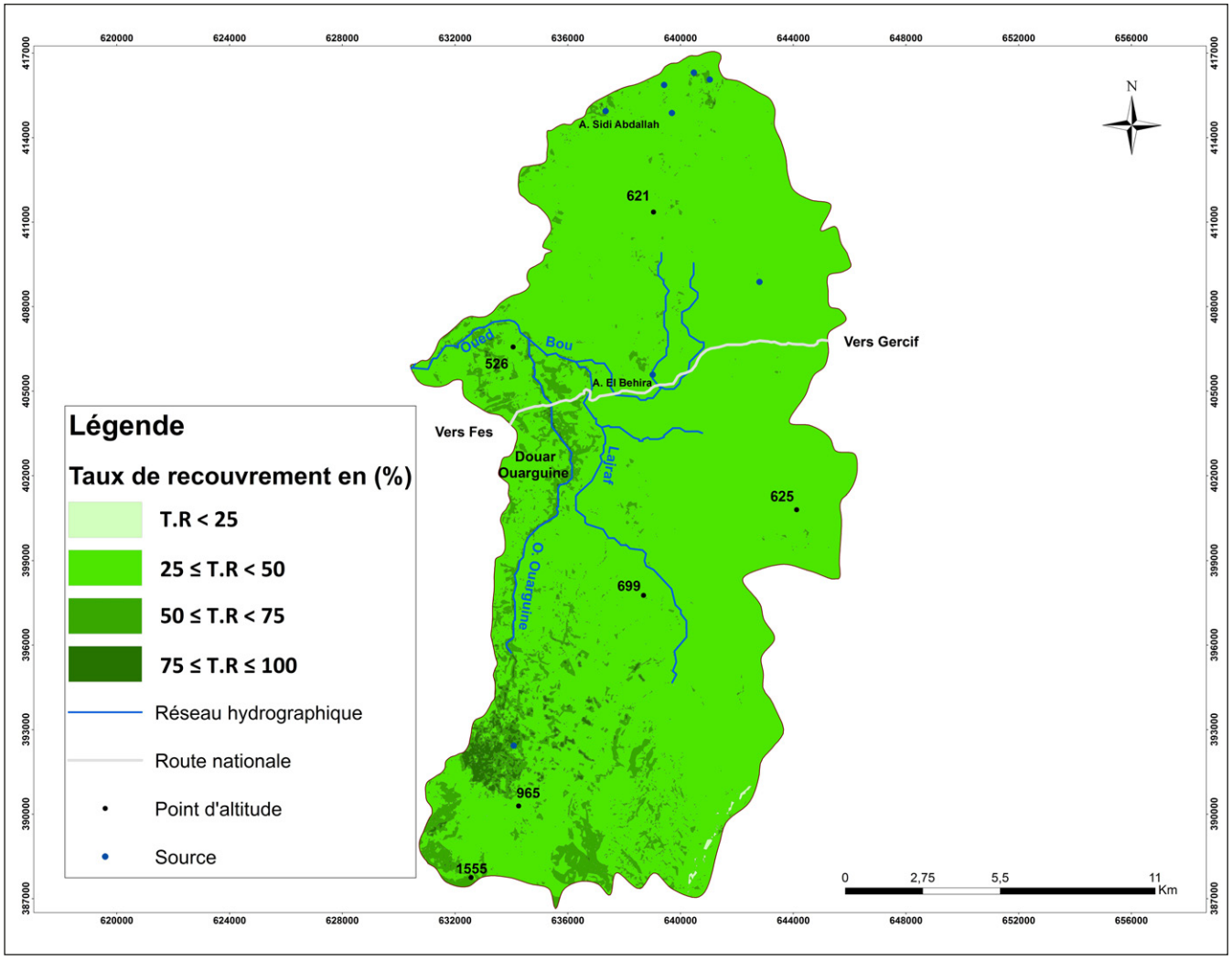

Figure 14. Carte du taux de recouvrement (CV) du BV Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur le NDVI, les directives de PAP/CAR et l'outil SIG.

La classe la plus représentative est celle de protection moyenne (25–50%) avec un pourcentage de 92% de la superficie total du BV, localisée surtout dans la partie avale du bassin. Les zones bien protégées ne dépassent pas 1 km^2, localisées au Sud-Ouest du bassin versant.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

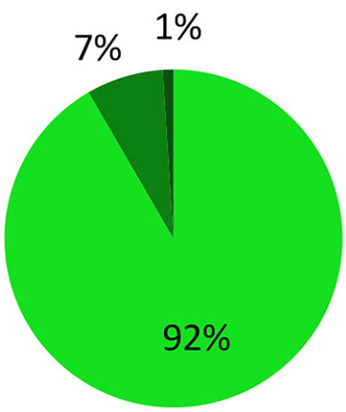

Figure 15. Répartition relative des classes du taux de recouvrement dans le BV Bou Lajraf. Légende: même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

Le couvert végétal dépend des conditions écologiques responsables de la croissance et du développement de la végétation et des pratiques sociétales dans le bassin versant. Le taux de recouvrement joue un rôle clé dans le maintien de la résistance des sols. En effet, le couvert végétal de densité forte permet une meilleure conservation du sol.

L'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) du BV Bou- Lajraf a permis d'identifier trois classes de valeurs de NDVI. En effet, les valeurs les plus élevées correspondent aux zones de forêts et qui ne dépassent pas 1% de la surface totale, les valeurs moyennes correspondent aux versants de cultures en lignes (oliviers) et les valeurs faibles correspondent aux surfaces de cultures sèches.

Selon les résultats de la carte d'occupation des sols et la carte du taux de recouvrement, on observe qu'une surface très importante du bassin versant reste très sensible aux facteurs déclenchant de l'érosion hydrique. La carte de protection des sols du BV permet de visualiser cinq classes (figure 16).

