



Received: August 2025 / Revised: September 2025 / Accepted: September 2025 / Published: December 2025

Évaluation spatio-temporelle de l'érosivité des pluies (Facteur-R) en utilisant l'indice d'Arnoldus dans le bassin versant d'oued Siliana (Tunisie)

Arbi Chafai ¹ and Khaled Taghouti ²

¹Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar

²Département de Génie Civil, Institut Supérieur des études technologiques de Siliana

Résumé

L'érosivité des pluies constitue l'un des facteurs naturels les plus déterminants dans le processus d'érosion hydrique des sols. Elle traduit l'énergie cinétique des gouttes de pluie lorsqu'elles frappent la surface du sol, provoquant la désagrégation des agrégats et la dispersion des particules constitutives. Ce phénomène contribue significativement à l'augmentation du taux de sédimentation et, par conséquent, à l'envasement des ouvrages hydrauliques. Dans ce contexte, la présente étude a été menée dans le bassin versant d'oued Siliana (1039 km^2), situé dans le Nord-ouest de la Tunisie, avec pour objectif d'estimer le facteur d'érosivité R à partir des données annuelles et mensuelles de précipitations. L'indice d'Arnoldus a été retenu pour le calcul, permettant ainsi d'élaborer une carte d'érosivité des pluies destinées à identifier et cartographier les zones sensibles à l'érosion hydrique. L'analyse des données issues des différentes stations pluviométriques révèle que les valeurs du facteur R varient entre $39 \text{ MJ.mm.ba}^{-1}.h^{-1}.an^{-1}$ et $52 \text{ MJ.mm.ba}^{-1}.h^{-1}.an^{-1}$. Sur le plan spatial, les gradients les plus marqués sont observés dans la partie Est et la partie Sud-ouest du bassin, tandis que la zone centrale enregistre des valeurs plus faibles. Le pluviomètre de Bargou indique notamment un taux d'érosivité particulièrement élevé. D'un point de vue temporel, l'érosivité se manifeste principalement au cours des saisons d'automne et d'hiver, périodes caractérisées par des précipitations plus intenses et plus érosives.

Mots clés : Facteur d'érosivité, Pluies, Indice d'Arnoldus, Bassin versant Siliana, Tunisie

Spatio-temporal assessment of rainfall erosivity (R-factor) using the Arnoldus index in the Siliana River watershed (Tunisia)

Abstract

Rainfall erosion is one of the most significant natural factors in the process of water erosion of soils. It reflects the kinetic energy of raindrops as they strike the soil surface, causing the disintegration of aggregates and the dispersion of constituent particles. This phenomenon contributes significantly to increased sedimentation rates and, consequently, to the silting up of hydraulic structures.

In this context, the present study was conducted in the Siliana River watershed (1039 km^2), located in northwestern Tunisia, with the objective of estimating the erosivity factor R from annual and monthly precipitation data. The Arnoldus index was used for the calculation, enabling the development of a rainfall erosivity map to identify and map areas susceptible to water erosion. Analysis of data from the various rainfall stations reveals that R factor values vary between $39 \text{ MJ.mm.ba}^{-1}.h^{-1}.year^{-1}$ and $52 \text{ MJ.mm.ba}^{-1}.h^{-1}.year^{-1}$. In terms of spatial distribution, the most pronounced gradients are observed in the eastern and southwestern parts of the basin, while the central area records lower values. The Bargou rain gauge in particular indicates a particularly high rate of erosion. From a temporal perspective, erosion occurs mainly during the fall and winter seasons, periods characterized by more intense and erosive precipitation.

Keywords: : Erosivity factor, Rainfall, Arnoldus index, Siliana watershed, Tunisia.

¹ Corresponding author: geologue.arbi@hotmail.com

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est l'un des principaux processus de dégradation des sols dans le monde. Elle se définit comme le détachement, le transport et le dépôt des particules du sol sous l'effet de la pluie et du ruissellement [1-2-3-4]. Ce phénomène compromet la fertilité des sols, réduit la productivité agricole et affecte la durabilité des écosystèmes terrestres [5]. Selon la FAO [6], plus de 75 milliards de tonnes de sols sont perdus chaque année par érosion hydrique, représentant une menace majeure pour la sécurité alimentaire et la gestion durable des terres.

