

Évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant d'Oued Aghrouz (Maroc): approche comparative entre la modélisation RUSLE et la simulation de pluie

Assessment of water erosion in the Oued Aghrouz catchment (Morocco): comparative approach between RUSLE modelling and rainfall simulation

Evaluación de la erosión hídrica en la cuenca del Oued Aghrouz (Marruecos): enfoque comparativo entre la modelización RUSLE y la simulación pluviométrica

Miloud Afenzar

miloud.afenzar@usmba.ac.ma  0009-0008-0839-0230

Mohamed Abahrour

abahrourmohamed@gmail.com  0000-0001-7764-7812

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah - Fès. Laboratoire Espace, Histoire, Dynamique et Développement durable.
Faculté Polydisciplinaire Taza Route d'Oujda-B.P. 1223, Taza, Maroc.

Mohamed El Bakkari

mohamed.elbakkari@usmba.ac.ma  0009-0000-0365-5705

Laboratoire Recomposition de l'Espace et Développement Durable, Laboratoire Recomposition de l'Espace et Développement Durable, Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Chouaïb Doukkali, El Jadida, Av. Khalil Jabran, 27. 24000 El Jadida, Maroc.

Hamid Achiban

hamid.achiban@usmba.ac.ma  0000-0002-6484-729X

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah - Fès. Laboratoire Milieux naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-spatiales. FLSH Sais-Fès. Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Sais-Fès. BP 59 Route Immouzer. 30000 Fès, Maroc.

88

INFO ARTÍCULO

Reçu : 26-03-2025

Révisé : 07-07-2025

Accepté : 17-10-2025

MOTS-CLÉS

Bassin versant
Érosion hydrique
Simulateur de pluie
Télédétection
SIG
RUSLE

RÉSUMÉ

L'érosion hydrique constitue la principale menace de dégradation des sols au Maroc en général, et dans le Rif en particulier. Cette étude évalue le risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Aghrouz au moyen d'une double approche : la modélisation spatiale par l'Équation universelle révisée des pertes en sol (RUSLE) et l'expérimentation in situ par simulation de pluie. Les résultats de la modélisation indiquent une perte moyenne de 30,6 t/ha/an, avec des maxima locaux proches de 150 t/ha/an. La plupart des surfaces étudiées souffrent de pertes de sol modérées à très fortes, en particulier les terres agricoles en forte pente ou faiblement couvertes. Les essais de simulation de pluie mettent en évidence l'impact déterminant des pratiques culturales sur le ruissellement, l'infiltration et la production sédimentaire : les parcelles labourées, notamment sur vertisols, sont les plus érosives. Les mesures de turbidité atteignent 140 g/L en automne sur ces parcelles, des valeurs supérieures à celles relevées sur d'autres types d'occupation.

L'analyse comparative des deux approches montre un taux de concordance de 42,7 %, soulignant la robustesse de l'approche mixte ainsi que certaines limites liées à l'échelle d'analyse et à la variabilité des facteurs anthropiques. L'étude insiste sur le rôle des actions humaines dans l'exacerbation de l'érosion et appelle à une meilleure intégration des pratiques agricoles dans les politiques d'aménagement du territoire, assortie de mesures de conservation et de sensibilisation adaptées. Elle fournit une base solide pour la gestion durable des ressources en sols et peut être mobilisée comme référentiel dans d'autres bassins versants à risque.



KEYWORDS

Catchment
Water erosion
Rainfall simulator
Remote sensing
GIS
RUSLE

PALABRAS CLAVE

Cuenca hidrográfica
Erosión hídrica
Simulador de lluvia
Teledetección
SIG
RUSLE

ABSTRACT

Water erosion is the main threat to soil degradation in Morocco, particularly in the Rif. This study assesses erosion risk in the Oued Aghrouz catchment using a dual approach: spatial modelling with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and in situ rainfall simulation. Modelling results indicate an average soil loss of 30.6 t/ha/yr, with local maxima up to 150 t/ha/yr. Most areas are affected by moderate to very severe losses, especially agricultural land on steep slopes with limited cover. Rainfall simulation trials highlight the decisive role of farming practices on runoff, infiltration and sediment yield. Ploughed plots, especially on vertisols, are the most erosive, with turbidity levels reaching 140 g/L in autumn compared to other land uses.

The comparative analysis of both methods shows a 42.7% concordance, underscoring the robustness of a mixed approach while revealing scale-related limits and the influence of anthropogenic factors. The findings stress the role of human activities in accelerating erosion and call for better integration of agricultural practices into land-use policies, alongside targeted soil conservation measures and local awareness programs. This work provides a solid basis for the sustainable management of soil resources and offers a methodological framework transferable to other at-risk catchments.

RESUMEN

La erosión hídrica constituye la principal amenaza de degradación de los suelos en Marruecos, especialmente en el Rif. Este estudio evalúa el riesgo de erosión en la cuenca del Oued Aghrouz mediante un enfoque doble: la modelización espacial con la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) y la experimentación in situ mediante simulador de lluvia. Los resultados de la modelización indican una pérdida media de 30,6 t/ha/año, con máximos locales de hasta 150 t/ha/año. La mayoría de las superficies presentan pérdidas moderadas a muy severas, en particular las tierras agrícolas de fuerte pendiente o con escasa cobertura. Los ensayos de simulación de lluvia ponen de relieve el papel decisivo de las prácticas agrícolas en la escorrentía, la infiltración y la producción de sedimentos. Las parcelas labradas, especialmente sobre vertisoles, son las más erosivas, con niveles de turbidez que alcanzan 140 g/L en otoño frente a otros usos del suelo.

El análisis comparativo de ambos métodos muestra una concordancia del 42,7 %, lo que confirma la solidez del enfoque mixto al tiempo que revela límites relacionados con la escala de análisis y la influencia de factores antrópicos. El estudio subraya la importancia de las actividades humanas en el ámbito de la intensificación de la erosión y plantea la necesidad de integrar mejor las prácticas agrícolas en las políticas de ordenación territorial, acompañadas de medidas de conservación de suelos y de sensibilización local. Este trabajo proporciona una base sólida para la gestión sostenible de los recursos edáficos y un marco metodológico transferible a otras cuencas en riesgo.

89

1. INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un phénomène naturel et universel qui contribue fortement à la dégradation des sols (Boukhier *et al.*, 2001 ; Valentin *et al.*, 2005). Elle se caractérise par le détachement puis le transport des particules du sol de l'amont vers l'aval (Ludwig, 2000), sous l'effet de divers facteurs naturels et anthropiques. Elle est considérée comme l'une des problématiques environnementales les plus complexes (Lal, 2001), menaçant à la fois les écosystèmes (Yang *et al.*, 2003) et la productivité des terres agricoles (Melalih *et al.*, 2021). Ses impacts incluent également la dégradation de la qualité de l'eau, des risques pour la santé humaine, l'envasement des barrages et l'augmentation des inondations (Lal, 1998 ; Cheggou, 2008). Ses conséquences s'étendent plus largement à l'environnement et les sociétés (Yang *et al.*, 2018).

Au cours du siècle dernier, de nombreuses recherches ont été consacrées à quantifier les taux d'érosion des sols à l'aide de diverses méthodes, appliquées dans un large éventail de conditions climatiques, pédologiques, d'occupation du sol et de topographies (Zhang *et al.*, 2023 ; Li *et al.*, 2021 ; Tribak *et al.*,



2015). La modélisation spatiale de l'érosion hydrique, à travers l'Équation Universelle révisée de perte en sol (RUSLE), constitue aujourd'hui un outil de référence pour estimer les pertes en sol dans les bassins versants (Musasa *et al.*, 2025 ; Li *et al.*, 2023). Elle revêt une grande importance scientifique en raison de sa capacité à identifier les zones les plus vulnérables, à évaluer les risques environnementaux et économiques liés à l'érosion et à proposer des interventions adaptées (Cerdan *et al.*, 2002). Elle représente également un support précieux pour la décision et la planification des mesures de conservation des sols et de l'eau (Smith, 1999). Plusieurs travaux ont appliqué ce modèle au contexte marocain (Al Karkouri, 2003 ; Sadiki *et al.*, 2009 ; Abahrour, 2009 ; Faleh, 2010 ; El Aroussi *et al.*, 2011 ; Tribak *et al.*, 2009 ; Meliho *et al.*, 2020 ; El Ommal, 2021 ; Arari, 2022 ; Amhani, 2022 ; Tahiri *et al.*, 2024).

L'étude des processus liés à l'érosion hydrique nécessite toutefois une compréhension fine de plusieurs paramètres fondamentaux, tels que la perméabilité des sols, les seuils de déclenchement du ruissellement, le volume d'eau écoulée et la charge solide transportée (Marston *et al.*, 1999 ; Morgan *et al.*, 1997). Le suivi in situ de ces phénomènes lors de pluies naturelles se heurte cependant à de nombreuses contraintes, liées notamment à la durée et à la variabilité spatio-temporelle des événements (Collinet *et al.*, 1979 ; Léonard *et al.*, 1998). Dans ce contexte, l'utilisation de simulateurs de pluie constitue une alternative méthodologique efficace, permettant de contrôler l'intensité des précipitations et de recueillir des données précises en un temps limité (Casenave *et al.*, 1989). Cette approche facilite l'analyse des facteurs explicatifs du ruissellement, de l'infiltration et des réponses hydrodynamiques des sols.

De nombreuses études se sont attachées à quantifier l'érosion hydrique et à établir des corrélations entre le risque d'érosion et divers indicateurs mesurés à l'aide de simulateurs de pluie, tels que l'état de surface, la teneur en matière organique, l'humidité initiale du sol et le type d'occupation du sol (Lafforgue, 1977 ; Asseline & Valentin, 1978 ; Casenave, 1982 ; Marston & Dolan, 1999 ; Roose, 1996 ; Cheggour, 2008 ; Abahrour, 2009 ; El Ommal, 2023 ; Amhani, 2022 ; Arari, 2022). Ces travaux confirment l'apport essentiel de l'expérimentation contrôlée dans l'analyse des dynamiques érosives.