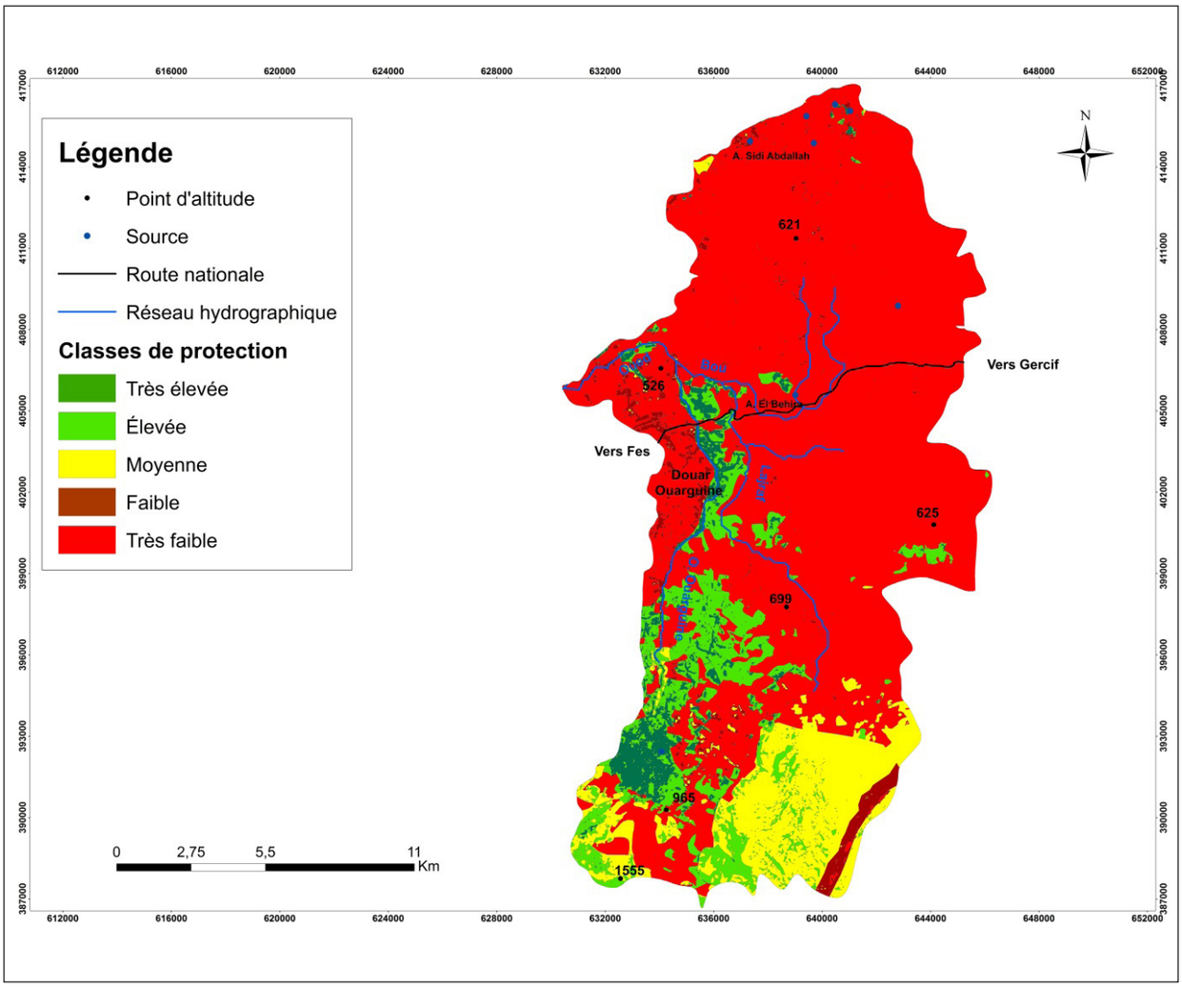

Figure 16. Carte de protection des sols du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur les directives de PAP/CAR et l'outil SIG.

© Editorial Universidad de Sevilla 2024 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

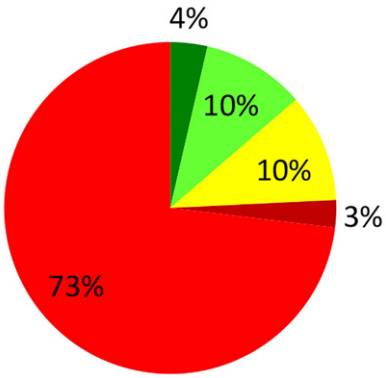

Figure 17. Répartition relative des classes de protection des sols dans le BV Bou Lajraf. Légende: même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

Photo 3. Aspects des versants de forêt faiblement dense du bassin de l'Ouèd Bou- Lajraf. Source: photographie personnelle (06/03/2021).

Photo 4. Aspects des versants forestiers dans le BV de l'Ouèd Bou Lajraf . Source: photographie personnelle (06/03/2021).

À partir de la carte réalisée, les classes de très faible et faible protection s'étendent sur une superficie de 231.1 km², soit 76% de la surface totale, avec une concentration très forte dans la partie médiane et avale du bassin versant. La classe de protection moyenne s'étale sur une superficie de 32.2 Km². Les classes de protection élevée et très élevée couvrent une superficie de 41.7 Km² (14%) avec une localisation importante au niveau de la partie amont du bassin versant.

La carte de protection des sols contre l'érosion hydrique du bassin versant Bou Lajraf montre que la présence de la forêt ne suffit pas le rôle de protection sans addition avec un taux de recouvrement végétal dense, ce dernier, c'est lui qui affaiblit la surface protégée contre le risque d'érosion hydrique.

4.1.3. La carte des etats erosifs

La carte des états érosifs du BV de l'Ouèd Bou Lajraf permet de distinguer cinq classes représentatives des degrés d'érosion hydrique (figure 18).

La répartition des superficies sur la carte des états érosifs montre que les classes à risque d'érosion très faible et faible occupent une surface faible (17% du BV). La classe à risque d'érosion moyenne occupe

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

une superficie de 25.6 km², soit 8% de la superficie totale, les classes élevée et très élevée représentent 221.7 km², soit 75% de la superficie totale.

Selon les facteurs déterminants, les résultats trouvés, représente la situation géomorphologique érosive du BV Bou Lajraf, la couche superficielle est facilement dégradable sans protection intense. La granulométrie (discontinue) pour la partie amont et la fragilité pour la partie aval sont très favorables à déclencher plusieurs formes d'érosion hydrique.

