

LA PREVISION DE L'EROSION DES SOLS AVEC USLE ET LES TENDANCES DE DEGRADATION DANS LE BASSIN DU DARGOL (AFRIQUE DE L'OUEST)

ACHIROU TCHIROMA SOULEYMANE*, KIARI FOUYOU HADIZA**, MAHE GIL***

Key-words: Earth observation, USLE MODEL, GIS, modelling, erosion.

Forecasting soil erosion using USLE and degradation trends in the Dargol river basin (west Africa). This study uses the USLE model of Wischmeier and Smith to forecast surface erosion in the Dargol basin (Burkina-Faso/Niger, 7 457 km²). It uses earth observation data in applications in the study area to analyse and assess soil degradation and the impact on runoff conditions. The techniques of preprocessing and classification of spatial data used the model and produced the results of all factors of the model in the GIS. The images are provided by the Landsat-OLI sensor in 2015, used to produce the C factor, which varies between 1.00 and 0.24. The K factor is obtained from the FAO soil map of the world, showing soil erodibility between 0.03 and 0.34; the R factor, computed from the CHIRPS weather data, indicates a rainfall erosivity ranging from 139 to 193; the LS factor modelled from a digital elevation model shows a variation of elevations from 0.95 to 81.18. Eventually, the extent of the river basin is subject to an average annual soil loss of 72 t/ha/year. The flow accumulation is observed to be very high, taking into account the lower variability of the C and K factors, which can be linked to a strong surface degradation despite the increasing Sahel heavy rainfall events, which cause extensive degradation.

1. INTRODUCTION

Les grands systèmes d'eau ouest africains traversent des périodes des grandes variabilités liées au changement climatique Mahe *et al.* (2013), Ekolu *et al.* (2022). Ainsi, plusieurs études ont caractérisé l'ampleur particulière de ce phénomène au Sahel ouest-africain, qui s'explique par l'augmentation du coefficient d'écoulement même en cas de baisse des pluies particulièrement dans les bassins de rive droite du fleuve Niger, provenant du Mali et du Burkina-Faso, comme le bassin versant du Dargol Mahé *et al.* (2011), Descroix *et al.* (2013). Ce phénomène est concomitant d'une dégradation des états de surface par diminution de la végétation naturelle et augmentation de l'érosion hydrique. Dans ce contexte, il est important d'étudier l'érosion hydrique et la dégradation des terres à travers l'équation empirique des pertes en sol (USLE) de Wischmeier & Smith (1978), afin de quantifier les dégradations et d'analyser les écoulements, dans le bassin versant du Dargol. L'équation empirique USLE est le modèle le plus utilisé pour estimer les pertes en sol, car il fournit une approche simple pour l'estimation qualitative des pertes en sol moyennes annuelles Fagbohun *et al.* (2016). Cependant, la restriction du facteur *érosivité des pluies* (R) et d'autres aspects de l'USLE méritant une mise à niveau, ont permis de parvenir à d'autres formes révisées de USLE tel que RUSLE, MUSLE ou autres: SATEEC (*Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control*), USPED model (*Unit Stream Power-based Erosion Deposition*), (Fagbohun *et al.*, 2016; Ezzaouini *et al.*, 2020; Micu & Urdea 2022).

* Doctorant à l'Université de Diffa, BP: 78 Diffa, Niger, tchiromas@gmail.com.

** Maître de conférences, Université de Diffa; Institut Supérieur en Environnement et Ecologie de l'Université de Diffa; BP: 78 Diffa, Niger, hadiza.kiarifougou@gmail.com.

*** HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IRD, IMT Alès, Montpellier, France, +33 4 67 14 37 22, gil.mahe@ird.fr.

¹ Corresponding Author

L'utilisation de ces modèles nécessite de documenter plusieurs facteurs: érosivité des pluies (R), érodibilité du sol (K), longueur et inclinaison de la pente (LS), couverture des sols (C) et pratiques de soutien (P), sous forme des couches de données SIG, afin de déterminer les pertes annuelles moyennes de sol dans la zone d'étude (Belasri & Lakhouili, 2016).

2. METHODOLOGIE

2.1. Présentation de la zone d'étude

Le Niger est un pays enclavé d'Afrique de l'Ouest (Fig. 1) qui couvre 1.267.000 km², dont le climat est tropical de type soudanien (INS-NIGER, 2010; Abdou Babaye, 2012).

Le fleuve Niger parcourant la République du Niger reçoit des affluents en provenance du Bénin, du Mali et du Burkina-Faso, et des régions sahariennes au nord. Le Dargol est l'un des affluents burkinabés au fleuve Niger, orienté vers l'Est depuis le Nord du Burkina-Faso, sur une longueur de 212 km, (Sighomnou *et al.*, 2013; Brunet-Moret *et al.*, 1986).

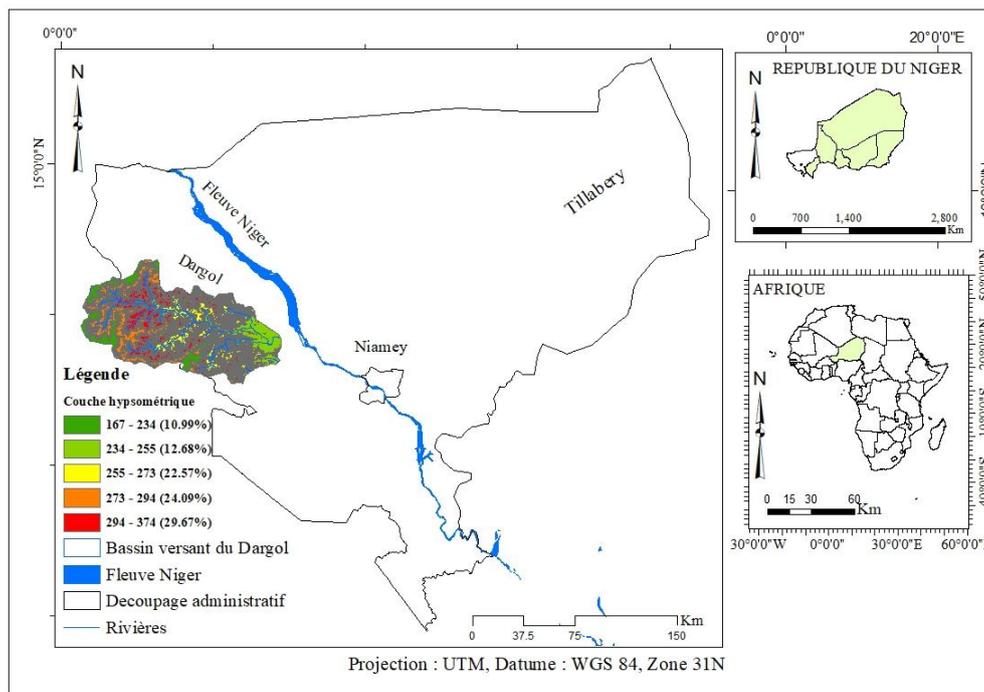


Fig. 1 – Présentation de la zone d'étude et du bassin versant du Dargol (Burkina-Faso et Niger).

