

**DOI: 10.38173/RST.2022.24.2.15:203-222**

<b>Title:</b>	<i>MODELING OF SOIL WATER EROSION IN OUED CHERRAT WATERSHED (MOROCCO) BY APPLYING THE UNIVERSEL SOIL LOSS EQUATION (USLE)</i>
<b>Authors:</b>	Youssef BOUSSALIM Nabil RAHINE Wadi BADRI Hassan FOUGRACH Bouchra RACHDI

**Section:** Engineering

**Issue:** 2(24)/2022

<b>Received:</b> 29 August 2022	<b>Revised:</b> 12 October 2022
<b>Accepted:</b> 7 November 2022	<b>Available Online:</b> 15 November 2022

Paper available online [HERE](#)

## MODELING OF SOIL WATER EROSION IN OUED CHERRAT WATERSHED (MOROCCO) BY APPLYING THE UNIVERSEL SOIL LOSS EQUATION (USLE)

**Youssef BOUSSALIM<sup>1</sup>**  
**Nabil RAHINE<sup>2</sup>**  
**Wadi BADRI<sup>3</sup>**  
**Hassan FOUGRACH<sup>4</sup>**  
**Bouchra RACHDI<sup>5</sup>**

### ABSTRACT:

*IN THE CURRENT STUDY, THE UNIVERSEL SOIL LOSS EQUATION (USLE) IS APPLIED TO MODELING THE SOIL WATER EROSION IN OUED CHERRAT WATERSHED LOCATED IN THE WEST OF MOROCCO. USLE MODEL TAKES IN CONSIDERATION THE MAIN FACTORS THAT INFLUENCE WATER EROSION : RAINFALL, TOPOGRAPHY, SOIL PROPERTIES, THE CONDITIONS OF CROP MANAGEMENT AND CONSERVATION PRACTICES. MANY DATA, FROM VARIOUS SOURCES WAS USED THROUGH THE SPATIAL TOOLS, GIS (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS) AND REMOTE SENSING, TO ASSESS THE RISK OF WATER EROSION. THE RESULTS SHOW THAT 65.7% OF THE STUDY AREA HAS A VERY LOW RISK OF EROSION, 7.7% LOW RISK, 9.9% MEDIUM RISK, 5.4% HIGH RISK AND 11.3% A VERY HIGH RISK. THE SOIL LOSS VARY BETWEEN 0 AND 524.15 T/HA/YR. THE AVERAGE RATE OF EROSION FOR THE ENTIRE WATERSHED IS ESTIMATED TO 12.16 T/HA/YR. PRIORITY AREAS FOR EROSION MANAGEMENT REPRESENT 16.7%. GENERALLY CHARACTERIZED BY HIGH SLOPES, THEY ARE MAINLY LOCATED IN THE UPSTREAM OF THE WATERSHED AND ON THE BANKS OF OUED CHERRAT AND ITS STREAMS.*

**KEY WORDS:** WATER EROSION, GIS, REMOTE SENSING, USLE MODEL, OUED CHERRAT, MOROCCO.

<sup>1</sup> Laboratoire d'Ecologie et d'Environnement, Faculté des Sciences Ben M'Sick, Université Hassan II-Casablanca, Maroc. (Auteur correspondant: [yboussalim@gmail.com](mailto:yboussalim@gmail.com))

<sup>2</sup> Agence Nationale des Eaux et Forêts (ANEF), Direction Provinciale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de Benslimane, Maroc.

<sup>3</sup> Laboratoire d'Ecologie et d'Environnement, Faculté des Sciences Ben M'Sick, Université Hassan II-Casablanca, Maroc.

<sup>4</sup> Laboratoire d'Ecologie et d'Environnement, Faculté des Sciences Ben M'Sick, Université Hassan II-Casablanca, Maroc.

<sup>5</sup> Laboratoire d'Ecologie et d'Environnement, Faculté des Sciences Ben M'Sick, Université Hassan II-Casablanca, Maroc.

## INTRODUCTION

L'érosion, sous toutes ses formes, conduit à une perte des ressources en sol, de leur fertilité et favorise l'installation de la désertification<sup>6</sup>. L'érosion hydrique est parmi les formes les plus graves de ce phénomène. Elle constitue un risque important pour les surfaces agricoles, pastorales et forestières, en amont et en aval des bassins versants, causant des pertes en terre, des coulées de boues, la turbidité et la pollution des eaux<sup>7</sup>. Par conséquent, la perte de la productivité et l'envasement des infrastructures hydro-agricoles<sup>8</sup>, tel que l'envasement des barrages. Ainsi, elle constitue une source de la matière en suspension, qui, en grande quantité, entrave la vie littorale, causant l'aggradation côtière accompagnée d'une diminution de la bathymétrie et participant fortement au problème d'ensablement des ports<sup>9</sup>.

Au Maroc, l'érosion hydrique est favorisée par des facteurs naturels, tels que l'extension des zones à relief (25% du territoire national), la prédominance de substrats fragiles, l'agressivité climatique caractérisée par une irrégularité des précipitations et la faiblesse du couvert végétal naturel (8% des peuplements ouverts). Ainsi, elle est accentuée par les activités anthropiques telles que le surpâturage, les prélèvements excessifs en bois de feu et les techniques culturales inadaptées. 15 millions hectares de terres sont déjà érodées et la capacité de stockage des retenus de barrages a été réduite avec 0,5%, correspondant à un taux d'envasement de 75 millions de mètres cubes par année<sup>10</sup>.

L'érosion hydrique dépasse un simple problème environnemental et technique ; c'est un risque pour les biens et les populations, un enjeu économique, un enjeu agricole et un enjeu pour l'eau potable<sup>11</sup>. Ses répercussions multidimensionnelles font obstacle à un développement durable et soutenu. La lutte contre ce phénomène a pris de l'importance dès l'annonce de l'agenda 21 et la signature des premières conventions sur les problèmes environnementaux dans les années 90 du siècle passé. Cependant, les aménagements antiérosifs ne peuvent concerner toute la surface d'un bassin versant et les interventions ne peuvent se faire d'une manière aléatoire. Une estimation des pertes en sol est nécessaire et une connaissance des zones présentant le plus de risque à l'érosion hydrique est indispensable.

Le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre d'un stage d'application au sein de la Direction Provinciale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de Benslimane, Maroc, dont l'objectif est de cibler les zones prioritaires en matière d'aménagements antiérosifs au niveau du bassin versant Oued Cherrat, l'un des oueds côtiers atlantiques marocains, par une quantification potentielle des pertes en sol annuelles en tonnes par hectare, en utilisant le modèle USLE (Universel Soil Loss Equation), qui tient en compte

---

<sup>6</sup> D'Odorico, P., & al., (2013). Global desertification: Drivers and feedbacks, *Advances in Water Resources*, 51, 326-344.

<sup>7</sup> Le Bissonnais, Y., & al., (2004). Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale Exemple du département de l'Aisne, *Étude et Gestion des Sols*, 11 (3), 307-321.

<sup>8</sup> Khemiri, K., & Jebari, S. (2021). Évaluation de l'érosion hydrique dans des bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un Système d'information géographique, *Cah. Agric.*, 30 (7).

<sup>9</sup> Raissouni, A., & al., (2011). Érosion hydrique et transferts des matières vers les zones côtières méditerranéennes. Cas du bassin de l'oued Khmiss (Rif nord occidental. Maroc), *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime*, 2.

<sup>10</sup> <http://www.eauxetforets.gov.ma/> Consulté le 15 Octobre 2022.

<sup>11</sup> Ouvry, J.F. (2012). Dégradation des sols par l'érosion hydrique : quels remèdes en région de grandes cultures, *Cairn.info*, 213.

les principaux facteurs contrôlant l'érosion hydrique : l'agressivité climatique, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur de la pente, l'occupation des sols et les pratiques anti-érosives.

### ZONE D'ÉTUDE

Avec une superficie de 52802,1 hectares (ha), le bassin versant Oued Cherrat s'inscrit entre 33°31' et 33°44' Nord en latitude, et 6°50' et 7°12' Ouest en longitude. Il se situe dans la partie Ouest du Maroc, entre la province de Benslimane (région de Casablanca-Settat) et celle de Skhirat Temara (région de Rabat-Salé-Kénitra), occupant une partie des communes de Cherrat, Ain Tizgha, Ziaida, Bir Ennasr et Sidi Bettache dans la première province avec 78,5% de la superficie ; 41464,2 ha et Sabbah et Sidi Yahya Zaër dans la deuxième province, avec 21,5% ; 11337,9 ha (figure 1). Il fait partie des oueds côtiers atlantiques, avec Oued El Maleh, Oued N'Fifikh et Oued Ykem.