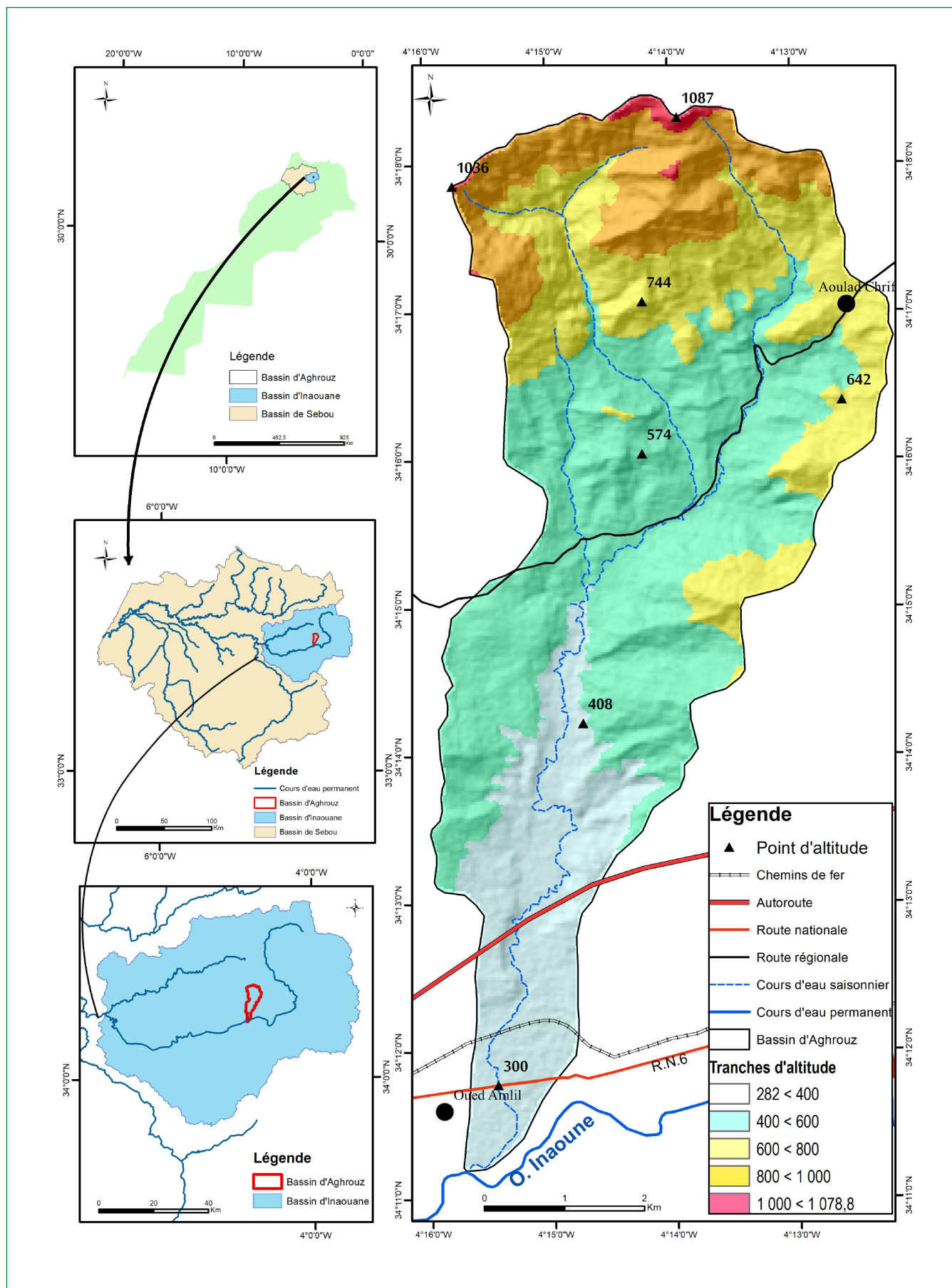
Dans cette perspective, la présente étude vise à évaluer la vulnérabilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Aghrouz à travers une double approche :

- Une quantification spatiale de l'érosion potentielle par l'application du modèle RUSLE, combinée aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) et à la télédétection ;
- Une analyse expérimentale du ruissellement et du transport solide à l'aide d'un simulateur de pluie à rampe manuelle.

Cette approche permet d'examiner les relations entre infiltration, ruissellement et nature des sols, tout en quantifiant les pertes en fonction des types d'occupation. Enfin, une comparaison critique est établie entre les résultats issus de la modélisation (RUSLE) et ceux obtenus par expérimentation de terrain, dans une perspective de validation croisée.

1.1. La zone d'étude

L'Oued Aghrouz constitue un affluent de la rive droite de l'Oued Inaouène. Il prend naissance dans le Prérif méridional oriental du Maroc, à l'ouest de la ville de Taza, et s'étend entre les latitudes 34,18° N et 34,30° N, ainsi que les longitudes 4,20° O et 4,26° O (figure 1). Le bassin versant couvre une superficie d'environ 41 km², caractérisée par une lithologie majoritairement marneuse. Le relief de la zone se compose de collines peu allongées, séparées par de larges vallées profondes. L'altitude varie de 282 mètres au point de confluence avec l'Oued Inaouène à 1 087 mètres au sommet du Jbel Errouda, point culminant du bassin.





Sur le plan géologique, le substrat lithologique du bassin versant est principalement constitué de marnes friables et imperméables d'âge miocène, ainsi que de formations de flyschs éocènes. Cette configuration géologique fragile et sensible à l'érosion favorise le développement d'un réseau hydrographique dense et bien structuré. D'un point de vue climatique, le bassin présente un climat de type méditerranéen à influence atlantique, avec des conditions bioclimatiques relevant de l'étage semi-aride. Les précipitations l'un des facteurs majeurs responsables des phénomènes érosifs, il oscille entre 540 mm et plus de 600 mm, les plus importantes étant enregistrées entre les mois de janvier et mars. Les températures les plus basses sont relevées en janvier et février, tandis que juillet et août constituent les mois les plus chauds de l'année.

2. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

2.1. Modélisation de l'érosion hydrique par le modèle RUSLE

L'équation universelle de perte de sol est basée sur plusieurs facteurs qui contribuent à déterminer la quantité de perte de sol, principalement liés à l'agressivité des précipitations, à la susceptibilité du sol à l'érosion, en plus du facteur topographique résultant de la combinaison de la longueur et de l'inclinaison de la pente. Elle intègre également les facteurs d'utilisation du sol et les pratiques de lutte contre l'érosion. (Wischmeier & Smith, 1958) les ont définis comme suit :

$$A = R * K * LS * C * P \quad [1]$$

- A : Quantité de perte de sol en tonnes/hectare/an.
- R : Indice d'agressivité des pluies.
- K : Indice de sensibilité du sol à l'érosion.
- LS : Indice du degré et de la longueur de la pente.
- C : Indice d'utilisation du sol.
- P : Indice du degré de protection du sol contre l'érosion

92

2.1.1. Calcul du facteur de l'agressivité des précipitations (R)

Le facteur R est lié à diverses caractéristiques des précipitations, notamment la durée, l'intensité, la quantité, la taille des gouttes et la vitesse de chute, qui définissent le potentiel érosif des précipitations. Toutefois, pour calculer le facteur d'agressivité des précipitations, la plupart des chercheurs qui ont appliqué l'équation de la perte Universelle de sol pour quantifier l'érosion au Maroc se sont appuyés sur la formule (Arnoldus, 1980) dans sa première formule, ou sur la formule modifiée (Rango & Arnoldus, 1987) qui incluent seulement les précipitations mensuelles et annuelles. Il se présente comme suit :

$$\log R = 1.74 * \log \Sigma (P_i^2 / P) + 1.29 \quad [2]$$

- R : Agressivité de Pluie.
- P_i : Précipitations mensuelles moyennes en mm.
- P : Précipitations annuelles moyennes en mm.



2.1.2. Calcul du facteur d'érodabilité du sol

Le facteur K est un indicateur de la sensibilité du sol à l'érosion et est corrélé à la texture du sol et à la teneur en matière organique (Zhang, *et al.*, 2023). Pour estimer le facteur d'érodabilité du sol K dans la zone étudiée, des analyses de laboratoire ont été effectuées sur la base de la structure Granulométrique et du taux de matière organique, en plus de certaines analyses extraites du Rapport Biologique du Nord de Taza (SETE, 1996). Le facteur d'érodabilité du sol (K) a été calculé d'après l'équation suivante :

$$K = 2.1 * M^{1.14} * 10^{-6} (12-MO) + 0.0325 * (S - 2) + 0.025 * (P - 3) \quad [3]$$

- Où : K : facteur d'érodabilité du sol selon le système métrique (tonnes/N/ha),
- MO : matière organique
- M : Texture (% de limon + sable fin) * (100 - % d'argile).
- S : Code de la structure.
- P : Code de la perméabilité

2.1.3. Facteur topographique (LS)

La pente est l'un des facteurs les plus importants à étudier lors de l'évaluation de l'érosion hydrique, du fait qu'elle joue un rôle important dans la détermination de la distance de transport et de dépôt des matériaux. Le volume de matériaux transportés par l'eau augmente progressivement avec la pente, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de l'énergie cinétique de l'eau lorsque la pente dépasse 15 % (Rosse, 1994). Ce facteur comprend à la fois la longueur de la pente en mètres (**L**) et le degré de la pente (S), qui influencent clairement toutes les formes d'érosion des pentes. On peut définir (**L**) comme la distance entre le point de départ du ruissellement sur la pente et le point de dépôt, c'est-à-dire le point de discontinuité de la pente ou le point où le ruissellement rejoint le cours d'eau. Le facteur de gradient de la pente (**S**) est exprimé en %. 93

Ce facteur a été déterminé en multipliant L et S à l'aide du SIG basé sur le modèle numérique des terres de la MNT (résolution de 30 mètres), avec le logiciel ARCGIS, en passant par les étapes suivantes.

Tout d'abord, le facteur L a été calculé à l'aide de la direction d'accumulation du flux selon l'équation (Desmet *et al.*, 1996)

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \quad [4]$$

- Avec D : La résolution spatiale.
- A : direction d'accumulation.
- M= $\beta/(\beta+1)$. β a été exprimé de la manière suivante :

$$\beta = \frac{(\sin\theta/0.0896)}{3.0 (\sin\theta)^{0.8} + 0.56} \quad [5]$$

Le facteur **S** est défini par l'équation suivante :

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \text{si } \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \text{si } \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases} \quad [6]$$



2.1.4. Facteur du couvert végétal et les pratiques culturales (C)

Le calcul du facteur du couvert végétal et les pratiques culturales par la méthode proposée par Wischmeier, et Smith, (1978) nécessite un ensemble de données précises, notamment en ce qui concerne la quantité de résidus végétaux après la récolte, la vitesse de décomposition de ces résidus, la relation entre la masse des résidus et le pourcentage de sol couvert, le poids des racines des plantes, la hauteur des précipitations, et le cycle agricole (Renard *et al.*, 1997).

Vu l'absence de ces données pour déterminer les valeurs du facteur C et mettre en évidence sa distribution spéciale au sein du bassin, nous nous sommes appuyés sur un ensemble d'études réalisées par plusieurs chercheurs en zone du préif pour évaluer ses valeurs en fonction des utilisations du sol (Abahrour, 2009 ; Tribak *et al.*, 2009 ; Faleh, 2010).

2.1.5. Facteur des pratiques antiérosives du sol (P)

Le facteur de protection contre l'érosion des sols (P) est un paramètre clé du modèle RUSLE. Ce facteur comprend un éventail de stratégies utilisées par les populations locales ou d'interventions des autorités pour protéger le sol de l'érosion hydrique. L'inclusion de ce facteur est un avantage favorable par rapport à d'autres modèles utilisés pour évaluer l'érosion. Par exemple, les facteurs humains peuvent contribuer à augmenter le taux d'érosion hydrique, mais en même temps ils peuvent intervenir pour préserver le sol et prévenir sa dégradation par des interventions ciblées (Renard *et al.*, 1997). Selon les observations effectuées sur le terrain, les témoins anti-érosifs sont très limités spatialement dans la zone d'étude, de sorte que la valeur 1 a été attribuée à l'ensemble du bassin et que ce facteur est neutralisé.

2.2. Expérimentation par simulation de pluie

94

Le dispositif expérimental adopté dans cette étude repose sur un simulateur d'irrigation manuel à rampe, conçu selon un modèle simplifié décrit par Roose (1996) et Roose *et al.* (1997). Ce simulateur permet de générer une pluie artificielle sur une parcelle expérimentale en vue de mesurer le ruissellement de surface ainsi que les pertes en sol qui y sont associées (Barthès *et al.*, 1998). Il s'inspire du prototype initial développé par Asseline et Valentin (1976), adapté pour fonctionner sur différentes pentes et avec un faible volume d'eau (60 litres).

Les essais ont été réalisés sur des parcelles expérimentales d'une superficie de 1 m², délimitées à l'aide d'un cadre métallique mesurant 1,66 m de long sur 0,60 m de large (photo 1). Le système d'arrosage utilisé délivre une intensité simulée de 80 mm/h.