Parmi les facteurs déclencheurs, l'érosivité des pluies occupe une place déterminante. Elle exprime l'agressivité des précipitations à provoquer l'érosion, en fonction de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et de leur intensité [7]. L'érosivité des pluies traduit l'influence climatique dans le phénomène d'érosion des sols. Ce facteur est nettement lié aux pertes des sols [7-8]. D'après Roose et al., [9], l'érosion est contrôlée par l'évolution des conditions climatiques et lithologiques défavorables (pluies torrentielles, forte vulnérabilité des terrains marneux), auxquelles s'ajoutent des pressions liées à l'utilisation excessive inadaptée des terres agricoles.

Le facteur d'érosivité R est donc un indicateur essentiel pour quantifier le potentiel érosif d'un climat et constitue une variable clé dans les modèles prédictifs tels que l'USLE et le RUSLE [8-10]. Dans les régions méditerranéennes et semi-arides, marquées par des précipitations intenses mais irrégulières, l'érosivité atteint des valeurs particulièrement élevées, ce qui accroît la vulnérabilité des sols aux processus d'érosion [11].

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'évaluation de l'érosivité des pluies, en développant différentes formules. Les plus connues sont celles de Fournier [12], suivie par celle d'Arnoldus [13], puis la formule alternative de Rango-Arnoldus [14]. Ces méthodes permettent de déterminer le facteur d'agressivité des pluies R en se basant uniquement sur les précipitations mensuelles et annuelles [15]. Cependant, l'indice d'érosivité des pluies R de Wischmeier & Smith [7], calculé à partir de l'énergie cinétique des gouttes de pluie durant une intensité maximale sur 30 minutes, présente une contrainte majeure : les stations de notre zone d'étude ne disposent pas de mesures des précipitations maximales à cette échelle de temps. Ceci constitue une limitation importante, surtout dans un contexte méditerranéen caractérisé par des pluies torrentielles et de courte durée, particulièrement agressives pour les sols.

Dans ce cadre, la formule empirique d'Arnoldus [13] a été sélectionnée et appliquée pour le calcul du facteur R, en vue de l'élaboration d'une carte d'érosivité des pluies du bassin versant d'oued Siliana, permettant d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique et nécessitant des mesures d'intervention prioritaires.

Le choix de l'indice d'Arnoldus [13] a été retenu pour sa capacité à refléter la répartition intra-annuelle des précipitations et à identifier les périodes critiques d'agressivité pluviale. Il présente une corrélation significative avec l'indice de Wischmeier et Smith [7], confirmant sa fiabilité pour l'évaluation indirecte de l'érosivité pluviométrique [7]. Cet indice s'avère particulièrement pertinent dans les régions méditerranéennes et semi-arides, où les précipitations sont fortement variables et ponctuées d'épisodes intenses. Plusieurs études menées en Afrique et en Méditerranée ont également validé son efficacité à l'échelle des bassins versants (Apaydin et al., [16] ; Kouli et al., [17] ; Elbouqdaoui et al., [18] ; El Garouani et al., [19] ; Kouri, [20] ; Meddi, [21] ; Andoh et al., [22]) [23].

2. Materials et methods

2.1. Site d'étude

Le bassin versant d'oued Siliana est situé dans le nord-ouest de la Tunisie. Il couvre une superficie d'environ 1039 km² et est drainé principalement par ce cours d'eau (Fig.1). Climatiquement, la région présente un régime contrasté, dominé par deux étages bioclimatiques : le semi-aride supérieur (73 %) et le semi-aride moyen (23,7 %). La température moyenne annuelle enregistrée à Siliana en 2023 est de 18,8 °C, reflétant des conditions typiques des zones semi-arides de la Tunisie.

D'un point de vue géologique, le bassin versant d'oued Siliana est essentiellement composé de formations sédimentaires datant du Paléozoïque au Tertiaire, comprenant calcaires, dolomies, marnes et argiles, ainsi que des grès et conglomérats dans les secteurs de relief modéré. La région est traversée par des failles et fractures orientées nord-ouest – sud-est, héritage de l'activité tectonique alpine, qui structurent le relief et

influencent la répartition des formations géologiques. Les sols sont principalement argilo-limoneux et sableux, et l'agriculture céréalière et arboricole constitue l'usage principal des terres.

