

Quantification de l'érosion hydrique par les méthodes USLE et RUSLE : Application aux sous-bassins versants du Bouregreg, Maroc

Quantification of water erosion using USLE and RUSLE methods: Application to the Bouregreg sub-watersheds, Morocco

Fatima HARA¹, Mohammed ACHAB^{1*}, Anas EMRAN¹, Amal SAIDI¹ & Gil MAHE²

1. Geo-Biodiversity and Natural Patrimony Laboratory (GEOBIO), Scientific Institute, Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry Research Centre (GEOPAC), Mohammed V University in Rabat Morocco.

* Corresponding author (med.achab70@gmail.com; mohammed.achab@is.um5.ac.ma).

2. HydroSciences Montpellier / IRD, France.

Résumé. L'érosion hydrique est l'une des causes majeures de la dégradation des sols dans le monde. La sédimentation dans les retenues des barrages est un des effets les plus négatifs de l'érosion hydrique, entraînant une perte de leur potentiel de stockage des eaux et des dégâts agro-pédologiques. Le bassin versant du Bouregreg, situé dans le Nord-Ouest du Maroc, connaît chaque année des pertes de sol à l'origine d'un déséquilibre naturel des écosystèmes du bassin et d'un ralentissement du développement socio-économique de la région. Ces pertes de sols se traduisent au niveau du Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah proche de l'embouchure du Bouregreg, par un envasement estimé, de point de vue financier, à plusieurs millions de dirhams/an. Afin de quantifier et mieux comprendre ce phénomène de dégradation des sols, nous avons procédé à une évaluation et quantification des pertes en sol en utilisant les équations universelles empiriques (USLE) et (RUSLE), en intégrant sous forme de couches d'informations les principaux facteurs environnementaux impliqués dans le processus érosif (climat, topographie, sol, occupation du sol) relatives aux sous-bassins du Bouregreg dans un Système d'Information Géographique (SIG). L'application de ces équations empiriques nous a permis d'établir de façon générale les facteurs décisifs responsables de l'érosion hydrique des sols au niveau de ce bassin. Ainsi, les résultats obtenus montrent des valeurs moyennes des pertes en sol estimées à 0,94 t/ha/an et 1,07 t/ha/an par application des équations USLE et RUSLE respectivement. D'autre part, la comparaison entre les valeurs des pertes en sol estimées dans ce travail par USLE et RUSLE et celles des travaux antérieurs, montre des différences relativement faibles. La distribution des différentes classes d'érosion met en évidence l'effet conjugué notamment du couvert végétal et de la topographie sur la variabilité des taux d'érosion hydrique au niveau des quatre sous bassins de Bouregreg.

Mots-clés : Erosion hydrique, USLE-RUSLE, Perte en sol, Sédimentation, Bassin-versant, Bouregreg, Maroc.

Abstract. Water erosion is one of the major causes of soil degradation in the world. Among the most negative effects of water erosion is the accumulation of sedimentation in dam reservoirs, leading to a loss of their water storage potential and agro-pedological damage. In the northwest of Morocco, the Bouregreg watershed experiences soil losses every year, that cause a natural imbalance in the ecosystems of the basin and a slowdown in the region's socio-economic development. These soil losses are reflected in the Sidi Mohamed Ben Abdellah Dam near the mouth of the Bouregreg, by silting up estimated, from a financial point of view, at several million dirhams/year. In order to help better understand and quantify this soil degradation phenomenon, we carried out an evaluation and quantification of the soil losses using empirical universal soil loss equations (USLE) and (RUSLE), by integrating into a Geographic Information System (GIS), layers of information of the main environmental factors involved in the erosive process of the Bouregreg sub-basins (climate, topography, soil, land use). The application of these empirical equations allowed us to identify in a general way, the main factors responsible for the soils water erosion in the Bouregreg watershed. Therefore, the results obtained from these equations show average values of soil loss estimated to 0.94 t/ha/yr and 1.07 t/ha/yr, by applying the USLE and RUSLE methods respectively. On the other hand, the comparison between the values of soil losses estimated in this work by USLE and RUSLE and those of previous works, show relatively small differences. The distribution of the different erosion classes highlights the combined effect of vegetation cover and topography on the variability of water erosion rates in the Bouregreg sub-watersheds.

Keywords: Water erosion, USLE-RUSLE, soil Loss, Sedimentation, Bouregreg Watershed, Morocco.

Abridged English Version

Introduction and purpose

Soils play an essential role in the balance and preservation of terrestrial ecosystems. However, they are increasingly threatened by natural and anthropogenic factors, that cause their degradation or even their irreversible and permanent sterilization (Lal *et al.* 2000, Pandey *et al.* 2009, Paroissien *et al.* 2015, Borrelli *et al.* 2017). Globally, soil water erosion is considered a major cause of land degradation. Annual soil

losses due to water erosion favored by the aggressiveness of the rainfall combined with the alternation of dry and wet periods, the fragility of geological formations, and human actions lead to the silting up of dam reservoirs (Remini *et al.* 2009).

The Bouregreg watershed, subject of this study, is located to the north-west of the Moroccan central massif (Fig. 2). Characterized by a Mediterranean climate, classified as sub-humid to semi-arid (Mahé *et al.* 2012) and by predominantly rain-fed agriculture dominated by cereal growing. Geomorphologically, this watershed presents a

flat and undulating topography essentially made up of hills and impermeable plateaus with a fairly dense plant cover. From a geological point of view, this watershed experiences great geochronological and lithological diversity, with a clear predominance of schistose, sandstone and, quartzite formations, generally of Paleozoic age.

The Bouregreg watershed includes four sub-watersheds (Bouregreg, Grou, Ain Loudah, and Sidi Mohamed Cherif) and shows significant erosion processes causing soil degradation and solid transport caused by climatic, physical, and geomorphological factors (Laouina *et al.* 2010, El Hadraoui 2013, Mahé *et al.* 2013, Moussebih *et al.* 2019). The purpose of this study is to set up a soil erosion risk assessment and estimation model in the Bouregreg watershed, based on the numerical calculation of annual soil loss factors using the universal empirical equations (USLE and RUSLE). This study aims to compare the water erosion rate by the two empirical models and also to estimate the rate of eroded and transported sediments in the whole basin and sub-basins and their potential contribution to the silting up of the Sidi Mohamed Ben Abdellah Dam (SMBA).

Material and methods

The methodology used to estimate/calculate the erosion and sedimentation processes in the four Bouregreg sub-basins is based on the use of the universal soil loss equations USLE and RUSLE.

$$A_{USLE} = R \times K \times LS \times C \times P$$

$$A_{RUSLE} = R \times K \times LS \times C \times P$$

Where: A_{USLE} , A_{RUSLE} : average Soil loss rate (t/ha/year), R: Rainfall erosivity factor (MJ.mm/ha.h.year), K: soil erodibility factor (t.h/ha.MJ.mm), LS: length and slope gradient factor (dimensionless), C: vegetation cover factor (dimensionless), P: supporting conservation practice factor (dimensionless).

The rainfall erosivity factor (R) was estimated according to the formula of Rango & Arnoldus (1987), using a precipitation database covering a period of 20 years (1997-2018), obtained from the recordings of seven meteorological stations distributed at the Bouregreg watershed (Tab. 3).

$$\log R = 1.74 \log \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} + 1.29$$

The soil erodibility factor (K) was calculated according to the formula proposed by Masson (1971) and Williams (1995), using data from the Digital Soil Map of the World version 3.6 of FAO-UNESCO.

$$K_{usle} = \int_{csand} \times \int_{cl-si} \times \int_{orgC} \times \int_{hisand}$$

Where: Coarse sand content, Clay-silt content, Organic matter content, High sand content.

The topographic factor (LS) was calculated from data of the degree and the length of slope, based on a digital elevation model (DEM) with 30m resolution, available on the web (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). The map of the vegetation cover factor (C) is derived from a supervised classification of the Landsat OLI-8 multi-spectral satellite image of 2017.

Results and Discussions

The spatial distribution of Rainfall erosivity factor (R) in the four sub-watersheds of the Bouregreg watersheds shows values ranging from 63.81 to 79.86 (MJ. Mm / ha.h.year). The maximum values appear mainly in the East and North-East of the basin, which generally coincide with the highest elevations (Fig. 5). A decrease in the values of this factor is clearly marked in the extreme south and southeast of the basin. The majority of the catchment area is subject to medium to high rainfall aggressiveness, which gives rainfall a significant erosive power.

The distribution map of the Soil erodibility factor (K) shows average values of 0.018 t.h/ha.MJ.mm, occupying more than 70% of the total area of the Bouregreg watershed (Fig. 6). These values indicate that a large proportion of soils with low to medium erodibility, correspond to soils rich in coarse sands and with slightly low organic matter contents. The rest of the basin has a strong predisposition to erosion (> 25% of the total area) associated with soils enriched in organic matter and of fine grain size. The degree of soil erodibility in the Bouregreg watershed can, thus, be explained by the variability of the textural characteristics and the organic composition of the surface soils.

The geomorphology of the study area contributes significantly to soil erosion through slope length (L) and slope steepness (S). The LS factor distribution map according to the USLE and RUSLE models, shows very variable values with an average for the whole basin estimated at 3 (Fig.7). Overall, this variation is found to be related to its essentially hilly topography and medium altitude plateaus, characterized by relatively low slopes with a percentage that exceeds 90%. The highest values are found in the most rugged and steep parts of the basin, especially, the central part and upstream of the basin representing less than 10% of the total area.

In soil erosion studies, the vegetation cover factor (C) is highly correlated to the land use/ land cover practice, because of its dependence on crop rotation, agri-cultural practice, vegetation canopy, surface roughness, and sub-surface biomass. In our study area, the land cover map shows that the area which are most vulnerable to erosion are attributed to the bare land-use types, which represent almost 20% of the total sub-watersheds: Ain loudah, Sidi Mohamed Cherif, Grou, and Bouregreg (Fig. 9). The distribution of the C factor throughout the Bouregreg watershed shows values ranging between 0 and 1. Protection classes $C < 0.16$ covers 75% of the watershed area with a well-protected vegetation cover rate. These values are located in areas covered by forests and agricultural and arboricultural zones. The remaining 25% of the area appears to have low to very low protection ($0.16 \leq C \leq 1$) and generally corresponds to bare soil, built-up and water land cover types.

Support practice factor (P) is one of the important factors that play a vital role in controlling soil erosion by minimizing its potential hazard. In our study, no significant anti-erosive technic is practiced, the value of 1 was assigned to the P factor in the entire watershed area.

The numerical superposition of the different water erosion parameters calculated according to the USLE and RUSLE equations enabled us to produce thematic maps for assessing soil losses in the four sub-watersheds of Bouregreg. Concerning the soil erosion water risk, the results of the application of the RUSLE model revealed that 89.4% of the study area experienced a low risk of erosion, 8.4% medium risk, and 2.2% a high to very high risk (Tab. 9). According

to the USLE model, the results also show that 92.7% of the study area experienced low risk of erosion, 3.68% medium risk, and 3.6% a high to very high risk (Tab. 10).