Au total, 56 tests ont été effectués afin d'analyser les variations des niveaux d'infiltration, de ruissellement et de transport solide en fonction de différents types de sols et d'occupations du sol. Plus précisément, 12 tests ont été réalisés sur des vertisols, 16 sur des sols calcimagnésiques, 16 sur des sols peu évolués, 8 sur des sols minéraux bruts et 4 sur des sols isohumiques. En termes d'occupation du sol, 16 tests ont été menés sur des jachères, 12 sur des terres abandonnées, 20 sur des parcelles en céréaliculture et 4 sur des terres arborées (tableau 1). Par ailleurs, afin de saisir l'impact de la variabilité saisonnière sur le comportement hydrodynamique des sols, les 56 tests ont été répartis équitablement sur les quatre saisons de l'année, soit 14 tests par saison.

**Tableau 1.** Répartition des parcelles expérimentales.

En fonction du type de sol					
	Sols calcimagnésiques	Sols minéraux bruts	Sols peu évolués	Sols isohumiques	Vertisols
Automne	4	2	4	1	3
L'hiver	4	2	4	1	3
Printemps	4	2	4	1	3
L'été	4	2	4	1	3
En fonction de l'utilisation du sol					
	Terres abandonnées	Jachères	Céréaliculture	Terres arborées	
Automne	4	4	5	1	
L'hiver	4	4	5	1	
Printemps	4	4	5	1	
L'été	4	4	5	1	

Source : élaboration personnelle.

2.2.1. Déroulement de test

Avant toute opération d'irrigation, il est essentiel de procéder à une série de mesures et de calculs visant à évaluer les principaux facteurs influençant le ruissellement, tels que l'état de surface, la rugosité du sol, la morphologie du terrain, ainsi que les caractéristiques physico-chimiques du sol à travers un échantillonnage pour analyse en laboratoire.

95

L'état de surface du sol est évalué selon la méthode des points quadrats décrite par Roose (1996). Deux transects diagonaux sont tracés à l'intérieur de la parcelle à l'aide d'un mètre, et des piquets sont implantés tous les 2 cm (photo 2). Pour chaque point d'observation, la surface est classée en trois catégories : surface couverte (SC %, incluant la végétation, la litière et les cailloux en surface), surface fermée (SF %, comprenant les croûtes, les zones tassées et les cailloux intégrés dans la masse du sol) et surface ouverte (SO %, correspondant aux agrégats, fissures et cavités liées à la faune).

La rugosité de la surface a été mesurée par méthode à la chaînette développée par Roose (1996). Il consiste à utiliser une chaînette métallique flexible, tenue manuellement à ses deux extrémités, de telle sorte qu'elle se dépose sur la tranche de sol située à l'aplomb de la règle rigide. Étant donné que la chaîne épouse la rugosité de la surface du sol et suivre les ondulations de la surface (en hauteur comme en largeur) leur longueur excède celle du cadre d'expérimentation. L'indice de rugosité (Ir %) est obtenu en rapportant la longueur réelle de la chaînette déployée à la distance linéaire mesurée. La rugosité moyenne de la parcelle est calculée à partir de six mesures, réalisées selon deux directions : trois dans le sens longitudinal et trois dans le sens transversal.

La détermination de la pluie d'imbibition (π_i) est réalisée à l'aide d'un arrosoir de 10 litres, en enregistrant le volume et le temps nécessaires pour que la première goutte de ruissellement apparaisse à l'aval de la parcelle (photo 3). Une fois cette pluie d'imbibition déterminée, l'expérience se poursuit sans interruption. Les 10 litres d'eau sont appliqués en 7 minutes et 30 secondes, correspondant à une intensité de 80 mm/h. À chaque apport de 10 litres, le volume d'eau ruisselée est mesuré à la sortie de la parcelle. Ce processus est répété jusqu'à l'obtention de deux volumes identiques consécutifs, indiquant la stabilisation du ruissellement et une perméabilité constante du sol (photo 4).



Par ailleurs, la quantification de la charge solide nécessite la collecte des eaux de ruissellement tout au long de l'expérience afin d'en analyser la teneur en sédiments.



Photo 1. Parcelle expérimentale délimitées à l'aide d'un cadre métallique. Source : cliché le 25/01/2022.



Photo 2. Mesure de L'état de surface du sol selon la méthode des points quadrats. Source : cliché le 25/01/2022.

96



Photo 3. La première goutte de ruissellement apparaisse à l'aval de la parcelle. Source : cliché le 25/01/2022.



Photo 4. Collecte des eaux de ruissellement pour la quantification de la charge solide. Source : cliché le 17/03/2021.



2.2.2. Coefficient de ruissellement (Cr %)

Le coefficient de ruissellement (Cr) est le rapport entre le volume d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée et le volume total d'eau arrosé (volume ruisselé + volume infiltré) (Wodiew, 1987). La détermination du coefficient de ruissellement (Cr) pour les différents tests de simulation de pluie s'effectue selon la formule suivante :

$$Cr(\%) = (E.R(mm) \div E.T(mm)) * 100 \quad [7]$$

- Cr(%) : Le coefficient de ruissellement (%)
- E.R(mm): le volume d'eau ruisselé (litres)
- E.T(mm): le volume total d'eau (volume ruisselé + volume infiltré)

2.2.3. L'analyse statistique

Une analyse statistique a été réalisée pour examiner les relations entre les résultats obtenus et les facteurs influençant les mécanismes de ruissellement et d'infiltration. Les coefficients de corrélation de Pearson ont été utilisés à cette fin. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statgraphics XVII - X64 pour Windows, les résultats étant rapportés à un niveau de signification de 0,05.

2.2.4. Méthodologie de comparaison des résultats de RUSLE et simulation de la pluie

Dans cette étude, une comparaison est faite entre les résultats de l'équation de perte universelle de sol et ceux de la technique de simulation de pluie, puisque les deux approches évaluent l'érosion en nappe. Les résultats obtenus par la simulation des pluies concernent une surface d'un m². Dans un premier temps, ces résultats sont convertis en tonnes par hectare, ce qui correspond à la quantité d'eau arrosée sur la parcelle (par exemple, 60 mm). Puis, pour calculer les pertes annuelles de sol, cette quantité est convertie pour correspondre au total des précipitations annuelles dans la région (576 mm). Afin de convertir le volume de perte de sol sur une surface d'un mètre carré en tonnes par hectare et par an, la relation suivante a été adoptée (Afenzar, 2024) :

$$A = (A_s * P) / p_s \quad [8]$$

- Avec, A : Perte de sol (tonnes/ha/an)
- As : Perte de sol moyenne inter-saisonnière basée sur la simulation des pluies (tonnes/ha)
- Ps : Quantité d'eau arrosée sur la parcelle
- P : Précipitations annuelles moyennes dans la région

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Paramètres du modèle

Agressivité des précipitations (R) : Les résultats du facteur d'agressivité des pluies dans le bassin de l'Oued Aghrouz, basés sur l'équation [2], et son application aux données pluviométriques disponibles aux stations d'Oued Amlil, Bab Marzouka, et Oued Amlil, ont montré que les valeurs du facteur R dans le bassin de l'Oued



Aghrouz sont proches les unes des autres, allant de 73,1 à 89,8, avec une croissance de l'aval à l'amont du bassin (figure 2). À titre de comparaison, les valeurs obtenues sont proches de celles trouvées dans le reste du Rif par un groupe de chercheurs ayant travaillé avec l'une des deux équations : 56,3 dans le bassin de l'Oued El Telata (Abahrou, 2009) et 96 dans le bassin de l'Oued Lahdar (Amhani, 2022).

Érodabilité du sol : Les résultats obtenus montrent que l'érodabilité du sol dépend étroitement de la texture du sol et de la teneur en matière organique, et qu'elle varie d'un sol à l'autre. Ces valeurs varient de 0,21 pour les sols isohumiques à 0,38 pour les sols peu évolués, ce qui est cohérent avec les valeurs obtenues avec le même indice aux États-Unis d'Amérique après des expériences menées dans plus de 55 types de sols sur plus de 10 000 parcelles expérimentales ; elles varient de 0,03 à 0,69, avec une fréquence élevée de valeurs de 0,1 à 0,5 pour les sols peu résistants (Al Karkouri, 2003). La distribution de l'érodabilité des sols selon la classification (Manrique, 1988) révèle des différences significatives (tableau 2), avec une proportion élevée de sols à forte érodabilité (plus de 46,3 %), tandis que les sols à faible érodabilité représentaient moins de 24,8 % et que les sols à érodabilité moyenne ne dépassaient pas 28,7 %. (figure 3).

Tableau 2. Distribution d'érodabilité des sols dans le bassin de l'Oued Aghrouz.

Taux d'érodabilité du sol	Classe d'érodabilité des sols	Surface	Pourcentage du bassin
$K < 0.15$	Très faible érodabilité	0	0
$0.15 < k < 0.25$	Faible érodabilité	10.1	24.8
$0.25 < k < 0.35$	Moyennement érodables	11.7	28.7
$0.35 < k < 0.45$	Fort érodabilité	18.9	46.3
$0.45 < k$	Très fort érodabilité	0	0

Source : traitement personnel des données issues de la carte d'érodabilité des sols basés sur le rapport de SETE 1996.

Facteur topographique (LS) : Les valeurs du facteur LS varient de 0,03 à 234,8 (fig. 4). Elles sont élevées dans les zones montagneuses en amont du bassin, où le sol est instable et menacé par l'érosion. D'autre part, des valeurs plus faibles ($LS < 5$) sont enregistrées dans la partie occidentale et en aval dans la plaine qui occupe la partie sud du bassin versant. Elles correspondent à une faible altitude de la plaine et du chenal du cours d'eau. Cela s'explique par le relief assez hétérogène qui caractérise la zone d'étude.

Facteur d'utilisation des sols (C) : Les valeurs associées aux cultures annuelles (0,53) sont dominées à 60 % en raison de la prédominance de la culture céréalière dans la zone d'étude (figure 5, tableau 3). En deuxième position, on trouve les terres consacrées à l'arboriculture, qui couvrent 20,5 % de la zone d'étude. Enfin, les valeurs associées aux cultures des oliviers, qui représentent 18,1 % de la superficie du bassin.

Tableau 3. La distribution du facteur d'utilisation des sols.

Utilisation des sols	Facteur C	Surface	Pourcentage
Terres incultes	0.75	0.28	1.10
Cultures des oliviers	0.28	5.39	18.01
Céréaliculture	0.26	30.57	60
Arboriculture	0.25	4.48	20.5
Forêt ouverte	0.08	0.01	0.32

Source : élaboration personnelle à partir des Images de Google Earth 2021 et les observations sur le terrain.