2.2. Aspects pédologiques et géologiques du bassin

Le bassin du Dargol draine les granites du Liptako, recouverts partiellement de terrains précambriens, et des schistes et des roches vertes du Birrimien qui apportent quelque vigueur à son relief. Les dépôts éoliens sont importants dans la partie inférieure du bassin, (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

Sa structure pédologique est étroitement liée à son histoire géologique, ainsi 6 types de sols sont rencontrés: la moitié du bassin versant du Dargol est couverte d'arénosols luviques et l'autre de cambisols eurtiques, (Amogu, 2009; Nachtergaele *et al.*, 2012).

2.3 DONNEES ET METHODES

Le Système d'Information Géographique (SIG) et la Télédétection spatiale sont des moyens nécessaires, sollicités dans l'étude de l'érosion des terres, (Redjem *et al.*, 2021). La disponibilité des outils SIG et l'accessibilité aux données de Télédétection, permet à cette étude de modéliser l'érosion hydrique en appliquant l'équation des pertes en sol (USLE) de Wischmeier & Smith, (1978), dans le bassin versant de Dargol; cette équation (USLE) est la composition de cinq facteurs suivants:

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

Dans ce cas, l'application de cette équation (USLE) est réalisée à travers l'exploitation des données telles que: la carte des sols de la FAO, le modèle numérique de terrain (STRM), les images Landsat 7 et 8, les données de précipitation spatiales (CHIRPS), avec divers logiciels SIG, à savoir: ENVI, QGIS, ARCGIS et ERDASIMAGINE.

2.3.1. Démarche méthodologique

2.3.2. Facteur K

Le facteur K indique une description quantitative de la vulnérabilité du sol à l'érosion, Micu & Urdea (2022). L'utilisation des SIG et Télédétection est un moyen certain, permettant de retrouver l'érodibilité des sols à partir de la base de données pédologique harmonisée des sols de la FAO, (Bouhadab *et al.*, 2018; Ouedraogo *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2016). La base de données mondiale harmonisée des sols (HWSO) est une couche raster scientifique et solide, développée par la FAO et l'UNESCO; elle apporte des informations sur plus de 16 000 unités de sols reconnues à travers le monde et cartographiées à l'échelle 1/5 000 000^{ème}. La couche raster de résolution d'environ 1 km, soit 30 secondes d'arc par 30 secondes d'arc, est répartie en 21 600 lignes et 43 200 colonnes, soit 221 millions de cellules de grille couvrant le globe terrestre. Elle contient également les paramètres du sol dont : la matière organique, le pH, la capacité de stockage de l'eau, la profondeur du sol, la capacité d'échange cationique du sol, et d'autres informations sur la fraction argileuse, le total des éléments nutritifs échangeables, la teneur en chaux et en gypse, le pourcentage d'échange de sodium, la salinité, la classe texturale et la granulométrie. L'ensemble de ces informations permet de bien modéliser l'érodibilité des sols, dont le facteur K.

Selon Wischmeier & Smith (1978), le facteur K est une fonction prenant en compte la texture, la structure, la rugosité, la teneur en matière organique et le degré d'humidité du sol (Addis & Klik, 2015). L'équation primitive de l'érodibilité des sols est:

$$100K = 2.1M^{1.14}(10^{-4})^{(12-a)} + 3.25(b-2) + 2.5 + (c-3).$$

$$100K = 2.1M^{1.14}(10^{-4})^{(12-\alpha)} + 3.25(b-2) + 2.5 + (c-3)$$

Avec M = (% sable fin + limon). (100 - % argile); a représente le pourcentage de la matière organique; b - le code de la perméabilité et c - le code de la structure.

2.3.3. Facteur R

Le facteur R, ou érosivité des pluies, est la capacité potentielle des pluies à provoquer l'érosion, à travers le détachement des particules de sol, Bouhadab *et al.* (2018). Il se détermine en faisant le produit de l'énergie cinétique (Ec) et de l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes (I30), Wischmeier & Smith (1978).

Pour notre étude, nous utilisons des données pluviométriques d'origine spatiale de CHIRPS; ce sont des données climatologiques de haute résolution, dont la constitution repose sur une approche d'interpolation intelligente, basée sur un système de haute résolution (0,05° soit 5 km), permettant d'estimer les précipitations quotidiennes, pentade (5 jours) et mensuelles. CHIRPS, utilise la version 7

d'analyse pluviométrique (TMPA 3B42 v7) afin d'étalonner les estimations de la pluviométrie dans le Cloud Cold Cloud (CCD). Il fournit également des estimations de précipitations par jauge-satellite combinées qui couvrent la plupart des régions terrestres, avec une latence relativement faible, une résolution élevée, un faible biais et une longue période d'enregistrement. Les données sont fournies aux formats NetCDF, GeoTiff et BIL; les unités sont le mm par période de temps, et sont téléchargeable à partir du site de CHIRPS: (<http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps>), Funk *et al.* (2015).

Ces données de climatologie CHIRPS ont été appliquées à travers la formule alternative de facteur R suivante:

$$R = 0.0295 * P * 1.89 \text{ et } R = 0.04830 * P * 1.610$$

P : précipitations moyennes annuelles.

Cette formule a déjà été appliquée par Kabre (2009) et Mahamadou (2009) dans le contexte ouest africain au Burkina Faso et au Niger dans la modélisation du facteur érosivité des pluies (facteur R).

2.3.4. Facteur LS

Le facteur LS, représente la longueur et l'orientation des pentes, lesquelles favorisent le déclenchement du processus de l'érosion et du transport des sédiments sous forme particulière en suspension, (Roose, 1994; Lakhdar, 2017).