The comparison of water erosion rates calculated by the RUSLE and USLE methods in the Bouregreg sub-watersheds, showed that these rates remain rather low compared to those found by other authors in various Moroccan watersheds (Sadiki *et al.* 2004, Tahiri *et al.* 2014, 2017, Khali Issa *et al.* 2016, Chadli 2016, El Jazouli *et al.* 2019). In addition, the results we find in this work are relatively close to those found

in the same watershed by other authors, mainly Lehlou (1971) (1.85 t/h/year), Lehlou (1986) (3.70 t/h/year) and Mahé *et al.* (2014) (2.70 t/h/year). The bivariate analysis of the erosion rate estimated by USLE and RUSLE methods show also a significant positive correlation (Fig.12). These results place the Bouregreg watershed in the class of basins with low water erosion rate (Maleval 2014). However, the rates of sediments retained by the dam, estimated at more than 1.109.166 t/year, represents a non-negligible value which must be taken into account in the sustainability of the availability of the water resource of the SMBA dam.

INTRODUCTION

A l'échelle mondiale, les sols jouent un rôle primordial dans les équilibres et les préservations des écosystèmes terrestres. C'est un patrimoine et une ressource naturelle peu ou lentement renouvelable et nécessaire à la subsistance et au développement de l'humanité. Cependant ces sols sont de plus en plus menacés par des facteurs naturels et anthropiques, responsables de leur dégradation ou même de leur stérilisation irréversible et définitive. En effet, l'érosion hydrique, les exploitations agricoles excessives, la déforestation des terres, les polluants et le changement climatique, représentent les principaux phénomènes à effet direct et qui sont aggravés par la croissance démographique sous des contraintes géopolitiques (Lal *et al.* 2000, Bates *et al.* 2008, Pandey *et al.* 2009, Lammadalena 2010, Paroissien *et al.* 2015, Borrelli *et al.* 2017).

Au Maroc, plusieurs facteurs naturels et anthropiques favorisent le déclenchement des processus d'érosion hydrique notamment l'agressivité climatique, l'irrégularité des précipitations et une topographie collinaire et montagneuse (25 % du territoire national) conjuguées à une absence de protection végétale et des substrats géologiques fragiles (Ait Fora 1995, Rouichi 1996, Rahhou 1999, Sadiki *et al.*, 2009, Remini *et al.* 2009, El Garouani *et al.* 2010, Khali Issa *et al.* 2016, El Mouatassime *et al.* 2019). Les pertes annuelles de sols dues à l'érosion hydrique sont estimées à 100 millions de tonnes, ce qui représente un coût de 10 milliards de dirhams (Sadiki *et al.* 2004) et 50 millions de m³ d'eau perdus par l'envasement des barrages, évalués d'une perte financière estimée à 150 millions de dh/an (PNABV 1995). Afin d'atténuer ce phénomène, des études de quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation dans les bassins versants marocains ont été menées ces dernières années (Tahiri *et al.* 2014, 2017, Faleh & Maktite 2014, Yjjou *et al.* 2014, Elaloui *et al.* 2017, Argaz *et al.* 2019, Bouhlassa & Bouhsane 2019, El Jazouli *et al.* 2019, Markhi *et al.* 2019, Ezzaouini *et al.* 2020). Ainsi, plusieurs méthodes et modèles de quantification des pertes de sol par érosion hydrique ont été appliqués. Ces méthodes incluent : le modèle WEPP (Water Erosion Prédiction Project) à base physique de Flanagan & Nearing (1995) et l'équation semi-empirique SWAT (Soil and Water Assessment Tools) d'Arnold *et al.* (1998). D'autre part, plusieurs études d'érosion par la susceptibilité magnétique (Thompson *et al.* 1980) et les radionucléides ont été effectuées dans plusieurs régions du monde (Bunzl *et al.* 1988, Ritchie & Machenry 1990, Xinbao *et al.* 2003, Zhang 2017) et au Maroc (Benmansour *et al.* 2000, Bouhlassa *et al.* 2000, Damnati *et al.* 2006, Sadiki *et al.* 2007, Zouagui 2010, Damnati *et al.* 2010). Enfin l'équation empirique USLE (Equation Universelle de Perte en Sol) de Wischmeier & Smith (1978) avec la version révisée RUSLE de Renard *et al.* (1997) et modifiée MUSLE par Renard *et al.* (1991) sont également utilisées dans la quantification de l'érosion hydrique.

Au nord-ouest du massif central marocain, le bassin-versant du Bouregreg montre d'importants processus d'érosion à l'origine d'une dégradation du sol et de transport solide, causés par des facteurs climatiques, physiques et géomorphologiques (Laouina *et al.* 2010, El Hadraoui 2013, Mahé *et al.* 2013b, Moussebbih *et al.* 2019). L'objectif de cette étude est de mettre en place un modèle d'évaluation du risque d'érosion des sols dans le bassin-versant du Bouregreg, basé sur le calcul numérique des facteurs des pertes annuelles en sol en utilisant les équations universelles empiriques USLE et RUSLE. Egalement, il est question d'estimer le taux de sédiments érodés et transportés dans la totalité du bassin et des sous-bassins et leur contribution potentielle à l'envasement du Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA).

ZONE D'ETUDE

Le bassin-versant du Bouregreg se situe dans la partie Nord-Ouest du Maroc, avec une superficie d'environ 10 000 km² qui inclut également la zone du barrage SMBA. Il se trouve limité au nord par le bassin de l'Oued Sebou, au sud et sud-ouest par le bassin de l'Oued Oum Er-Rbia et les bassins versants des Oueds côtiers (Cherrat, Ykem, N'Fifikh et Malleh), et s'ouvre à l'ouest vers l'océan Atlantique. Il intègre quatre sous-bassins: Bouregreg, Grou, Ain Loudah et Sidi Mohamed Cherif (Tab.1). Le cours du Bouregreg a été modifié par la construction en 1974 du Barrage SMBA d'une hauteur de 97,5 m et d'une capacité de 446 millions de m³ jusqu'en 2005. Passé à une hauteur de 105 m suite à des travaux de surélévation du barrage en 2006, sa capacité a été portée à 1025 millions de m³ (environ 31% de l'eau potable produite au Maroc) (ABHBC). Il dessert en eau douce près de 8 millions d'habitants entre Kenitra et Casablanca. En plus de l'augmentation démographique associée à l'évolution socio-économique de la région et de la diminution des précipitations depuis 1979, ce barrage voit sa capacité de stockage en eau réduite régulièrement par le comblement de sa retenue par les sédiments, causant ainsi de graves préjudices à l'économie régionale et même à l'échelle nationale (Moguedet *et al.* 1994, Benzha *et al.* 2012).

Climat et réseau hydrographique

Sur le plan climatique, le bassin-versant du Bouregreg constitue un espace privilégié au Maroc, en effet il se situe dans la partie humide du pays avec un climat de type méditerranéen qui est passé de semi-humide à semi-aride depuis quelques décennies (Driouech *et al.* 2010, Khomssi *et al.* 2016). Les précipitations moyennes annuelles varient de 450 mm/an vers Rabat, pour atteindre près de 750 mm/an en altitude (Oulmès). Ces précipitations sont souvent agressives notamment sur les fortes pentes (Mohsine 2009). Les températures moyennes annuelles varient entre 15 et 25°C et sont fortement influencées par les courants chauds en période sèche. Les températures moyennes maximales pendant l'été (juillet et août) varient entre 30 et 34°C (Marghich 2004, Laouina *et al.* 2010) (Fig. 1).

Table 1. Caractéristiques des quatre sous-bassins étudiés.
 Table 1. Characteristics of the four studied sub-catchments.

Nom Sous-bassins	Surface (km ²)	Nom Stations	précipitations moyennes annuelles	Lambert Coordinats	
				X	Y
Bouregreg	3663	AguibatEzziar	459	394550	368150
		LallaChafia	439	408400	345650
		Tsalat	515	441300	303800
Grou	3505	Ras El Fathia	392	394250	351800
		Ouljet Haboub	393	420200	279300
Ain Loudah	699	Ain Loudah	390	373750	329150
S.M.Cherif	648	S. M. Cherif	383	385850	328200

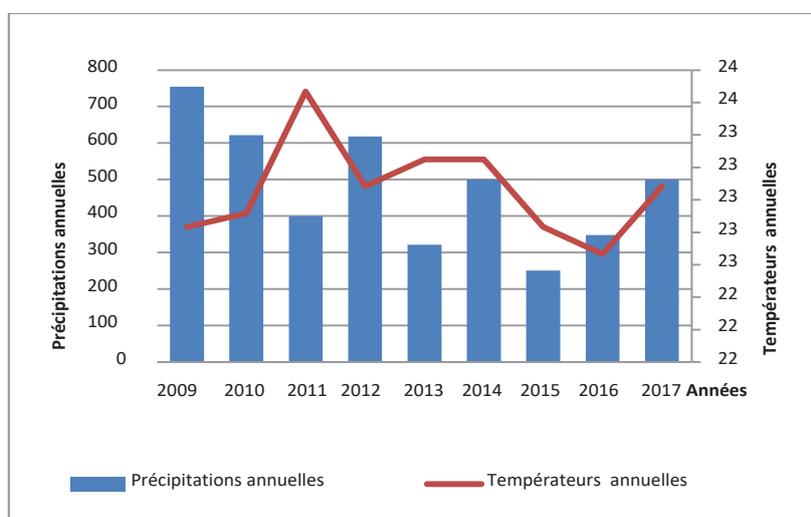


Figure 1. Evolution des précipitations et des températures annuelles sur la zone d'étude pour la période 2009–2017.

Figure 1. Annual precipitation and temperature trends in the study area during the period 2009–2017.

Le bassin versant du Bouregreg est caractérisé par une agriculture essentiellement pluviale dominée par la céréaliculture. Cette agriculture est fortement corrélée à la répartition saisonnière de la pluviométrie (Mahé *et al.* 2012, Tra Bi *et al.* 2013, Goussot *et al.* 2014). Cependant, la dynamique des précipitations, depuis les années 1970, rend de plus en plus aléatoire cette agriculture pluviale. Ce bassin est défavorisé en raison de ses conditions hydrogéologiques constituées essentiellement de formations géologiques imperméables d'âge primaire. Cette structure géologique ne favorise pas le développement de l'agriculture irriguée.

Le réseau hydrographique du bassin s'articule autour de deux principales rivières, l'Oued Bouregreg et l'Oued Grou, qui drainent respectivement une superficie de 4000 km² et de 3600 km². En plus de ces deux cours d'eau majeurs, s'ajoutent l'Oued Korifla de 1900 km², affluents de l'Oued Grou, et l'Oued Akrech de 150 km² qui rejoignent le Bouregreg peu avant l'estuaire après le barrage SMBA (Cherkaoui 2006, SIGMED 2010) (Fig.2).

Cadre géomorphologique et géologique

Sur le plan géomorphologique, le bassin-versant du Bouregreg présente une topographie plane ondulée et rompue par des vallées encaissées des oueds côtiers (Cherrat, Ykem, N'Fifikh et Malleha). Les altitudes décroissent de plus de 1500

m jusqu'à la mer d'Est en Ouest. Le bassin est essentiellement constitué de collines et de plateaux imperméables dont la couverture végétale est assez dense, mais diminuant vers le centre-sud (Fig. 3).