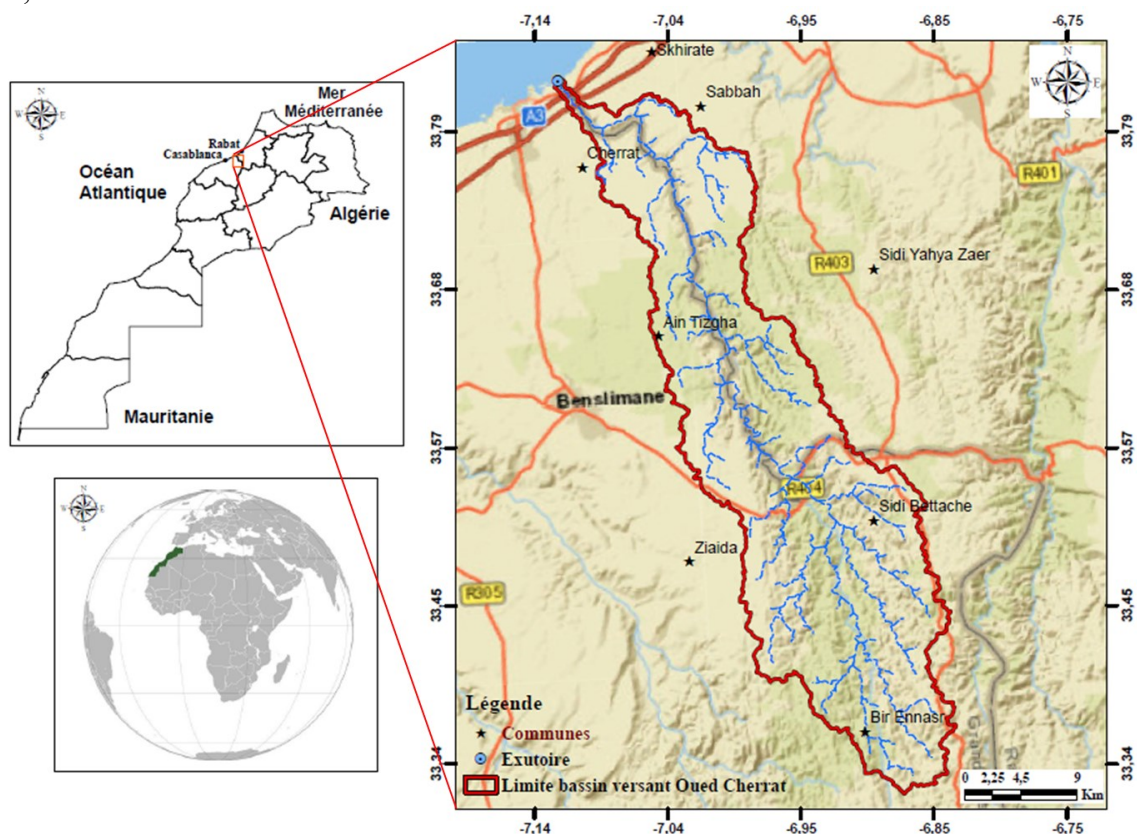


Figure 1. Localisation géographique du bassin versant Oued Cherrat.

Le bassin versant Oued Cherrat appartient au domaine géomorphologique de la meseta côtière septentrionale; la zone la plus basse du plateau central occidental, qui se présente sous forme d'un ensemble de bas plateaux inclinés vers l'océan<sup>12</sup>. Les altitudes sont comprises entre 15 et 570 mètres (m). Elles ne dépassent les 400m que dans la partie la plus interne du bassin, au contact de la meseta centrale (figure 2). Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 411 et 471 millimètres (mm), avec une moyenne de 441 mm; les valeurs élevées sont enregistrées en aval. La température minimale moyenne du mois le plus froid de l'année (m), mois de Janvier, varie entre 5,1 et 7,7 degrés Celsius (°C), avec une moyenne de

<sup>12</sup> Zerhouni, R. (1982). Etude hydrologique des oueds côtiers de la meseta atlantique marocaine, *D.R.S.T.O.M (PARIS)*, 158p.

6,4 °C. La température maximale moyenne du mois le plus chaud de l'année (M), mois d'août, varie entre 26,3 et 31,3 °C; la moyenne est de 28,8 °C<sup>13</sup> (figure 3). La température moyenne annuelle est de 17,6 °C. Le climat est de type méditerranéen, comme toute la partie centrale et septentrionale du Maroc<sup>14</sup>. Le quotient pluviothermique d'Emberger (Q2)<sup>15</sup>, est de 67,6. Ce dernier et la moyenne des minimas du mois le plus froid de l'année (m) ont servi pour déterminer le bioclimat de la zone, par le climagramme pluviothermique d'Emberger (modifié) extrait d'Akman et Daget<sup>16</sup> cité dans Daget<sup>17</sup>. Le bioclimat est semi-aride supérieur à hiver tempéré doux, fortement influencé par l'océan atlantique et le cours d'eau Oued Cherrat.

Sur le plan édaphique, le bassin versant Oued Cherrat présente une typologie variable des sols (tableau 1). Leur occupation est présentée dans la figure 4, faite à partir de la carte mondiale d'occupation des sols, dérivée d'imagerie satellitaire ESA Sentinel-2 à 10m de résolution<sup>18</sup>.

## MÉTHODOLOGIE

Le modèle appliqué dans la présente étude est celui développé par Wischmeier et Smith<sup>19</sup> et révisé par Renard et al.<sup>20</sup>; le modèle USLE (Universel Soil Loss Equation). Il est largement utilisé dans plusieurs pays autour du monde pour la modélisation de

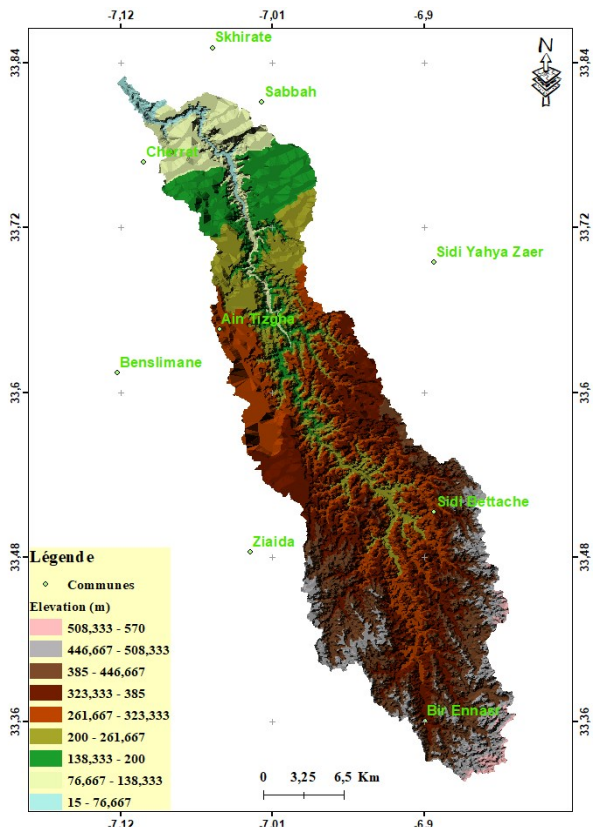


Figure 2. Carte topographique du bassin versant Oued Cherrat.

<sup>13</sup> Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2 : nouvelles surfaces climatiques à résolution spatiale de 1 km pour les zones terrestres mondiales. *Journal international de climatologie*, 37(12), 4302-4315. Disponibles sur <https://www.worldclim.org/> consulté le 23 Juillet 2022.

<sup>14</sup> Roumieux, C., & al., (2010). Actualisation des limites de l'aire du bioclimat méditerranéen selon les critères de Daget (1977), in : *Ecologia mediterranea*, 36 (2),17-24.

<sup>15</sup>  $Q2 = 2000P/(M+m+546,4)(M-m)$  ; Avec P: La moyenne annuelle des précipitations en mm; M: La moyenne des maxima du mois le plus chaud de l'année en °C; m: La moyenne des minimas du mois le plus froid de l'année en °C.

<sup>16</sup> Akman, Y., & Daget, P. (1971). Quelques aspects synoptiques des climats de la Turquie. *Bull. Soc. Lang. Geogr.*, 5 (3), 269-300.

<sup>17</sup> Daget, P. (1977). Le bioclimat Méditerranéen: Analyse des formes climatiques par le système d'Emberger, *Vegetatio*, 34, 87-103.

<sup>18</sup> Karra, K., & al., (2021). Utilisation/couverture des sols à l'échelle mondiale avec Sentinel-2 et apprentissage en profondeur, IGARSS 2021-2021, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Disponible sur *Esri Land Cover (arcgis.com)* consulté le 30 Juillet 2022.

<sup>19</sup> Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide To Conservation Planning, *Agriculture Handbooks (USA)*, 537, 62.

<sup>20</sup> Renard, K.G., & al., (1997). Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the Revised Universel Soil Loss Equation (RUSLE), *Agricultural Handbooks*, 703, pp. 385.

l'érosion<sup>21</sup>. Au Maroc, entre 1987 et 2020, 56 publications ont été faites dans ce sens, dont 14% concernent des sites qui appartiennent à la meseta marocaine, où figure notre terrain d'étude, soit huit publications<sup>22</sup>.

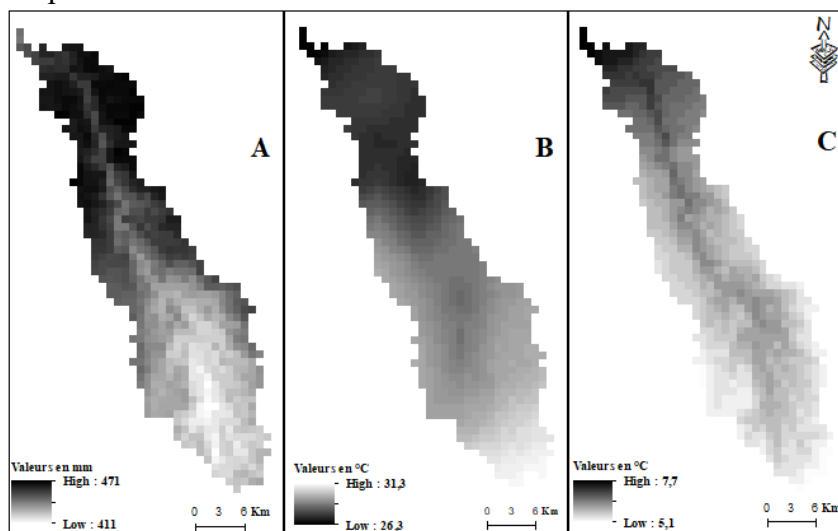


Figure 3. A. Précipitations moyennes annuelles B. Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud de l'année C. Moyenne des températures minimales du mois le plus froid de l'année.

Tableau 1. Typologie des sols au niveau du bassin versant Oued Cherrat<sup>23</sup>.