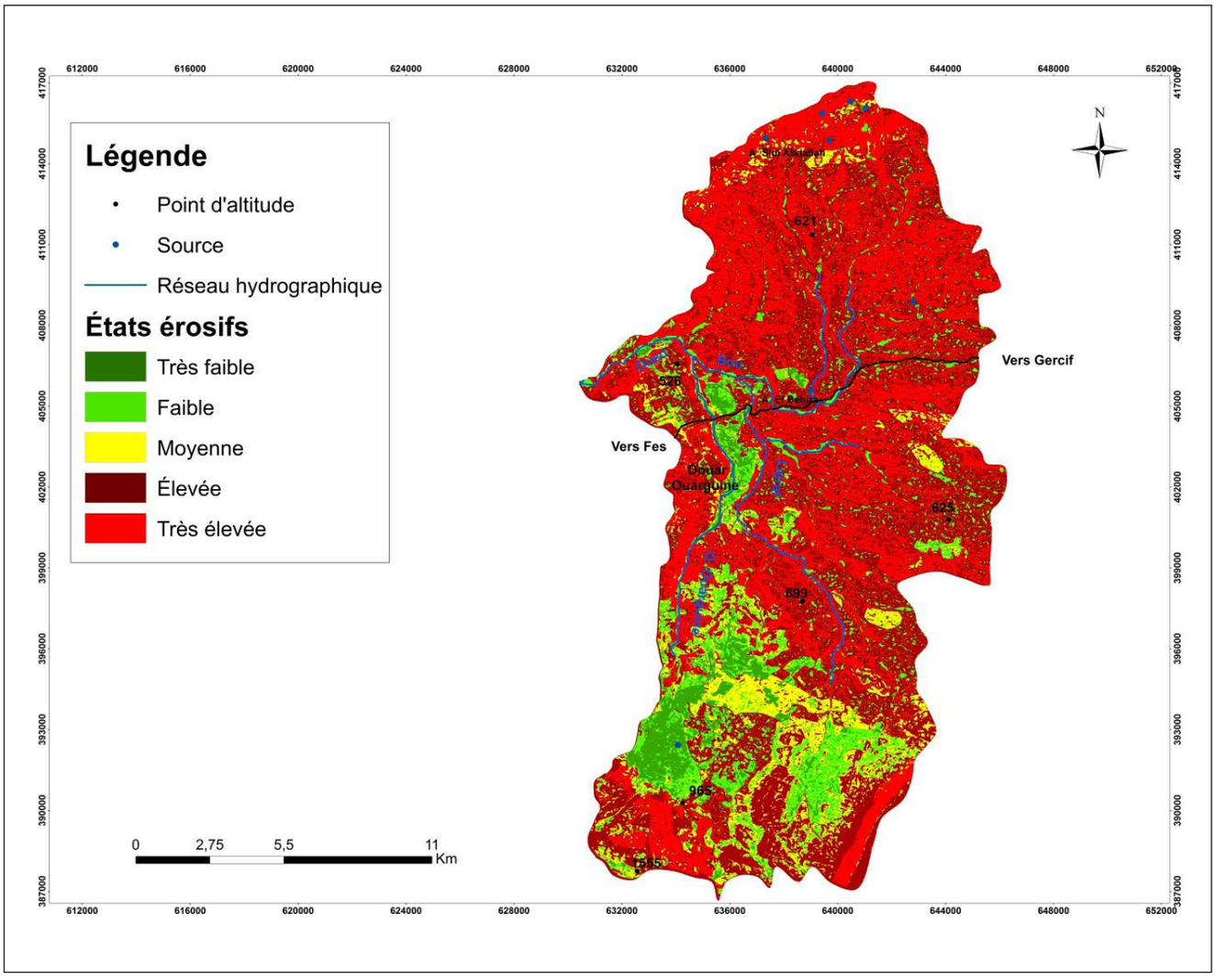

Figure 18. Carte des états érosifs du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur les directives de PAP/CAR et l'outil SIG.

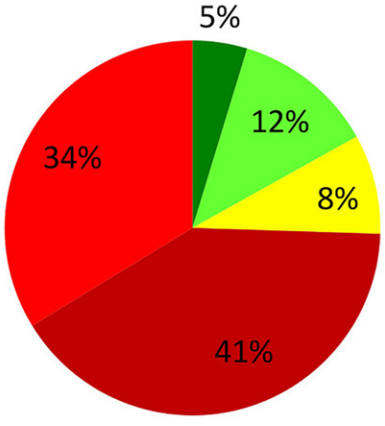

Figure 19. Répartition relative des états érosifs dans le BV Bou Lajraf.
Légende : même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

© Editorial Universidad de Sevilla 2024 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

4.2. La cartographie descriptive des formes d'erosion

L'analyse des formes d'érosion hydrique reste une étude particulière à cause de la diversité géomorphologique qui caractérise le bassin versant de Bou Lajraf. La figure suivante (figure 20) présente la carte des formes d'érosion hydrique.

La cartographie des formes d'érosion dans le BV Bou Lajraf montre que l'érosion en nappe et en ravines sont les plus abondantes, occupent respectivement 121 km² et 105 km², soit 40% et 34% de la surface totale (figure 21).

Au Maroc, dans les marnes du Pré-Rif, B. HEUSCH (1970) avait attiré l'attention sur la contribution des divers types d'érosion en fonction de l'abondance des pluies : le ravinement et les glissements de terrain dominent largement en années excédentaires ou lors d'averses exceptionnelles, tandis que l'érosion en nappe répartie sur la majorité des surfaces des bassins méditerranéens l'emporte lors des années moyennes ou sèches. En année ordinaire, les ravines évoluent sur place (comblement du fond) ou semblent souvent endormies jusqu'à ce qu'un événement pluvial surabondant balaie les sédiments accumulés (effet de chasse).

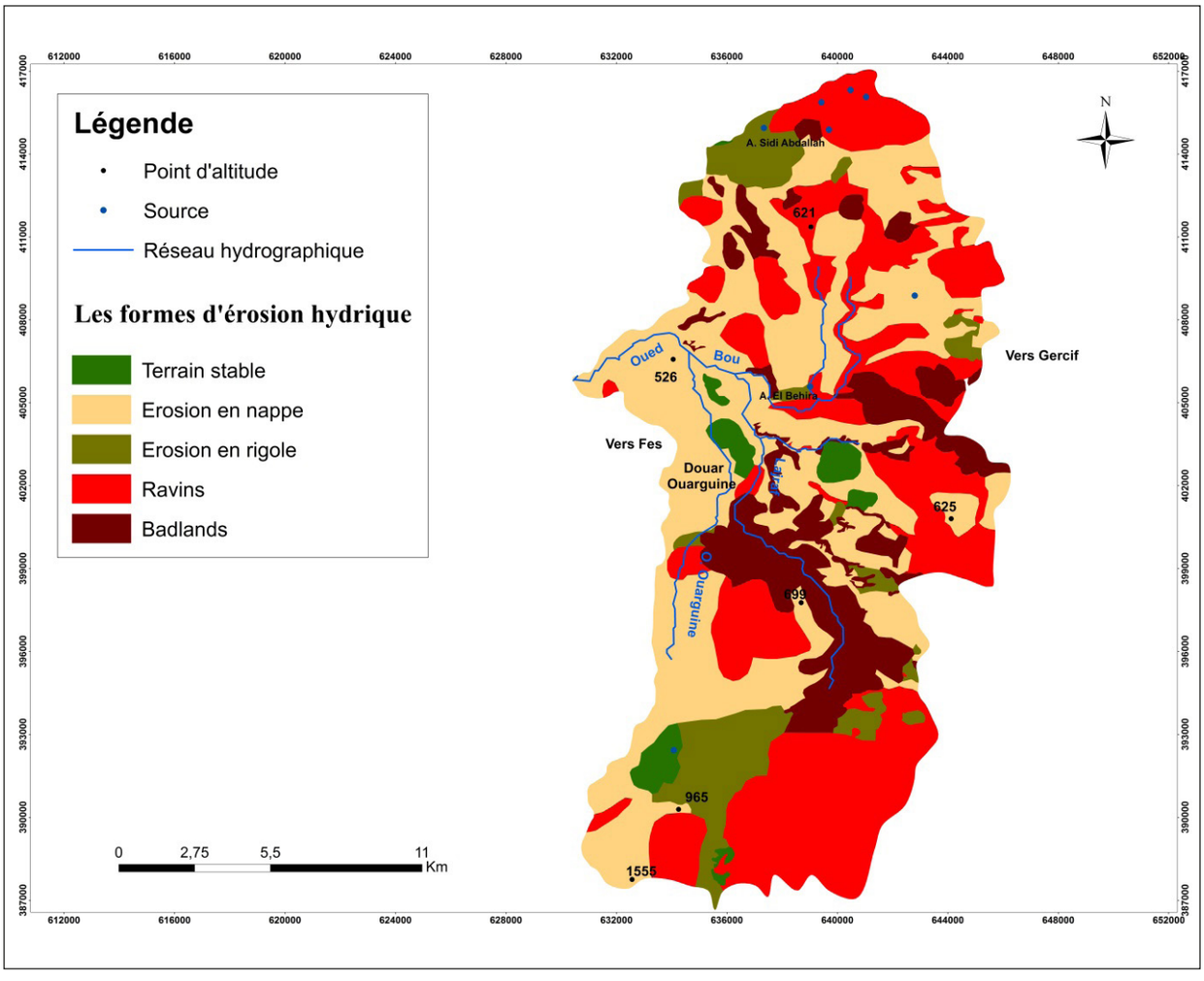

Figure 20. Carte des formes d'érosion hydrique du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur l'observation de terrain, les images satellitaires, les directives de PAP/CAR et l'outil SIG.