La formule empirique du Facteur LS définie par Wischmeier & Smith (1978) a été révisée pour permettre de déterminer le facteur LS à partir du modèle numérique de terrain (MNT). Le MNT utilisé pour cette étude est celui de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), de résolution 30m et téléchargé depuis la plateforme d'USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), (Teh, 2011; Belasri & Lakhouili, 2016; Khali Issa *et al.*, 2016).

$$X = (\text{accumulation de débit} * \text{la résolution})$$

$$LS = (\text{accumulation du débit} * \text{résolution} / 22.1) \text{ m} * (0.065 + 0.045 * \text{PentesMNT} + 0.065 * (\text{PentesMNT} * \text{PentesMNT})).$$

2.3.5. Facteur C

Le facteur C définit la variation du couvert végétal sur un bassin versant. La dégradation du couvert végétal contribue à l'érosion hydrique des sols; dans ce cas, les images Landsat 7 et 8 de résolution spatiale 30m sont utilisés pour modéliser le couvert végétal. Le traitement de ces images, permet d'exploiter la relation exponentielle qui existe entre le NDVI et la végétation afin de calculer le facteur C (Gitas *et al.*, 2009; Toumi *et al.*, 2013; Belasri & Lakhouili, 2016):

$$C = \text{expo}(-\alpha * \text{NDVI} / \beta - \text{NDVI})$$

Avec α et β des valeurs entre 1 et 2

Le NDVI est un indice de réflectance de la végétation dans le spectre rouge (R) et proche infrarouge (PIR) et est obtenu par différence normalisée à travers la formule suivante:

$$\text{NDVI} = \text{NIR} - \text{Red} / \text{NIR} + \text{Red} \text{ (Guechi } et al., 2021).$$

3. RESULTATS

3.1. Facteur K

La modélisation du facteur K à partir de la base de données pédologique harmonisée de la FAO, permet de présenter et analyser les résultats à travers la Figure 2 et le Tableau 1 ci-dessous.

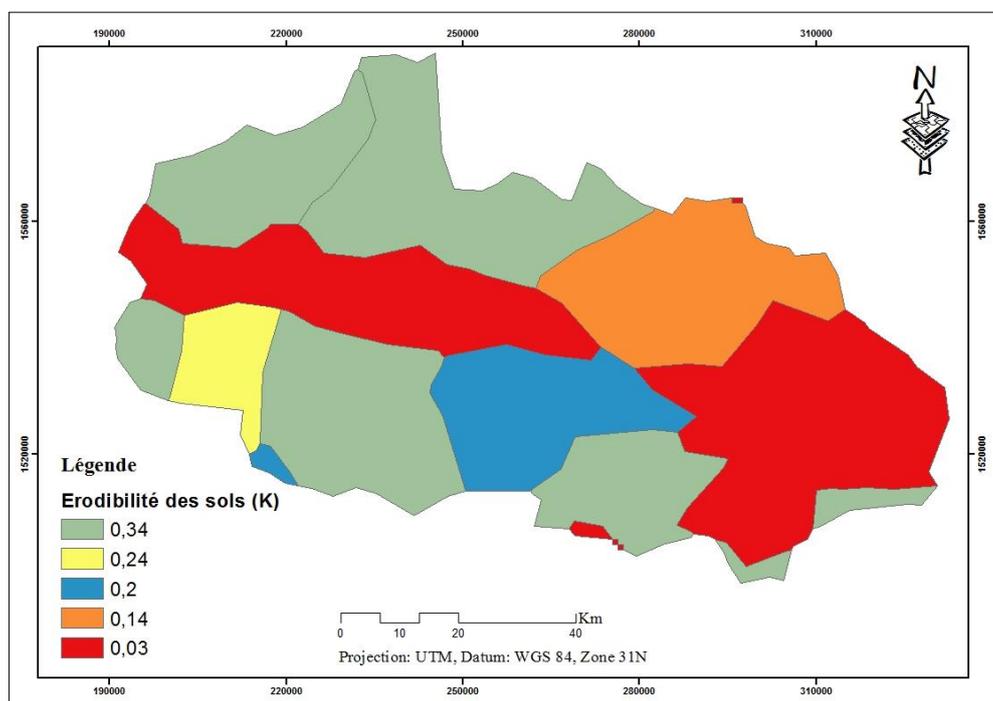


Fig. 2 – Erodibilité par type de sol.

Les valeurs d'érodibilité des sols s'attribuent aux types des sols sur l'ensemble du bassin versant du Dargol. Ces valeurs sont fortes pour certains types de sol, situés principalement sur les bords les plus élevés du contour du bassin, tandis qu'elles sont en même temps moyennes et faibles pour d'autres types de sol, dans la vallée principale et proche de l'exutoire, où les particules argileuses les plus imperméables sont accumulées par le transfert de sédiments vers le bas des pentes.

Tableau 1

Répartition des classes d'érodibilité par occupation et type de sol.

Type de sol	Texture	K métrique t/ha	Proportion de surface en m ²
Régosols eurtique	Limoneuse	0,34	522,09
Planosols sodiques	Limoneuse	0,34	983,37
Arénosols luviqes	Sableuse	0,03	2395,66
Luvisols ferriques	Limono-sableuse	0,2	718,18
Cambisols vertiques	Limoneuse	0,34	558,90
Cambisols vertiques	Argileuse	0,24	285,39
Cambisols eurtiques	Limoneuse	0,14	925,03
Cambisols eurtiques	Limoneuse	0,34	999,54

Le tableau 1 montre que les valeurs du facteur K, sont supérieures ou égales à 0,03 pour les sols moins vulnérables; et inférieures ou égales à 0,34 pour les sols les plus vulnérables à l'érosion.

A l'échelle de bassin versant, les sols sont majoritairement exposés à l'érosion hydrique, sachant qu'au Sahel l'érosion hydrique est un processus marqueur de la dégradation des terres, (Bachirou *et al.*, 2020).

Une étude conduite sur l'érosion hydrique sur deux bassins versants sahéliens au Niger (Boubon et Louguel), et non loin du bassin versant de Dargol, a confirmé l'existence d'une forte érodibilité des sols sur l'étendue du bassin du fleuve Niger (Bachirou *et al.*, 2020). En l'occurrence dans la région de

Tillabéry les travaux de Mansour *et al.* (2020) sur l'érosion hydrique confirment que les sols de texture limoneuses sont dominants dans cette zone, et présentent une forte érodibilité, telles qu'elles se retrouvent dans le bassin versant du Dargol (Mansour *et al.*, 2020).

3.2. Facteur R

L'érosivité des pluies est souvent en fonction des altitudes, les zones en haute altitude du bassin versant étant caractérisées par une forte érosivité des pluies (Micu & Urdea, 2022), particulièrement au Sahel, où les pluies peuvent être de forte intensité et peuvent provoquer un important détachement de particules de sol (Roose, 1994). La Figure 3 est un aperçu de la répartition de l'érosivité des pluies sur l'ensemble du bassin versant du Dargol.

L'intensité des pluies sur le bassin versant du Dargol est répartie entre Faible et Très forte (Tableau 2); plus les pluies sont fortes, plus ils accentuent l'érosion hydrique.

Les pluies tropicales sahéniennes sont naturellement très fortes, et peuvent être uniformes ou varier sur l'étendue d'un bassin versant, (Mahamadou, 2009; Ouedraogo *et al.*, 2019). Les travaux réalisés sur les bassins versants de Louguel et Boubon, prouvent aussi que les pluies de cette zone étudiée sont très érosives, et suivent un ordre de classement allant de faible à très fort (Bachirou *et al.*, 2020).