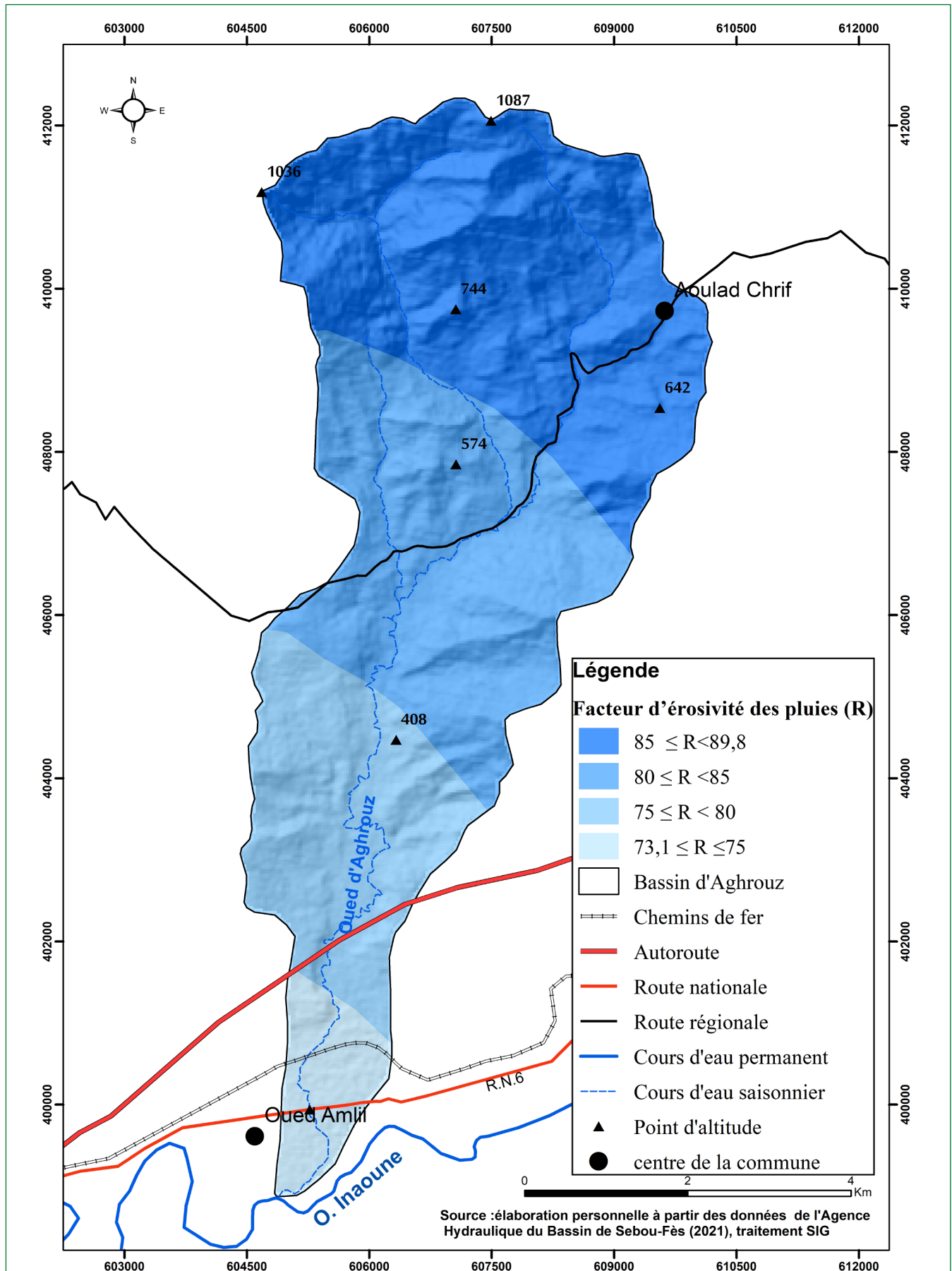


Figure 2. Les résultats du facteur d'agressivité des pluies. Source : élaboration personnelle.

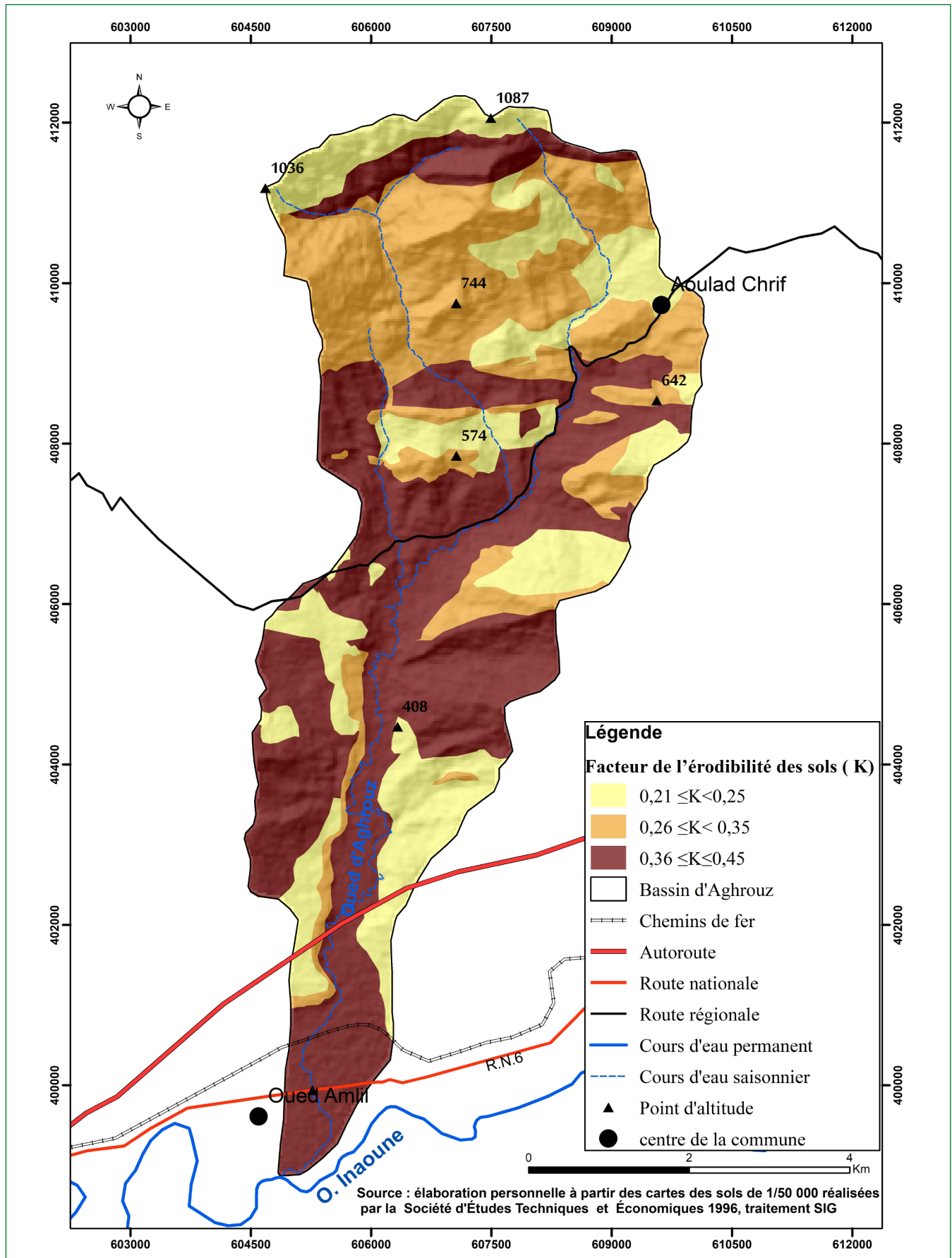


Figure 3. Répartition des classes d'érodibilité des sols dans le bassin de l'Oued Aghrouz. Source : élaboration personnelle.

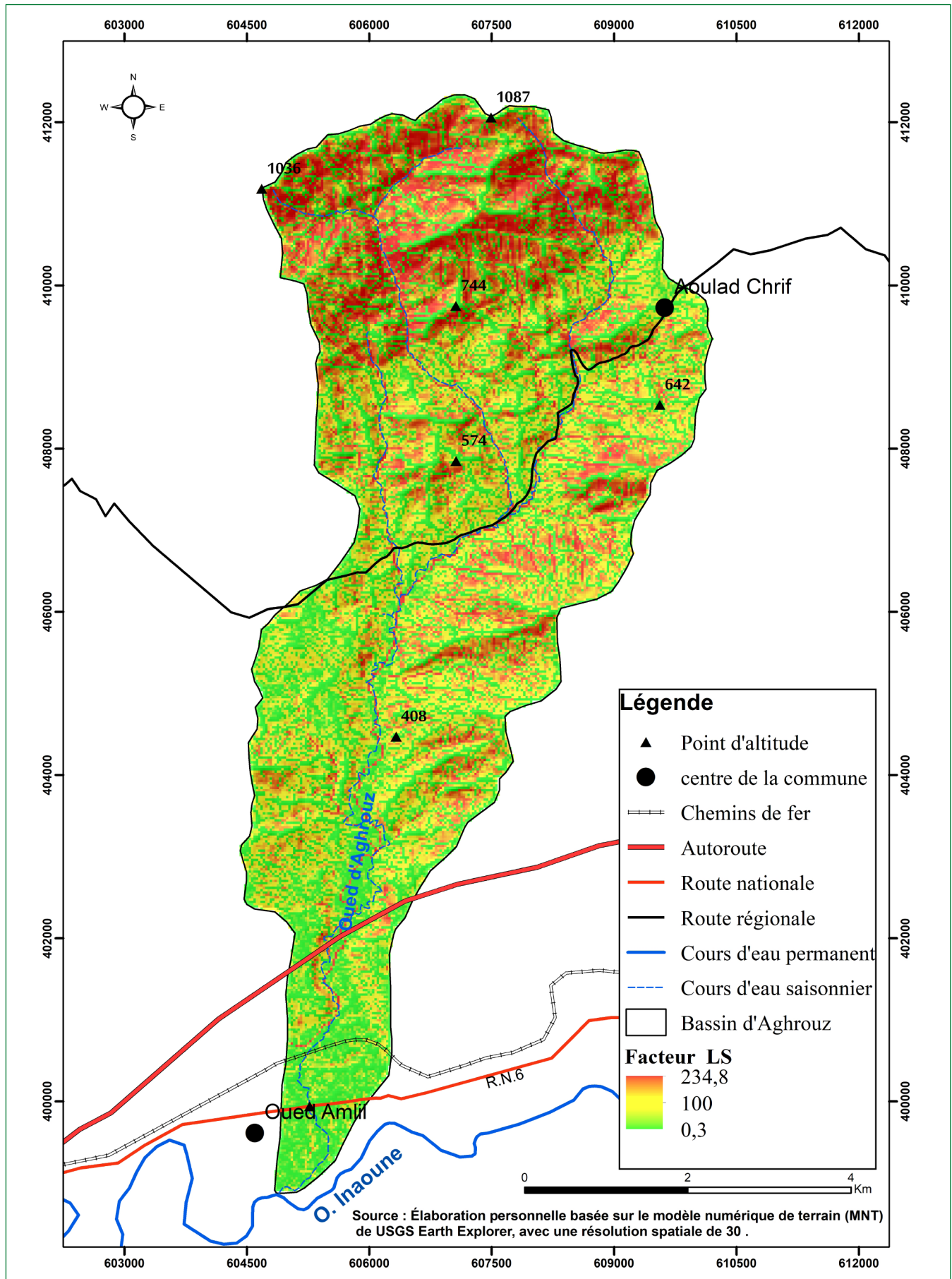


Figure 4. La distribution du facteur LS. Source : élaboration personnelle.