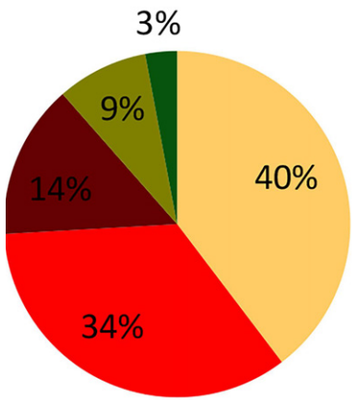

Figure 21. Répartition relative des formes d'érosion du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Légende: même figurés que dans la figure précédente. Source: travail personnel.

© Editorial Universidad de Sevilla 2024 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

Les terrains bien dégradés (badlands) s'étendent sur une surface très importante qui égale 44 km² (14% de la surface totale), l'érosion en rigole occupe une surface de 26 km², soit 9% de la surface totale, les terrains stables représentent uniquement 3% de la superficie totale, soit 9 km².

Avec la succession des années sèches, les terrains de cultures sèches deviens inutile. L'absence de tout travail du sol, particulièrement le labour qui présente une aptitude à l'infiltration importante par l'ouverture de la surface des sols, le cassement et la suppression des croutes superficielles, l'augmentation de la rugosité de surface et le retardement de déclenchement du ruissellement, fait que les parcelles abandonnées deviennent un endroit spécial de fonctionnement d'un réseaux dense de griffures, et constituent le théâtre d'une forte activité de ruissellement avec des coefficients très élevées et représentent, par conséquent, une source importante de la production d'énormes quantités de sédiments (Tribak, 2000).

4.3. La phase d'integration: la carte consolidee d'erosion PAP/CAR

La carte consolidée d'érosion PAP/CAR du bassin versant Bou Lajraf montre que les formes d'érosion en ravines occupent une surface très importante, coïncident avec les zones qui subissent un degré d'érosion moyen à très élevé.

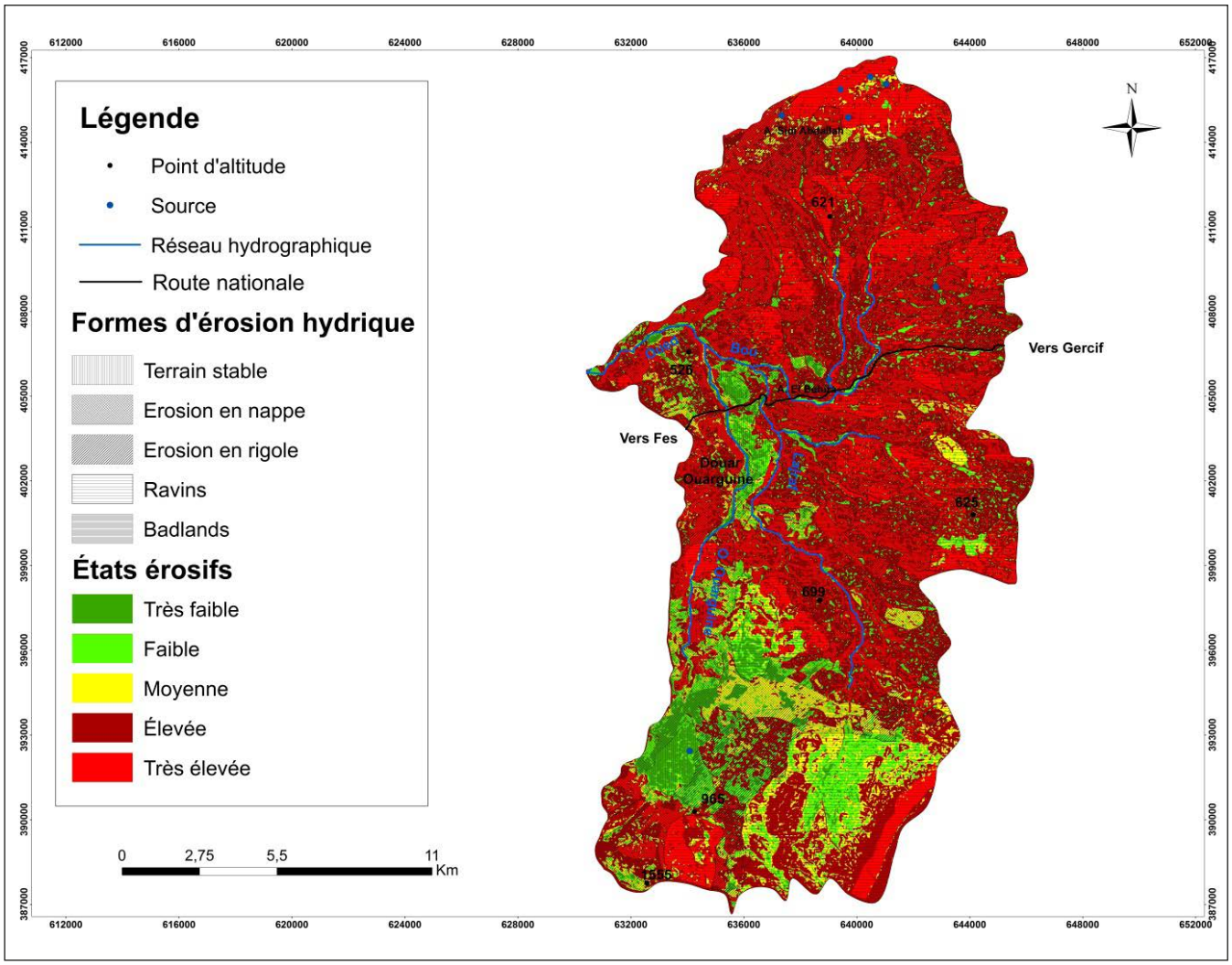

Figure 22. Carte consolidée d'érosion PAP/CAR du bassin versant de l'Ouèd Bou Lajraf. Source: travail personnel basé sur les directives de PAP/CAR et l'outil SIG.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

L'érosion en nappe occupe également une superficie d'environ 40% de la totalité du bassin versant, tandis que les terrains stables qu'on trouve dans la partie amont, représentent une superficie très faible. Ils coïncident avec des terrains à degré d'érosion moyen à fort selon leurs sensibilités à l'érosion hydrique.

5. DISCUSSION

Au Maroc, Malgré la gravité de la menace de l'érosion des sols, seul un nombre limité d'études indexées ont été menées pour caractériser et évaluer l'érosion des sols au Maroc. (Laman *et al*., 2022).