De point de vue géologique, le bassin-versant du Bouregreg présente une grande diversité aussi bien géochronologique que lithologique, avec une nette prédominance des formations schisteuses, gréseuses et quartzitiques généralement d'âge primaire (Ordovicien, Silurien, Dévonien et Carbonifère) (Fig. 4). Les formations granitiques, calcaires et basaltiques s'étendent quant à elles sur de plus faibles surfaces (Beudet 1969). Ces formations géologiques répondent différemment à l'érosion hydrique selon leur dureté, leur cohésion et leur porosité (Poncet 1981). Les grès et les quartzites du bassin constituent la majeure partie des crêtes rocheuses bien dégagées dans le paysage, alors que les schistes très vulnérables à l'érosion sont fortement disséqués par le réseau hydrographique. Les vallées sont très encaissées avec des terrasses très étroites. Les granites et les roches métamorphiques y affleurent en plusieurs massifs qui drainent des régions plus humides vers les hauteurs. Des calcaires, d'âge essentiellement Dévonien, apparaissent dans des secteurs localisés de faible ampleur et les dépôts quaternaires sont très limités en raison de l'étroitesse des vallées (PDAIRE 2011).

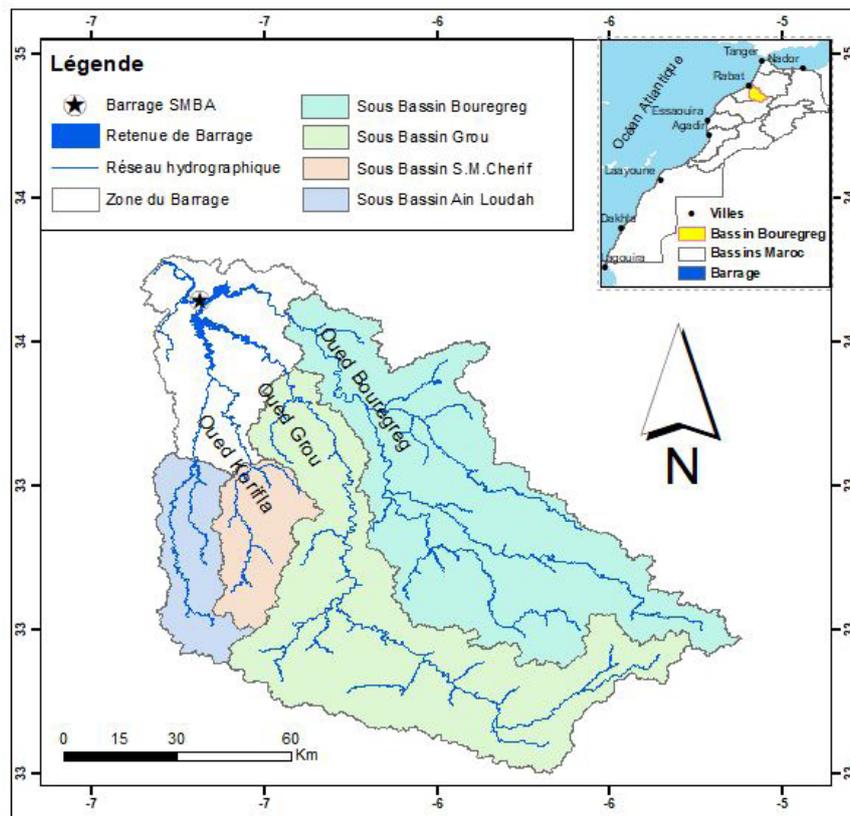


Figure 2. Situation géographique et réseau hydrographique du bassin-versant de Bouregreg.

Figure 2. Geographical location and hydrographic network of the Bouregreg watershed.

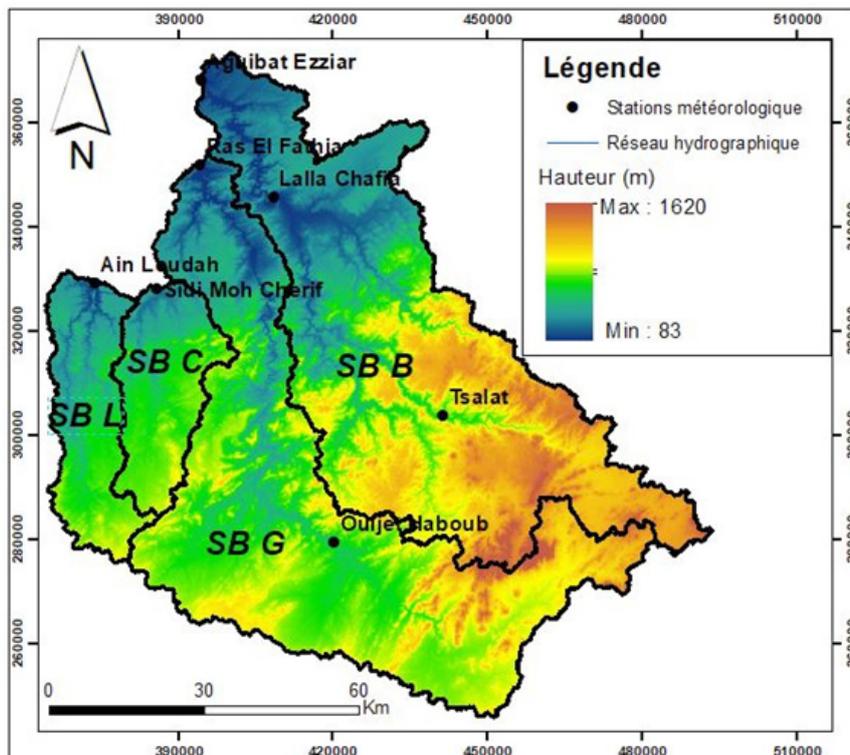


Figure 3. Carte des altitudes des quatre sous-bassins du Bouregreg (SB B : Sous Bassin Bouregreg, SB G : Sous Bassin Grou, SB L : Sous Bassin Ain Loudah et SB C : Sous Bassin S.M.Cherif).

Figure 3. Altitude map of the four Bouregreg sub-catchments (SB B : Bouregreg sub-catchment, SB G : Grou sub-catchment, SB L : Ain Loudah sub-catchments and SB C : S.M.Cherif sub-catchments).

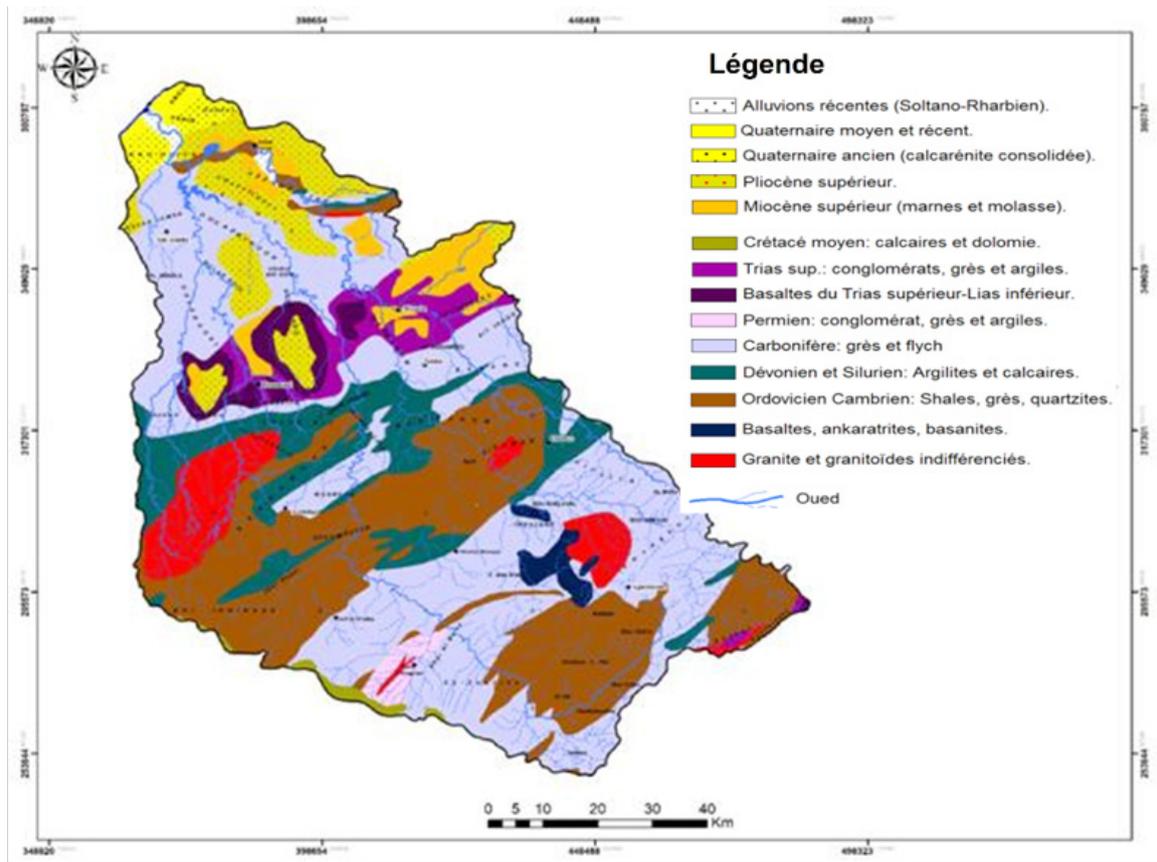


Figure 4. Carte géologique schématique du bassin-versant du Bouregreg (source : carte géologique du Maroc au 1/1000.000) (modifiée, SIGMED 2010).

Figure 4. Schematic geological map of the Bouregreg watershed (source : geological map of Morocco at 1/1000,000) (modified, SIGMED 2010).

METHODOLOGIE

La disponibilité et la nature des données numériques (géologie, topographie, climatologie, pédologie, occupation du sol, etc.), utilisées dans le calcul des processus d'érosion et de sédimentation dans les quatre sous-bassins du Bouregreg, se prêtent bien à l'utilisation des équations universelles de perte en sol USLE et RUSLE (SIGMED 2010, Mahé *et al.* 2013b). Ces différents types de données ont été intégrés, répertoriés et traités numériquement dans un système d'information géographique. Des logiciels de traitement d'images ont été également utilisés (QGIS, Erdas, Envi) pour la délimitation des sous-bassins et l'extraction de leurs propriétés géométriques (la superficie, l'altitude moyenne...). Un modèle numérique de terrain (MNT) à résolution 30 m, téléchargé à partir de la base de données NASA Earthdata (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), a été utilisé comme base pour l'extraction du réseau hydrographique et le calcul numérique des différentes cartes thématiques du bassin.

Le modèle USLE

C'est l'équation empirique la plus utilisée pour une estimation globale des pertes dues au processus de l'érosion de surface (Wischmeier & Smith, 1978, Millward & Mersey, 1999). En fonction des régimes pluviométriques, topographie, sol, occupation du sol et pratiques anti-érosives, le modèle s'exprime ainsi par la relation :

$$A_{USLE} = R K LS C P$$

Avec :

A : Taux de perte en sol (t/ha/an), R : Facteur d'érosivité des pluies (MJ.mm/ ha.h.an), K : Facteur d'érodibilité du sol (t.h/ha.MJ.mm), LS : Facteur topographique (adimensionnel), C : Facteur de couverture végétale (adimensionnel), P : Facteur des pratiques antiérosives (adimensionnel).