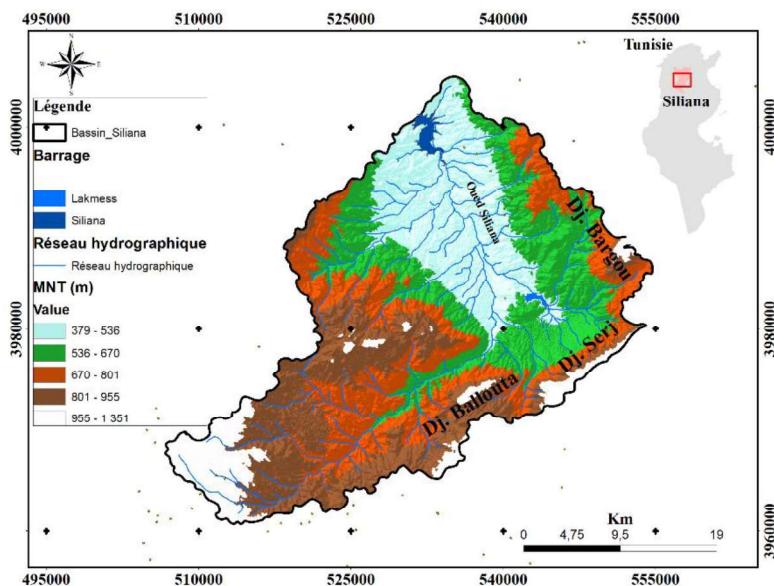


Fig. 1 - Carte de situation et MNT du bassin versant d'oued Siliana

Sur le plan topographique, le bassin présente un relief accidenté marqué par la présence de massifs montagneux et une forte variation altitudinale, allant de 379 m à l'exutoire jusqu'à 1351 m au sommet du Djebel Serj (Fig.1). L'analyse des classes de pentes du bassin versant d'oued Siliana, met en évidence une prédominance des pentes faibles à modérées dans la zone d'étude (Fig. 2). En effet, les pentes inférieures à 10 % couvrent une superficie de 556 km², soit 53,6 % de la surface totale du bassin versant. Les pentes moyennes, comprises entre 10 et 15 %, occupent une superficie de 197 km² (soit 19 %). Les pentes relativement élevées, variant de 15 à 25 %, représentent 192 km², correspondant à 18,5 % du territoire. Enfin, les pentes fortes, supérieures à 25 %, s'étendent sur 94 km², soit environ 9 % de la superficie totale (Fig. 3). Ces dernières se localisent principalement dans les zones de hauts reliefs situées à l'extrême orientale du bassin, notamment au niveau du Djebel Serj et du Djebel Bargou.

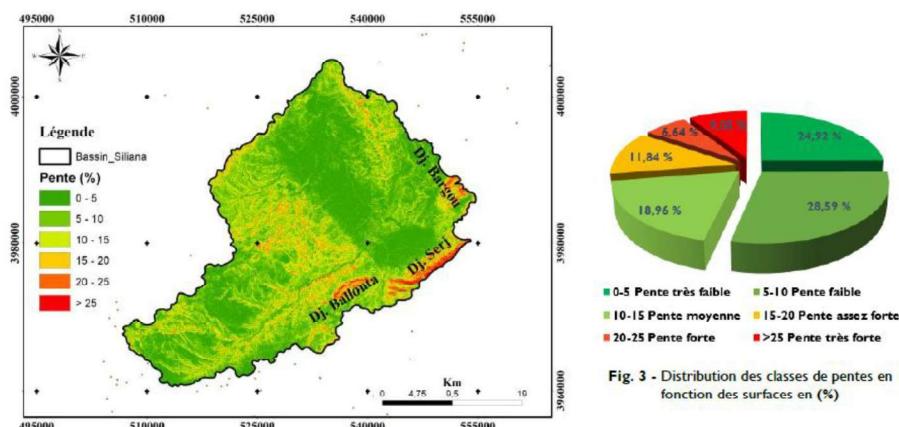


Fig. 2 - Carte des pentes de la zone d'étude

2.3. Méthodologie

Les principales données ayant servi à la réalisation de cette étude sont :