Type de sols	
1	Sols à sesquioxydes de fer, fersiallitiques, peu lessivés à réserve calcique
2	Sols peu évolués, non climatiques, d'apport alluvial
3	Sols hydromorphes, peu humifères, à accumulation de fer
4	Sols brunifiés, bruns
5	Sols complexes (mélange/association de plusieurs types de sols)
6	Sols peu évolués, non climatiques, d'érosion
7	Vertisols, à drainage externe nul ou réduit, à structure anguleuse
8	Sols minéraux bruts, non climatiques, d'érosion
9	Sols brunifiés, lessivés

L'équation universelle de pertes en sol est applicable pour quantifier et prédire les pertes en sol dues à l'érosion en nappes. Elle fait intervenir les principaux facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : l'agressivité climatique, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur de la pente, l'occupation des sols et les pratiques anti-érosives. L'équation se présente sous forme d'une fonction multiplicative de ces cinq facteurs:

<sup>21</sup> Benavidez, R., & al., (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimate, *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 6059-6086.

<sup>22</sup> Manaouch, M., Zouagui, A., & Fenjiro, I. (2021). A review of soil erosion modeling by R/USLE in Morocco: Achievements and limits. *E3S Web Conf.*, 234.

<sup>23</sup> <http://www.fertimap.ma/> consulté le 27 Juillet 2022.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

A : Pertes en sol par unité de surface en tonnes /hectare/an ;

R : Erosivité des pluies en Megajoul.mm/hectare.heure.an ;

K : Erodibilité des sols en tonnes.hectare.heure/hectare.Megajoul.mm ;

LS : Facteur topographique présente l'inclinaison S en % et la longueur de la pente L en mètres (adimensionnel) ;

C : Effet du couvert végétal (adimensionnel) ;

P : Effet des pratiques anti-érosives (adimensionnel).

Le traitement des données et la déposition de tous les facteurs ont été faites dans un système d'information géographique (SIG); l'ArcGIS 10.8 selon l'organigramme méthodologique présenté dans la figure 5. Les outils d'analyse spatiale (*Spatial Analyst Tools*<sup>24</sup>) sont les principaux outils utilisés. Ainsi, toutes les cartes faites pour la mise en place du modèle présentent une résolution spatiale de 100m.

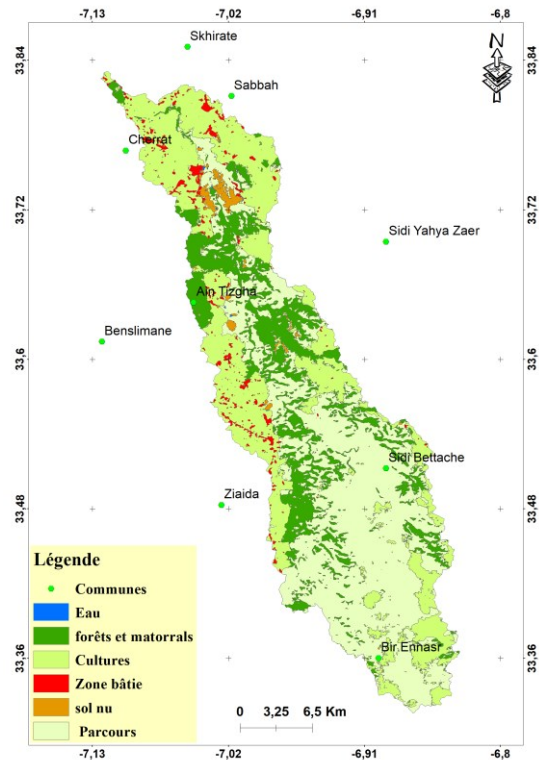


Figure 4. Carte d'occupation des sols du bassin versant Oued Cherrat (2021).

### Le facteur d'érosivité des pluies (R)

La pluie est un facteur important causant l'érosion des sols. Plus elle est intense et plus elle dure longtemps, plus les risques d'érosion sont grands<sup>25</sup>. L'érosivité des pluies est définie comme étant le produit de l'énergie cinétique totale des pluies et leur intensité maximale en 30 minutes<sup>26</sup>. La méthode de Wischmeier et Smith<sup>27</sup> est difficilement applicable. En effet, autres méthodes alternatives plus simples ont été développées, qui reposent sur les précipitations moyennes mensuelles et/ou annuelles pour une période suffisamment longue (Arnoldus<sup>28</sup> ; Rango et Arnoldus<sup>29</sup> cité dans Zouagui et al.<sup>30</sup> ; Zhou et al.<sup>31</sup> cité dans Li et al.<sup>32</sup>

<sup>24</sup> *Spatial analyst tools* sont des outils géomatiques d'ArcGIS pour l'analyse et la modélisation des données spatiales.

<sup>25</sup> Stone, R.P., & Hillborn, D. (2000). Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada, *Ontario Ministry of Agriculture and Food and Rural Affairs (OMAFRA)*.

<sup>26</sup> Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide To Conservation Planning, *Agriculture Handbooks (USA)*, 537, 62.

<sup>27</sup> Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide To Conservation Planning, *Agriculture Handbooks (USA)*, 537, 62.

<sup>28</sup> Arnoldus, H.M.J. (1980). An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation, in: De Boodt, M., & Gabriels, D. Eds. Assessment of Erosion, *John Wiley and Sons, New York*, 127-132.

<sup>29</sup> Rango, A. & Arnoldus, H.M.J. (1987). Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*, 36p.

<sup>30</sup> Zouagui, A., & al., (2018). Modelisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental : Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc), *European Scientific Journal*, 14.

<sup>31</sup> Zhou, F.J., & al., (1995). The rainfall erosivity index in Fujian Province, *J. Soil Water Conserv.*, 9, 13-18.

; El-Swaify et al.<sup>33</sup> cité dans Hernandez et al.<sup>34</sup>). L'équation retenue pour ce travail est celle proposée par Renard et Freimund<sup>35</sup>:

$$R = 0,0483 \times P^{1,610}$$

P: Moyenne des précipitations annuelles en mm.

P a été calculée à partir des données historiques des précipitations moyennes mensuelles, de 30 secondes d'arc, soit une résolution de 1km, téléchargées à partir de la base de données WorldClim version 2.1 pour la période 1970-2000, mise en ligne en 2020<sup>36</sup>.

La carte obtenue pour le facteur R montre des valeurs qui varient entre 780 et 972 MJ.mm/ha.h.an (figure 6).

### Le facteur topographique (LS)

La topographie liée à la pente est parmi les facteurs les plus importants influençant le processus de l'érosion hydrique. Elle combine deux sous-facteurs : la longueur de la pente (L) et son inclinaison (S). Une pente forte et longue favorise l'érosion hydrique des sols et accentue les risques y sont associés, tandis qu'une pente faible et courte a tendance à réduire les effets des autres facteurs contrôlant le phénomène, en conséquence, limiter les risques. Ce facteur a été calculé directement à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) à 30m de résolution, téléchargé à partir de USGS – EarthExplorer<sup>37</sup>. L'équation appliquée pour le calcul de LS est celle proposée par Stone et Hilborn<sup>38</sup>:

$$LS = (0.065 + 0.0456 \times S + 0.006541 \times S^2) (L \div C^{NN})$$

S : L'inclinaison de la pente en % ;

L : La longueur de la pente en mètres = Flow Accumulation<sup>39</sup> (FlowAcc) × La résolution spatiale du MNT ;

C : Constante = 22.1 ;

NN : Constante dépendante de S (tableau 2).

<sup>32</sup> Li, L., Wang, Y., & Liu, C. (2014). Effects of land use changes on soil erosion in a fast developing area, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 11, 1549–1562.

<sup>33</sup> El-Swaify, S.A., Gramier, C.L., & Lo, A. (1987). Recent advances in soil conservation in steepland in humid tropics, *Proceedings of the International Conference on Steepland Agriculture in the Humid Tropics*, 87–100.

<sup>34</sup> Hernandez, E.C., Henderson, A., & Oliver, D.P. (2012). Effects of changing land use in the Pagsanjan–Lumban catchment on suspended sediment loads to Laguna de Bay, Philippines, *Agric. Water Manag.*, 106, 8–16.

<sup>35</sup> Renard, K., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE, *J. Hydrol.*, 157, 287–306.

<sup>36</sup> Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2 : nouvelles surfaces climatiques à résolution spatiale de 1 km pour les zones terrestres mondiales. *Journal international de climatologie*, 37(12), 4302-4315. Disponible sur <https://www.worldclim.org/> consulté le 23 Juillet 2022.

<sup>37</sup> <http://earthexplorer.usgs.gov> Consulté le 15 Juillet 2022.

<sup>38</sup> Stone, R.P., & Hilborn, D. (2012). Universal soil loss equation (USLE) factsheet, *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario*. Disponible sur *Équation universelle des pertes en terre (USLE) (gov.on.ca)* Consulté le 21 Juillet 2022.

<sup>39</sup> Flow Accumulation : une opération d'analyse spatiale qui permet de calculer le flux accumulé sous la forme d'une pondération cumulée de toutes les cellules s'écoulant dans chaque cellule en pente descendante.

Tableau 2. Les valeurs de NN.

S* (en %)	< 1	1 ≤ S < 3	3 ≤ S < 5	≥ 5
Valeur de NN	0.2	0.3	0.4	0.5

\*Inclinaison de la pente

76,48% de la superficie du bassin versant Oued Cherrat présente des pentes supérieures ou égales à 5%. Par conséquent, la valeur attribuée à NN est de 0,5. L'équation devient :

$$LS = (0.065 + 0.0456 \times S + 0.006541 \times S^2) ((\text{FlowAcc} \times 30) \div 22.1^{0.5})$$

Le remplissage des cuvettes, l'extraction de l'inclinaison des pentes, de la direction des écoulements et leur accumulation ont constitué les principaux traitements subis par le MNT sous le SIG.