Le modèle RUSLE

Le modèle RUSLE (Renard *et al.* 1997) est la version révisée du modèle USLE. Il possède de nombreuses modifications pour l'estimation de l'érosion hydrique en tenant compte du ruissellement et en introduisant un nouveau terme d'érosivité pluie-ruissellement. RUSLE prévoit la perte en sol moyenne annuelle en fonction de cinq facteurs d'érosion et maintient la même équation empirique que le modèle USLE :

$$A_{RUSLE} = R K LS C P$$

Facteur d'érosivité des précipitations (R) selon RUSLE et USLE

L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier nécessite la connaissance des énergies cinétiques et l'intensité moyenne sur 30 minutes des gouttes de pluie de chaque averse. En raison du fait que les données d'énergie cinétique et d'intensité des pluies sont difficiles à obtenir, des formules alternatives ont été développées par plusieurs auteurs (Kalman 1967, Arnoldus 1980, Rango & Arnoldus 1987) nécessitant

des données mensuelles et annuelles pour la détermination du Facteur R.

Nous avons opté pour la formule Rango & Arnoldus (1987), qui a été largement appliquée à des bassins versants marocains et a donné des résultats satisfaisants (Sadiki *et al.* 2004, El Garouani *et al.* 2008, Markhi *et al.* 2015, Khali Issa *et al.* 2016). L'expression de la formule se présente comme suit :

$$\log R = 1.74 \log \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P} + 1.29$$

Où R : l'érosivité des précipitations en (MJ / ha mm / h), Pi : les précipitations mensuelles (mm) et P : les précipitations annuelles (mm).

Pour le calcul du facteur d'érosivité R, on a eu recours à une base de données des précipitations qui couvre une période de 20 ans (1997-2018), obtenues des enregistrements de sept stations météorologiques réparties au niveau du bassin-versant du Bouregreg (Tab. 1).

Facteur d'érodibilité des sols (K)

Le facteur K exprime la vulnérabilité du sol à être érodé pendant les événements pluvieux (Renard *et al.* 1997). Ce facteur est déterminé en fonction de quatre paramètres : le paramètre de texture (% limon, sable, argile) et le pourcentage de matière organique. Dans notre zone d'étude, en absence d'une carte précise et complète des sols, nous avons utilisé la carte numérique des sols (Digital Soil Map of the World), version 3.6 de la FAO-UNESCO, produite en version papier à l'échelle 1: 5 millions.

La carte numérique des sols de la FAO montre 4931 unités de cartographie constituées d'associations de sols, qui sont

des mélanges de différents types de sols, classés selon la légende FAO-UNESCO, qui définit un total de 106 unités de sol sur la base de la présence de propriétés diagnostiques et 4 non-unités de sol. Pour les unités de sol, des estimations sont fournies des propriétés physiques (% sable, % limon, % argile, densité apparente) et chimiques (pH, carbone organique, CEC, saturation en base, rapport C / N, teneur en CaCO₃) dans la couche arable et le sous-sol.

Dans cette étude, la valeur de l'érodibilité du sol a été calculée en utilisant les formules suivantes proposées par Masson (1971) et Williams (1995).

$$K_{usle} = \int_{csand} \times \int_{cl-si} \times \int_{orgC} \times \int_{hisand}$$

Où \int_{csand} exprime la teneur en sable, \int_{cl-si} représente le taux d'argile-silt, \int_{orgC} le taux en matière organique, \int_{hisand} traduit une teneur élevée en sable.

$$\int_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \times e^{-0.256 \times m_s \times \left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)} \right)$$

$$\int_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$\int_{orgC} = \left(1 - \frac{0.25 \times orgC}{orgC + e^{[3.72 - 2.95 \times orgC]}} \right)$$

$$\int_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + e^{[-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)]}} \right)$$

Où m_s : pourcentage en sable, m_{silt} : pourcentage en limon, m_c : pourcentage en argile, $orgC$: pourcentage en carbone organique (Tab.2).

Tableau 2. Estimation des paramètres du facteur K des différents types de sol du bassin versant de Bouregreg. LC : chromic luvisols, WE : Eutric Planosols, V : Vertisols, KK Calcic Kastanozems, BK : calcic cambisols.

Table 2. Estimation of K-factor parameters of different soil types at the Bouregreg watershed. LC : Chromic Luvisols, WE : Eutric Planosols, V : Vertisols, KK : Calcic Kastanozems, BK : Calcic Cambisols.

Soil sample	m_s (Sand) Top soil %	m_{silt} (Silt) Top soil %	m_c (Clay) Topsoil %	org C Organic carbon %
LC	64,3	12,2	23,5	0,63
WE	76,6	10,3	13,1	0,46
V	24,6	14,4	61	0,68
KK	16,5	48,9	34,4	1,50
BK	81,6	6,8	11,7	0,44

Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique est un indice qui représente la morphologie du terrain. Il se calcule à partir de la longueur (L) et l'inclinaison (S) de la pente qui influencent considérablement le taux d'érosion du sol (Roose 1977, Roose 1994). Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont en général à l'origine d'une érosion importante. Ces valeurs dépendent de la géologie régionale, la nature des sols, et de la protection du sol par la couverture végétale (Stone & Hilborn 2000). Le facteur topographique a été calculé à partir de la conjugaison de l'inclinaison et longueur de pente, en se basant sur un modèle numérique de terrain (résolution de 30 m), dont les données sont disponibles sur le web (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Nous avons utilisé deux formules de calcul selon les modèles suivants :

Facteur (LS) selon USLE

$$LS = \left[\frac{Q_a M}{22.13} \right]^m \times (0.065 + 0.045 \times S_g + 0.0065 \times S_g^2)$$

Avec = grille d'accumulation de flux, M: taille de la grille (x y), m: exposant qui dépend de la pente (m = 0.5 si la pente est > 5%, m = 0.4 si la pente est de 3,5 à 4.5 %, m = 0.3 si la pente est de 1 à 3 %, m = 0.2 si la pente est < 1%) la pente de la grille en pourcentage (Wischmeier and Smith 1978).

Facteur (LS) selon RUSLE

$$LS = 0.10 + 0.21 \times S \times \frac{3}{4}$$

Avec S: la pente de la grille en degré (David 1987)

Facteur de couverture végétale (C)

Dans les processus d'érosion hydrique, le facteur couverture végétale représente la densité du couvert végétal dans un bassin donné, sa valeur varie de 0 à 1 selon les différents types de couverture de la surface (Kalman 1967, Shi *et al.* 2002, Adediji *et al.* 2010). Selon Wischmeier & Smith (1978), le facteur C compare les pertes en sol entre les terres bien couvertes naturellement par une végétation dense, et puis les terres soumises à une gestion spécifique. Dans le bassin-versant du Bouregreg, le couvert végétal est formé essentiellement de forêts de chêne liège, matorrals de chêne vert et agriculture pluviale marginale (Tra Bi *et al.* 2013). La détermination du facteur C dans les sous-bassins versants a été élaborée par la classification de l'image satellitaire multi-spectrales Landsat OLI-8 de 2017 (Fig. 3).

Facteur des pratiques antiérosives P

Le facteur P représente le degré d'intervention humaine à réduire le potentiel d'érosion du ruissellement. Les valeurs P varie de 0 à 1, en étant la valeur 0 représente un très bon milieu de résistance à l'érosion par une intervention humaine et la valeur 1 montre une absence de pratique antiérosive. Dans le bassin versant du Bouregreg, l'absence des pratiques anti-érosives nous a permis de considérer le Facteur P égal à 1.

RESULTATS ET DISCUSSION**Description et cartographie des facteurs d'érosion hydrique****Facteur d'érosivité de pluie(R)**

Pour le calcul du facteur d'érosivité de pluie R dans les quatre sous-bassins versants du Bouregreg, on a eu recours au

Tableau 3. Valeurs moyennes des précipitations mensuelles, annuelles (mm) et de facteur R pour la période 1997–2017.

Table 3. Average values of monthly and annual precipitation (mm) and R-factor for the period 1997–2017.

Station	sept.	oct.	nov.	dec.	jan.	fev.	mar.	avr.	mai	juin	juil.	aout	total	R
Aguibat Ezziar	15,08	44,01	80,20	69,94	68,25	60,90	51,14	34,68	22,29	7,99	1,66	3,06	459,21	77,27
Lalla Chafia	15,65	43,83	73,17	68,04	66,31	55,16	49,11	32,87	22,24	8,18	1,61	3,76	439,94	73,79
Ras El Fathia	15,65	43,22	62,99	56,54	54,41	47,14	52,75	30,58	19,86	5,63	1,31	2,70	392,79	67,07
Ain Loudah	13,69	39,78	79,13	54,71	60,66	46,87	43,02	31,22	16,40	3,73	0,18	0,94	390,33	71,17
S. M. Cherif	14,18	40,52	67,60	61,19	59,04	47,03	40,85	30,74	16,41	4,02	0,36	1,23	383,16	68,73
Tsalat	21,30	46,79	89,80	78,67	68,92	60,37	54,53	31,97	35,00	11,44	8,46	8,20	515,44	79,87
Ouljet Haboub	18,46	42,26	63,53	55,91	48,34	45,02	46,47	30,31	24,83	7,66	4,40	6,51	393,71	63,81

Tableau 4. Répartition des pourcentages des classes du facteur R au niveau du bassin de bouregreg.

Table 4. Percentage distribution of R factor classes in the Bouregreg basin.

Classes R	Surface ha	Surface %
63-68	164465,78	19,31
68-70	269818,79	31,68
70-75	333136,94	39,11
75-79	84340,17	9,90

calcul numérique par interpolation des données disponibles dans les stations de mesures au niveau de chaque sous-bassin. La pluviométrie annuelle moyenne est de 425 mm, calculée en rapportant les valeurs moyennes annuelles des précipitations mesurées entre 1997 et 2017 dans les stations de mesures du bassin versant sur le nombre des années. Le facteur d'érosivité (R) montre des valeurs allant de 63,81 à 79,86 (MJ. mm/ha.h.an) (Tab. 3).

La distribution spatiale de ce facteur montre des valeurs maximales représentées par la classe 75-79, occupant une superficie de 9.9 % de la totalité du bassin (Tab. 4). Ces valeurs apparaissent principalement à l'est et au nord-est du bassin et coïncident généralement avec les altitudes les plus élevées et des quantités de précipitations moyennes importantes. Une diminution des valeurs du paramètre R est bien marquée dans l'extrême sud et le sud-est du bassin où les altitudes et les précipitations décroissent progressivement (Fig. 5). La majorité du territoire du bassin-versant est soumise à une agressivité pluviale moyenne à élevée. En effet plus de 70% des valeurs de R dépassent la valeur de 70, ce qui donne aux précipitations sur le bassin versant du Bouregreg un pouvoir érosif important.

Des travaux antérieurs réalisés sur des bassins versants marocains, montrent que les valeurs estimées du facteur R sur le bassin versant du Bouregreg sont plus importantes que celles obtenues dans le bassin versant de N'fis au Haut Atlas occidental (R = 41.40 à 57.28 MJ. mm/ha.h.an) (Markhi *et al.* 2015) et dans le bassin de Boussouab situé dans la partie orientale du Rif (R = 31,2 à 60 MJ. mm/ha.h.an) (Sadiki *et al.* 2004). Par contre, d'autres bassins versants marocains, montrent des valeurs de R supérieurs à celles du bassin versant du Bouregreg, c'est le cas des bassins de Telata dans le Rif occidental (215 et 228 MJ. mm/ha.h.an) (Merzouk & Dahman, 1998), d'Oum Er-Rbia au Moyen Atlas (R=67 à 119 MJ.mm/ha.h.an (Yjjou *et al.* 2014), de l'Oued Lebenau dans le Rif central (R=43 à 87,56 MJ.mm/ha.h.an) (Rahhou 1999) et du bassin de Kalaya dans le Rif Nord Occidental (R=94,73 à 95,27 MJ. mm/ha.h.an) (Khali Issa *et al.* 2016) entre autres bassins.