- Une image SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), avec une résolution de 30m disponible sur le site web (<http://opentopo.sdsc.edu/datasets>). Cette image a permis de créer plusieurs cartes thématiques à savoir la carte de délimitation du bassin versant, la carte du réseau hydrographique, la carte des altitudes (MNT) et la carte des pentes.
- Les données de précipitations mensuelles et annuelles sont fournies par le Commissariat Régional au Développement Agricole Siliana (CRDA Siliana) sur une période allant de 1990 à 2022. Ces données ont permis de déterminer le facteur climatique (R).
- Afin de déterminer de la répartition géographique des classes d'érosivité dans notre région d'étude, le logiciel **Arc-Gis (10.8)**, a permis de produire la carte d'érosivité des pluies du bassin versant d'oued Siliana. Le facteur d'érosivité R a été calculé en se fondant sur la formule de Arnaldus [14] qui tient compte du rapport entre la somme carrée de la pluviosité moyenne mensuelle de chaque mois de l'année à la pluviosité moyenne annuelle. Cette formule a été appliquée sur six (6) pluviomètres installés dans et à l'entour de l'espace cible. Elle est exprimée comme suit

$$IA = \sum_{i=1}^{12} (Pi^2 / P)$$

Avec :

P_i = précipitation moyenne mensuelle (mm), P = précipitation moyenne annuelle (mm)

Deux cartes ont été élaborées, la carte de répartition de la pluie moyenne annuelle et la carte de répartition de l'érosivité des pluies selon indice de Arnaldus [14].

3. Résultats et discussion

Les valeurs de l'érosivité des pluies obtenues sont présentées dans le Tableau 1 pour les six (6) stations pluviométriques installées dans et à l'entour du bassin versant d'oued Siliana. L'indice d'Arnaldus varie de 39,44 MJ.mm. ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹ à la station de Siliana nord à 51,89 MJ.mm. ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹ à la station de Bargou forêt. Selon la classification proposée par le CEC (1992) et synthétisée dans le Tableau 2, l'ensemble des stations étudiées se situe dans la classe de risque très faible (IA < 60) (Tab.2). Par ailleurs, les valeurs les plus élevées de l'indice d'érosivité sont directement corrélées aux pluviométries importantes. Ainsi, les stations de Bargou Forêt, Gaafour Délégation et Makthar Forêt, caractérisées par des précipitations abondantes, présentent également les indices d'Arnaldus les plus élevés [14] (Fig.4).

Tab.1 - Valeurs obtenues de l'érosivité des pluies (Facteur R) selon la formule d'Arnoldus (1980) durant la période 1990-2022

Stations	Code Station	X	Y	Pluviométrie (mm)	Indice d'Arnoldus (IA)
Kesra B9	63664	531500	3964601	439	40,45
Makthar forêt	54102	518163	3967148	485	45,23
Siliana Sud	56763	534968	3991765	442	41,72
Bargou forêt	45416	551245	3994042	530	51,89
Gaafour délégation	52783	528960	4019295	448	47,38
Siliana Nord	56764	532694	3992954	417	39,44

Tab.2 - Classes de l'indice d'Arnoldus (CEC, 1992)

Classes classe	Description	Indice d'Arnoldus (1980)
1	Très faible	< 60
2	Faible	60 – 90
3	Moyenne	90 – 120
4	Elevée	120 – 160
5	Très élevée	> 160

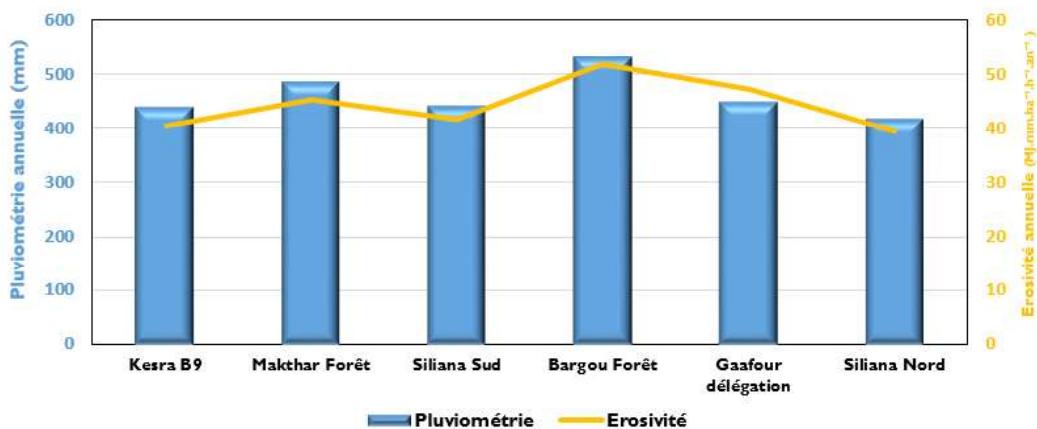


Fig.4 - Variabilité annuelle de la pluviométrie et l'érosivité dans la zone d'étude par délégation (1990-2022)