L'érosion hydrique est devenue l'un des risques naturels majeurs rencontrés en moyenne montagne méditerranéenne, connue depuis plus de 50 ans au Maroc, à cause de la croissance démographique, les défrichements et le surpâturage entrainent la dégradation du couvert végétal et par la suite l'augmentation du ruissellement, le ravinement, le sapement des berges des oueds, les glissements des collines environnantes et la sédimentation accélérée dans les barrages (Laouina *et al.* 2000).

Au Maroc, de graves conséquences sont perçues pour l'économie basée notamment sur l'agriculture qui contribue à environ 20% du PIB (Aboulabbas *et al.,* 2005) telles que des précipitations irrégulières et des périodes de sécheresse, des eaux polluées et par conséquent des ressources limitées. L'inventaire montre que les ressources naturelles ont de plus en plus de mal à se renouveler et à assurer leur durabilité (Laouina, 2006).

L'approche PAP/CAR a été utilisée par plusieurs chercheurs qui ont démontrés sa grande utilité pour la cartographie et la modélisation de l'érosion hydrique (Mesrar *et al*. 2012; Ousmana *et al*. 2017; Benaissa *et al*. 2021).

À titre de comparaison, il est possible de comparer les résultats obtenus avec d'autres bassins versants du Rif et Prérif, tels que celui de l'Ouèd Asfalou (principal affluent de l'Ouèd Ouergha). L'approche prédictive révèle que 6,67% des terrains ont une prédisposition très faible à l'érosion hydrique, les terrains à faible érosion représentent 13,33%, tandis que les terrains à état érosif élevé représentent 26,67%, les niveaux très élevés d'érosion touchent 33,33% du bassin versant (Tahouri *et al.*, 2016).

Dans le bassin versant Amlil qui constitue un sous bassin versant d'Inaouène, l'analyse des données naturelles du bassin versant par la méthode de PAP/CAR a permis d'identifier cinq principaux états d'érosifs: érosion très élevée 23%, 48% pour l'érosion élevée, la classe d'érosion notable représente 22%, 6% et 1% pour les classes d'érosion faibles et très faible respectivement. (Hili *et al*., 2017).

Par ailleurs, la carte d'érosion réelle montre une grande perturbation des versants de la zone d'étude par plusieurs formes d'érosion : l'érosion en nappe (sur 61% du bassin), les ravins (21%), les badlands (13%), les glissements (2%), les rigoles (2%) et les zones périodiquement inondées (1%). (Hili *et al*., 2017).

Selon l'approche prédictive, dans le bassin versant de l'Oued Aoudour, les états érosifs faible et très faible représentent 46% de la surface totale, tandis que l'état érosif moyen représente 31%, les états érosifs élevé et très élevé représentent 23%. Selon l'approche descriptive, 26% de la superficie totale est constituée de ravins profonds (Boukrim, 2016).

Dans le bassin versant de l'Oued Sra, l'analyse prédictive révèle que les niveaux d'érosion élevés et très élevés représentent 36% de la surface totale, tandis que les niveaux d'érosion faible et très faible représentent 28%. Selon l'analyse descriptive, 76% de la surface totale est affectée par une érosion en nappe, tandis que 9% sont des ravins moyennement profonds (Badaoui, 2011).

Au sein du bassin versant de l'Oued Larbaa, l'analyse prédictive révèle que les niveaux d'état érosif très élevés représentent 53% de la superficie totale, l'état érosif élevé touche 37%. Selon l'approche descriptive, 73.9% de la surface totale est exposée à une érosion en nappe, les rigoles et ravines de faible profondeur touchent 7.2%, les ravins profonds et Badlands couvrent 14.1%. (Sadiki, 2012).

Au sein du bassin versant de l'Oued Amzaz, l'analyse prédictive révèle que les niveaux d'érosion élevés et très élevés représentent 62% de la superficie totale. Selon l'approche descriptive, 8% de la surface totale est exposée à une érosion liée à des ravins profonds (Mesrar, 2012).

L'utilisation de l'approche PAP/CAR pour une étude descriptive de l'érosion hydrique dans le BV Bou Lajraf fournira une connaissance géomorphologique de l'état des versants.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

La méthode d'approche adoptée, basée sur l'observation systématique de divers phénomènes sur le terrain. Ainsi pour chaque type de milieu défini composant le bassin versant, nous avons relevé toutes les manifestations morphogéniques. Les interprétations sont basées sur l'analyse des éléments du milieu physique et humain (modes d'exploitation du sol).

L'étude qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf nous a permis de découvrir et de comprendre les mécanismes d'évolution des versants qui le composent.

La confrontation des résultats obtenus avec d'autres résultats des sous-bassins versants d'Inaouène nous a permis de constater la fragilité des versants du bassin versant Bou Lajraf.

Avec la succession des années sèches qui caractérise l'agriculture du bassin versant Bou Lajraf, on a trouvé que les versants de pentes raides sont marqués par la concentration de plusieurs formes d'érosion hydrique, ce sont des surfaces qui ne bénéficient d'aucun entretien de la part des paysans, et par conséquent, la réduction de l'infiltration des eaux dans le sol.

Le ravinement affecte avant tous les matériaux peu résistants, se situe généralement sur des pentes fortes et suffisamment longues. Il concerne localement les surfaces ou l'homme par ses activités enracinées dans l'histoire a créé les conditions favorables à son développement.

Les effets d'une telle dynamique sont spectaculaires, après chaque période pluvieuse de profondes perturbations affectent l'espace, les remaniements encourus par la surface créent de nouvelles conditions topographiques, les pertes en matière de sol sont très importantes et les dégâts au niveau des équipements coutent cher à l'économie locale, aggravant ainsi la précarité des conditions de vie de la communauté paysanne.

La comparaison des résultats avec d'autres résultats des sous-bassins versants d'Inaouène a révélé la fragilité des versants du bassin versant Bou Lajraf (tableau 1).

Tableau 1. Évaluation des états érosifs dans le bassin versant Inaouène.

		Surface (%)							
		BV Al-Malha	BV Amlil	Prérif (moyenne)	BV Zireg	BV Bou-Hellou	Moyen Atlas (moyenne)	BV Bou-Lajraf	BV Inaouène (moyenne)
A. Prédictive (États érosifs)	Faible et T.F	14	30	22	24	50	37	8	22,3
	Moyen	21	21	21	20	21	20,5	17	19,5
	Élevé et T.É	65	49	57	56	29	42,5	75	58,2

Source: Benaissa, 2024.

Les formes d'érosion concentrées, en particulier les ravinements, revêtent une grande importance dans le bassin versant Bou Lajraf par rapport aux autres bassins versants d'Inaouène atlasiques et rifaines (tableau 2).

Tableau 2. Synthèse des formes d'érosion dans le bassin versant Inaouène.