Les résultats obtenus pour le facteur LS montrent des valeurs comprises entre 0 et 27 (figure 7).

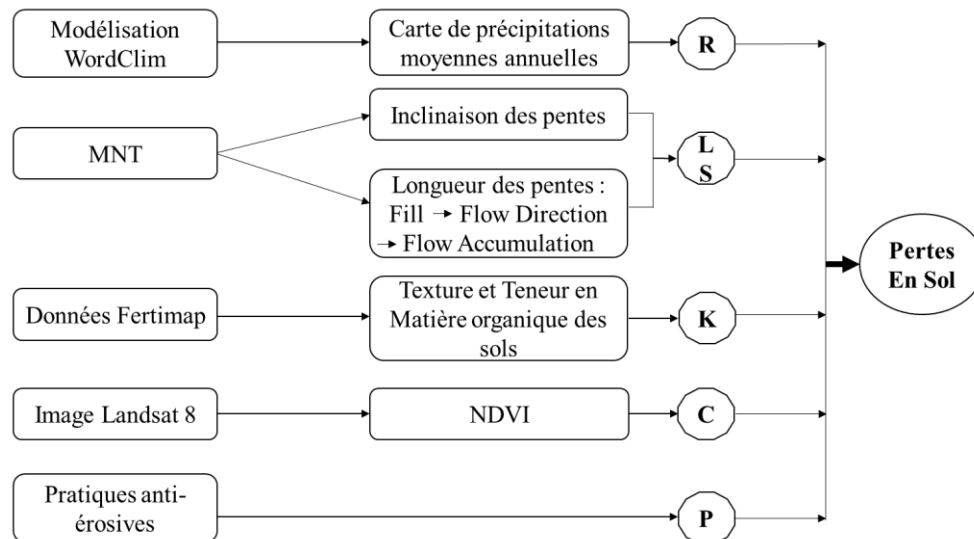


Figure 5. Organigramme méthodologique appliqué pour la mise en place du modèle.

### Le facteur d'érodibilité des sols (K)

Le facteur d'érodibilité des sols est une estimation quantitative de la vulnérabilité des particules du sol au détachement et au transport par les précipitations et le ruissellement. Il est défini comme étant la perte moyenne en sol en tonnes par hectare, pour un sol particulier travaillé et laissé en jachère, avec des caractéristiques de pente choisies arbitrairement ; longueur de 22,13m et inclinaison de 9%<sup>40</sup>.

<sup>40</sup> Stone, R.P., & Hilborn, D. (2012). Universal soil loss equation (USLE) factsheet, *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario*. Disponible sur *Équation universelle des pertes en terre (USLE) (gov.on.ca)* Consulté le 21 Juillet 2022.

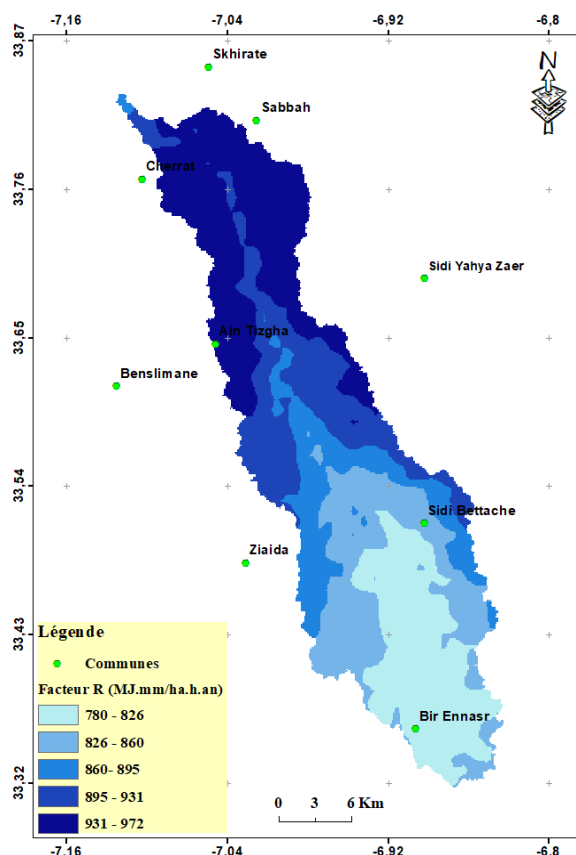


Figure 6. Distribution spatiale du facteur R.

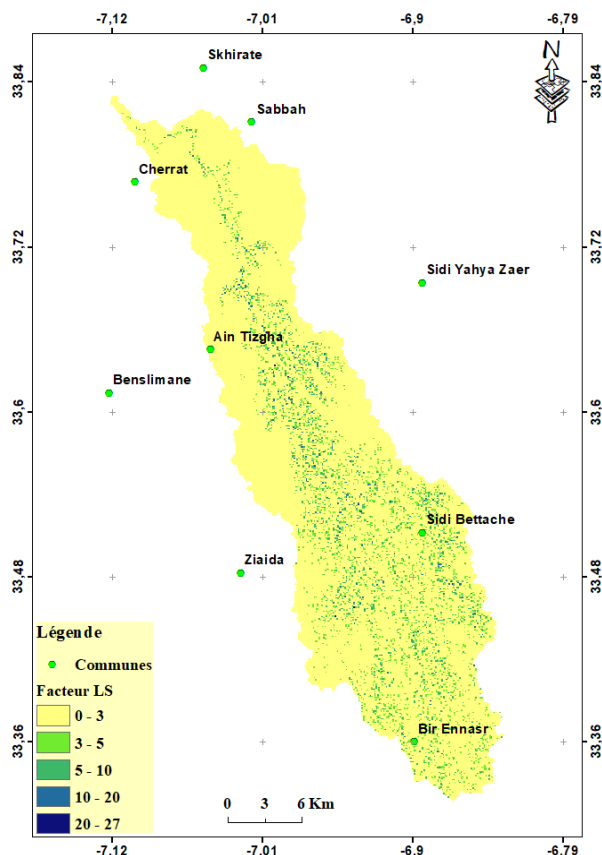


Figure 7. Distribution spatiale du facteur LS.

Dans cette étude, nous avons utilisé des données sur la texture et la teneur en matière organique des sols, issues du système expert interactif sur les ressources en sol au Maroc et leurs principales caractéristiques<sup>41</sup>, réalisé dans le cadre du projet Fertimap lancé en 2007 par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM) et le Groupe Office Chérifien des Phosphates (OCP), dont la réalisation a été faite par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) en partenariat avec l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II et l'École Nationale d'Agriculture de Meknès. Les données extraites concernent 43 échantillons. Les valeurs de K, en tonnes par acre, ont été déterminées à partir du tableau de correspondance entre la classe texturale, la teneur en matière organique et le facteur K donné par Stone et Hilborn<sup>42</sup>. Une conversion des valeurs dans le système international des unités a été faite en multipliant par un facteur de 0,1317<sup>43, 44</sup>. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 3. L'interpolation de K pour toute la surface du bassin versant a été faite avec la pondération par l'inverse de distance (IDW), les autres méthodes telles que le krigeage ou

<sup>41</sup> <http://www.fertimap.ma/> consulté le 27 Juillet 2022

<sup>42</sup> Stone, R.P., & Hilborn, D. (2000). Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada, *Ontario Ministry of Agriculture and Food and Rural Affairs* (OMAFRA).

<sup>43</sup> Payet, E., Dumas, P., & Pennober, G. (2012). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana, *Vertigo*, 11(3).

<sup>44</sup> Chadli, K. (2016). Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2 (51), 1-10.

splines présentent l'inconvénient d'accroître ou décroître rapidement les valeurs quand la densité des données spatiales est faible <sup>45</sup>.

La carte établie, du facteur K, montre des valeurs comprises entre 0,001 et 0,044 t.ha.h/ha.MJ.mm (figure 8).

### **Le facteur d'occupation des sols (C)**

La couverture végétale freine le ruissellement, facilite l'infiltration et empêche le déclenchement de l'érosion. En effet, un bon couvert végétal réduit considérablement les effets de l'agressivité climatique, l'érodibilité des sols et le degré de l'inclinaison de la pente, et augmente la résistance du terrain au phénomène d'érosion hydrique <sup>46</sup> , <sup>47</sup>. Le facteur C représente un ratio comparant les pertes de terre dans un champ travaillé et laissé en jachère et celles provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques<sup>48</sup>. Il varie entre 0 et 1, plus le sol est bien protégé plus les valeurs convergent vers 0 et inversement ; la valeur 1 correspond à un terrain nu. Ce facteur a été établi par l'intermédiaire de l'indice de végétation normalisé (NDVI), faite à partir d'imagerie satellitaire Landsat 8 (29/12/2021), à 30m de résolution, téléchargée de USGS-EarthExplorer. NDVI a été calculé par la formule suivante:

$$NDVI = ((NIR - R) \div (NIR + R))$$

Où NIR est la bande d'infrarouge et R est la bande du rouge qui correspondent successivement aux bandes 5 et 4 pour Landsat 8 <sup>49</sup>.

La formule suivante a été utilisée pour le calcul du facteur C <sup>50</sup> , <sup>51</sup> , <sup>52</sup> :

$$C = e^{-(\alpha NDVI / (\beta - NDVI))}$$

<sup>45</sup> Sebbar, A., & al., (2010). Contribution à la mise à jour de la carte pluviométrique du Maroc Contribution to the updating of the rainfall map of Morocco. *Gestion Environnemental des Produits Chimiques Proceedings GEPROC4*, 2, 56-68.

<sup>46</sup> Sadiki, A., & al., (2009). Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla, Rif central Maroc, *Cahiers Géographiques*, 6.