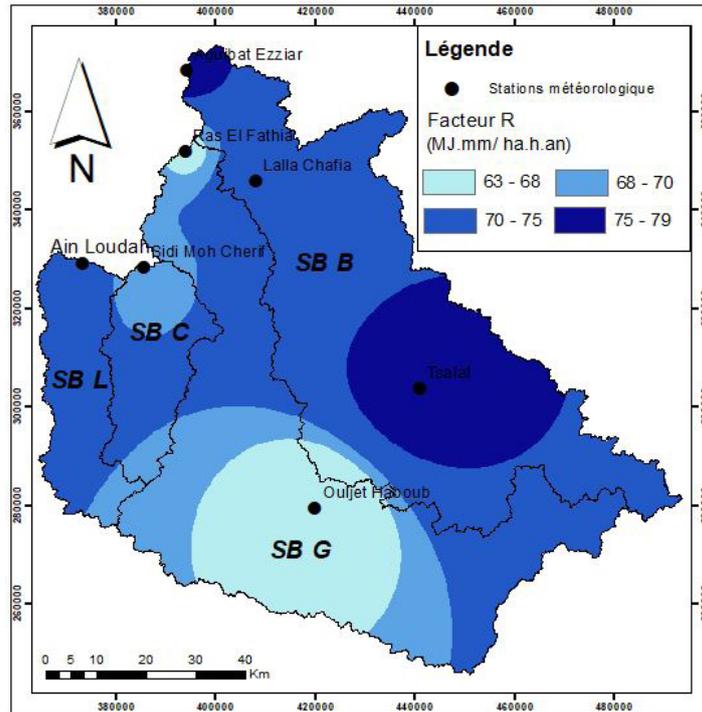


Figure 5. Distribution spatiale des principales valeurs du facteur R au niveau du bassin versant du Bouregreg.

Figure 5. Spatial distribution of the main values of the R factor at the Bouregreg watershed.

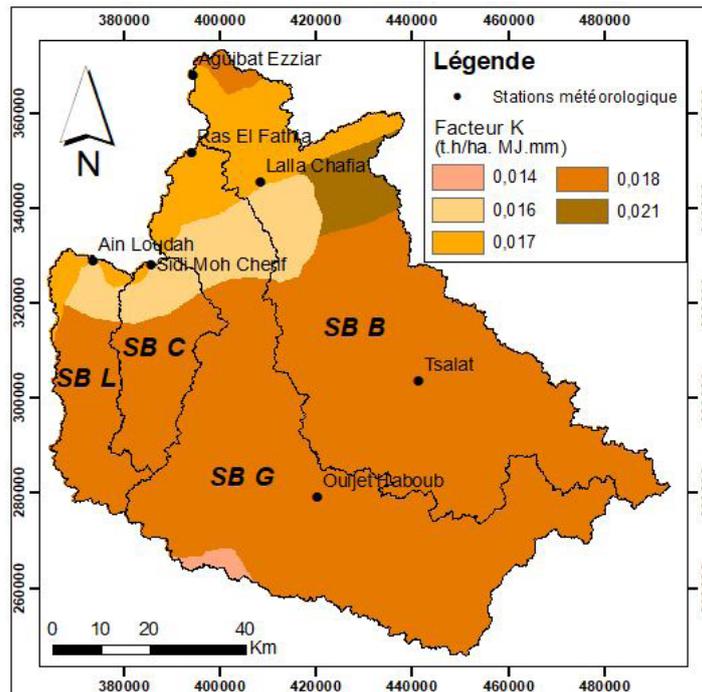


Figure 6. Distribution spatiale des principales valeurs du facteur K au niveau du bassin versant de Bouregreg.

Figure 6. Spatial distribution of the main K-factor values at the Bouregreg watershed.

Facteur d'érodibilité des sols (K)

La distribution spatiale du facteur K dans les 4 sous-bassins montre des valeurs oscillantes entre 0,014 et 0,021, avec une moyenne de 0,018 occupant plus de 78% de la superficie totale du bassin versant de Bouregreg (Tab. 6 et Fig. 6). Les valeurs obtenues du facteur K indiquent qu'une grande proportion des sols montre une érodibilité faible à moyenne, représentée par des sols de type *ChromicLuvisols*

riches en sables grossiers et avec des teneurs légèrement faibles en matière organique. Le reste du bassin présente une forte prédisposition à l'érosion (>20%) associée à des sols de types *Vertisols*, *EutricPlanosols* et *calcic*, généralement enrichis en matière organique et de granulométrie fines (Tab. 5-6). Le degré d'érodibilité des sols du bassin versant du Bouregreg, pourrait donc s'expliquer par la variabilité des caractéristiques texturales et de la composition organique des terrains superficiels.

Facteur topographique (LS)

La carte de répartition du facteur LS selon les deux modèles utilisés USLE et RUSLE montrent des valeurs très variables regroupées en quatre classes allant de 0 à plus de 9, avec une moyenne pour tout le bassin estimée à 3 (Fig. 7). Globalement, cette variation des valeurs du facteur LS au niveau du bassin versant du Bouregreg est liée à sa topographie essentiellement

collinaire et de plateaux de moyenne altitude caractérisés par des pentes relativement basses avec un pourcentage qui dépasse 90%. Les valeurs les plus élevées de ce facteur se localisent dans les parties les plus accidentées et escarpées du bassin qui peuvent atteindre 1620 m d'altitude, notamment à l'amont et un peu moins dans la partie centrale du bassin représentant moins de 10% de la superficie totale (Tab. 7).

Table 5. Estimation du facteur K pour les différents types de sol au niveau du bassin versant de Bouregreg. ($K = K_{USLE} \times 0,1317$).

Table 5. Estimation of the K-factor for the different soil types at the Bouregreg watershed. ($K = K_{USLE} \times 0.1317$).

Type de sol (carte numérique du sol du monde)	f_{csand}	f_{cl-si}	f_{orgC}	f_{hisand}	K_{USLE}	K
ChromicLuvisols (Lc)	0,200	0,724	0,977	0,983	0,139	0,018
EutricPlanosols (We)	0,200	0,781	0,989	0,850	0,131	0,017
Vertisols (V)	0,201	0,608	0,972	0,999	0,119	0,016
CalcicKastanozems(Kk)	0,234	0,852	0,811	0,999	0,162	0,021
CalcicCambisols(Bk)	0,200	0,740	0,990	0,718	0,105	0,014

Tableau 6. Répartition des pourcentages des classes du facteur K au niveau du bassin versant de Bouregreg.

Table 6. Percentage distribution of K factor classes in the Bouregreg watershed.

Classes K	Surface ha	Surface %
0,014	4843,43	0,57
0,016	72393,27	8,50
0,017	83653,29	9,82
0,018	666841,79	78,29
0,021	24012,88	2,82

Tableau 7. Répartition des pourcentages des classes du facteur LS selon les modèles RUSLE et USLE.

Table 7. Percentage distribution of K factor classes according to RUSLE and USLE models.

Classes LS	Surface ha (RUSLE)	Surface % (RUSLE)	Surface ha (USLE)	Surface % (USLE)
0 - 1	456335,53	53,59	615845,95	72,32
1 - 3	199881,62	23,47	75457,05	8,86
3 - 9	192307,56	22,58	91519,87	10,75
>9	3069,41	0,36	68748,15	8,07

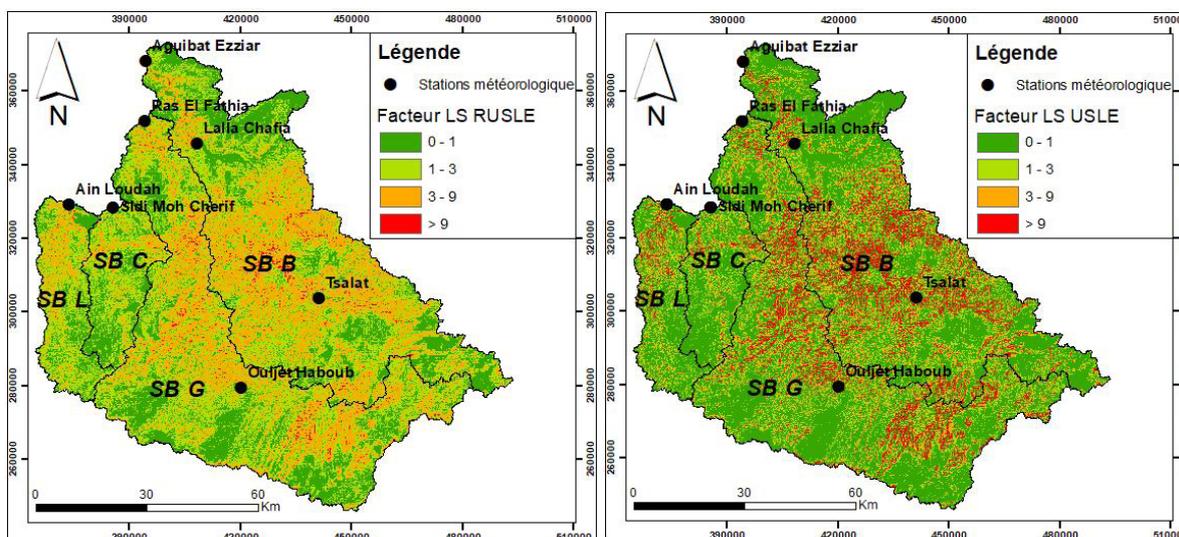


Figure 7. Cartes de distribution du facteur LS, selon les modèles RUSLE et USLE.

Figure 7. Distribution maps of the LS factor, according to RUSLE and USLE models.

Facteur de couverture végétale (C)

La carte d'occupation du sol (Fig. 8) montre que les zones les plus vulnérables à l'érosion sont attribuées aux types d'occupation des sols nus, qui représentent presque 20% de la totalité des sous-bassins : Ain Loudah, Sidi Mohamed Cherif, Grou et Bouregreg. L'exposition des versants joue un rôle important dans l'évolution de la couverture végétale. Les versants exposés au sud sont plus chauds et moins humides que ceux exposés au nord. Cela discrimine naturellement la répartition spatiale de la végétation dans les espaces de plateau et de montagne.

La carte de distribution spatiale du facteur C dans le bassin versant du Bouregreg montre des valeurs qui varient entre 0 et 1. Les classes de protection $C < 0,16$ couvrent 75% de la superficie du bassin versant, présentant un taux de couvert végétal bien protégé. Ces valeurs se localisent dans les aires couvertes par les forêts et les zones agricoles et arboricoles. Les 25% de la superficie semblent présenter une protection faible à très faible ($0,16 \leq C \leq 1$) et correspondent généralement aux sols nus, bâtis et l'eau (Fig.9, Tab.8). En général, on pourrait dire que la dégradation du couvert végétal dans le bassin versant du Bouregreg pourrait être plus importante sur les versants à forte pente exposés au sud (matorral et sol nu). Ces versants sont naturellement plus chauds et plus fragiles.