Tableau 2

Présentation des classes d'érosivité des pluies.

Code	Classe d'érosivité	Valeur d'indice
R1	Faible	139-151
R2	Moyenne	151-169
R3	Forte	169-181
R4	Très forte	181-193

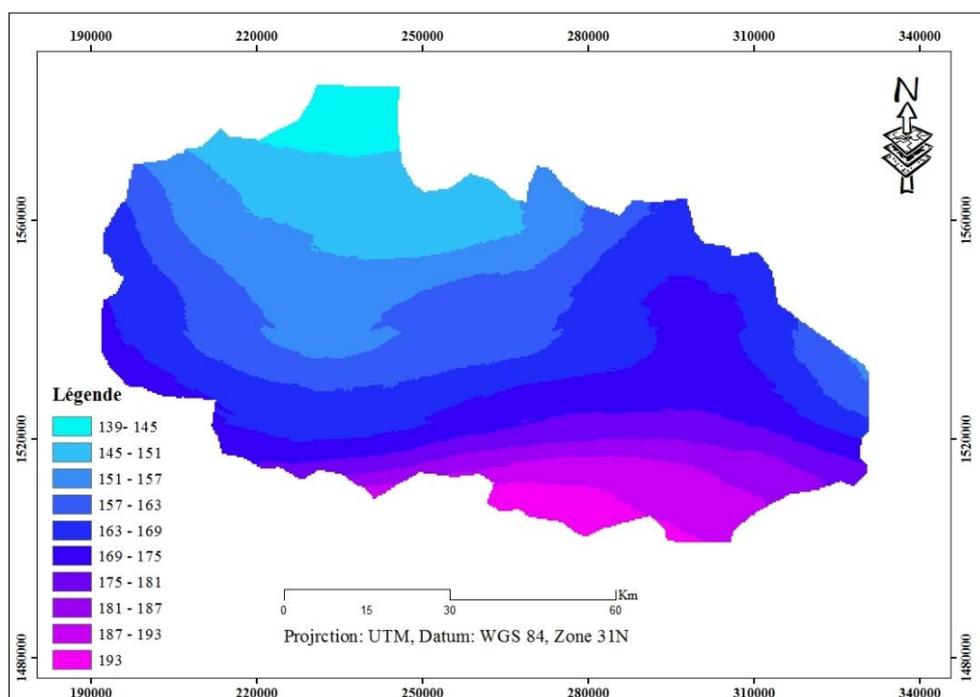


Fig. 3 – Répartition spatiale de l'érosivité des pluies.

3.3. Facteur LS

Les pentes contribuent au ruissèlement selon leurs caractéristiques: degré et orientations du terrain; dans le bassin versant du Dargol, les pentes suivent la répartition spatiale selon la Figure 4.

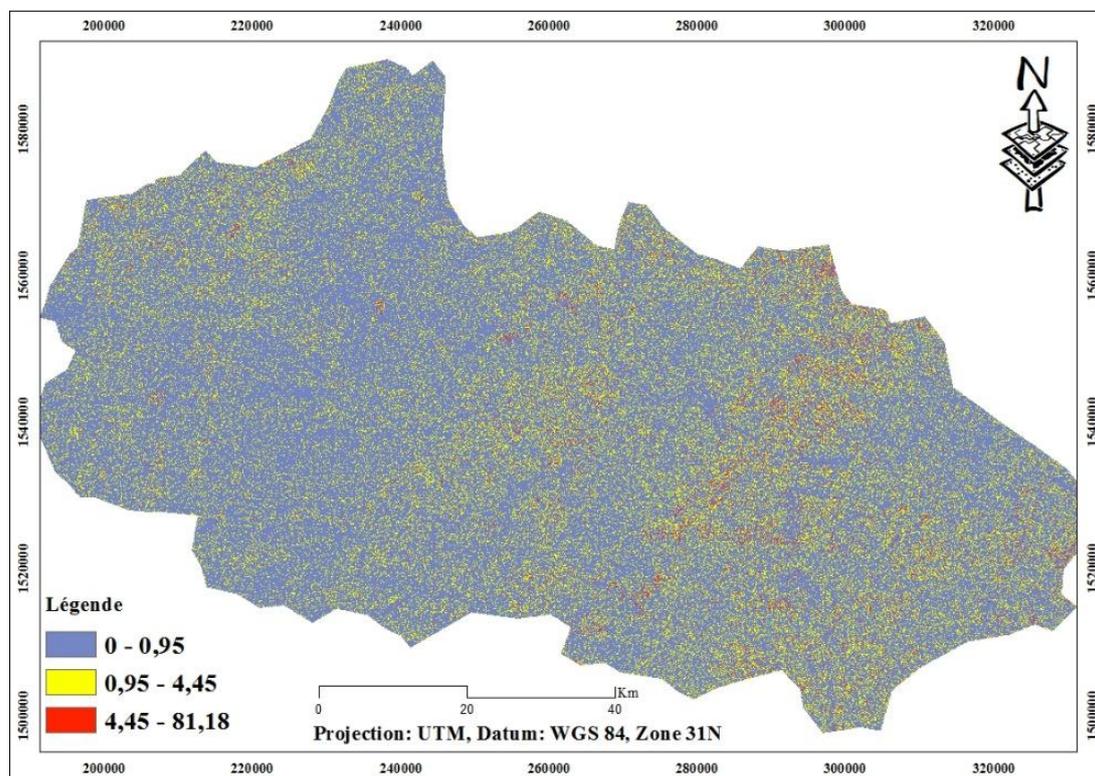


Fig. 4 – Répartition spatiale des longueurs et orientations des pentes.

Tableau 3

Variation du facteur LS.

Classe de facteur LS	Valeurs d'indice
Faible	0-0,95
Moyen	0,95-4,45
Fort	4,45-81,18

Quand la pente est forte, elle provoque plus de drainage et l'arrachement des particules de sols, ainsi que la formations des ravinements.

Aux abords du Dargol, dans le bassin du fleuve Niger l'analyse de l'érosion hydrique montre une différence des pertes en sol notoire, et variant entre 10 à 20 t/ha/an pour une variation de 10 à 20% des pentes (Bachirou *et al.*, 2020).

3.4. Facteur C

La relation exponentielle qui existe entre le NDVI et le couvert végétal permet de modéliser le facteur C et d'observer l'évolution du couvert végétal sur les Figures 5 et 6.