3.1. Carte de répartition des pluies

La pluviométrie moyenne annuelle dans la région d'étude varie entre 417 mm et 523 mm (Fig.5). La classe dominante, comprise entre 417 et 452 mm, s'étend sur une superficie de 574 km², soit 55,25 % de la surface totale, et se situe principalement dans la partie centrale du bassin selon un axe nord-sud. À l'inverse, la classe la plus élevée, comprise entre 474 et 523 mm, n'occupe que 15,69 % de la superficie. Par ailleurs, une tendance à l'augmentation des précipitations est observée dans les stations situées au sud-ouest et au nord-est, représentées respectivement par les postes pluviométriques de Makthar et de Bargou forêt.

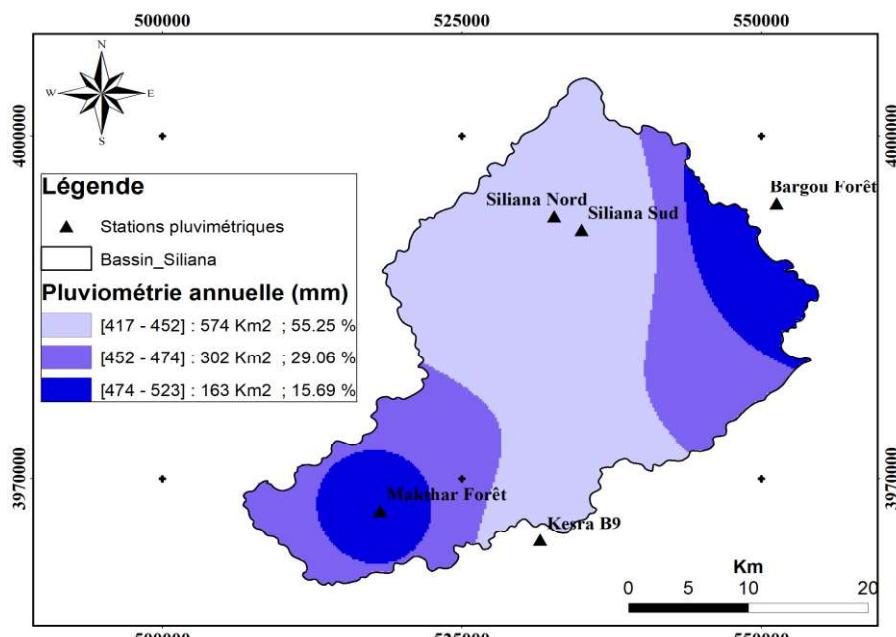


Fig. 5 - Variabilité spatiale des pluies annuelles - bassin versant d'oued Siliana.

3.2. Carte d'érosivité des pluies selon l'indice d'Arnoldus

La carte de répartition spatiale de l'indice d'Arnoldus (Fig.6) met en évidence la présence de trois classes d'érosivité au sein du bassin versant d'oued Siliana. Les stations situées au centre de la région se caractérisent par une érosivité faible appartenant à la classe [39–43], couvrant une superficie de 635 km², soit 61,12 % du bassin. Elles sont suivies par les stations du sud-ouest et du nord-est, qui enregistrent une érosivité moyenne de la classe [43–46], répartie sur 331 km² (soit 31,86 %). Enfin, la station de Bargou se distingue par une érosivité relativement élevée, comprise dans la classe [46–52], couvrant 73 km², soit 7,02 % de la superficie totale. Ces résultats indiquent que l'espace étudié est dominé par une érosivité faible à moyenne, avec une intensification nette aux altitudes élevées, cela explique que l'érosivité des pluies augmente en fonction des altitudes.