<sup>47</sup> Modeste, M., & al., (2016). Cartographie Des Risques De L'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Révisée Des Pertes En Sols, La Teledetection Et Les Sig Dans Le Bassin Versant De L'ourika (Haut Atlas, Maroc). *European Scientific Journal*, ESJ, 12(277).

<sup>48</sup> Stone, R.P., & Hillborn, D. (2000). Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada, *Ontario Ministry of Agriculture and Food and Rural Affairs* (OMAFRA).

<sup>49</sup> Gemitzi, A., Dalampakis, P., and Falalakis, G. (2021). Detecting geothermal anomalies using Landsat 8 thermal infrared remotely sensed data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 1-13.

<sup>50</sup> Modeste, M., & al., (2016). Cartographie Des Risques De L'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Révisée Des Pertes En Sols, La Teledetection Et Les Sig Dans Le Bassin Versant De L'ourika (Haut Atlas, Maroc). *European Scientific Journal*, ESJ, 12(277).

<sup>51</sup> Kouli, M., Souplos, P., & Vallianatos, F. (2009). Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece, *Environ Geol.*, 57, 483-497.

<sup>52</sup> Markhi, A., & al., (2015). Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. Application dans le bassin versant N'Fis dans le Haut Atlas de Marrakech (Maroc), *European Scientific Journal*, ESJ, 11(29).

Tableau 3. Les données et les valeurs du facteur K.

Id	Latitude	Longitude	Classe texturale	Teneur en M.O* (%)	Facteur K (t. ha.h/ha.MJ.mm)
1	33.8255	-7.1305	Sable	1.71	0,003951
2	33.8295	-7.1178	Loam argileux	1.87	0,043461
3	33.8095	-7.1136	Sable	1.63	0,003951
4	33.8095	-7.1037	Sable	1.6	0,003951
5	33.789	-7.0927	Sable	1.68	0,003951
6	33.8058	-7.0567	Sable	1.59	0,003951
7	33.6794	-7.0793	Loam	2.4	0,034242
8	33.6729	-6.9694	Loam	2.52	0,034242
9	33.6277	-7.0038	Loam argileux / Argile / Sable	1.86	0,02634
10	33.6563	-6.953	Loam	2.46	0,034242
11	33.5694	-6.9667	Sable / Loam argileux / Loam sableux	2.26	0,0179112
12	33.5705	-6.8987	Sable	1.84	0,003951
13	33.5625	-7.0333	Argile	2.03	0,027657
14	33.511	-7.0312	Argile	1.53	0,031608
15	33.3815	-6.898	Sable	2.58	0,001317
16	33.4767	-6.7978	Loam argileux / Argile / Sable	0.86	0,02634
17	33.3463	-6.9058	Loam argileux	1.51	0,043461
18	33.3411	-6.9257	Sable	1.66	0,003951
19	33.2797	-7.0225	Argile	2	0,027657
20	33.6217	-6.9937	Sable / Loam argileux / Loam sableux	2.2	0,0179112
21	33.4961	-6.9128	Loam argileux	2	0,036876
22	33.6151	-6.9986	Loam argileux / Argile / Sable	2.31	0,0218622
23	33.634	-6.9869	Sable / Loam argileux / Loam sableux	2.53	0,0179112
24	33.5642	-6.9636	Sable / Loam argileux / Loam sableux	2.15	0,0179112
25	33.6263	-6.9869	Sable / Loam argileux / Loam sableux	2.45	0,0179112
26	33.5759	-6.9705	Loam argileux / Argile / Sable	2.35	0,0218622
27	33.8147	-7.1174	Sable	1.54	0,003951
28	33.7999	-7.105	Sable	1.38	0,003951
29	33.8113	-7.0474	Sable / Loam argileux	1.38	0,023706
30	33.7896	-7.0721	Loam	1.76	0,044778
31	33.7794	-7.0638	Sable	1.73	0,003951
32	33.7839	-7.0329	Sable / Loam argileux / Loam sableux	1.48	0,0218622
33	33.6766	-7.0761	Loam	2.74	0,034242
34	33.6011	-6.9676	Loam argileux / Argile / Sable	2.48	0,0218622
35	33.5845	-7.0143	Loam sableux	2.27	0,015804
36	33.4769	-6.9175	Loam argileux	1.96	0,043461
37	33.5256	-6.8015	Sable	2.6	0,001317
38	33.4752	-6.8894	Sable	1.81	0,003951
39	33.4122	-6.9615	Loam argileux	2.11	0,036876
40	33.3428	-6.8653	Sable	1.43	0,003951
41	33.4225	-6.9045	Sable	2.69	0,001317
42	33.3382	-6.9285	Sable	1.63	0,003951
43	33.533	-6.912	Loam sableux	1.87	0,018438

\* Matière Organique

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres sans unité ;  $\alpha = 2$  et  $\beta = 1$ .

Les résultats obtenus pour ce facteur montrent des valeurs qui varient entre 0,30 et 1 (figure 9).

### Le facteur des pratiques anti-érosives (P)

Les pratiques de conservation, telles que le travail du sol à contre pente, la culture en bande et la culture suivant les courbes de niveau, réduisent la quantité et la vitesse d’eaux de ruissellement et atténuent les effets de l’érosion hydrique. Le facteur P est défini comme étant le ratio entre les pertes en terre associées à une pratique de conservation et les pertes en terre associées à la culture en rangs dans le sens de la pente<sup>53</sup>. Il varie entre 0 et 1; plus la pratique en question est efficace, plus il converge vers 0.

Ces pratiques culturelles anti-érosives ne se font pas pour la majorité des terres du bassin versant. En effet, une valeur de 1 a été attribuée arbitrairement à toute la surface du bassin.

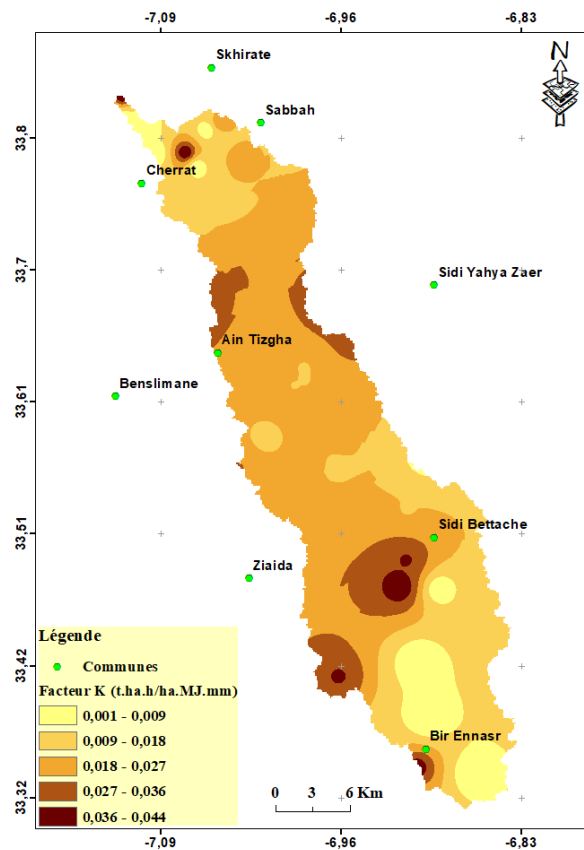


Figure 8. Distribution spatiale du facteur K.

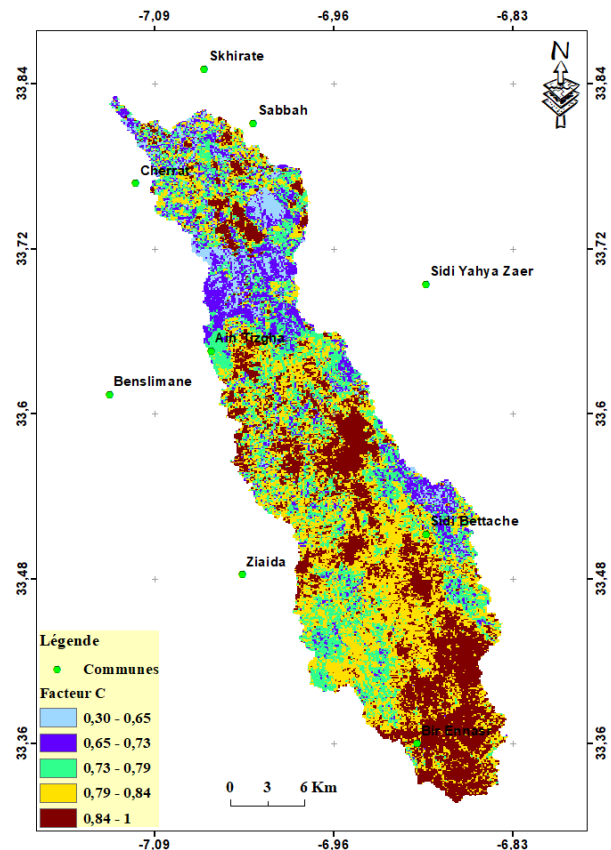


Figure 9. Distribution spatiale de facteur C.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chacun des rasters obtenus, pour les différents facteurs, présente une résolution spatiale de 100m et chaque pixel présente une valeur. La multiplication des facteurs pixel à pixel, a donné une carte raster du facteur A, de la même résolution spatiale, avec des valeurs

<sup>53</sup> Stone, R.P., & Hilborn, D. (2012). Universal soil loss equation (USLE) factsheet, *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario*. Disponible sur *Équation universelle des pertes en terre (USLE) (gov.on.ca)* Consulté le 21 Juillet 2022.

de pertes en sol en t/ha/an. Cette carte a été classée en cinq classes (figure 10), selon la classification du risque d'érosion de Stone et Hilborn<sup>54</sup> (tableau 4).