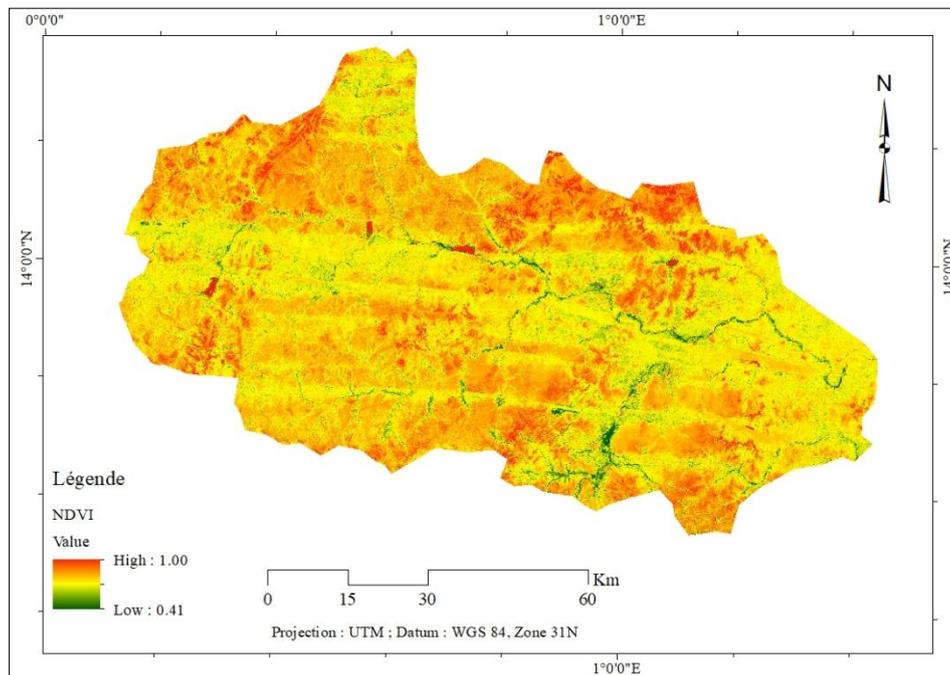


Fig. 5 – Indice de végétation NDVI.

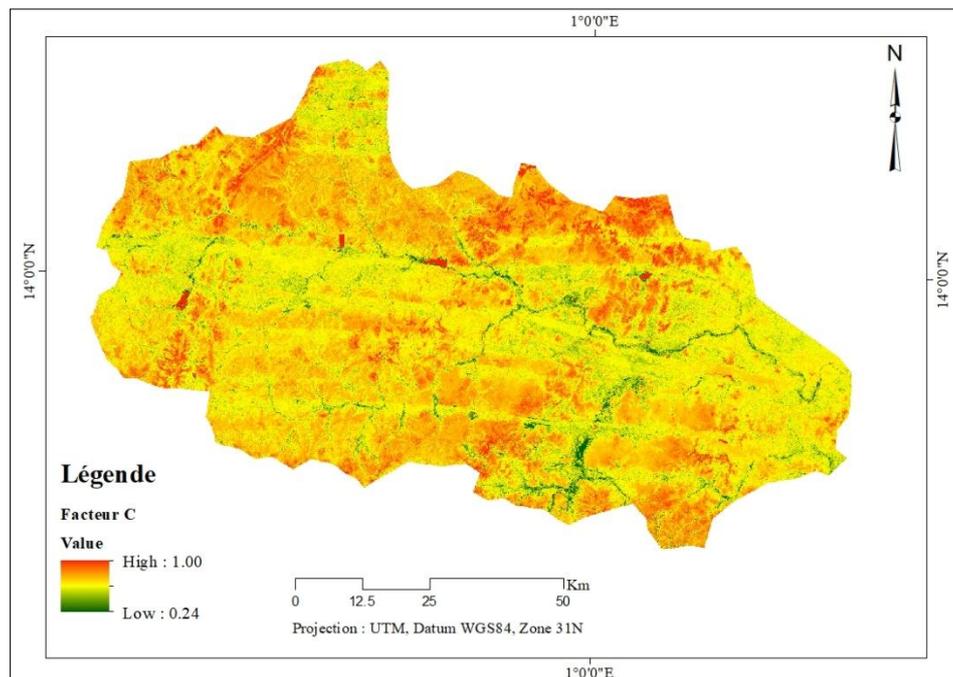


Fig. 6 – Facteur C.

Le lien exponentiel entre le NDVI et la végétation s'observe dans la variation des valeurs du couvert végétal sur les deux cartes monocanal (Figures 5 et 6). Les valeurs de l'NDVI varient entre 0.41 et 1.00, tandis que les valeurs du facteur C varient entre 0.24 et 1.00.

Pour mieux constater ce lien exponentiel, les auteurs Gitas *et al.* (2009) et Toumi *et al.* (2013), ont opéré une analyse de l'évolution du facteur C par rapport au NDVI au moyen d'un diagramme expérimental reliant les variations de NDVI par rapport au facteur C (Fig. 7).

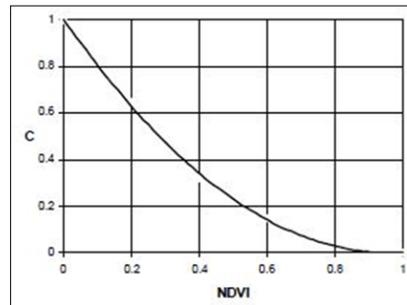


Fig. 7 – Evolution du Facteur C par rapport au NDVI.

Les images Landsat traitées pour cette étude, concernent la période de décembre 2000 à 2015, une période relativement propice à l'abondance du couvert végétal sur le bassin du Dargol; cependant, les auteurs Amogu (2009) et Sighomnou, *et al.* (2013) relient les dégradations du couvert végétal dans cette zone, à l'augmentation de l'encroûtement des sols et des écoulements (Bachirou *et al.*, 2020).

4. DISCUSSIONS

La carte des pertes en sol est obtenue en croisant les quatre facteurs de l'USLE dans un SIG ($A = R \times LS \times C \times K \times P$). Selon Khali Issa *et al.* (2016), le facteur P concernant les pratiques de soutien est toutefois remplacé par un coefficient égal à 1 en cas de manque d'informations sur ce sujet. Ensuite, une statistique zonale du raster est calculée par classe de sol pour établir les pertes moyennes annuelles en sols qui s'élèvent à 72 t/ha/an.