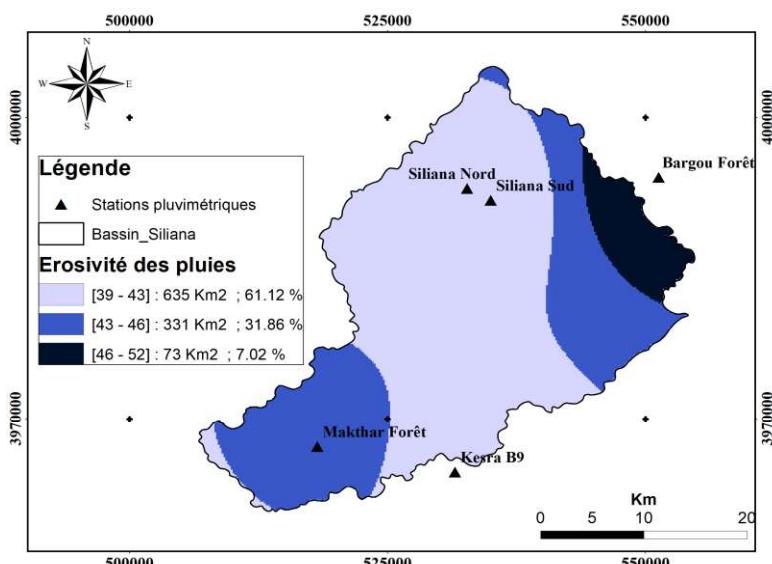


Fig. 6 - Carte de la répartition spatiale de l'érosivité des pluies de la zone d'étude

Selon la classification d'Arnoldus [14], les valeurs obtenues se situent dans la classe d'érosivité inférieure à 60. Sur le plan temporel, l'érosivité des précipitations dans la zone d'étude se manifeste principalement durant les saisons d'automne et d'hiver, périodes marquées par des pluies plus intenses et donc plus érosives (Fig.7).

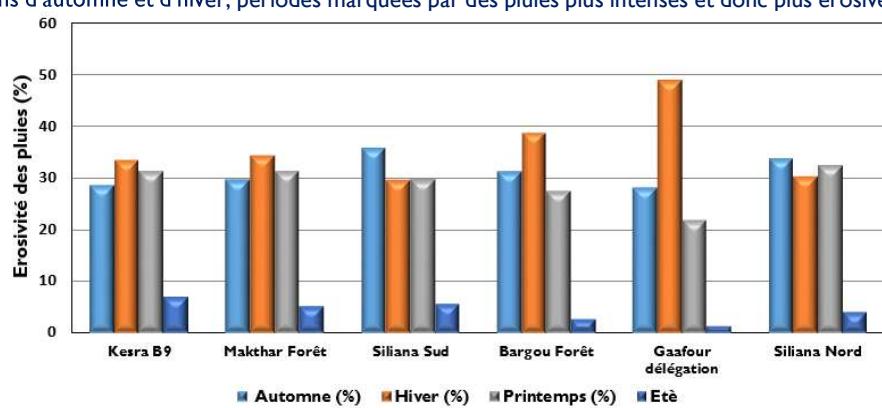


Fig.7 - Variabilité saisonnière de l'érosivité dans la zone d'étude par délégation (1990-2022)

4. Conclusion

L'évaluation de l'érosivité des pluies au sein du bassin versant d'oued Siliana met en évidence une variabilité spatio-temporelle marquée, étroitement liée à la distribution des précipitations et aux caractéristiques topographiques de la région. Les valeurs de l'indice d'Arnoldus, oscillant entre 39 et 52 MJ.mm. ha⁻¹.h⁻¹.an⁻¹, indiquent globalement un niveau d'érosivité faible à moyen, correspondant à une classe de risque très faible selon la classification du CEC (1992).

Sur le plan spatial, la cartographie de l'érosivité révèle une prédominance des faibles valeurs dans les zones centrales du bassin, contrastant avec des indices plus élevés localisés dans les secteurs montagneux, notamment au Djebel Serj et au Djebel Bargou. Cette distribution spatiale confirme l'existence d'une corrélation positive entre l'altitude, la pluviométrie et l'intensité érosive des précipitations.

D'un point de vue temporel, l'analyse met en évidence une concentration des phénomènes érosifs au cours des saisons d'automne et d'hiver, périodes caractérisées par des pluies intenses et de forte énergie cinétique. Ces résultats traduisent la forte variabilité intra-annuelle de l'agressivité pluviale typique des milieux méditerranéens semi-arides.

Ces résultats s'avèrent cohérents avec d'autres études menées dans les régions semi-arides de Tunisie. Les valeurs de l'indice d'Arnoldus observées sont comparables à celles rapportées à Kairouan ou Zaghouan, où l'érosivité est également évaluée comme faible à moyenne [23-24]. Cette cohérence confirme la fiabilité de l'indice d'Arnoldus pour estimer l'agressivité pluviale dans les milieux méditerranéens semi-arides, en accord avec l'indice de Wischmeier et Smith [7].