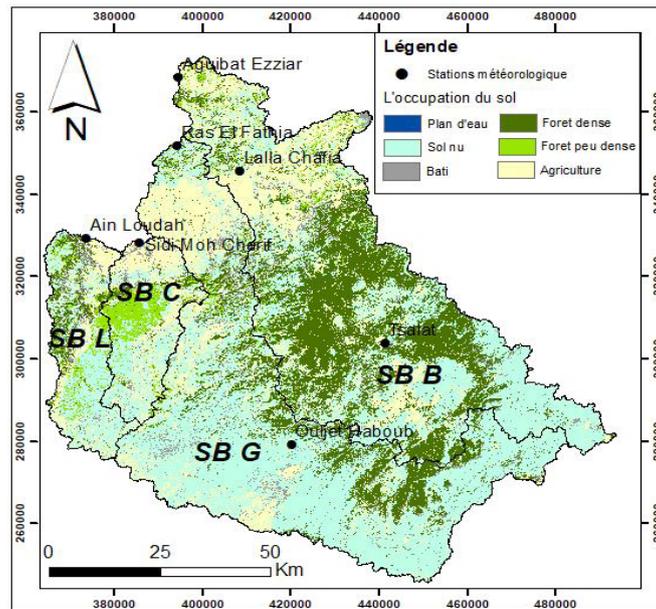


Figure 8. Carte d'occupation du sol du bassin versant de Bouregreg à partir de l'image Landsat OLI-8 de 2017.
 Figure 8. Land cover/use map of the Bouregreg watershed from the classification of the Landsat OLI-8 image of 2017.

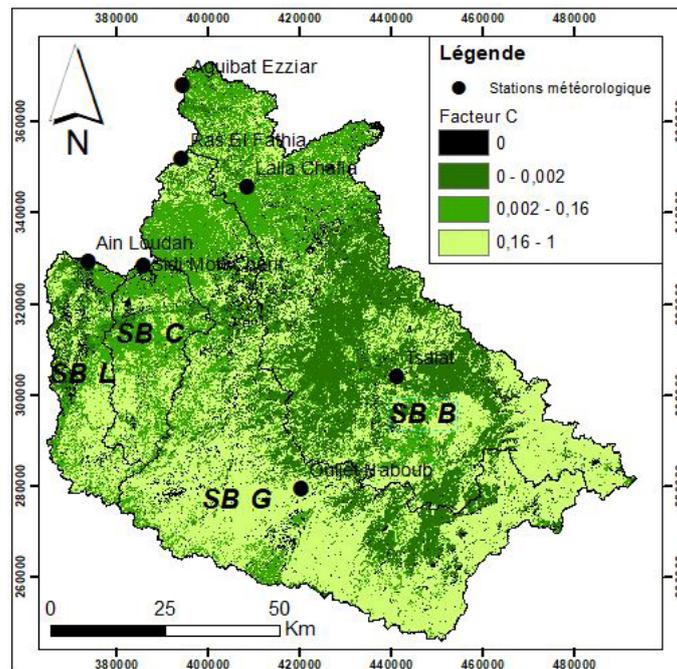


Figure 9. Distribution spatiale des valeurs du facteur C au niveau du bassin versant de Bouregreg.
 Figure 9. Spatial distribution of C-factor values in the Bouregreg watershed.

Table 8. Répartition des classes du facteur C.

Table 8. Class distribution of the C factor

Type de couvert végétal	Valeur C
Eau	0
Végétation	0,014
Sol nu	1
Forêt dense	0,001
Forêt peu dense	0,002
Bâti	0
Agriculture	0,16

Facteur des pratiques antiérosives P

Dans le bassin versant du Bouregreg, on a attribué la valeur 1 au facteur des pratiques antiérosives dans toute la zone d'étude, en raison de l'absence quasi-totale de ces pratiques dans le bassin.

Evaluation et estimation des Pertes en Sol

La superposition numérique des différents facteurs d'érosion hydrique, calculés selon l'équation RUSLE (Renard *et al.* 1997), nous a permis la réalisation de la carte synthétique d'évaluation des pertes en sol dans les quatre sous-bassins versant du Bouregreg (Fig. 10, Tab. 9). Ainsi, le sous-bassin versant de Sidi Mohamed Cherif montre des pertes en sol variant entre 0 et 12,88 t/ha/an, avec une perte moyenne de l'ordre de 0,73 t/ha/an. Au niveau du sous-bassin versant

d'Ain Loudah, ces valeurs varient entre 0 et 11,89 t/ha/an, avec une perte moyenne de l'ordre de 0,94 t/ha/an. Les pertes en sols les plus importantes sont observées dans le sous-bassin versant du Bouregreg, elles atteignent 20,91 t/ha/an, avec une perte moyenne estimée à 1,03t/ha/an, tandis que le sous-bassin versant de Grou montre des pertes en sols moyennes de l'ordre 1,60 t/ha/an avec un maximum de 17,85 t/ha/an. Selon le modèle RUSLE, les résultats montrent également que 89,4% de la zone d'étude a un faible risque d'érosion, 8,4% de risque moyen et 2,2% de risque élevé à très élevé (Fig.10 et Tab.9).

L'application du modèle USLE dans les quatre sous-bassins versants de Bouregreg montre des pertes moyennes en sol proches de celles obtenues par le modèle précédent (RUSLE) (Fig. 11, Tab. 10). Ainsi, le sous-bassin versant de Sidi Mohamed Cherif montre des pertes moyennes de l'ordre de 0,51 t/ha/an avec un maximum qui peut atteindre 47,93 t/ha/an. Au niveau du sous-bassin versant d'Ain Loudah, les valeurs maximales sont estimées à 60,87 t/ha/an, et les moyennes de l'ordre de 0,64 t/ha/an. Les pertes en sols les plus importantes sont calculées dans le sous-bassin versant du Grou (260,22 t/ha/an) avec une moyenne de l'ordre de 1,61 t/ha/an. Le sous-bassin versant du Bouregreg montre des valeurs allant jusqu'à 145,23 t/ha/an, et une moyenne estimée à 1,01 t/ha/an. En terme de risque d'érosion, l'application de ce modèle montre que 92,7% de la zone d'étude a un faible risque d'érosion, 3,68 % de risque moyen et 3,6% de risque élevé à très élevé (Fig.11, Tab.10).

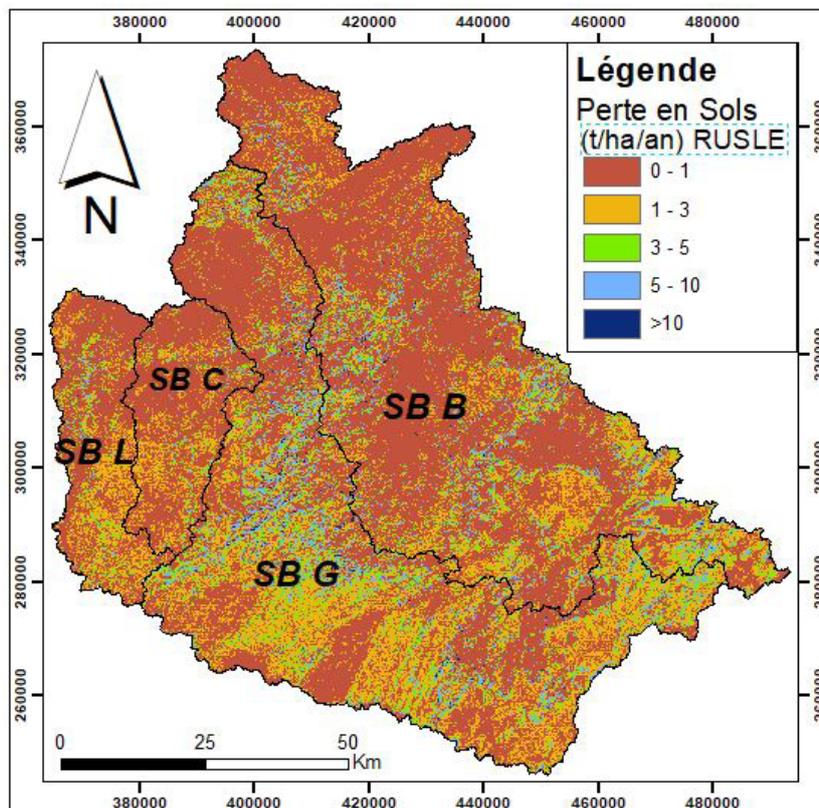


Figure 10. Carte des pertes en sol dans les quatre sous-bassins versant du Bouregreg (selon le modèle RUSLE).

Figure 10. Soil loss map in the four sub-catchments of the Bouregreg (according to RUSLE model).

Tableau 9. Classification des pertes en sol dans les quatre sous-bassins versant de *Bouregreg* calculés par la méthode RUSLE.Table 9. Classification of soil losses in the four sub-catchments of *Bouregreg* calculated by the RUSLE method.

Classe des Pertes en sol (t/ha/an)	<i>Grou</i>		<i>Bouregreg</i>		<i>Ain Loudah</i>		<i>Sidi Mohamed Cherif</i>		Risque d'érosion
	Surface (ha)	Surface %	Surface (ha)	Surface %	Surface (ha)	Surface %	Surface (ha)	Surface %	
< 3	286031	81,91	322360	88,21	64415	92,27	61759	95,55	Faible
3 – 5	74732	13,67	32468	8,88	4918	7,05	2586	4,00	Moyenne
5 – 10	14501	4,15	10202	2,79	470	0,67	289	0,45	Elevé
> 10	928	0,27	431	0,12	304	0,004	365	0,01	Très élevé
Perte en sol max (t/ha/an)	17,85		20,91		11,89		12,88		
Taux d'érosion moyen (t/ha/an)	1,60		1,03		0,94		0,73		

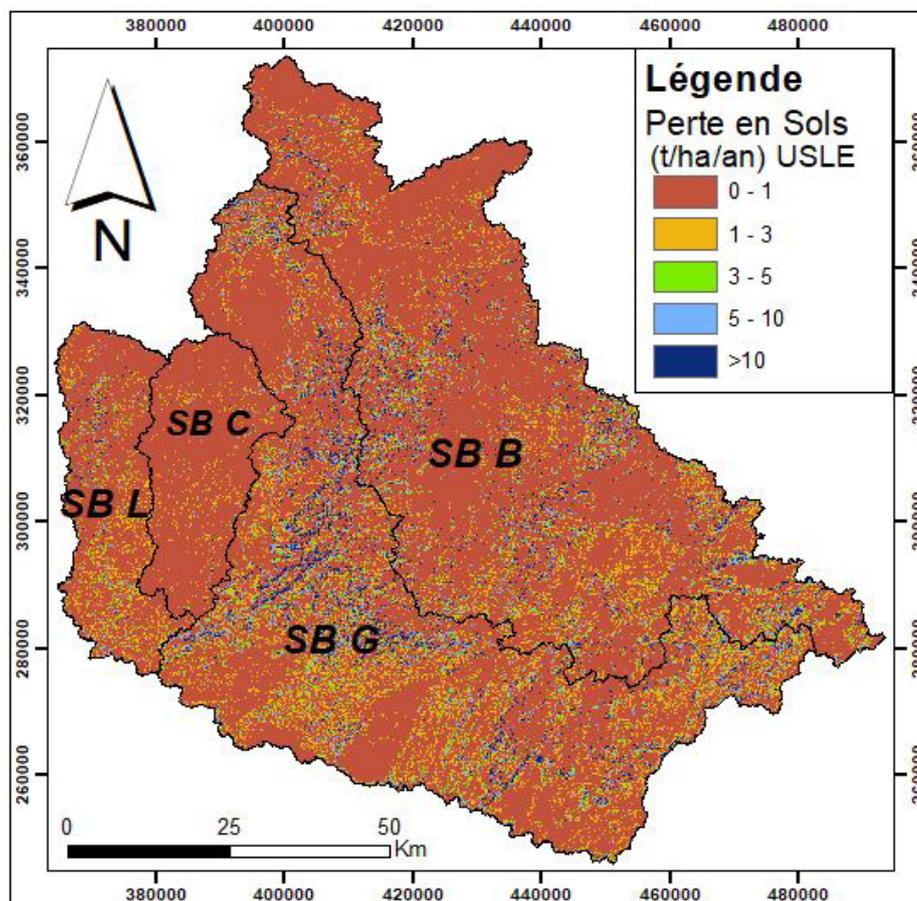


Figure 11. Carte des pertes en sol dans les quatre sous-bassins versant de Bouregreg (selon le modèle USLE).