		Surface (%)							
		BV Al-Malha	BV Amlil	Prérif	BV Zireg	BV Bou-Hellou	Moyen Atlas	BV Bou-Lajraf	BV Inaouène (moyenne)
A. Descriptive (Formes d'érosion hydrique)	Érosion en nappe	49	72	60,5	31	22	26,5	40	42,3
	Érosion en rigole	32	16	24	10	5	7,5	9	13,5
	Ravines	11	3,2	7,1	1	3	2	34	14,4
	Badlands	1	0,4	0,7	-	-	-	14	5
	T. Stable	5	8	6,5	58	70	64	3	24,5

Source: Benaissa, 2024.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

Selon l'étude géographique et géomorphologique de ce bassin versant, les principaux facteurs de cette dégradation sont les suivants:

- Le bassin versant de Bou Lajraf se situe à un endroit où deux climats très différents se rencontrent (semi-humide et semi-aride), tandis que les processus de thermoclastie et hydroclastie jouent un rôle crucial dans la dégradation de la couche superficielle.
- La lithologie de ce bassin reste de faible résistance aux processus érosifs, notamment avec la présence d'une couverture végétale faible ou moyenne.
- La succession des années sèches annule l'effet de la culture sèche sur la stabilisation de la couche superficielle.
- L'utilisation des versants de pentes élevées pour la culture sèche, facilite la propagation des ravines.

Photo 5. Dégradation des milieux par le développement des ravines, badlands dans la partie médiane du BV Bou Lajraf. Source: photographie personnelle (06/03/2021).

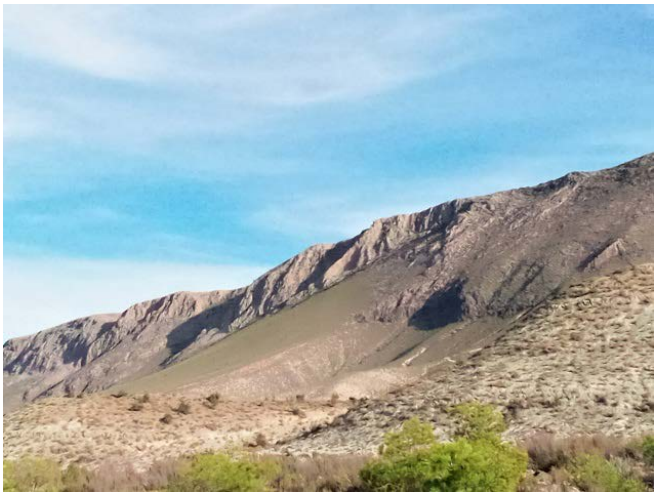

Photo 6. Aspect d'érosion en nappe dans la partie médiane du BV Bou Lajraf. Source: photographie personnelle (06/03/2021).

Photo 7. La baisse du taux de couverture végétale déclenche la propagation des ravines dans la partie centrale du BV Bou Lajraf. Source: photographie personnelle (06/03/2021).

Photo 8. L'impact de la sécheresse et de la succession des années sèches sur le BV Bou- Lajraf. Source: photographie personnelle (06/03/2021).

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

6. CONCLUSION

L'analyse qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant Bou Lajraf par la méthode PAP/CAR, permis de donner des résultats sur la situation géomorphologique de la surface au niveau de l'érosion hydrique. L'approche prédictive montre que 75% du BV présentent un état érosif élevé et très élevé.

Le bassin versant de Bou Lajraf est caractérisé par une combinaison de processus morphodynamiques érosifs, modifient les versants en fonction de plusieurs facteurs :

- Pentes fortes correspondant souvent à l'affleurement de la roche en place, ce qui entraine un ruissellement immédiat lors des averses.
- Les caractéristiques intrinsèques du matériel, meuble, facile à inciser et à mobiliser par les eaux.
- Intervention humaine, l'homme a joué un rôle complexe dans cette dynamique, ses rapports avec le milieu ont pris des aspects différents en fonction des conditions socio-économiques.

L'analyse de la carte des formes d'érosion hydrique montre que le bassin versant de Bou Lajraf est influencé par un taux très élevé de dégradation des versants, avec une grande superficie de badlands.

La phase actuelle dans le bassin versant Bou Lajraf semble constituer une phase de transition majeure entre le climat humide de quatre saisons et le climat semi-aride de deux saisons. En effet, la couverture végétale et l'exploitation des versants sont caractérisées par une couverture extrêmement complexe et hétérogène. Ce couvert est soumis à différentes expositions, entrainant une grande hétérogénéité géomorphologique.

Chaque année, avec le mode des précipitations, le bassin versant Inaouène subit la disparition d'une partie de ces bonnes terres par le ruissellement. La fertilité de ses sols étant en régression, les irrégularités climatiques viennent accentuer la dynamique de surface par l'irrégularité des pluies et des températures. Les terrains du bassin versant Bou Lajraf connaissent soit le prolongement de la saison sèche, qui prépare le sol à une dynamique plus importante, soit l'agressivité des pluies qui favorise le ruissellement et par conséquent l'érosion hydrique concentrée.

Le bassin versant d'Ouèd Bou Lajraf représente un état géomorphologique vulnérable, une lithologie marneuse, un couvert végétal naturel faible et des activités humaines qui facilitent la propagation de plusieurs formes d'érosion hydrique.

La présence d'un versant plus ou moins stable avec un degré d'érosion moyen ou fort explique que le sol est très sensible et peut se détériorer pendant un court laps de temps, sans interventions de développement géomorphologiques (conservation des ressources en sol) adéquates.

Responsabilités and conflits d'intérêts

Les auteurs s'engagent à divulguer tout conflit d'intérêts existant ou potentiel intérêt par rapport à la publication de cet article. De plus, les contributions des quatre auteurs concernés sont présentées comme suit:

- Mohamed Benaissa: Le traitement et l'étude des données géographiques et géomorphologiques du bassin versant Bou Lajraf, la modélisation, le travail de terrain et l'analyse des résultats.
- Jaouad Gartet**:** Orienter le travail, superviser la véracité des résultats obtenus et contribuer à la version définitive du manuscrit.
- Fouad Sahi: Observation et l'analyse des données géographiques sur le terrain.
- Mustapha Hamdach: Valoriser la discussion scientifique en parallèle avec la problématique.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

REFERENCES

Aboulabbas, O. (2005). *Application des directives PAP/CAR 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 du Centre d'Activités Régionales, Rabat.

Aefc, S. (1999). *Plan National d'Aménagement des Bassins Versant (PNABV)*. Rapport d'Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols.

Attia, *et al.* (2005). *Application des Directives PAP/CAR 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*. Programme d'Actions Prioritaires du centre d'Activités Régionales, Tunisie.

Avenard, J.M. (1990), Sensibilité des terres aux mouvements de masse. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 25*(1), 119–130.

Avenard, J.M. (1965). *L'érosion actuelle dans le bassin du Sébou*. Édit. INRA.

Badaoui, O. (2011*). Etude et cartographie des risques liés à l'érosion des sols dans le bassin versant d'oued Sra.* [Projet de fin d'étude de Master Sciences et Techniques, FST Fès].

Beaudet G., *et al*. (1964). Remarques sur quelques facteurs de l'érosion des sols. *Revue de Géographie du Maroc, 6*, 65-72.

Benaissa, M. (2024). *Apport du SIG et des approches géomorphologiques à l'étude de l'érosion des sols et des mouvements de terrain dans le bassin versant de l'Ouèd Inaouène en amont du barrage Idriss 1er.* [Thèse de doctorat, Faculté des lettres et sciences humaines Sais – Fès].