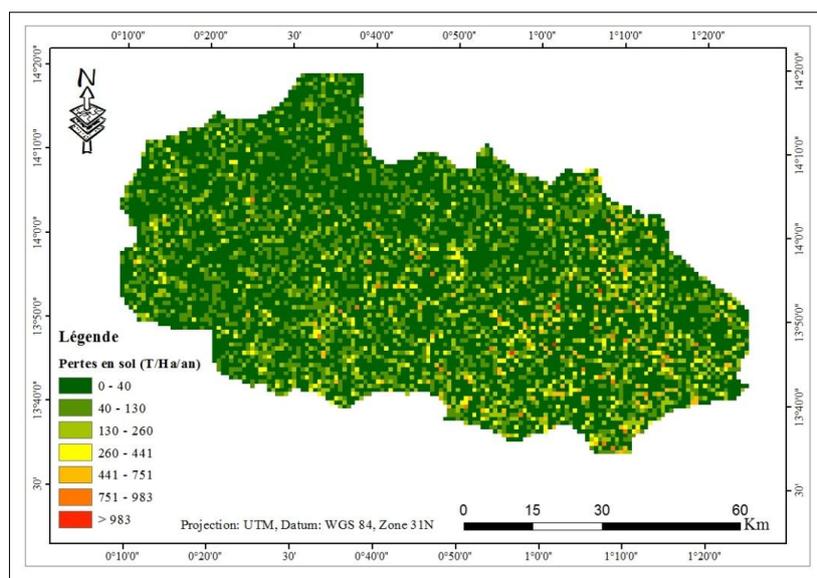


Fig. 8 – Estimation des pertes en sol moyennes annuelles.

Ces résultats sont très proches de ceux obtenus par d'autres études utilisant le même modèle (USLE); dans le bassin du fleuve Niger, sur la localité du Fondou Béri, les pertes en sols moyennes annuelles vont de 26 à 46 t/ha/an (Warren *et al.*, 2001).

En l'occurrence dans la zone de Tillabéry, d'autres travaux utilisant la forme révisée du modèle USLE, dont RUSLE, rejoignent en partie les résultats de nos travaux. Ces résultats présentent deux taux de pertes en sols allant de 0 à 140 t/ha/an et de 30 à 50 t/ha/an (Mahamane *et al.*, 2020).

Nous pouvons citer également les travaux de Bachirou *et al.* (2020) sur les deux bassins versants de Louguel et Boubon, toujours dans le bassin du fleuve Niger, qui présentent un taux de perte en sols de 21 à 52 t/ha/an sur la topo-séquence 1 et un taux de 192 à 207 t/ha/an sur la topo-séquence 2.

4.1. Analyse de la dégradation et des nouvelles tendances d'écoulement

Dans les parties sud, aussi que dans le centre du bassin (Fig. 8), les pertes en sols sont plus élevées, variant entre 130 et 983 t/ha/an, mais elles sont plus faibles à l'ouest et au nord, et varient entre 40 et 260 t/ha/an. Les fortes dégradations sont, en partie, liées au poids du facteur R (agressivité climatique), qui représente des fortes valeurs à l'est, au sud et un peu au centre du bassin, où des fortes pertes en sol sont constatées. Les valeurs du facteur R sont très élevées dans ces zones, et évoluent entre 163 et 193 t/ha/an (Fig. 3). Il y a aussi le poids du facteur LS, car les fortes élévations accentuent le transport et la dégradation des terres par érosion hydrique (Roose, 1994); dans la partie sud, au centre et à l'est du bassin, le LS varie entre 0,95 et 81,18 (Fig. 4). Ces valeurs sont les plus élevées et entraînent une augmentation du drainage dans ces zones du bassin versant du Dargol. La dégradation du couvert végétal déjà examinée à travers l'évolution du NDVI et du facteur C (Figures 5 et 6) confirme l'existence d'une nette dégradation sur une période où une meilleure pluviométrie relative devrait permettre une reprise du couvert végétal (mois du décembre). Les travaux de Amogu (2009) analysent ces dégradations suivies de problèmes d'encroûtement dans d'autres bassins proches du Dargol, à savoir: Gorouol, Mekrou et Sirba, où le taux de dégradation et de transport des matières en suspension entre 1979 et 1999 est passé de 65% à 86% dans le bassin du Gorouol, et de 45% à 89% dans le bassin de la Sirba. Ainsi, les auteurs Sighomnou *et al.* (2013) ont associé l'augmentation de l'encroûtement des sols dans cette zone à l'augmentation du coefficient d'écoulement, signe d'un sol dénudé avec moins de couvert végétal.

En d'autres termes, ces dégradations arrivent en fonction de l'érodibilité des sols (facteur K), car certains types de sols favorisent le drainage, tandis que d'autres favorisent le ravinement et l'arrachement des arbres et herbes (Roose, 1994; Amogu, 2009). Une étude réalisée sur des parcelles expérimentales sur une période de 10 ans a mis en relation l'existence d'une forte dégradation des sols en parallèle d'un coefficient de ruissellement en croissance très élevée, sur tous les types de surface, de +80% - sur les parcelles en jachère - à +300% - sur les parcelles en culture -, dans le bassin du fleuve Niger (Bouzou Moussa *et al.*, 2020).

Au problème d'érosion hydrique s'ajoute le problème de l'évolution des relations entre pluies et débits auxquelles est confrontée l'ensemble de l'Afrique sub-saharienne. Cette augmentation des écoulements trouve son origine dans deux phénomènes concomitants. Tout d'abord malgré la baisse durable des totaux annuels de pluie dans les régions sahéliennes depuis plusieurs décennies, de nombreux auteurs ont constaté une augmentation de l'intensité des événements pluvieux au Sahel (Chagnaud *et al.*, 2022; Saley & Salack, 2023), qui accentue la réponse hydrologique rapide en surface. Ensuite, la dégradation durable des états de surface des sols, provoquant leur encroûtement, accentue l'imperméabilité des sols, ce qui augmente le coefficient des écoulements des rivières sahéliennes, même en cas de baisse de la pluie, depuis les années 1970. Ce phénomène qui fragilise l'ensemble du Sahel depuis plus de 50 ans, est à relier à l'augmentation de la population et de la pression agricole sur les espaces naturels (Paturel *et al.*, 2017) et au changement d'usage des sols lié à l'augmentation des

surfaces mises en cultures et au raccourcissement de la jachère (Descroix *et al.*, 2013; Bouzou Moussa *et al.*, 2020).

Ce phénomène résultant du changement climatique et des modifications des états de surface ne se limite pas à des petits espaces, mais apporte des conséquences même sur le régime du fleuve Niger dans son ensemble et de ses affluents, dont le bassin versant de Dargol (Mahé *et al.*, 2003; Mahé *et al.*, 2005; Descroix *et al.*, 2009; Lienou *et al.*, 2010; Mahé *et al.*, 2011; Descroix *et al.*, 2013).