Figure 11. Soil loss map in the four sub-catchments of Bouregreg (according to USLE model).

Tableau 10. Classification des pertes en sol dans les quatre sous-bassins versant du Bouregreg calculés par la méthode USLE

Table 10. Classification of soil losses in the four sub-catchments of Bouregreg calculated by the USLE method.

Classe des Pertes en sol (t/ha/an)	Grou		Bouregreg		Ain Loudah		Sidi Mohamed Cherif		Risque d'érosion
	Surface (ha)	Surface %	Surface (ha)	Surface %	Surface (ha)	Surface %	Surface (ha)	Surface %	
< 3	302150	86,53	332829	91,15	65855	94,34	63858	98,79	Faible
3 – 5	21460	6,15	14973	4,10	2526	3,62	565	0,88	Moyenne
5 – 10	13455	3,85	9420	2,58	1060	1,52	165	0,26	Elevé
> 10	12127	3,47	7914	2,17	363	0,52	49,3	0,08	Très élevé
Pertes en sol max (t/ha/an)	260,22		145,23		60,87		47,93		
Taux d'érosion moyen (t/ha/an)	1,61		1,01		0,64		0,51		

La lecture parallèle des cartes d'évaluation des pertes en sol dans les quatre sous-bassins versants du Bouregreg montre une distribution variable des classes d'érosion, et met en évidence l'impact cumulatif des différents facteurs de l'érosion hydrique. Les résultats de ce travail montrent que la présence d'une végétation dense (forêt) (Fig. 9), même en présence de pentes fortes (Fig. 7), minimise fortement les taux d'érosion (Fig. 10-11). Par contre les zones dénudées de végétation avec des pentes moyennes à fortes présentent un risque potentiel d'érosion plus important. Outre le couvert végétal, le phénomène d'érosion hydrique dans la zone d'étude pourrait être influencé par le facteur topographique, on constate que les zones à risque moyen à fort d'érosion suivent généralement la répartition la carte des altitudes et des pentes, c'est-à-dire qu'elles se concentrent sur des zones où la pente et l'altitude sont moyennes à fortes.

A l'échelle du Maroc, d'autres bassins versants ont été sujet d'étude du risque d'érosion hydrique avec des degrés de pertes en sols variables selon les régions. Ainsi, dans le Rif nord occidental, les bassins versants de Kalaya et de l'Oued Sania présentent des taux d'érosion moyens de 34,74t/ha/an (Khali Issa *et al.* 2016) et 47,18 t/ha/an (Tahiri *et al.* 2014, 2017) respectivement. Les bassins de l'Oued Boussouab (Rif orientale) et de l'Oued Salha (Rif centrale) montrent des pertes en sols de l'ordre de 55,53 t/ha/an (Sadiki *et al.* 2004) et 22 t/ha/an (Sadiki *et al.* 2009) respectivement. Dans la région du Gharb, le bassin versant du Sebou dont plus de 70% de sa superficie montre 10 t/ha/an (Chadli 2016). Dans le Moyen Atlas, le bassin d'Oum Er-Rbia présente selon les auteurs des taux variables allant de 58 t/ha/an (El Jazouli *et al.* 2019) jusqu'à 224 t/ha/an (Yjjou *et al.* 2014). Enfin dans le bassin de N'fis au Haut Atlas occidental, le taux d'érosion est estimé à 115 t/ha/an (Markhi *et al.* 2015).

Dans notre étude, si on compare les taux d'érosion dans les sous-bassins du Bouregreg, calculés par les méthodes RUSLE et USLE, on constate que ces valeurs restent plutôt faibles par rapport à celles trouvées dans les bassins versants marocains cités précédemment, ce qui place le bassin versant du Bouregreg dans la classe des bassins à faible taux d'érosion (Maleval 2014). Cependant le taux de sédiments transportés, estimé à 967.664 tonnes chaque année, issus des quatre sous-bassins, constitue un véritable problème de comblement du barrage SMBA (Mahé *et al.* 2013a, 2014). Ainsi, les résultats

obtenus et les cartes élaborées dans cette étude, pourraient bien contribuer à la planification des activités de conservation des sols et à la réduction de l'envasement du barrage, notamment dans les secteurs de moyenne à forte valeur de perte en sol, qui constituent plus de 75.497 ha avec un taux d'érosion de 3 à plus de 10 t/h/an.

D'autres équations empiriques d'estimation du potentiel de perte en sol ont été utilisées dans le bassin versant du Bouregreg, principalement par Ezzaouini *et al.* 2020, qui a appliqué l'équation universelle de perte en sol modifiée (MUSLE) pour prédire le transport des solides. Cette méthode est généralement conçue pour valider les prédictions des pertes annuelles moyennes de sol par l'érosion hydrique à long terme (Williams & Berndt 1976).

Pour le calcul du rendement en sédiments, Ezzaouini *et al.* (2020) ont utilisé les données des débits de ruissellement et des flux de sédiments, collectés et mesurés à l'entrée du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah (SMBA) par l'Agence du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (ABHBC). Les points de mesures concernent les stations des quatre sous-bassins versants durant les années hydrologiques 2016-2018. L'étalonnage du modèle MUSLE a été effectué à chaque station hydrologique en utilisant la méthode du pourcentage de KGE (Kling-Gupta Efficiency) (Gupta *et al.* 2009). Le calibrage des valeurs de transport solide, estimés par le modèle MUSLE montre que la méthode du pourcentage de KGE simule bien les résultats de transport solide observés (Tab.11).

La comparaison entre les valeurs moyennes de transport solide estimées par le modèle MUSLE calibré par KGE (1,46 t/ha/an) et celles estimées par les deux modèles RUSLE (1,07 t/ha/an) et USLE (0,95 t/ha/an) montrent des différences relativement faibles (Tab. 12). En plus l'analyse bivariée des valeurs des pertes moyennes en sol, estimés par les équations USLE et RUSLE au niveau des différents sous-bassins du Bouregreg, montre une corrélation significative, qui se traduit par un coefficient de corrélation de 95%. Aussi, on peut dire que les résultats que nous avons trouvés dans ce travail en terme de perte en sol sont relativement proches à ceux trouvés dans le même bassin par d'autres auteurs principalement Lehlou (1971) (1,85 t/h/an), Lehlou, (1986) (3,70 t/h/an) et Mahé *et al.* (2014) (2,70 t/h/an).

Tableau. 11. Comparaison entre les valeurs de transport solide observées et celles calculées par la méthode MUSLE avant et après calibration (élaboré à partir des données de Ezzaouini *et al.* 2020).

Table 11: Comparison between the solid transport values observed and those calculated by the MUSLE method before and after calibration (based on data from Ezzaouini *et al.* 2020).

Sous bassins	Transport solide observé (t/ha/an)	Transport solide par MUSLE (t/ha/an)	
		Non calibré	Calibré par KGE
<i>Bouregreg</i>	1,61	2,04	1,57
<i>Grou</i>	2,03	3,33	2,51
<i>Ain Loudah</i>	1,15	1,66	1,22
<i>S.M.Cherif</i>	0,58	1,65	0,59
<i>Moyenne</i>	1,34	2,17	1,46

Tableau. 12. Comparaison des résultats du modèle MUSLE calibré et celles estimés par MUSLE et USLE dans les sous-bassins de Bouregreg.

Table 12. Comparison of the results of the calibrated MUSLE model and those estimated by MUSLE and USLE for the four Bouregreg sub-watersheds.

Sous bassins	USLE (t/ha/an)	MUSLE (t/ha/an)	MUSLE calibré par KGE(t/ha/an)
<i>Bouregreg</i>	1,01	1,03	1,57
<i>Grou</i>	1,61	1,60	2,51
<i>Ain Loudah</i>	0,64	0,94	1,22
<i>S.M.Cherif</i>	0,51	0,73	0,59
<i>Moyenne</i>	0,95	1,07	1,46

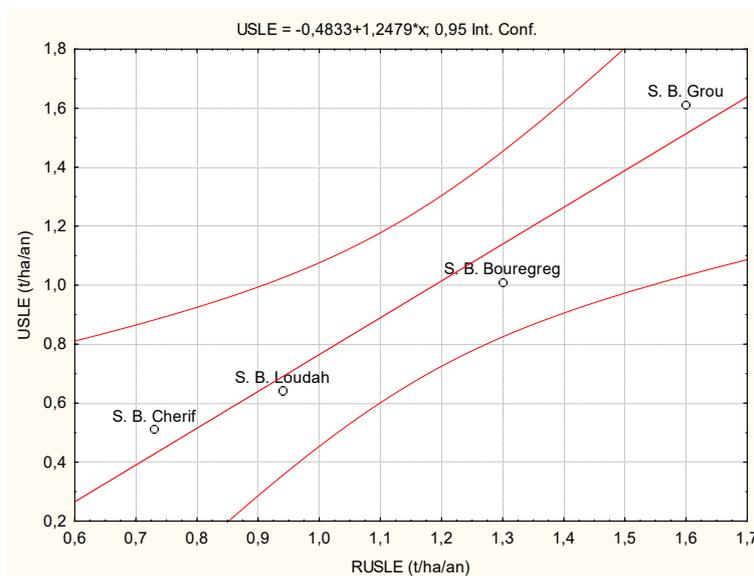


Figure 12. Analyse statistique bivariée des taux d'érosion, estimée par les équations USLE et MUSLE dans les quatre sous-bassins du Bouregreg.

Figure 12. Bi-variate statistical analysis of the erosion rates estimated by the USLE and MUSLE equations in the four sub-catchments of Bouregreg.

CONCLUSION

Les résultats de ce travail montrent que l'application des modèles empiriques dans la modélisation des risques d'érosion hydrique des grands bassins constituent des outils intéressants pour caractériser et quantifier les taux de perte en sol, notamment avec le développement rapide des outils géospatiaux et les SIG. Cette étude vise à utiliser et à comparer

les résultats des taux d'érosion hydrique estimés à partir de deux modèles USLE et MUSLE. Les résultats des pertes en sol obtenus par ces deux modèles sont relativement proches les uns des autres. Les taux d'érosion spécifique, estimés dans toute la surface du bassin versant du Bouregreg selon les modèles USLE et MUSLE, sont respectivement de 0,94 (t/ha/an), 1,07 (t/ha/an).