Benaissa, M. (2021). Utilisation du modèle PAP/CAR et de l'outil SIG pour la cartographie et l'évaluation des processus de l'érosion hydrique en milieu moyen atlasique: cas du bassin versant de l'Oued Al Zireg (Moyen Atlas). In *Actes du colloque: Bassin Sebou: Espace, Société et Patrimoine, Faculté Polydisciplinaire de TAZA* (pp. 47-56).

Bennett, H. (1939). *Elements of soil conservation*. Édit. Mac Graw-Hill.

Bhuyan, *et al*. (2002). Evaluation du ruissellement et du rendement sédimentaire par télédétection, GIS and AGNPS. *Journals of soil and water conservation, 57*, 351 – 364. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194705000-00012

Boukrim, *et al*., (2016). Cartographie de l'érosion qualitative des sols du bassin versant de L'Aoudour (Rif – Maroc). *European Scientific Journal, 12*(11), 1857–7431.

BRGM (1976). *Zones exposées à des risques liés aux mouvements du sous-sol. Carte Zermos : Trouville, Pont-l'Evêque (Calvados)*.

Bruun, *et al*. (2015). Dynamique du carbone organique dans différents types de sols après conversion de la forêt en terres agricoles. *Dégradation des terres et développement, 26*, 272 – 283. https://doi.org/10.1002/ldr.2205

Cerda, A. (1998). Influence de l'exposition et de la végétation sur les variations saisonnières de l'érosion sous l'effet de la pluie sur un sol argileux en Espagne. *Revue canadienne de la science des sols, 78,* 321-330. https://doi.org/10.4141/S97-060

Chaplot V., *et al*. (1999). Mesures sur le terrain de l'érosion entre les rigoles sous différentes pentes et tailles de parcelles. *Processus de surface et reliefs terrestres, 24*, 1 – 10.

Colazo J.C., *et al.* (2015). L'impact de l'agriculture sur la texture du sol en raison de l'érosion éolienne. *Dégradation des terres et développement, 26*, 62 – 70. https://doi.org/10.1002/ldr.2297

Dhman, L., *et al.* (1997). *Cartographie des pertes en terre dues à l'érosion hydrique par utilisation d'un système d'information géographique et des images satellites. Cas du bassin versant de Telata, Atelier de travail sur la modélisation de l'érosion hydrique par «RUSLE»*, Marrakech 24-28 mars, pp 52–65.

Dhman, H. (1994). *Utilisation des SIG et des télédétections dans l'étude de l'érosion hydrique: application au bassin versant de Tleta.* Mémoire de troisième cycle, ENFI, Salé.

Duffa, C., & Danic, F. (2006). *Entraînement et redistribution des radionucléides sur le bassin versant de la Peyne.* Direction de L'environnement et de L'intervention, Service d'Etude et de Surveillance de la Radioactivité dans l'Environnement.

El Harradji, A. (1997). Aménagement, érosion et désertification sur les Hauts-Plateaux du Maroc oriental*. Méditerranée*, (1-2), 15-23. https://doi.org/10.3406/medit.1997.2985

Faleh, A., & Maktite, A., (2014). Cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique à l'aide de la méthode PAP/CAR et SIG en amont du barrage Allal El Fassi, Moyen Atlas (Maroc). *Papeles de Géographia*, (59 – 60), 71–82. https://doi.org/10.6018/geografia/2014/218161

Faleh, A. (2004). *Évaluation quantitative, qualitative et modulation de l'érosion hydrique dans le bassin d'Aknoul et Mergat (Prérif Orientale).* [Thèse de doctorat d'état en géographie (en arabe), Université Mohammed 1er Oujda].

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

Faleh, A., & Gartet, A. (2000). Cartographie des risques naturels lié à la morphodynamique des versants : Application sur le bassin versant de l'Oued El Kébir (Prérif centrale). *Revue Al Misbahia n°4, FLSH Sais-Fès, pôle de compétence patrimoine culturel*, 173 – 200.

Fanghua, H. (2011). Vegetation NDVI Linked to Temperature and Precipitation in the Upper Catchments of Yellow River. *Environ Model Assess*, (pp. 389 – 398). https://doi.org/10.1007/s10666-011-9297-8

FAO (2019). *Rapport d'évaluation du Programme 2019*. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Flanagan, D.C., *et al.* (2007). Projet de prévision de l'érosion hydrique : historique du développement, capacités du modèle et améliorations futures. *Transactions de l'ASABE, 50*, 1603 - 1612.

Foley, et al. (2005). Conséquences mondiales de l'utilisation des terres. *Sciences, 309* (5734), 570 - 574. https://doi.org/10.1126/science.1111772

Gartet, A. (2010). *Mouvements de terrain et risques environnementaux dans l'agglomération de Fès et son arrière-pays… Aménagement, gestion et prévention.* [Thèse de Doctorat d'État, Université de Rabat].

Gazzolo, T., & Bassi, G. (1966). *Carta delle isolinee diugual érosione en Italie, contribuer au studio du degré d'érodibilité des terres constituantes et des bacs montagneux des corsi d'eau italienne*. Mémoires et études hydrographiques–Servizio idrografico, Publication n° 2.

Giordano, A., & Marchisio (1989*). Analyse et corrélation des cartes existantes d'érosion du sol dans les zones côtières méditerranéennes*. PAP, Malaga, Espagne.

Gréco, J. (1966). *L'érosion, la défense et l'érosion des sols et le reboisement en Algérie.* Édit. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Alger.

Heusch, B. (1970). L'érosion du Pré-Rif (Maroc). *Annales de la Recherche Forestière au Maroc, 12*, 1-176. http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010056569

HILI, A., et al. (2017). Estimation qualitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Amlil (Taza – MAROC) par la combinaison de l'outil SIG et de l'approche PAP/CAR. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, (18) 133-144.

IPCC (2012). Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Geoengineering. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, C. Field, V. Barros, T. F. Stocker, Q. Dahe, J. Minx, K. Mach, G.-K. Plattner, S. Schlömer, G. Hansen, & M. Mastrandrea (Eds.)*, IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.* IPCC Working GroPotsdam Institute for Climate Impact Research, Germany, (pp. 98-99).

Karkouri, J., & Zahnoun, A. (2019). Estimation et cartographie de l'érosion hydrique des sols par intégration du modèle «EPM» de Gavrilovic dans un SIG. Application à un bassin versant méditerranéen: Bénir boufrah (Rif central). In *Espace, Territoire et société au Maroc: Mutations, Dynamiques et Enjeux, Publication FLSH-Mohammedia* (pp. 57 – 68).

Kim, K., & Jeong, Y. (1998). Variations hydrologiques du débit, des pertes en sol et du coefficient de récession dans trois petits bassins versants forestiers, Sciences forestières environnementales. *Forestry Sciences, 54.* Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5324-9_47

Lahlou, A. (1977). *Dégradation spécifique des bassins versants au Maroc. Rabat: Rapport n°1000, Ministère de l'équipement et de la promotion nationale*. Direction de l'hydraulique, Division exploitation, service de gestion des eaux.