5. CONCLUSIONS

L'équation des pertes en sols (USLE) appliquée dans le bassin versant du Dargol à travers les SIG et la télédétection montre une importante dégradation des sols avec une moyenne de 72 t/ha/an, et de transport des matières en suspension. Ces dégradations sont mises en évidence grâce aux résultats des principaux paramètres de USLE tel que le facteur K, qui examine la capacité du sol dans le bassin versant du Dargol à résister à l'érosion hydrique, et au transport des matières en suspension; ce facteur varie entre 0,03 et 0,34. Ensuite, il y a les facteurs R et LS, dont le premier détermine l'érosivité des pluies variantes entre 139 et 193 sur l'ensemble du bassin-versant. Le transport des sédiments s'avère être très influencé par l'orientation des pentes (facteur LS) et varie entre 0,95 et 81,18. Les pluies de forte intensité causent des fortes dégradations dans cette zone (Dargol), ce qui alourdit les pertes en sols dans l'Est et le Sud et un peu au centre du bassin versant du Dargol (de 130 à 983 t/ha/an). Mais les facteurs d'érosivité sont plus faibles à l'ouest et au nord, passant de 40 et 260 t/ha/an. Le manque d'informations sur le facteur P a amené cette étude à le substituer par un coefficient égal à 1, ce qui est le cas des autres régions où des informations sur ce facteur ne sont pas disponibles. D'autres difficultés comme le manque d'accessibilité à cette zone sont rencontrées, concernant surtout le terrorisme au Sahel qui empêche toute expérience réelle sur le terrain, en particulier dans le bassin du fleuve Niger.

En définitif, les résultats obtenus à travers la modélisation (USLE) dans cette zone, montrent l'efficacité et la pertinence de ce modèle (USLE) et apportent des connaissances nouvelles sur cette zone d'accessibilité restreinte. Cela s'annonce également comme une possibilité de pouvoir appliquer ce modèle (USLE) sur d'autres bassins versants africains, au Niger ou ailleurs, pour mieux étudier la dégradation des sols; de même, cette étude est une piste pour d'autres travaux concernant les phénomènes naturels avec les SIG et la télédétection se rapportant aux grands systèmes d'eau africains, tel que le Lac Tchad et ses affluents.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de soutien du CRASTE-LF et du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V-Agdal de Rabat, Maroc, à l'endroit desquels nous présentons nos sincères remerciements. Il a également bénéficié d'autres soutiens d'HydroSciences Montpellier dans la recherche, l'orientation et la mise en cohérence des résultats avec la vérité terrain.

REFERENCES

- Abdou Babaye, M.S. (2012), *Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger)*, Thèse, Université Abdou Moumouni (Niamey-Niger) et Université de Liège (Liège-Belgique), 265 p.
- Addis, H.K., Klik, A. (2015), *Predicting the spatial distribution of soil erodibility factor using USLE nomograph in an agricultural watershed, Ethiopia*, International Soil and Water Conservation Research (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.> 9 p.

- Amogu, O. (2009), *Sahelian land-cover degradation and its effects on the silting-up of the middle Niger River*, Hydrology. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. English. NNT: tel-00385629 HAL <https://theses.hal.science/tel-00385629v2>, 445 p.
- Bachirou, H.Y., Tahirou, H.Y., Amadou, A.T., Abdoukader, M.I., Bouba, H., Zibo, G. (2020), *Dynamique récente et actuelle de l'érosion en nappe aux abords du fleuve Niger*, Afrique Science **16**(1), pp. 247–259, ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>.
- Belasri, A., Lakhouili, A. (2016), *Estimation of Soil Erosion Risk using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco*, Journal of Geographic Information System, **8**, pp. 98–107. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2016.81010>.
- Bouhadeb, C.E., Menani, M.R., Bouguerra, H., Derdous, O. (2018), *Assessing soil loss using GIS-based RUSLE methodology. Case of the Bou Namoussa watershed, North-East of Algeria*, Journal of Water and Land Development. No. **36**, pp. 27–35. DOI: 10.2478/jwld-2018-0003.
- Ibrahim, B., Moussa, M., Aghali, I., Abdoulaye, B., Mahamadou, B., Oumarou, F., Ibrahim, M., Bachir, A., Descroix, L., Eric, L., Vandervaere, J. (2020), *Dynamique Hydro-Erosive Actuelle Des Bassins Versants Endoreiques de la Région De Niamey (Sud-Ouest Du Niger)*, European Scientific Journal, ESJ, **16** (33), 149 p. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p149>.
- Brunet-Moret, Y., Chaperon, P., Lamagat, J.P., Molinier, M. (1986), *Monographie hydrologique du fleuve Niger*, Edit. de l'ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, collection monographies hydrologiques, no **8**, Paris, 506 p.
- Chagnaud, G., Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T. (2022), *A synthetic view of rainfall intensification in the West African Sahel*. Environ. Res. Lett., **17** p., 044005, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a9c>.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle S., Gautier, E., Olivry J-C., Albergel, J., Amogu O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I., Sighomnou, D. (2009), *Spatio-temporel variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis*, Journal of Hydrology, Vol. **375**, Issues 1–2, 30 August 2009, pp. 90–102.
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Dascosta, H., Panthou, G., Quantin, G., Diedhiou, A. (2013), *Évolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel)*, Climatologie, **10**, pp. 37-49, <https://doi.org/10.4267/climatologie.78>.
- Ekolu, J., Dieppois, B., Sidibe, M., Eden, J.M., Trambly, Y., Villarini, G., Peña-Angulo, D., Mahe, G., Paturel, J.E., Onyutha, J., van de Wiel, M. (2022), *Long-term variability in hydrological droughts and floods in sub-Saharan Africa: New perspectives from a 65-year daily streamflow dataset*, Journal of Hydrology, Vol. **613**, Part A, 128359, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128359>.
- Ezzaouini, M. A., Mahé, G., Kacimi, I., Zerouali, A. (2020), *Comparison of the MUSLE Model and Two Years of Solid Transport Measurement, in the Bouregreg Basin, and Impact on the Sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdallah Reservoir, Morocco*, Water **2020**, **12**, 7, 1882 p., DOI :10.3390/w12071882.
- Fagbohun, B.J., Anifowose, A.Y.B., Odeyemi, C., Aladejana, O.O., Aladeboyeje, A.I. (2016), *GIS-based estimation of soil erosion rates and identification of critical areas in Anambra sub-basin, Nigeria*, Model. Earth Syst. Environ. **2**, 1, pp. 59–169, DOI: 10.1007/s40808-016-0218-3.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J. (2015), *The climate hazards infrared precipitation with stations—anew environmental record for monitoring extremes*, Scientific Data **2**:150066 |DOI: 10.1038/sdata.2015.66, 21.
- Gitas, I.Z., Douros, K., Minakou, C., Silleos, G.N., Karydas, C. G. (2009), *Multi-temporal soil erosion risk assessment in Chalkidiki using a modified USLE raster model*, EARSeL eProceedings **8**, 1/2009, pp. 40–52.
- Guechi, I., Gherraz, H., Alkama, D. (2021), *Relationship between LULC characteristic and LST using remote sensing and GIS, case study: Guelma (Algeria)*, Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr., **65**, (2), pp. 203–222, 2021, București.
- INS-NIGER. (2010), *Annuaire statistique des cinquante ans d'indépendance du Niger. Institut National de Statistique (INS)*, Edition Spéciale, Niger, 338 p.
- Kabre, M. (2009), *Vulnérabilité des sols à l'érosion dans la région du Centre Nord du Burkina Faso : approche par télédétection et SIG (Système d'Information Géographique)*, http://www.memoireonline.com/02/12/5289/m_Vulnerabilite-des-sols-a-l-erosion-dans-la-region-du-Centre-Nord-du-Burkina-Faso--approche-par14.html, 51 p.
- 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) (2016), pp. 2778-2795 ISSN: 2028-2508 https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N8/291-JMES-2151-Khali%20Issa.pdf.
- Lakhdar, G. (2017), *Quantification de l'érosion hydrique sur les sols marneux des Alpes de haute Provence (région de la motte du Caire)*, France. Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr., **61**, (1), pp. 27–38, 2017, București.
- Lienou, G., Mahé, G., Deulin, C., Paturel, J.E., Bamba, F., Sighomnou, D., Dessouassi, R. (2010), *The river Niger water availability: facing future needs and climate change*, In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources*, IAHS Publ. **340**, pp. 637–645.