Les résultats obtenus montrent que 65,7% de la superficie du bassin versant présente un risque très faible à l'érosion, 7,7% un risque faible, 9,9% un risque modéré, 5,4% un risque élevé et 11,3% un risque de type sévère (figure 11). Les pertes annuelles en sol varient entre 0 et 524,15 t/ha/an. La moyenne des pertes est de 12,16 t/ha/an. Cette valeur correspond à un risque d'érosion moyennement faible, comme un statut global pour la totalité du bassin versant. En effet, cette moyenne reste inférieure aux celles trouvées dans d'autres zones au Maroc où l'érosion hydrique est particulièrement intense. Dans le bassin versant de l'Oued Boussouab (Rif oriental), Sadiki et al.<sup>55</sup> ont montré des pertes qui varient entre 0,09 et 1159,51 t/ha/an, avec une moyenne de 55,35 t/ha/an. Cette valeur très élevée du nôtre est expliquée par l'importance des facteurs LS et K au niveau du bassin (55% de sa surface présente des pentes supérieures à 15% et les sols sont très érodables ; 60 % montrent un facteur K supérieur à 0.25). Aussi, Tribak et al.<sup>56</sup> ont estimé une moyenne proche (61 t/ha/an) dans le sous-bassin de l'oued Tlata. La même chose dans le Rif occidental : 34,74 t/ha/an dans le bassin versant Kalaya<sup>57</sup>, 39.5 t/ha/an dans le bassin versant de Moulay Bouchta<sup>58</sup>, 36 t/ha/an dans le bassin versant Khmiss<sup>59</sup> et 47,18 t/ha/an dans le sous-bassin de l'Oued Sania, Bassin de Tahaddart<sup>60</sup>. Dans le Rif central, Sadiki et al.<sup>61</sup> ont trouvé dans le bassin versant de l'oued Sahla, une moyenne de 22 t/ha/an, inférieure aux celles trouvées dans le Rif oriental et occidental. Cela est dû aux faibles valeurs du facteur topographique dans ce bassin. De même, Sbai et al.<sup>62</sup> ont aussi trouvé une moyenne élevée, de 37.64 t/ha/an, dans le bassin versant de Moulouya (Maroc oriental). De plus, dans le Haut Atlas, Bou-imajjane et Belfoul<sup>63</sup> ont estimé, dans le bassin versant Beni Mohand, des pertes qui varient entre 0 et 227.67 t/ha/an, avec une perte moyenne de 40.38 t/ha/an. Encore, une moyenne très élevée

<sup>54</sup> Stone, R.P., & Hilborn, D. (2012). Universal soil loss equation (USLE) factsheet, *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario*. Disponible sur *Équation universelle des pertes en terre (USLE) (gov.on.ca)* Consulté le 21 Juillet 2022.

<sup>55</sup> Sadiki, A., & al., (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 26, 69-79.

<sup>56</sup> Tribak, A., El Garouani, A., & Abahrour, M. (2009). Evaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du PréRif oriental (Maroc) : cas du sous-bassin de l'oued Tlata, *Sécheresse*, 20 (4), 333-7.

<sup>57</sup> Khali Issa, L., & al., (2016). Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental), *J. Mater. Environ. Sci.*, 7 (8), 2778-2795.

<sup>58</sup> Zouagui, A., & al., (2018). Modelisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental : Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc), *European Scientific Journal*, 14.

<sup>59</sup> Khali Issa, L., & al., (2014). Mapping and Assessment of Water Erosion in the Khmiss Watershed (North Western Rif, Morocco), *Current Advances in Environmental Science*, 2 (4), 119-130.

<sup>60</sup> Tahiri, A. (2014). Evaluation et Quantification de l'Erosion et la Sédimentation à Partir des Modèles RUSLE, MUSLE et Déposition Intégrés dans un SIG. Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc), *European Journal of Scientific Research*, 125 (2), 157-178.

<sup>61</sup> Sadiki, A., & al., (2009). Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla, Rif central Maroc, *Cahiers Géographiques*, 6.

<sup>62</sup> Sbai, A., & al., (2021). Water Erosion in the Moulouya Watershed and its Impact on Dams' Siltation (Eastern Morocco), *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 384, 127-131.

<sup>63</sup> Bou-imajjane, L., & Belfoul, M.A. (2020). Soil Loss Assessment in Western High Atlas of Morocco: Beni Mohand Watershed Study Case, *Applied and Environmental Soil Science*, 1-15.

Tableau 4. La classification du risque d'érosion.

Classe d'érosion	Perte potentielle en sol en t/ha/an
Très faible (tolérable)	<6,7
Faible	6,7 – 11,2
Modéré	11,2 – 22,4
Elevé	22,4 – 33,6
Sévère	>33,6

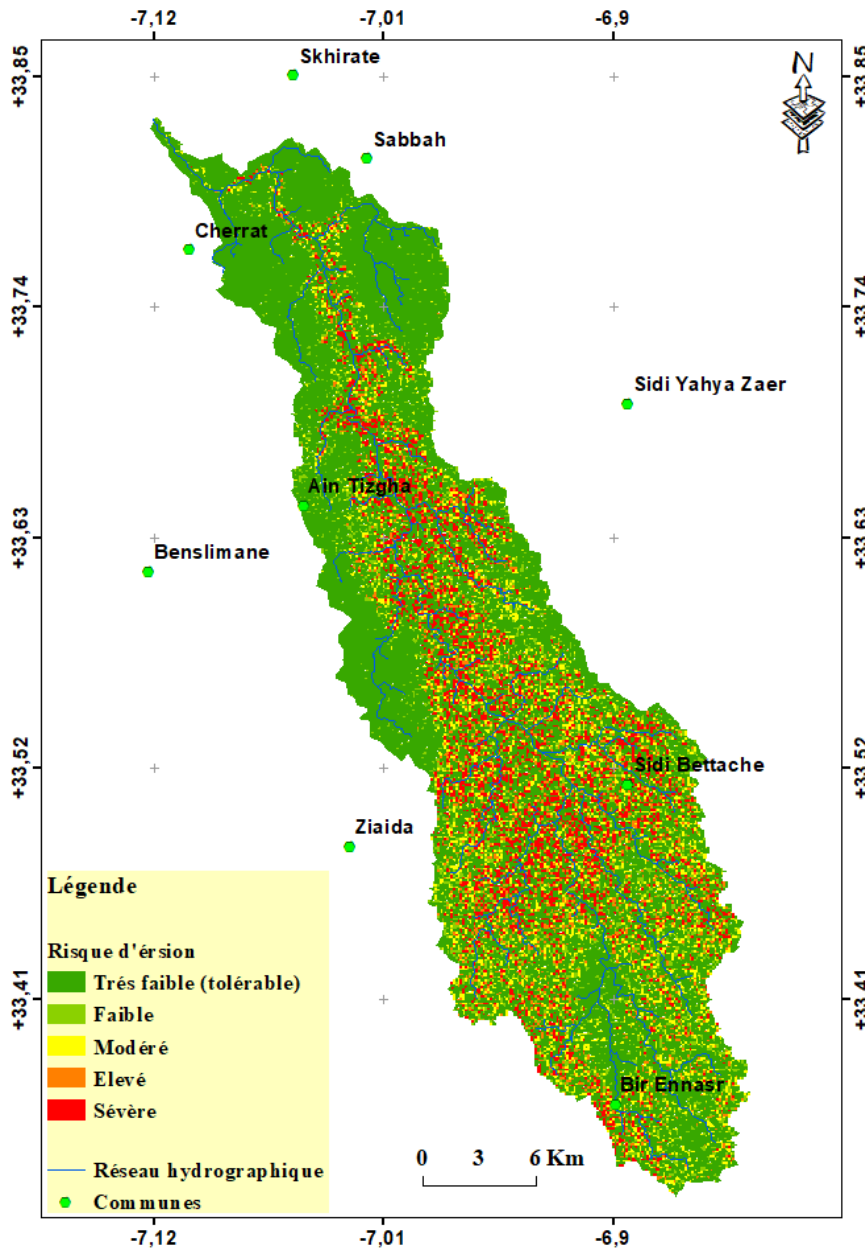


Figure 10. La distribution spatiale des catégories du risque d'érosion dans le bassin versant Oued Cherrat.

de 255,058 t/ha/an, a été trouvée par Ouadjane et al.<sup>64</sup> dans le bassin versant d'Agoudal en amont de la vallée d'Imilchil (Haut Atlas central), avec des pertes qui varient entre 1,223 et 1987,730 t/ha/an, montrant que cette région montagneuse est soumise aux hauts risques d'érosion. En outre, concernant les travaux faits dans la meseta marocaine et plus précisément sur les oueds côtiers atlantiques, Lahlaoui et al.<sup>65</sup> ont estimé, dans le bassin versant Oued El Maleh, des pertes qui varient entre 0.02 et 501.40 t/ha/an, avec une moyenne de 8.21 t/ha/an, ce qui est très proche de nos résultats.

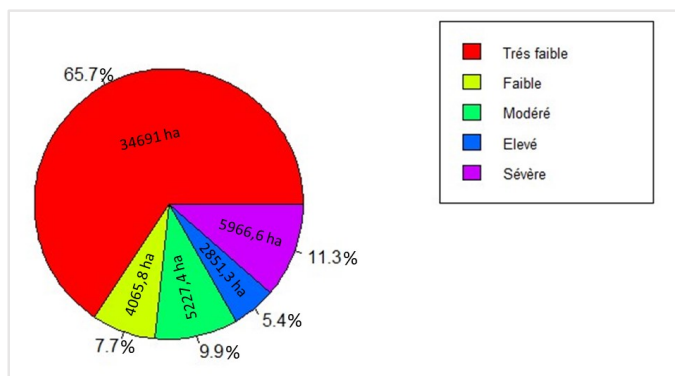


Figure 11. Répartition des catégories de pertes en sol dans le bassin versant Oued Cherrat.