Laman, H., *et al*. (2022*).* Soil water erosion assessment in Morocco through modeling and fingerprinting applications: A review. Contents lists available at ScienceDirect. *Heliyon, 8* (8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10209

Laouina, A. (2006). *Prospective «Maroc 2030» gestion durable des ressources naturelles et de la biodiversité au Maroc*. Haut-commissariat au plan, royaume du Maroc. https://www.hcp.ma/Gestion-durable-des-ressources-naturelles-et-de-la-biodiversite-au-Maroc_a845.html

Lizaga, I., *et al*.(2018). Estimation des schémas de redistribution des sols Mesures de With137Cs dans un bassin versant de montagne méditerranéen affecté par l'abandon des terres. *Dégradation des terres et développement*, (29), 105 - 117. https://doi.org/10.1002/ldr.2843

MacDonald, D., et al.(2000). Abandon de l'agriculture dans les zones de montagne en Europe : conséquences environnementales et réponses politiques. *Journal de gestion de l'environnement, 59,* 47 - 69. https://doi.org/10.1006/jema.1999.0335

Mahgoub, M. (2024). Relation between the soil erosion cover management factor and vegetation index in semiarid basins. *Earth Sciences*, 83 (337). https://doi.org/10.1007/s12665-024-11593-3

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

Masson, J.M. (1971). *L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen*. [Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Montpellier].

Maurer, G. (1968). *Les montagnes du Rif marocain. Étude géomorphologique*. [Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris 500].

Medejerab, A., & Henia, L. (2011). Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord- occidentale. *Courrier du Savoir scientifique et technique, 11*, 71 - 79. https://www.asjp.cerist.dz/en/article/78976

Mesrar, H. (2012). [*pplication des directives du PAP/CAR et des outils SIG pour l'évaluation de l'érosion hydrique et la définition des facteurs causaux dans le bassin versant de l'oued Amzaz*. [Mémoire de Master , Faculté des Sciences et Techniques de Fès].

Mesrar, H., *et al.* (2012). *Automatisation de la procédure de modélisation des directives PAP/CAR, par utilisation de l'utilitaire « PAP/CAR Tools » et du SIG, pour l'évaluation des tendances et des facteurs causaux de l'érosion hydrique, cas du bassin versant de l'Oued Sahla, Rif central, Maroc*. International Conference of GIS-Users, 421-424.

Mrabet, R., & Moussadek, R. (2012). Potentiel de restauration des qualités des sols sous semi direct sous litière au Maroc. In: *Restauration de la productivité des sols et la protection des effets des pluies cycloniques ou rares*. DVD sous presse, Édit. IRD, Marseille. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.13493

Nafâa, R. (1997). Dynamique du milieu naturel de la Mâamora et de ses bordures. Paléoenvironnements et dynamique actuelle. [Thèse de Doctorat d'État, Université Mohammed V, Rabat].

Ousmana H., e*t al.* (2017). Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives PAP/CAR. Cas du bassin versant de l'Oued Zgane. Moyen Atlas tabulaire, Maroc. *Bulletin de l'institut scientifique, Rabat, Section science de la terre,* (39), 103-119.

PAM/PNUE (2000). *Formulation et mise en œuvre des projets du PAC : Guide pratique, CAR/PAP-PAM, Athènes–Split, 2000.*

PAP/CAR (2000). *Rapports nationaux sur les problèmes et les pratiques de gestion de la lutte antiérosive dans la région méditerranéenne, PAP/CAR, Split, 2000.*

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 FAO, pp. xii + 72.

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 (2000).

Rahhou, M. 1999. *L'érosion dans le Prérif central, zone inter fluviale Leben-Sebou-Ouergha, un prolongement de l'évolution naturelle, une production sociale.* [Thèse d'État, Université Mohammed V de Rabat, Maroc].

Raynal, R. (1957). L'érosion des sols au Maroc. *Annales Scientifiques de l'Université de Halle, 6*(5), 855-893.

Rey, F., *et al*. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience,* (336), 991 - 998. https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.03.012

Robert, P. (1970). Comportement des systèmes antiérosifs des Eaux et Forêts dans le Pré-Rif. *Bulletin de Liaison des Ingénieurs Forestiers du Maroc, 2*, 33-46.

Romanya, J., & Rovira P. (2011). Une évaluation de la teneur en carbone organique des sols agricoles méditerranéen *Utilisation et gestion des sols, 27*, 321 - 332. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00346.x

Roose, *et al.* (2012). Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo, 6*, 43-69. https://doi.org/10.4000/physio-geo.2319

Rounsevell, M., *et al.* (1998). Le projet IMPEL: Intégrer des modèles biophysiques et socio -économiques pour étudier le changement d'affectation des sols en Europe. In *Actes du XVIe congrès mondial des sciences du sol*, Montpellier, France. https://www.researchgate.net/publication/252521314_Integrating_Biophysical_and_Socio-_Economic_Models_for_Land_Use_Studies

Ruellan, A. (1967). Individualisation et accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts quaternaires du Maroc. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 5*, 421-462.

Sadiki, A., *et al*. (2012). Modélisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique : cas du bassin versant de l'oued Larbaa, Maroc. *Papeles de Geografia*, (55 – 56), 179-188.

Sadiki, A., *et al*. (2007). Evaluation de l'érosion des sols et des facteurs de contrôle par la technique radiométrique dans le bassin versant de Boussouab, Rif oriental, Maroc. *CATENA,* (71), 13-20. https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.003

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12

Sadiki, A., *et al*. (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. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre, 26*, 69 – 79.

Szczypta, C. (2012). Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen. [Thèse de doctorat: Institut National Polytechnique de Toulouse, France].

Tahouri, *et al*. (2016). Utilisation du modèle PAP/CAR et des outils SIG pour la cartographie et l'évaluation des processus d'érosion hydrique en milieu méditerrané, cas du bassin versant de l'oued Asfalou, Maroc. In *Le premier congrès international des études sur l'eau et l'environnement, faculté des sciences Dhar El Mahraz, Fès–Maroc*.

Ttribak, A., et al. (2017). *Évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans un environnement méditerranéen: cas de quelques bassins marneux du Prérif oriental Maroc.* Eau et climat en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, Târgoviste: Editions Transversal, Roumanie (pp. 101 – 112).

Tribak, A., El Garouani, A., & Abahrour, M. (2008). Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans un espace montagnard marocain: cas du sous-bassin versant de l'Oued Tetla (Pré-Rif oriental). In: É. Roose, J. Albergel, G. De Noni, A. Laouina, & M. Sabir (Ed.) *Efficacité de la GCES en milieux semi-arides*, (pp. 339-342). AUF-IRD-ENFI.

Tribak, A. (2000). L'érosion hydrique en moyenne montagne du Prérif oriental: Étude des agents et des processus d'érosion dans une zone de marnes tertiaires. [Thèse d'état, Université Chouaib Doukkali].

Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning.* Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC. https://naldc-legacy.nal.usda.gov/catalog/CAT87208342

© Editorial Universidad de Sevilla 2025 | Sevilla, España| CC BY-NC-SA 4.0. | e-ISSN: 2340-2776 | doi: https://dx.doi.org/10.12795/rea.2025.i49.12