En conclusion, bien que le bassin versant d'oued Siliana soit globalement marqué par une érosivité modérée, les zones de relief accentué et à pluviométrie abondante demeurent particulièrement sensibles aux processus d'érosion hydrique. Ces observations soulignent l'importance d'intégrer les paramètres climatiques et topographiques dans les stratégies de gestion durable des terres et de conservation des sols, afin de limiter la dégradation progressive des ressources naturelles dans cette région.

5. Références

- [1] Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosion and Conservation. Blackwell Publishing.
- [2] Antoni, V., Bissonnais, Y.L., Thorette, J., Zaidi N., Laroche, B., Barthès, S., Daroussin, J. (2006). Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. Etude et Gestion des Sols 22.
- [3] Stichter, P. (2010). <http://restoringutopia.blogspot.com/2010/07/like-hollow-pointbullets-from-sky.html>. Accessed on 11 August 2019.
- [4] Zhang, K., Yu, Y., Dong, J., Yang, Q., Xu, X. (2019). Adapting & testing use of USLE K 61 factor for agricultural soils in China. Agriculture, Ecosystems & Environment 269, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.09.033>.
- [5] Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. Land Degradation & Development, 12(6), 519–539.
- [6] FAO. (2019). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Managing systems at risk (SOLAW 2019)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [7] Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Handbook No. 537.
- [8] Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Handbook No. 703.
- [9] Roose, É., Duchauffour, H., De Noni, G. (2012). Lutte antiérosive: Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.12419>.
- [10] Nearing, M. A., Yin, S., Borrelli, P., & Polyakov, V. O. (2017). Rainfall erosivity: An overview of methodologies and applications. Hydrology and Earth System Sciences, 21(4), 2103–2117.

- [11] García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 239, 160–173.
- [12] Fournier, F., 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses universitaires de France. Paris: 201 p.
- [13] Arnoldus, H.M.J., 1980. Methodology used to determine the maximum average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Bull. FAO*, (34): 39-48.
- [14] Rango, A. & Arnoldus, H.M.J., 1987. Aménagement des bassins versants. Cahiers techniques de la FAO : I-11.
- [15] Maamar-Kouadri, K., 2012. Etude de l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols dans le Tell oranais. Thèse de Magister. Université de Mostaganem, Algérie: 132 p.
- [16] Apaydin, H., Erpul, G., Bayramin, I. & Gabriels, D., 2006. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia, Project, Turkey *J. Hydrol* 328: 726-732.
- [17] Kouli, M., Soupios, P. & Vallianatos, F., 2008. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environ Geol* (2009) 57: 483-497. Doi: 10.1007/s00254-008-1318-9.
- [18] Elbouqdaoui, K., Ezzine, H., Badrahoui, M., Rouchdi, M., Zahraoui, M. & Ozer A., 2005. Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Geo-Eco-Trop*, 29: 25-36.
- [19] EL Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Tribak, A. & Abharour, M., 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellites et du Sig idrissi au nord-est du Maroc. *Télédétection*, 8 (3): 193-201.
- [20] Kouri, L., 1993. L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'oued Mina. Etude des processus et type de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 232 p.
- [21] Meddi, M., 2013. Sediment transport and rainfall erosivity evolution in twelve Basins in Central and Western Algeria. *Journal of Urban and Environmental Engineering (JUEE)*, v.7, (2): 253-263. Doi: 10.4090/juee.2013.v7n2.253263.
- [22] Andoh, H.F., Antxi B.O., Wakatsuki, T. & Atakora, E.T., 2012. Estimation of soil erodibility and rainfall erosivity patterns in the agroecological zones of Ghana. *Journal of Soil Science and Environmental Management* Vol. 3(11): 275-279. Doi: 10.5897JSSEM11.081.
- [23] Maamar-Kouadri, K., Kouri, L., & Cheboubi, Y. (2016). Utilisation de l'Indice d'Arnoldus pour cartographier les risques d'érosivité des pluies dans le Tell oranais (Algérie). *Geo-Eco-Trop*, 40(4), 287-296.
- [24] Hachicha, M., Trabelsi, R., & Ben M'barek, S. (2010). Étude de l'érosivité des pluies dans les régions semi-arides de Tunisie. *Revue Tunisienne des Sciences de l'Eau*, 5(2), 45-58.
- [25] Chaieb, A. (2015). Analyse de l'érosivité pluviale et de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Zaghouan. Tunis : Université de Tunis.