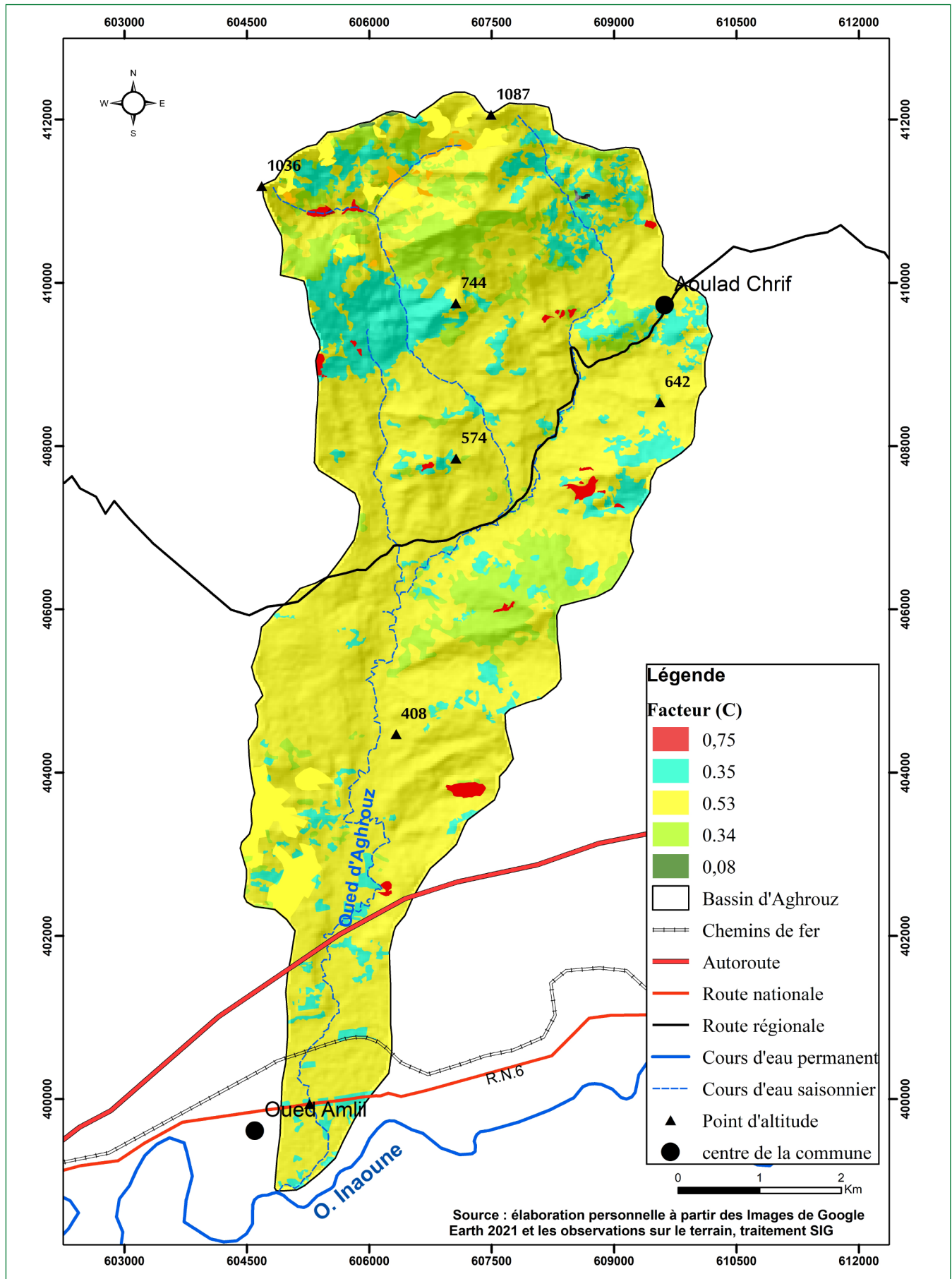


Figure 5. La distribution du facteur d'utilisation des sols. Source : élaboration personnelle.



3.2. Résultats de quantitative de l'érosion par module RUSLE

Après avoir déterminé les facteurs de l'équation de la perte universelle de sol, une carte de la distribution de la perte de sol par pixel a été créée. Afin de rendre la carte lisible et analysable, ces différentes valeurs ont été regroupées en catégories sur la base de la classification utilisée aux États-Unis, qui est fondée sur la résistance du sol à l'érosion hydrique. Cette dernière suppose qu'en moyenne, le sol peut supporter une dégradation allant jusqu'à 7,41 t/h/an tout en maintenant un niveau élevé de production agricole. La perte est considérée comme très élevée et la dégradation forte lorsqu'elle dépasse 19,7 t/h/an. Ce seuil peut en effet affecter négativement la production agricole (Faleh, 2010 ; Mokhtari 2017 ; Sadiki *et al.* 2004).

Les résultats de l'application de ce modèle indiquent que l'érosion moyenne dans le bassin de l'Oued Aghrouz est de 30,6 t/h/an. Les valeurs de perte de sol dans la zone étudiée varient entre 0,10 et 180,12 t/h/an. En outre, l'analyse de la distribution des pertes de sol révèle que l'érosion moyenne, qui s'étend de 7,44 à 19,7 t/h/an, est la plus répandue, couvrant 32,4 % de la superficie totale du bassin. L'érosion très forte, avec un volume supérieur à 32,13 tonnes par an, représente 24,7 % de la superficie totale du bassin, tandis que l'érosion faible couvre 18,6 % de cette même superficie et que l'érosion forte s'étend sur 24,11 % (figure 6 et 7). Les faibles valeurs de perte de sol sont prédominantes dans la partie sud du bassin, où le terrain est presque plat et où les pentes sont faibles. Des valeurs élevées sont observées dans la partie nord, où le risque d'érosion est clairement visible sur le terrain en raison de la présence d'un système de pentes fortes, en plus des valeurs élevées du coefficient d'agressivité des précipitations R. Ces chiffres mettent en exergue la nécessité impérieuse d'intervenir de manière proactive pour enrayer le processus de dégradation des sols et restaurer les terres affectées par l'érosion, afin d'éviter qu'elles ne se transforment en formes d'érosion plus profondes et plus dévastatrices.

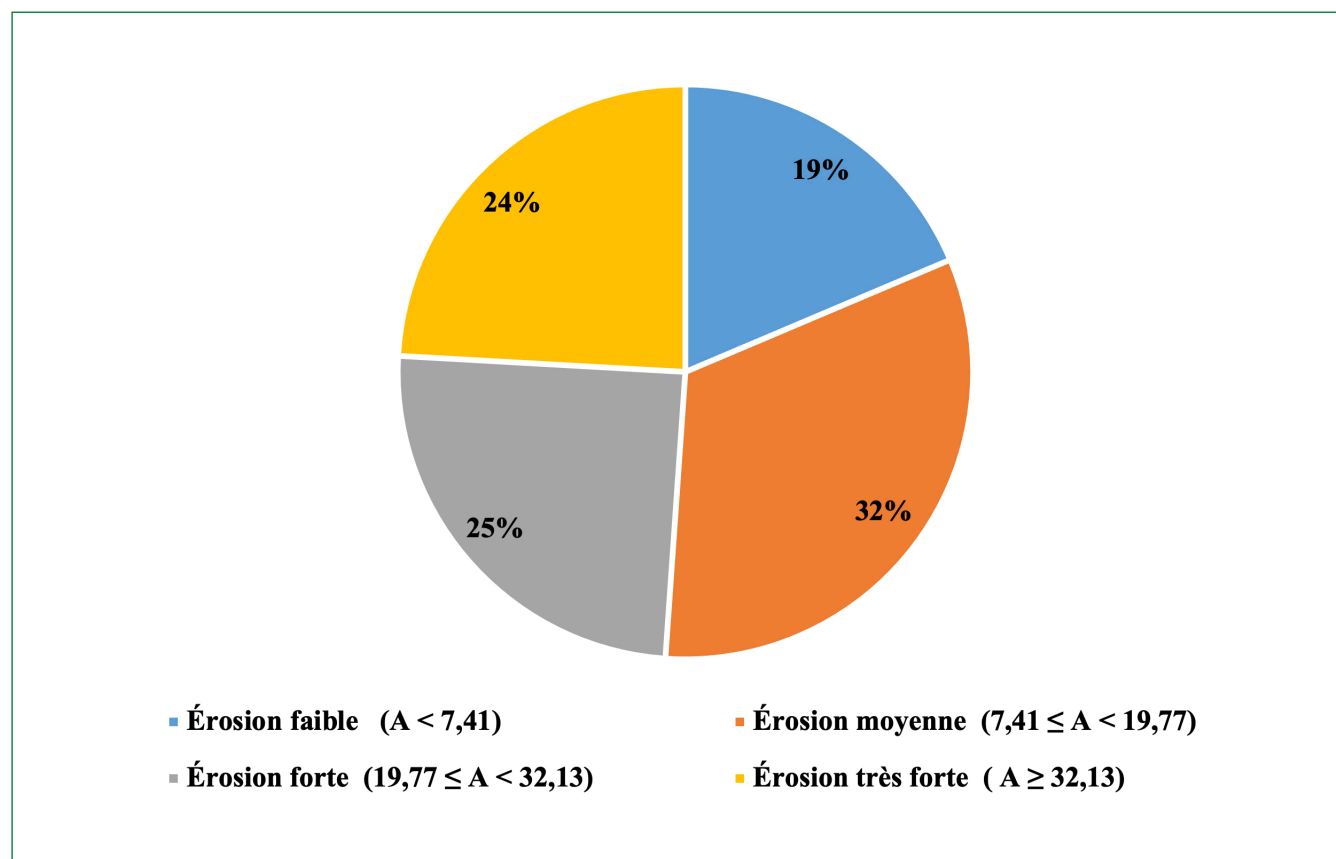


Figure 6. Distribution des classes de perte de sol. Source : élaboration personnelle.

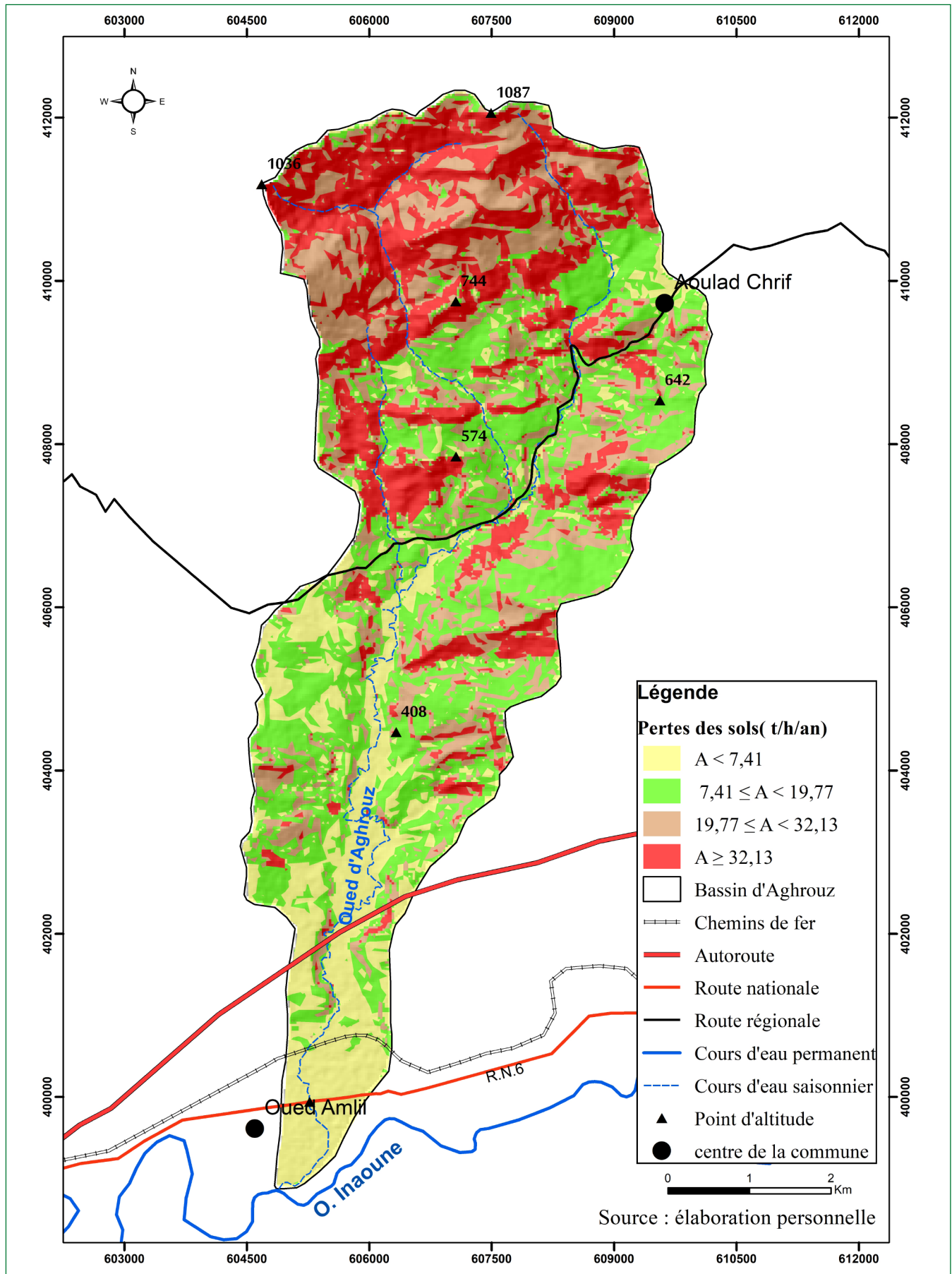


Figure 7. Carte de distribution de perte de sol dans le bassin de l'Oued Aghrouz. Source : élaboration personnelle.