- Mahamadou, B. (2009), *Dynamique hydro-géomorphologique du "kori mountséka" et ses effets socio-économiques : approche méthodologique*, DEA, Univ. Abdou Moumouni de Niamey, <http://www.memoireonline.com/04/12/5660/Dynamique-hydrogeomorphologique-du-kori-mountseka-et-ses-effets-socioeconomiquesapproche-meth.html>, 60 p.
- Mahamane, M., Issaharou Matchi, I., Volker Hochschule, V. Mahamane, A. (2020), *Évaluation du risque d'érosion du sol au Sahel: Cas du paysage de Tillabéry*, Afrique Science, **16**, pp. 235–248, <http://www.afriquescience.net>.
- Mahe, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturel, J.E., Laraque, A., Meddi, M., Habaieb, H., Adeaga, O., Dieulin, C., Chahnez Kotti, F., Khomsi, K. (2013), *The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment*, Hydrological Processes, **27**, pp. 2105–2114, DOI: 10.1002/hyp.9813.
- Mahe, G., Lienou, G., Bamba, F., Paturel, J.E., Adeaga, O., Descroix, L., Mariko, A., Olivry, J.C., Sangare, S. (2011), *Niger river and climate change over 100 years*, In: *Hydro-climatology: Variability and Change*, IAHS Pub. **344**, pp. 131–137.
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J.E., Girard, S., Servat, E., Dezetter, A. (2003), *Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau*, In: *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions IAHS Publ.* **278**, pp. 215–222.
- Mahé, G., Olivry, J.C., Servat, E. (2005), *Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux: extrêmes et paradoxes*, In: *Regional Hydrological Impacts of Climate Change – Hydroclimatological Variability*, AISH Publ. **296**, pp. 169–177.
- Mansour, M., Issiaka, I., Volker, H., Ali, M. (2020), *Évaluation du risque d'érosion du sol au Sahel : cas du paysage de Tillabéry*, Afrique SCIENCE **16**(5) (2020) pp. 235–248, ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>.
- Micu, D., Urdea, P. (2022), *The estimation of soil losses and the sediment yield using the SATEEC model on the southern slope of the Lipovei hills*, Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr., **66**, (1), pp. 27–43, 2022, București.
- Nachtergaele, F.O., van Velthuizen, H., Verelst, L., Wiberg, D., Batjes, N.H., Dijkshoorn, J.A., van Engelen, V.W.P., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., Prieler, S., Teixeira, E., Shi, X. (2012), *Harmonized World Soil Database (version 1.2) FAO*, <https://edepot.wur.nl/197153>.
- Ouedraogo, B., Kabore, O., Kabor, M. (2019), *Cartographie quantitative de l'érosion des sols par approche SIG/RUSLE dans la Commune de Karangasso Vigué (Burkina Faso)*, Int. J. Biol. Chem. Sci. **13**(3): pp. 1638–1653, 2019, <http://www.ifgdg.org>.
- Paturel, J.E., Mahé, G., Diello, P., Barbier, B., Dezetter, A., Karambiri, A., Yacouba, H., Maiga, H., Dieulin, C. (2017), *Using land cover changes and demographic data to improve hydrological modelling in Sahel*. Hydrological Processes, **31**, 4, pp. 811–824, DOI: 10.1002/hyp.11057.
- Redjem, A., Benyahia, A., Dougha, M., Nouibat, B., Hasbaia, M., Ozer, A. (2021), *Combining the analytic hierarchy process with GIS for landfill site selection : the case of the municipality of M'sila, Algeria*, Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr., **65**, (2), pp. 171–186, 2021, București.
- Roose, E. (1994), *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*, Bulletin Pédologique de la FAO 70, M-57 ISBN 92-5-203451-X, 442 p.
- Saley, L.A., Salack, S. (2023), *Present and future of heavy rain events in the Sahel and West Africa*. Atmosphere **14**:965. <https://doi.org/10.3390/atmos14060965>.
- Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahé, G., Bouzou Moussa I., Gautier, E., Mamadou, I., Vandervaere, J.P., Bachir, T., Coulibaly, B., Rajot, J.L., Malam Issa, O., Malam Abdou, M., Dessay, N., Delaitre, E., Maiga, O.F., Diedhiou, A., Panthou, G., Vischel, T., Yacouba, H., Karambiri, H., Paturel, J.E., Diello, P., Mougin, E., Kergoat, L., Hiernaux, P. (2013), *La crue de 2012 à Niamey: un paroxysme du paradoxe du Sahel ?*, Sécheresse **24**, 1, pp. 3–13. doi : 10.1684/sec.2013.0370.
- Teh, S.H. (2011), *Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on Cameron highlands, Malaysia, for Hydropower development*, Master's thesis, RES | The School for Renewable Energy Science, Solborg at Nordurslod IS600 Akureyri, Iceland www.res.is, 74 p.
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., Brou, Y.T. (2013), *Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG*, Hydrological Sciences Journal, **58**:7, pp. 1542–1558, DOI: 10.1080/02626667.2013.824088.
- Wang, B., Zheng, F., Guan, Y. (2016), *Improved USLE-Kfactor prediction: A case study on water erosion areas in China*, International Soil and Water Conservation Research **4** (2016) pp. 168–176, <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.003>.
- Warren, A., Batterbury, S., Osbahr, H. (2001), *Soil erosion in the West African Sahel: a review and an application of a local political ecology approach in South West Niger*, Global Environmental Change **11** (2001) pp. 79–95, [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(00\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(00)00047-9).
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978), *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. **537**, 67 p.