Le risque d'érosion hydrique au niveau du bassin versant Oued Cherrat décroît de l'amont en aval. Les zones les plus prioritaires en matière d'aménagements antiérosifs sont les zones à risques d'érosion élevé et sévère. Elles représentent 16,7 % de la superficie du bassin, soit 8817,9 ha. Ces zones se présentent surtout en amont du bassin versant et sur les rives du cours d'eau Oued Cherrat et ses affluents. Elles se caractérisent généralement par des pentes élevées, puisque à partir d'une simple comparaison entre la carte des pertes et celle du facteur topographique, il paraît que les zones qui présentent un risque d'érosion important, ont des valeurs de LS élevées et inversement. Pour vérifier cette hypothèse, une régression linéaire entre les pertes en sol annuelles (facteur A) et les différents facteurs influençant le phénomène (R, LS, K et C) a été établie (figure 12).

La régression faite a montré que les deux facteurs LS et K sont corrélés positivement avec les pertes en sol, tandis que R et C sont corrélés négativement. Autrement dit, la fluctuation des pertes va dans le même sens que LS et K et dans le sens inverse de R et C.

Le test de nullité a montré que les trois variables R, K et LS ont une corrélation significative avec les pertes en sol ( $P < 0,05$ ) tandis que le facteur C a montré une corrélation non significative ( $P > 0,05$ ). Le facteur topographique (LS) a montré la meilleure régression trouvée, avec un coefficient de corrélation de 0,67 et un coefficient de détermination de 0,45. Cela signifie qu'il est le plus décisif contrôlant l'érosion hydrique au niveau du bassin versant Oued Cherrat.

La corrélation négative du facteur R, la faible corrélation du facteur K et celle nulle et non significative du facteur C peuvent être expliquées par la forte influence de la topographie liée à la pente sur le phénomène de l'érosion hydrique au niveau du bassin versant Oued Cherrat. Par exemple, pour le facteur R, il est logique que l'érosion hydrique s'intensifie avec

<sup>64</sup> Ouadjane, Y., & al., (2021). Evaluation Des Risques D'érosion Hydrique Et Cartographie Des Zones Vulnérables Par La Méthode RUSLE Couplée Aux SIG Et À La Télédétection Dans Le Bassin Versant d'Agoudal En Amont De La Vallée d'Imilchil (Haut Atlas Central, Maroc), *European Scientific Journal*, 17 (21), 66-91.

<sup>65</sup> Lahlaoui, H., & al., (2015). Potential Erosion Risk Calculation Using Remote Sensing and GIS in Oued El Maleh Watershed, Morocco, *Journal of Geographic Information System*, 7, 128-139.

une agressivité climatique importante, or, ce n'est pas toujours le cas, car cela dépend fortement, entre autres, de la pente du terrain. La carte du facteur R (figure 6) montre très bien que le bassin présente un gradient d'agressivité climatique croissant de l'amont vers l'aval. Par contre, la distribution spatiale du risque d'érosion (figure 10) montre que les pertes en sol estimées sont plus importantes en amont qu'en aval, ce qui explique la corrélation à la fois négative et faible du facteur R et prouve que l'importante influence du facteur LS a tendance à neutraliser les effets des autres facteurs.

Cette influence explique aussi la faible corrélation du facteur K et en partie la non-significativité de la corrélation du facteur C. Pour ce dernier, s'ajoute le fait que les valeurs qu'il prend au niveau du bassin sont en majeure partie concentrées entre 0,73 et 1 (84,9%) et juste 15,1% qui présentent un  $C < 0,73$  ; la moyenne est de 0,8. Sachant qu'en principe il est compris entre 0 et 1 et dans notre cas entre 0,30 et 1 (figure 9). Cet intervalle ( $0,30 < C < 1$ ), avec une telle moyenne (0,8), est expliqué par le fait qu'un climat semi-aride, de plus en plus asséché à cause d'une aridification progressive du Sud vers le Nord du pays<sup>66</sup>, ne permet pas le développement d'une végétation dense. En plus, la province de Benslimane, où figure la majorité de la surface du bassin versant Oued Cherrat, a connu une pression anthropique sévère sur les ressources forestières durant la période entre 1973 et 2013, induisant des changements d'occupation des sols caractérisés par le défrichage des parcelles forestières au profit de l'agriculture, l'avancé du bâti et la dégradation du couvert végétal traduit par une matorralisation et une ouverture des milieux forestiers<sup>67</sup>. En effet, les valeurs de  $C < 0,30$  sont inexistantes au niveau du bassin, ainsi que 15,1% de sa surface qui présentent un

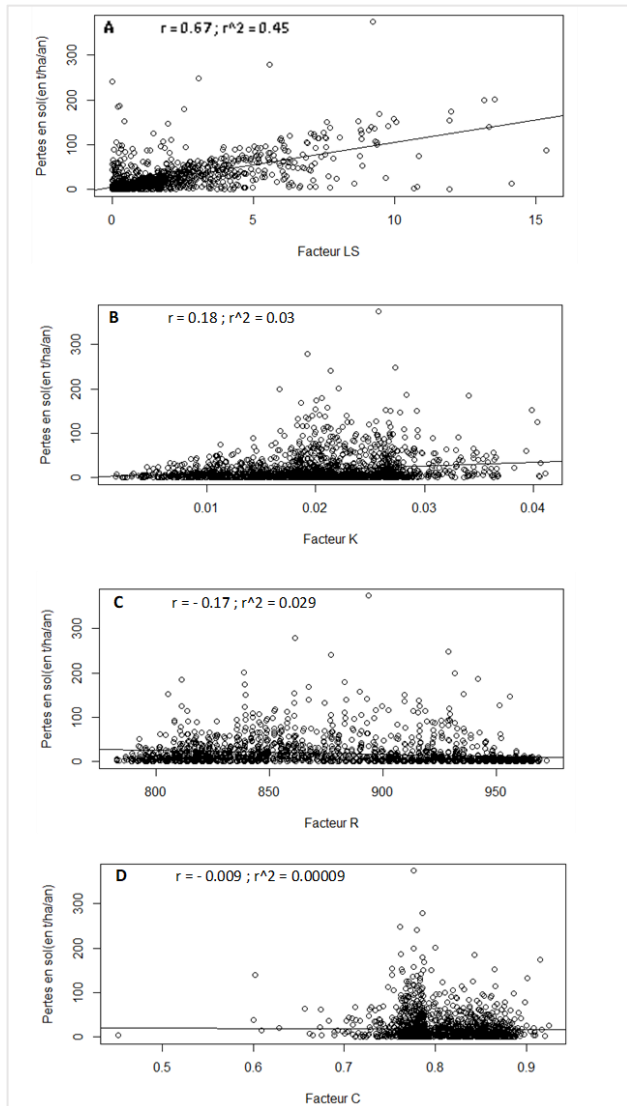


Figure 12. Régression linéaire entre les pertes en sol estimées par le modèle et les différents facteurs explicatifs (A. Le facteur topographique (LS) ; B. Le facteur d'érodibilité des sols (K) ; C. Le facteur d'érosivité des pluies (R) et D. Le facteur d'occupation des sols (C)).

<sup>66</sup> Sebbar A., & al., (2011). Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004), *Sécheresse*, 22, 139-148.

<sup>67</sup> Rachdi, B., & al., (2016). Diachronic study of the spatiotemporal changes of vegetal cover by remote sensing: the case of the province of Benslimane (central Morocco), *European Journal of Scientific Research*, 143 (2), 176-185.

$C < 0,73$ . De ce fait, le faible écart entre les valeurs prises par ce facteur explique en partie la non-significativité de sa corrélation avec les pertes en sol.

Le modèle USLE, appliqué dans cette étude, présente certaines limites à son application en dehors de son origine d'élaboration ; à la base, il a été développé aux États-Unis d'Amérique (USA) dans un contexte environnemental et des conditions différents du nôtre. D'autre part, les pertes en sol estimées par ce modèle ne concernent que l'érosion en nappe puisqu'il ne tient pas en compte les autres formes d'érosion (linéaire, en masse etc.). Cependant, ce type d'érosion hydrique (en nappe) est le plus prépondérant dans les zones où les pentes sont inférieures à 25% <sup>68</sup> (14° environ); le cas de la majorité de la surface du bassin versant Oued Cherrat (75% de sa superficie). Malgré ces imperfections, USLE reste très utile comme un modèle de base pour des fins d'aménagements antiérosifs au niveau des bassins versants, puisqu'il permet de cibler les zones prioritaires en matière d'aménagement. Néanmoins, les travaux faits par ce modèle sur différents bassins versants au Maroc qu'ailleurs dans le monde ont montré des résultats représentatifs. L'avantage, est que les apports de la télédétection et l'intégration des systèmes d'information géographique ont facilité la mise en place du modèle. Ces derniers permettent une bonne gestion des données disponibles afin de ressortir une multitude d'informations utilement exploitables.

## CONCLUSION

La modélisation et la quantification de l'érosion hydrique des sols du bassin versant Oued Cherrat ont été faites par l'application de l'équation universelle de pertes en sol (USLE), dans le but de cibler les zones prioritaires en matière d'aménagements antiérosifs. Les résultats obtenus montrent que 16,7 % de la superficie du bassin est soumise à une érosion de type élevé et sévère, avec des pertes supérieures à 22,4 t/ha/an, mais de l'autre côté, 65,7% présente un risque très faible à l'érosion (tolérable), avec des pertes inférieures à 6,7 t/ha/an. La moyenne des pertes en sol est estimée à 12,16 t/ha/an. Pourtant, des interventions, en matière d'aménagement au niveau des zones qui présentent un risque d'érosion important (les classes d'érosion élevé et sévère ; 8817,9 ha), pourraient diminuer considérablement cette moyenne. Ces informations sont d'une grande utilité pour les gestionnaires pour l'orientation des actions et la mise en place de plans d'aménagements.

## CONFLITS D'INTÉRÊTS

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.