En examinant les résultats obtenus dans le bassin de l'Oued Aghrouz, il apparaît que ceux-ci ne diffèrent pas significativement des résultats d'un ensemble de chercheurs dans d'autres régions marocaines. Par exemple, le bassin de l'Oued Lahdar dans le Rif oriental a enregistré environ 31 t/h/an (Amhani, 2022), tandis que (El Hafid & Akdim, 2018) a trouvé 21,78 t/h/an dans le bassin de l'Oued Isly dans le Hautes Plateaux Oriental. Par ailleurs, la perte de sol dans le bassin de l'Oued Sahla, situé dans la région du Rif central, a été estimée à 22,01 t/h/an par Sadiki, *et al.* (2009). De même, le bassin de l'Oued Larbaa Ayacha, dans la région du Rif occidental, a été enregistré à une perte de 25,7 t/h/an (Ouallalli, *et al.*, 2016) (tableau 4).

Tableau 4. Volume moyen de perte de sol au Maroc selon le modèle RUSLE.

Bassin versant	Perte de sol (t/h/an)	Référence
Telata Prérif oriental	61.42	(Abahour, 2009)
Larbaa Prérif oriental	49.7	(Arari, 2022)
Lahder Prérif oriental	31	(Amhani, 2022)
Tensift Haut Atlas	44.03	(Meliho, <i>et al.</i> 2020)
Aknoul rif central	39 .89	(Faleh, 2010)
Amzaz rif central	78	(Chaouan, 2015)
El Mallah prérf	41	(El Aroussi <i>et al.</i> , 2011)
Isly Hautes Plateaux Oriental	21.78	(El Hafid, et Akdim, 2018)
Isra rif central	42 .12	(El ommal, 2021)
Sahla rif central	22.01	(Sadiki, <i>et al.</i> 2009)
Bousouab Rif oriental	55,35	(Sadiki, <i>et al.</i> 2004)
Beni Boufrah rif central	46.5	(Al Karkouri, 2003)
Arbaa Ayacha Rif Occidental	25.77	(Ouallalli, <i>et al.</i> 2016)
Beht Hauts Plateaux et Moyen Atlas	19.40	(Gaatib, <i>et al.</i> 2014)
Kharouba Plateau central	27.38	(Tahiri, <i>et al.</i> 2024)

Source : élaboration personnelle.

D'autre part, ces résultats sont inférieurs aux estimations d'un ensemble de chercheurs sur autres régions du Maroc. En effet, Abahrour, (2009) a trouvé 61 t/h/an dans le bassin de l'Oued El Telata dans le Prérif oriental. Tandis que El Aroussi *et al.* (2011), ont obtenu dans le bassin de l'Oued El Mallah dans le Prérif central un résultat de 41 t/h/an. D'autre part, une perte de sol de 39,89 t/h/an dans le bassin d'Aknoul dans le Rif central (Faleh, 2010). La dégradation dans le bassin de l'oued Beni Boufarah dans le Rif central a été estimée à 46,5 t/h/an (Al Karkouri, 2003). Cela peut s'expliquer par la prédominance des terres abandonnées dans ces zones, qui sont considérées comme plus productrices de sédiments que le bassin de l'Oued Aghruoz. D'autres facteurs, comme l'agressivité des précipitations et les caractéristiques du sol, peuvent également avoir un impact.



3.3. Résultats de simulation de pluie

3.3.1. Ruissellement et infiltration

Les différentes simulations réalisées mettent en évidence un coefficient de ruissellement relativement élevé durant la saison humide, tandis que des valeurs plus faibles sont généralement enregistrées en période sèche, à quelques exceptions près (notamment les points P2, P5 et P8) (tableau 5). Ce ruissellement exceptionnel observé en automne peut être attribué à plusieurs facteurs : l'encroûtement et la compaction du sol par le piétinement animal, une couverture végétale réduite et une rugosité de surface inférieure à celle relevée en hiver. Plusieurs travaux ont d'ailleurs souligné que la production de ruissellement est étroitement liée aux propriétés physiques de l'état de surface du sol ainsi qu'à sa couverture végétale (Sabir *et al.*, 2004 ; Morsli *et al.*, 2004).

D'un point de vue de l'occupation du sol, les terrains abandonnés et ceux en jachère présentent les taux de ruissellement les plus élevés, atteignant jusqu'à 70 % en hiver sur les sols peu évolués. À l'inverse, les terrains en céréaliculture affichent des taux nettement inférieurs (jusqu'à 5,5 %). Des études antérieures menées dans des contextes similaires (Arabi, 1991) ont rapporté des taux avoisinant 30 % sur des sols nus et compactés. Les faibles valeurs enregistrées en céréaliculture s'expliquent notamment par la présence de résidus de culture (chaumes) en été et par la couverture végétale hivernale et printanière, qui contribuent à réduire la vitesse de ruissellement.

Les fluctuations saisonnières de l'infiltration finale sont également notables, avec des valeurs oscillant entre 19,8 et 77,44 mm/h. Les taux les plus élevés sont relevés durant la saison estivale, notamment sur les terres agricoles (P11 = 77,44 mm/h). Cette infiltration élevée est favorisée par l'état de surface résultant du travail du sol, qui améliore la rugosité, la porosité et le stockage superficiel de l'eau, en plus d'une faible humidité initiale. Ces résultats corroborent ceux d'études menées dans la même région (Al Karkouri, *et al.*, 2000). Le travail du sol joue ainsi un rôle essentiel en augmentant l'infiltrabilité, comme l'ont également montré Gómez *et al.* (2005). Les terres en jachère présentent des taux intermédiaires, supérieurs à ceux des terrains abandonnés mais inférieurs à ceux des terres labourées, avec une valeur maximale en été (68,6 mm/h) et une valeur minimale en hiver. Cette pratique agricole contribue donc efficacement à la réduction du ruissellement et à l'amélioration de l'infiltration (Abahrour, 2009 ; Boli & Roose, 2004 ; Diallo *et al.*, 2012 ; El Ommal, 2023 ; Laouina *et al.*, 2000 ; Zaher *et al.*, 2021).

Le type de sol constitue également un facteur déterminant. Sur les vertisols, les taux d'infiltration finale restent faibles sur les terres abandonnées (moins de 34 mm/h), alors qu'ils peuvent atteindre 64,41 mm/h en été sur les parcelles en céréaliculture. Cette variabilité s'explique par la forte teneur en argiles gonflantes, qui, en gonflant lors de l'humectation, ferment les fissures superficielles et limitent ainsi l'infiltration. Concernant les sols peu évolués, les infiltrations les plus importantes sont enregistrées sur les terrains labourés, dépassant 63 mm/h tout au long de l'année, avec des pics estivaux. Ces valeurs sont comparables à celles mesurées à l'échelle d'un mètre carré dans d'autres travaux (Amhani, 2022). À l'inverse, les valeurs minimales sont relevées en hiver sur les terres abandonnées, avec des différences notables allant jusqu'à un facteur de 2 à 3 par rapport aux terres labourées.

Enfin, sur les sols calcimagnésiques, l'infiltration finale reste faible en hiver (P5 = 41,8 mm/h), moyenne en automne et au printemps, et atteint des niveaux très élevés en été, dépassant 73,1 mm/h, en particulier sur les terres labourées en céréaliculture. La moyenne saisonnière s'établit autour de 59 mm/h, ce qui confirme l'importance de la gestion du sol dans la régulation des processus hydrologiques superficiels.

**Tableau 5.** Répartition saisonnière du coefficient de ruissellement et d'infiltration finale.

Parcelle	Automne		Hiver		Printemps		Été	
	If mm/h	Cr (%)	If	Cr	If	Cr	If	Cr
1	44,7	20,22	40,68	65,78	48,92	23,91	54	24,22
2	49,3	47,8	48,3	14,77	48,7	22,58	53,16	56,92
3	39,7	34,22	33,6	50,34	17,6	43,7	50,8	42,15
4	47,9	19,8	44,8	20	70,2	18,8	73,01	19,14
5	23,2	60,2	40,68	37,85	37,84	38,53	42,4	32,35
6	34	48,45	25,92	52,34	32,44	37,03	33,92	42,18
7	49,3	13,9	45,01	15,57	46,3	18	64,4	14,48
8	58	20,4	54,04	10	58,36	19,93	63,2	20,46
9	66,6	13,3	65,92	10,01	56,16	16,66	68,64	6,34
10	43,2	40,9	19,88	70	39,2	33,35	50,4	30,5
11	70,5	10	58,8	19,13	60,9	19	77,44	8,47
12	71,4	9	60,72	15,1	63,28	20,2	65,28	14
13	46,3	30	41,8	40	48,8	33,2	50,1	28,53
14	33,6	28,1	40,68	7,5	70,96	34,2	44,7	33,43

Source : élaboration personnelle.

107

3.3.2. L'érosion et perte de sols

Les résultats obtenus révèlent que l'érosivité maximale est observée pendant l'automne, avec une moyenne de 28 g/L. Les valeurs de production sédimentaire maximale sont enregistrées respectivement sur les terrains labourés des vertisols (P8 : 140 g/L) (tableau 6), des sols calcimagnésiques en arboriculture (P5 : 39 g/L) et des sols peu évolués sur les terrains abandonnés (P9 : 20 g/L). Cette situation est due à la fragilité des premiers horizons du sol en raison de la longue période d'ensoleillement, ainsi qu'à une dénudation généralisée des sols à la fin de la saison sèche. Ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés par d'autres chercheurs tels que Roose *et al.* (2000), Laouina, *et al.* (2000) et Morsli *et al.* (2004).

Les turbidités restent faibles pendant le printemps, avec des valeurs variant de 0,4 g/L pour les sols peu évolués sur les terrains abandonnés à 68,2 g/L pour les vertisols sur les terrains labourés, avec une moyenne de 16,04 g/L. Les turbidités moyennes pour chaque type de sol varient de 61,6 g/L pour les vertisols à 4 g/L pour les sols isohumiques. L'humidité initiale élevée et la couverture herbacée pendant cette période contribuent à maintenir la cohésion de la texture du sol, ce qui réduit les pertes en sol.

Les pertes en sol importantes observées sur les terres labourées témoignent de la vulnérabilité accrue de ces surfaces à l'érosion hydrique. Cette constatation rejoint les résultats de plusieurs travaux antérieurs qui ont mis en évidence l'effet délétère du travail du sol sur la stabilité des structures superficielles (Abahrour, 2009 ; Boli & Roose, 2004 ; Diallo *et al.*, 2012 ; El Ommal *et al.*, 2021 ; Laouina *et al.*, 2000). Dans cette même perspective, Zaher *et al.* (2021) soulignent que les terres cultivées présentent des taux d'érodabilité supérieurs d'un à trois ordres de grandeur par rapport aux terres dotées d'une couverture végétale permanente. Ces résultats plaident en faveur de la réduction du labour (grâce à des techniques telles que le semis direct ou



l'agriculture de conservation), de la préservation d'une couverture végétale (végétation pérenne, mulch ou cultures intermédiaires) et de l'adoption de pratiques anti-érosives (bandes enherbées, terrasses).

En revanche, les parcelles en jachère se distinguent par des taux de turbidité faibles, attribuables à une couverture végétale dense au long de l'année qui joue un rôle protecteur efficace contre l'érosion. Au printemps et en été, ces surfaces sont dominées par une couverture des adventices ainsi que des résidus de paille, constituant ainsi une barrière naturelle contre les impacts des gouttes de pluie et le ruissellement de surface et en favorisant l'infiltration, contribue à réduire considérablement les pertes en sol. (Abahrour, 2009).

Tableau 6. Les pertes saisonnières des sols en g/l.

Parcelle	Automne	Hiver	Printemps	Été
1	13	10,7	7,1	9,4
2	8,6	0,7	2,2	3,68
3	7,5	4,2	7,2	4,78
4	19,8	19,6	8,8	19,14
5	39,6	8,6	27,3	58,06
6	55,0	19,0	21,0	22,5
7	58,1	49,4	33	57,9
8	140	109,9	68,2	98,2
9	20,6	36,5	7,9	25,6
10	6,2	5,5	0,4	2,8
11	4,2	27,5	48,4	21,5
12	18,9	4,6	5,0	3,44
13	14	8	3,2	8,53
14	7,5	4	2,0	2,56

108

Source : élaboration personnelle.

Les résultats de l'analyse statistique menée sur l'ensemble des indicateurs (54 expériences) ont révélé de nombreuses corrélations entre les facteurs responsables et la charge solide. La première est négative avec le taux de surfaces couvertes ($R = -0,46$), et la seconde est positive avec les surfaces nues, avec une signification statistique ($P\text{-Value} = 0,0027$). Concernant la relation entre la charge solide et les propriétés du sol, les résultats ont montré une forte corrélation inverse avec la teneur en sable ($R = -0,7$), statistiquement significative ($P\text{-Value} = 0,001$), et une corrélation positive avec la teneur en limon ($R = 0,63$), également significative ($P\text{-Value} = 0,001$). En outre, une corrélation positive statistiquement significative ($P\text{-Value} = 0,027$) a été observée entre la charge solide et la pente, avec un coefficient de corrélation de $R = 0,5$. Autrement dit, plus la pente est prononcée, plus la capacité de l'eau à transporter les particules du sol augmente.

3.4. Comparaison entre la méthode RUSLE et la simulation des pluies

La comparaison entre les résultats obtenus en utilisant l'équation universelle de perte du sol et la méthode de simulation de la pluie est présentée dans le tableau 7. Il ressort de cette comparaison une coïncidence dans le degré d'érosion pour 6 parcelles sur 14, ce qui représente environ 42,7 %. Cette concordance inclut



4 parcelles sur 5 dans les sols peu évolués et 2 parcelles sur 3 dans les sols calcimagnésiques. D'autre part, trois parcelles présentent une différence d'un degré dans le niveau d'érosion, ce qui représente environ 21 % de l'échantillon. Au niveau du sol minéraux brut, la simulation des pluies ont conduit à un niveau d'érosion modéré, tandis que les résultats de l'équation universelle de perte du sol ont donné une forte érosion. Ces divergences peuvent être considérées comme acceptables en raison de la différence d'échelle, s'échelonnant d'un mètre à un grand versant.

D'une autre part, les résultats ont montré qu'il y avait des différences significatives au niveau du vertisol, où une très forte érosion a été observée en utilisant la simulation des pluies, alors qu'une faible érosion a été observée en utilisant l'équation mondiale du perte sol.

Tableau 7. Comparaison des résultats obtenus par Rusle avec les résultats de la simulation des pluies.

Parcelles	Simulation des pluies	Rusle	Parcelles	Simulation des pluies	Rusle
1	Érosion moyenne	Érosion Forte	8	Érosion très forte	Érosion faible
2	Érosion moyenne	Érosion Forte	9	Érosion très forte	Érosion faible
3	Érosion moyenne	Érosion Forte	10	Érosion faible	Érosion faible
4	Érosion moyenne	Érosion moyenne	11	Érosion moyenne	Érosion moyenne
5	Érosion très forte	Érosion très forte	12	Érosion faible	Érosion faible
6	Érosion très forte	Érosion faible	13	Érosion faible	Érosion très forte
7	Érosion très forte	Érosion faible	14	Érosion faible	Érosion faible

Source : élaboration personnelle.

D'autre part, bien que la technique de simulation des pluies soit appliquée à l'échelle du mètre carré et qu'il soit difficile de la généraliser à l'ensemble du versant et du bassin par rapport à la modélisation sur le terrain, la comparaison a révélé des points de convergence et de similitude significatifs sur un même versant. Quant aux zones présentant des différences marquées, celles-ci sont liées aux variations observées entre les parties supérieures et inférieures du versant.

Par ailleurs, les écarts enregistrés par simulation des pluies, avec des valeurs élevées pour certaines parcelles, s'expliquent par le fait que l'équation universelle de perte en sol a été développée pour prédire l'érosion annuelle. Ainsi, son applicabilité se limite à l'estimation de la perte moyenne en sol sur une zone donnée. Cette équation tend à sous-estimer les valeurs mesurées, particulièrement dans le cas de précipitations exceptionnelles et intenses. En revanche, les résultats obtenus par simulation des pluies sont associés à des précipitations artificielles de forte intensité (80 mm/h).

4. CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence l'ampleur du phénomène d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Aghrouz à travers une double approche : la modélisation spatiale par l'équation RUSLE et l'expérimentation in situ par simulation de pluie. Les résultats de la modélisation indiquent une perte moyenne de 30,6 t/ha/an, avec des valeurs locales dépassant 150 t/ha/an, traduisant une dynamique érosive particulièrement active. Cette intensité est liée à la fois aux caractéristiques naturelles du milieu (substrat marneux, fortes pentes, sols peu perméables) et aux pratiques humaines. L'analyse de l'occupation du sol a montré que les terres labourées et abandonnées sont les plus vulnérables. Les labours effectués traditionnellement sans mesures antiérosives, la rareté de la couverture végétale saisonnière, et la pression des pratiques associées (piétinement, compactage des sols) favorisent le ruissellement et augmentent la production de sédiments.



D'un autre côté, l'insuffisance d'aménagements de conservation et la méconnaissance des risques de l'érosion constituent des facteurs anthropiques responsables de l'intensification de ce phénomène.

L'utilisation du simulateur de pluie s'est révélée particulièrement adaptée pour analyser le ruissellement, l'infiltration et l'impact des pratiques culturales sur le comportement hydrodynamique des sols. Cette approche a permis de préciser le rôle de facteurs clés tels que l'état de surface, l'humidité initiale, la couverture végétale et la capacité d'infiltration dans le déclenchement du ruissellement et des pertes en sol.

La comparaison des deux méthodes a mis en évidence une concordance de 42,7 %, soulignant leur complémentarité : la simulation de pluie fournit des données locales et fines, tandis que la modélisation spatiale permet une vision intégrée à l'échelle du bassin. Les écarts observés s'expliquent par des différences d'échelle, par des paramètres non pris en compte dans le modèle RUSLE et par la variabilité spatiale des pratiques humaines. Cette étude souligne ainsi la nécessité d'intégrer les facteurs socio-économiques et les dynamiques d'usage du sol dans les modèles d'évaluation de l'érosion. La durabilité des aménagements hydriques et agricoles dépend étroitement de l'implication des acteurs locaux, de la robustesse des politiques de gestion intégrée des bassins versants et de l'adoption de mesures de conservation adaptées au terrain.

En définitive, la lutte contre l'érosion hydrique ne peut se limiter à une approche strictement technique ou physique ; elle doit s'appuyer sur une démarche intégrée qui articule facteurs naturels et pressions anthropiques. C'est dans cette synergie que réside la possibilité de préserver durablement les ressources en sols, indispensables au développement territorial et à la résilience des écosystèmes ruraux. Les recherches futures gagneraient à inclure des indicateurs socio-environnementaux et des scénarios d'évolution de l'occupation des terres afin de renforcer les stratégies d'adaptation et de mitigation. Enfin, cette contribution fournit des éléments pertinents pour la gestion et la stabilisation des bassins versants, et ouvre de nouvelles perspectives sur l'étude de l'érosion en nappe et du transfert sédimentaire vers l'aval, notamment en direction du barrage Idriss 1^{er}.

Remerciements

110

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à Mr Afenzar Mohamed pour sa précieuse collaboration pendant le travail sur le terrain. Les auteurs remercient également chaleureusement les réviseurs pour leurs commentaires perspicaces, qui ont sans aucun doute contribué à améliorer la qualité de ce travail.

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 :

- Miloud Afenzar : Conceptualisation, Méthodologie, Étude sur le terrain, Rédaction, Préparation de la version originale, Analyse des données.
- Abahrour Mohamed : Conceptualisation, Méthodologie, Étude sur le terrain, Rédaction - Préparation de la version originale, Analyse des données, Révision.
- Mohamed El Bakkarri : Analyse des données, Rédaction - Révision et édition.
- Hamid Achiban : Analyse des données, Rédaction - Révision et édition.