---

<sup>68</sup> Payet, E., Dumas, P., & Pennober, G. (2012). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana, *VertigO*, 11(3).

## RÉFÉRENCES

1. **Akman, Y., & Daget, P.** (1971). Quelques aspects synoptiques des climats de la Turquie. *Bull. Soc. Lang. Geogr.*, 5 (3), 269-300.
2. **Arnoldus, H.M.J.** (1980). An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation, in: De Boodt, M., & Gabriels, D. Eds. *Assessment of Erosion, John Wiley and Sons, New York*, 127-132.
3. **Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K.** (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimate, *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 6059-6086.
4. **Bou-imagjane, L., & Belfoul, M.A.** (2020). Soil Loss Assessment in Western High Atlas of Morocco: Beni Mohand Watershed Study Case, *Applied and Environmental Soil Science*, 1-15.
5. **Chadli, K.** (2016). Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2 (51), 1-10.
6. **D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K.F., Ravi, S., & Runyan, C.W.** (2013). Global desertification: Drivers and feedbacks, *Advances in Water Resources*, 51, 326-344.
7. **Daget, P.** (1977). Le bioclimat Méditerranéen: Analyse des formes climatiques par le système d'Emberger, *Vegetatio*, 34, 87-103.
8. **El-Swaify, S.A., Gramier, C.L., & Lo, A.** (1987). Recent advances in soil conservation in steep land in humid tropics, *Proceedings of the International Conference on Steepland Agriculture in the Humid Tropics*, 87-100.
9. **Fick, S., & Hijmans, R.** (2017). WorldClim 2 : nouvelles surfaces climatiques à résolution spatiale de 1 km pour les zones terrestres mondiales. *Journal international de climatologie*, 37(12), 4302-4315. Disponible sur <https://www.worldclim.org/> consulté le 23 Juillet 2022
10. **Gemitzi, A., Dalampakis, P., and Falalakis, G.** (2021). Detecting geothermal anomalies using Landsat 8 thermal infrared remotely sensed data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 1-13.
11. **Hernandez, E.C., Henderson, A., & Oliver, D.P.** (2012). Effects of changing land use in the Pagsanjan-Lumban catchment on suspended sediment loads to Laguna de Bay, Philippines, *Agric. Water Manag.*, 106, 8-16.
12. **Karra, K., Kontgis, C., Statman-weil, Z., Mazzariello, J.C., Mathis, M., & Brumby, S.P.** (2021). Utilisation/couverture des sols à l'échelle mondiale avec Sentinel-2 et apprentissage en profondeur, IGARSS 2021-2021, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Disponible sur *Esri Land Cover (arcgis.com)* consulté le 30 Juillet 2022
13. **Khali Issa, L., Raissouni, A., Moussadek, R., & El Arrim, A.** (2014). Mapping and Assessment of Water Erosion in the Khmiss Watershed (North Western Rif, Morocco), *Current Advances in Environmental Science*, 2 (4), 119-130.
14. **Khali Issa, L., Ben Hamman Lech-hab, K., Raissouni, A., & El Arrim, A.** (2016). Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental), *J. Mater. Environ. Sci.*, 7 (8), 2778-2795.
15. **Khemiri, K., & Jebari, S.** (2021). Évaluation de l'érosion hydrique dans des bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un Système d'information géographique, *Cah. Agric.*, 30 (7).
16. **Kouli, M., Souplos, P., & Vallianatos, F.** (2009). Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece, *Environ Geol.*, 57, 483-497.
17. **Lahloui, H., Rhinane, H., Hilali, A., Lahssini, S., & Khalile, L.** (2015). Potential Erosion Risk Calculation Using Remote Sensing and GIS in Oued El Maleh Watershed, Morocco, *Journal of Geographic Information System*, 7, 128-139.
18. **Le Bissonnais, Y., Dubreuil, N., Daroussin, J., & Gorce, M.** (2004). Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale Exemple du département de l'Aisne, *Étude et Gestion des Sols*, 11 (3), 307-321.
19. **Li, L., Wang, Y., & Liu, C.** (2014). Effects of land use changes on soil erosion in a fast developing area, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 11, 1549-1562.
20. **Manaouch, M., Zouagui, A., & Fenjiro, I.** (2021). A review of soil erosion modeling by R/USLE in Morocco: Achievements and limits. *E3S Web Conf.*, 234.

21. **Markhi, A., Laftouhi, N.E., Soulaïmani, A., & Fniguire, F.** (2015). Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. Application dans le bassin versant N'Fis dans le Haut Atlas de Marrakech (Maroc), *European Scientific Journal, ESJ*, 11(29).
22. **Modeste, M., Khattabi, A., Nadia, M., & Hongming, Z.** (2016). Cartographie Des Risques De L'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Révisée Des Pertes En Sols, La Teledetection Et Les Sig Dans Le Bassin Versant De L'ourika (Haut Atlas, Maroc). *European Scientific Journal, ESJ*, 12(277).
23. **Ouadjane, Y., Ait Yacine, E., Benzougagh, B., Nassiri, L., & Ibijbjen, J.** (2021). Evaluation Des Risques D'érosion Hydrique Et Cartographie Des Zones Vulnérables Par La Méthode RUSLE Couplée Aux SIG Et À La Télédétection Dans Le Bassin Versant d'Agoudal En Amont De La Vallée d'Imilchil (Haut Atlas Central, Maroc), *European Scientific Journal*, 17 (21), 66-91.
24. **Ouvry, J.F.** (2012). Dégradation des sols par l'érosion hydrique : quels remèdes en région de grandes cultures, *Cairn.info*, 213.
25. **Payet, E., Dumas, P., & Pennober, G.** (2012). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana, *Vertigo*, 11(3).
26. **Rachdi, B., Hakdaoui, M., Badri, W., Fougrach, H., El aboudi, A., & Hsaine, M.** (2016). Diachronic study of the spatiotemporal changes of vegetal cover by remote sensing: the case of the province of Benslimane (central Morocco), *European Journal of Scientific Research*, 143 (2), 176-185.
27. **Raissouni, A., Khali Issa, L., Moussadek, R., Mrabet, R., & El Arrim, A.** (2011). Érosion hydrique et transferts des matières vers les zones côtières méditerranéennes. Cas du bassin de l'oued Khmiss (Rif nord occidental. Maroc), *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime*, 2.
28. **Rango, A. & Arnoldus, H.M.J.** (1987). Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*, 36p.
29. **Renard, K., & Freimund, J. R.** (1994). Using monthly precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE, *J. Hydrol.*, 157, 287-306.
30. **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), *Agricultural Handbooks*, 703, pp. 385.
31. **Roumieux, C., Raccasi, G., Franquet, E., Sandoz, A., Torre, F., & Metge, G.** (2010). Actualisation des limites de l'aire du bioclimat méditerranéen selon les critères de Daget (1977), in : *Ecologia mediterranea*, 36 (2), 17-24.
32. **Sadiki, A., Bouhlassa, S., Saïdati, J., Auajjar, A., Faleh & Macaire, J.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.
33. **Sadiki, A., Faleh, A., Zezere, J., & Mastass, H.** (2009). Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla, Rif central Maroc, *Cahiers Géographiques*, 6.
34. **Sbai, A., Mouadili, M., Hlal, M., Benrbia, K., Mazari, F.Z., Bouabdallah, M., & Saidi, A.** (2021). Water Erosion in the Moulouya Watershed and its Impact on Dams' Siltation (Eastern Morocco), *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 384, 127-131.
35. **Sebbar, A., Yousfi, N., Hsaine, M., Fougrach, H., Saloui, A., & Badri, W.** (2010). Contribution à la mise à jour de la carte pluviométrique du Maroc Contribution to the updating of the rainfall map of Morocco. *Gestion Environnemental des Produits Chimiques Proceedings GEPROC4*, 2, 56-68.
36. **Sebbar A., Badri W., Fougrach H., Hsaine M., & Saloui A.** (2011). Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004), *Sécheresse*, 22, 139-148.
37. **Stone, R.P., & Hillborn, D.** (2000). Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada, *Ontario Ministry of Agriculture and Food and Rural Affairs (OMAFRA)*.
38. **Stone, R.P., & Hilborn, D.** (2012). Universal soil loss equation (USLE) factsheet, *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario*. Disponible sur *Equation universelle des pertes en terre (USLE) (gov.on.ca)* Consulté le 21 Juillet 2022
39. **Tahiri, A.** (2014). Evaluation et Quantification de l'Erosion et la Sédimentation à Partir des Modèles RUSLE, MUSLE et Déposition Intégrés dans un SIG. Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc), *European Journal of Scientific Research*, 125 (2), 157-178.

40. **Tribak, A., El Garouani, A., & Abahrour, M.** (2009). Evaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du PréRif oriental (Maroc) : cas du sous-bassin de l'oued Tlata, *Sécheresse*, 20 (4), 333-7.
41. **Wischmeier, W., & Smith, D.** (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide To Conservation Planning, Agriculture Handbooks (USA), 537, 62.
42. **Zerhouni, R.** (1982). Etude hydrologique des oueds côtiers de la meseta atlantique marocaine, *D.R.S.T.O.M (PARIS)*, 158p.
43. **Zhou, F.J., Chen, M.H., Lin, F.X., Huang, Y.H., & Lu, C.L.** (1995). The rainfall erosivity index in Fujian Province, *J. Soil Water Conserv.*, 9, 13–18.
44. **Zouagui, A., Sabir, M., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Benmansour, M.** (2018). Modelisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental : Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc), *European Scientific Journal*, 14.
45. [<http://earthexplorer.usgs.gov>] Consulté le 15 Juillet 2022.
46. [<http://www.fertimap.ma/>] consulté le 27 Juillet 2022.
47. [<http://www.eauxetforets.gov.ma/>] Consulté le 15 Octobre 2022.