RÉFÉRENCES

- Abahrour, M. (2009). *Contribution à l'évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans le Prérif Oriental (Cas du bassin versant de l'Oued Telata)*. [Thèse de doctorat]. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc. (In Arabe, with English Abstract).
- Afenzar, M. (2024). *Evaluation quantitative et qualitative de l'érosion hydrique dans le Prérif oriental : Le cas du bassin de l'Oued Aghrouz*. [Thèse de doctorat] Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc. (In Arabe, with English Abstract).
- Al Karkouri, J. (2003). *Dégradation du milieu naturel dans le bassin versant de Béni Boufrah (Rif central- Maroc) : Analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et de modélisation spatiale*. [Thèse de Doctorat d'Etat]. Université Mohamed V, FLSH Rabat, Maroc.
- Al Karkouri, J., A. Laouina, E. Roose, & Sabir, M. (2000). Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Beni boufrah- Rif central (Maroc). *Reseau Erosion Bull. Montpellier : IRD*, 20, 342-356.
- Amhani, Z. (2022). *Evaluation quantitative et qualitative de l'érosion hydrique, et aménagement dans le Pré-Rif Oriental : cas du bassin versant de l'oued lahdar*. [Thèse de doctorat]. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc.
- Arabi, M. (1991). *Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen (Médéa, Algérie)*. [Thèse Géogr.], Univ. Grenoble..
- Arari, Kh. (2022). *Evaluation quantitative et qualitative de l'érosion hydrique, et aménagements dans le Pré-Rif Oriental : cas du bassin versant de l'Oued Larbâa*. [Thèse de doctorat]. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc.
- Arnoldus, H. M. J. (1980). Methodology used to determine the maximum average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Bulletin FAO*, 34, 39-48.
- Asseline, J. (1997). Le simulateur de pluie en 1997 (type ORSTOM, Asseline-Valentin) : adaptations aux zones semi-arides et de montagne. *Bulletin Réseau Erosion*, 17, 272-281.
- Asseline, J., & Valentin, V. (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cahiers de l'ORSTOM. Série Hydrologie*, 15(4), 321-349.
- Barthès, B., Albrecht, A., Asseline, J., de Noni, G., Roose, E., & Viennol, M. (1998). Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les rougiers de Camarès (Aveyron). *Etude et Gestion des Sols*, 5, 157-170.
- Boli, Z., & Roose, E. (2004). Effets comparés du labour classique et du non labour sous litière sur le fonctionnement de deux sols ferrugineux tropicaux sableux à Mbissiri, Nord Cameroun. *Bulletin - Réseau Erosion*, 23(1), 431-437.
- Boukheir R., Shaban A., Girard M-C, & Khawlie M, (2001a). Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. *Sécheresse*, 1 2(3), 231-245.
- Casenave, A. (1982). Le mini-simulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. Hydro. XIX*, (4), 207-227.
- Casenave, A., & Valentin, C. (1989). *Les états de surface de la zone Sahélienne: Influence sur l'infiltration*. In *cahiers orstom*.
- Chaouan, J. (2015). *L'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) dans l'étude de l'érosion hydrique dans le Rif central – Cas du bassin versant d'Amzaz*. [Thèse de doctorat en géographie]. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs Fès, (In Arabe, with English Abstract).
- Cheggour, A., Simonneaux, V., Asma, S., Yaro, Y., Sadik, E., Sabir, M., & Roose, E. (2008). Recherche d'indicateurs de ruissellement et des risques d'érosion au moyen de tests d'infiltrométrie dans le bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, 21(3), 311-322. <https://doi.org/10.7202/018777ar>.
- Collinet, J., & Lafforgue, A. (1979). *Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta*. ORSTOM, Abidjan.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. A. (1996). GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427-433. <https://doi.org/10.1080/00224561.1996.12457102>
- Diallo, D., Orange, D., & Roose, E. (2012). Influence du labour, du semis direct et du type de sol sur le stock de carbone, les pertes en terre et les rendements d'une rotation intensive (coton/maïs) au Mali Sud. In E. Roose, H. Duchaufour, & G. D. Noni (Eds.), *Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles* (pp. 31-41). Marseille : l'Université d'État d'Haïti, l'Université de Quisqueya, l'Institut de recherche pour le développement (IRD). <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.12500>



- El Aroussi O., Mesrar L., El Garouani A., Lahrach A., Benaabidate L., Akdim B., & Jabrane R. (2011). Predicting the potential annual soil loss using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in the Oued El Malleh catchment (Prerif, Morocco). *Present Environment and Sustainable Development*, 5(2), 5-16.
- El Aroussi, O. (2014). *Etude de l'érosion et de la déposition des sols à l'échelle du bassin versant de l'Oued EL Malleh (Fès-MAROC) par l'utilisation conjointe de la télédétection, du SIG et des techniques de mesures sur le terrain*. [Thèse de doctorat nationale en géologie], Faculté des Sciences et Techniques, Sais Fès.
- El Hafid, D., & Akdim B. (2018). Quantification De L'érosion Hydrique En Utilisant Le Modèle Rusle Et Déposition Intégrée Dans Un Sig. Cas Du Bassin Versant De L'oued Isly (Maroc Oriental). *European Scientific Journal February edition*, 14(5), 373-385. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n5p373>
- El-Ommal, M. (2021). *Dynamique des versants du Rif Central Marocaine : Evaluation quantitative et qualitative de l'érosion hydrique et problématique de l'aménagement spatiale : Cas du bassin versant de l'Oued Sra*. [Thèse de Doctorat]. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc. (In Arabe, with English Abstract).
- 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/10.12911/22998993/1612024.0>
- Faleh, A. (2010). *Evaluation qualitative et quantitative de l'érosion des sols dans le Rif central, cas du bassin versant d'Aknoul*. Publications de l'Association Tataoun Asmir. (In Arabe).
- Gaatib, R.E., & Larabi, A. (2014). Integrated evaluation of soil erosion hazard and risk management in the oued beht watershed using remote sensing and GIS techniques: impacts on El Kansra dam siltation (Morocco). *Journal Geogr. Inf. Syst.*, 6, 677–689. <https://doi.org/10.4236/jgis.2014.66056>
- Gómez, J. A., Romero, P., Giráldez, J. V., & Fereres, E. (2005). Experimental assessment of runoff and soil erosion in an olive grove on a Vertic soil in southern Spain as affected by soil management. *Soil Use and Management*, 20(4), 426–431. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00392.x>
- Lafforgue, A. (1977). Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles : Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIV(4), 299-344.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.*, 17, 319–464, <https://doi.org/10.1080/07352689891304249>
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Dev.* 12, 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Laouina, A. (1992). Recherches actuelles sur les processus d'érosion au Maroc. *Bulletin - Réseau Erosion*, 12(1), 292–299.
- Laouina, A. (2000). Dynamiques agraires et dégradation des terres dans les régions de montagne au Maroc, la perspective d'un développement durable. In *La montagne marocaine* (pp. 1-5). Publ. Chaire UNESCO-GN.
- Laouina, A. (2010). Conservation des eaux et des sols au Maroc : prise en compte de la diversité géographique Water and soil conservation in Morocco, consideration about the geographical diversity. *Environnement, Aménagement, Société*, 214, 85–99. <https://doi.org/10.4000/norois.3156>
- Leonard, J., & Andrieux, P. (1998). Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32(3–4), 209–223. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00049-6)
- Li, P., Tariq, A., Li, Q., Ghaffar, B., Farhan, M., Jamil, A., Soufan, W., El Sabagh, A., & Freeshah, M. (2023). Soil erosion assessment by RUSLE model using remote sensing and GIS in an arid zone. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 3105–3124. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2243916>
- Li, H., Zhu, H., Wei, X., Liu, B., & Shao M. (2021). Soil erosion leads to degradation of hydraulic properties in the agricultural region of Northeast China. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 314, 107388. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107388>
- Ludwig, B. (2000). *Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion - De la parcelle au bassin versant*. Ingénieries - E A T, IRSTEA, (pp. 37-47). hal-00464068.
- Manrique, L. (1988). *Land Erodibility assessment methodology, LEAM, using soil survey data based on soil taxonomy*. [Thèse de Doctorat]. University of Hawaii, Honolulu, USA.
- Marston, R. A., & Dolan, L. S. (1999). Effectiveness of sediment control structures relative to spatial patterns of upland soil loss in an arid watershed. *Wyoming. Geomorphology*, 31(4), 313–323. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00089-6)



- Melalih, A., & Mazour, M. (2021). Using RUSLE and GIS for the soil loss assessment in arid regions: The case of the Ain Sefra catchment in the Ksour Mountains, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, (48) (I-III), 205–214. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136163>
- Meliho M., Nouira A., Benmansour M., Boulmane M., Khattabi A., Mhammdi N., & Benkdad A., (2019). Assessment of soil erosion rates in a Mediterranean cultivated and uncultivated soils usin fallout 137Cs. *Journal of Environmental Radioactivity*, 208–209, 106021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106021>
- Mokhtari, E. H. (2017). Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement du barrage Ghrib. [Doctoral dissertation, Remini Boualem ; Hamoudi Saeed Abdelaamir]. Doctorat en sciences.
- Morgan R. P. C., K. McIntyre, K., Vickers, A. W., Quinton, J. N., & Rickson. R. J. (1997). A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Technol.*, 11, 291-299. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(97\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(97)00013-5)
- Morsli, B., Mazour, M., Mededjel, N., & Roosé, E. (2004). Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et de l'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 15(1), 96–104.
- Musasa, T., Shoko, C., Marambanyika, T., & Dube, T. (2025). Modelling soil erosion risk in rural sub-catchments of Zimbabwe using RUSLE, remote sensing and machine learning. *Journal of Arid Environments*, 229, 105407. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105407>
- Ouallali, A., Moukhchane, M., Aassoumi, H., Berrad, F., & Dakir, I. (2016). La cartographie de l'état de dégradation des sols par adaptation des lignes directrices du CAR/PAP dans le bassin versant de l'oued Arbaa Ayacha, Rif occidental, Maroc. *Journal des géosciences et de la protection de l'environnement*, 4(7), 77-88. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.47009>
- Rango, A., & Arnoldus, H. (1987). Aménagement des bassins versants. In *Cahiers Techniques de La FAO* (pp. 1–11).
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In *Agricultural Handbook*, (703), 404.
- Roose E., & Smolikowski, B. (1997). Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert. *Reseau Erosion Bull. Montpellier : ORSTOM*, 17, 282-296.
- Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. In *Bulletin pédologique de la FAO*, 70, 420.
- Roose, E. (1996). Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bulletin Réseau Erosion*, 16, 87–97.
- 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., Barthès, B., & Roose, E. (2004). Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15, 105-110.
- Sadiki A., Bouhlassa S., Auajjar J., Faleh A., & Macaire J. (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.
- Sadiki, A., Ali, F., & Zézere, J., H., M. (2009). *Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla, Rif central Maroc*. Cahiers Géographiques N° 6.
- Smith H.J. (1999). Application of Empirical Soil Loss Models in southern Africa: a review South African. *Journal of Plant and Soil*, 16(3), 158-163. <https://doi.org/10.1080/02571862.1999.10635003>.
- Tahiri, H., El Aboudi, A., Boussalim, Y., & Dallahi, Y. (2024). Assessment of water erosion dynamics in the moroccan's central plateau for current and future situations using rusle model and gee platform: case study of kharouba watershed. *Geographia Technica*, 19(2), 91-103. https://doi.org/10.21163/GT_2024.192.08
- 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), 101–111.
- Tribak, A., El Garouani A. & Abahrour M. (2012). L'érosion hydrique dans les séries marneuses tertiaires du préif oriental : agents, processus et évaluation quantitative. *Revue Marocaine Des Sciences Agronomiques Et Vétérinaires*, 1(1), 47–52.



- Tribak, A., El Garouani, A., & Abahrour, M. (2009). Évaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du PréRif oriental (Maroc) : cas du sous-bassin de l'oued Tlata. *Sécheresse*, 20(4), 333–337. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0205>
- Valentin C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63, 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos. Transactions American Geophysical Union*, 39(2), 285–291. <https://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. In Guide for conservation planning*. Agricultural Handbook, (537).
- Wodiew, J. (1987). Méthodes utilisées pour le calcul du coefficient de ruissellement sur les bassins représentatifs et expérimentaux. *Cahiers de l'ORSTOM. Série Hydrologie*, 12, 27–38.
- Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., & Musiak, K. (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrol. Process.*, 17(14), p-p: 2913–2928. Published online in Wiley Inter Science (www.interscience.wiley.com). <https://doi.org/10.1002/hyp.1441>
- Zaher, H., Zouhri, M., Benjelloun, H., Chikhaoui, M., Naimi, M., & Sabir, M. (2021). Impact du changement de l'occupation des sols sur l'érosion hydrique et le comportement hydrologique des sols: Cas du bassin Tleta au nord-ouest du Maroc. *Revue Marocaine Des Sciences Agronomiques et Végétations*, 9(4), 643-650.
- Zhang, T., Lei, Q., Du, X., Luo, J., An, M., Fan, B., Zhao, Y., Wu, S., Ma, Y., & Liu, H. (2023). Adaptability analysis and model development of various LS-factor formulas in RUSLE model: A case study of Fengyu River Watershed, China. *Geoderma*, 439, 116664. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116664>