La distribution des différentes classes d'érosion met en évidence l'impact cumulatif des différents facteurs des équations utilisées sur l'érosion hydrique au niveau du bassin de bouregreg, notamment l'effet conjugué du couvert végétal et de la topographie. A l'échelle du bassin versant de Bouregreg, la comparaison des valeurs des pertes en sol estimées dans ce travail par modélisation RUSLE et USLE avec celles obtenues par des travaux antérieurs, ainsi que celles estimées par MUSLE calibré (Ezzaouini, 2020) montre de faibles variations, ce qui montre que les modèles utilisés pour l'estimation des pertes en sol sont acceptables pour ce genre d'étude.

Selon ces deux modèles empiriques, les pertes en sol estimées au niveau du bassin du Bouregreg se rangent généralement dans la classe de niveau de risque faible et parfois moyen à élevé dans des zones limitées du bassin. Cependant, le taux d'envasement du barrage SMBA peut atteindre $9,4910^6$ m³/an (Ezzaouini, 2020), cela signifie que le barrage SMBA reçoit des sédiments très bas de ses affluents. Une possible hypothèse que l'on pourrait formuler est qu'une partie des sédiments du barrage très probablement provient de l'érosion de ses berges. Ainsi, les résultats obtenus et les cartes élaborées dans cette étude, pourraient bien contribuer à la planification des activités de conservation des sols et à la réduction de l'envasement du barrage.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Mr Mohamed Ezzaouini de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia, qui a mis à notre disposition des données numériques des précipitations et de transport solide sur la zone d'étude.

RÉFÉRENCES

- ABHBC. Agence du Bassin Hydraulique de Bouregreg et de la Chaouia.
- Adediji A., Tukur A.M. & Adepoju K.A. 2010. Assessment of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Katsina Area, Katsina State of Nigeria using Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS). *Iranica Journal of Energy and Environment*, 1(3), 255–264.
- Ait Fora A. 1995. *Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin-versant du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments*. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, Québec, 231 p.
- Argaz A., Darkaoui A. & Bikhtar H., *et al.* 2019. Using EPM Model and GIS for Estimation of Soil Erosion in Souss Basin, Morocco. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 7(8), 1228–1232.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S. *et al.* 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of American Water Resources Association*, 34, 73–89.
- Arnoldus H.M.J. 1980. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soil Bull.*, 34, 39–51.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., *et al.* 2008. Les changements climatiques et l'eau. Document Technique VI du GIEC, Secrétariat IPCC, Geneva.
- Beaudet G. 1969. Le Plateau central marocain et ses bordures. Etude géomorphologique. Rabat, 478 p.
- Benmansour M., Ibn Majah M., Marah H. *et al.* 2000. Use of the 137 Cs technique in soil erosion in Morocco - Case study of the Zitouna basin in the north. *Proceeding of an international Symposium on Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrients, Water and Soil management*, IAEA/ FAO, 308–315.
- Benzha F., Delhi R., Hilali A. *et al.* 2012. Sédiment et spéciation du phosphore de la retenue de barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (MAROC). *Environnement. Science Lib Editions Mersenne*, 4, 120901, ISSN 2111–4706.
- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R. *et al.* 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8 (1), 2013.
- Bouhlassa S. & Bouhsane N. 2019. Assessment of areal water and tillage erosion using magnetic susceptibility: the approach and its application in Moroccan watershed. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–15.
- Bouhlassa S., Moukhchane M. & Aiachi A. 2000. Estimation of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using 137 Cs technique and calibration models. *Acta Geologica Hispanica*, 35(3/4), 239–249.
- Bunzl K. & Kracke W. 1988. Cumulative deposition of 137Cs, 238Pu, 239+240Pu and 241Am from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 8(1), 1–14.
- Chadli K. 2016. Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 1–10.
- Cherkaoui E. 2006. Estuaire du Bouregreg, peuplements macro zoobenthiques, bioévaluation, évolution à court et long terme, dynamique des populations. Thèse de Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences de Rabat.
- Damnati B., Chatt.A, Hamani M. *et al.* 2006. L'érosion hydrique et sa quantification par le radioélément 137Cs au niveau du bassin versant du barrage Raouz (Région de TangerTétouan). *TANCA-01. Workshop sur les techniques analytiques, nucléaires et conventionnelles, et leurs applications*. Rabat 8–9 Décembre, p 38.
- Damnati B., Ibrahim S., Benhardouze O. *et al.* 2010. Quantification de l'érosion par le 137Cs et le 210Pb en excès : cas d'une parcelle au niveau du bassin versant du barrage Nakhla (Région de Tétouan, Nord-ouest du Maroc). *Africa Geoscience Review*, 17(3), 215–223.
- David W.P. 1987. Soil and water conservation planning. Policies, Issues and recommendations. DENR Quezon City. *Journal of Philippine Development*, 26(15), 47–84.
- Driouech F. Déqué M. & Sanchez-Gomez E. 2010. Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change*, 72(1–2), 1–10.
- El Garouani A., H. Chen., L. Lewis., *et al.* 2008. « Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au Nord-Est du Maroc ». *Téledétection*, 8(3), 193–201.
- El Garouani A., Tribak A. & Abahrour M. 2010. Assessment the Effects of Land-Use Cover Changes on Regional Soil Loss Susceptibility Using RUSLE Model and Remote Sensing Data. *Red Books. International Association of Hydrological Sciences Publication*, 340, 343–349.
- El Hadraoui Y. 2013. *Étude Diachronique de L'occupation du sol et de Modélisation des Processus Erosifs du Bassin Versant du Bouregreg (Maroc) à Partir des Données de L'observation de la*

- Terre. Mémoire d'ingénieur du CNAM, Spécialité Géomètre et Topographe : Spécialité Géomètre et Topographe : Maroc. 88 p.
- El Jazouli A., Barakat A., Khellouk R. *et al.* 2019. Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum ErRbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications. Society and Environment*, 13, 361–374.
- El Moutassime S., Boukdir A., Karaoui I. *et al.* 2019. Modelling of soil erosion processes and runoff for sustainable watershed management: case study oued el Abid watershed, Morocco. *Agriculture & Forestry*, 65(4), 241–250.
- Elaloui A., Marrakchi C., Fekri A., *et al.* 2017. USLE-based assessment of soil erosion by water in the watershed upstream Tessaoute (Central High Atlas, Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(3), 873–885.
- Ezzaouini M.A., Mahé G., Kacimi I. *et al.* 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 Abdellah Reservoir, Morocco. *Water*, 12, 1882.
- Faleh A. & Maktite A. 2014. Cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique à l'aide de la méthode PAP/CAR et SIG en amont du barrage Allal el fassi, moyen Atlas (Maroc). *Papeles de Geografía*, (59–60), 71–82.
- FAO and IUSS. 2017. Digitized Soil Map of the World. FAO, Rome, Italy and IUSS.
- Flanagan D.C. & Nearing M.A. 1995. USDA Water Erosion Prediction Project hillslope and watershed model documentation. *Nserl Rep*, 10, 1–123.
- Goussot E., Brou Y.T., Laouina, A., *et al.* 2014. Land covers dynamic and agricultural statistics on the Bouregreg watershed in Morocco. *European Journal of Scientific Research*, 126(2), 191–205.
- Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K. *et al.* 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1–2), 80–91.
- Kalman R. 1967. Essai d'évaluation pour le pré-Rif du facteur couverture végétale de la formule de Wischmeier de calcul de l'érosion. Rapport pour l'administration de la forêt et d'eau, Rabat, 1–12.
- Khali Issa L., Lech-Hab KBH., Raissouni A., *et al.* 2016. Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(8), 2778–2795.
- Khomsy K., Mahé G., Tramblay Y. *et al.* 2016. Regional impacts of global change: Seasonal trends in extreme rainfall, runoff and temperature in two contrasted regions of Morocco. *Natural Hazards and Earth System. Sciences*, 16, 1079–1090.
- Lahlou A. 1971. Etude du transport solide à la station Dar Es Soltane sur l'Oued Bouregreg. Rapport de travaux du service GDE : gestion des eaux, Ministère des travaux publics et des communications, Direction de l'hydraulique, Rabat, Maroc.
- Lahlou A. 1986. Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc. *Revue des Science de l'Eau*, 6, 337–356.
- Lal R., Ahmadi M. & Bajracharya R.M. 2000. Erosional impacts on soil properties and corn yield on alfisols in central Ohio. *Land degradation and development*, 11(6), 575–585.
- Lammadalena N. 2010. Changements climatique et ressources en eau dans la région méditerranéenne. *La lettre de veille de CIHEAM*, 12, 1–4.
- Laouina A., Aderghal M., Al Karkouri J., *et al.* 2010. Utilisation des sols, ruissellement et dégradation des terres, le cas du secteur Sehoul, région atlantique, Maroc. *Sécheresse*, 21(4), 309–316.
- Mahé G., Aksoy H., Brou Y.T. *et al.* 2013a. Relationships among man, environment and sediment transport: A spatial approach. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26, 235–244.
- Mahé G., Aderghal M., AlKarkouri J. *et al.* 2013b. Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: Schumann A., Belyaev V.B., Gargouri E., Kucera G., Mahé G. (eds) - *Considering hydrological change in reservoir planning and management. IAHS Publ*, 362, 115–124.
- Mahé G., Benabdelfadel H., Dieulin C. *et al.* 2014. Evolution des débits liquides et solides du Bouregreg. In : Laouina, A. & Mahé, G. (Eds.), Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat. Edité par ARGDT, Rabat, Maroc, ISBN 978-9954-33-482-9, 21–36.
- Mahé G., Emran A., Brou Y.T. *et al.* 2012. Analyse statistique de l'évolution de la couverture végétale à partir d'images MODIS et NOAA sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Géo Observateur*, 20, 33–44.
- Maleval V. 2014. Premiers résultats des mesures d'érosion ravinatoire sur les versants lacustres du barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah (Maroc) et perspectives de recherche. In: Laouina, A. & Mahé, G. (Eds.), Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013. Edité par ARGDT, Rabat, Maroc, ISBN 978-9954-33-482-9, 53–62.
- Marghich A. 2004. *Le bassin versant de Bouregreg (Maroc Central) : Etudes hydrologique, hydrogéologique et hydrochimie des eaux.* Thèse de Doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences Dhar El Mehraz, Fès.
- Markhi A., Laftouhi N., Grusson Y., *et al.* 2019. Assessment of potential soil erosion and sediment yield in the semi-arid N'fis basin (High Atlas, Morocco) using the SWAT model. *Acta Geophysica*, 67(1), 263–272.
- Markhi A., Laftouhi N., Soulaïmani A., *et al.* 2015. Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrée dans un SIG. Application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc). *European Scientific Journal*, 11(29).
- Masson J.M. 1971. *L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen.* Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Techniques de Montpellier, 213 p.
- Merzouk, A. & Dahman, H. 1998. Shilling land use and impact on sediment yield in the Rif Mountains. In *advanced in geoecologie*, 31, by CATENA VERLAG, 350447.
- Millward A.A. & Mersey J.E. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *CATENA*, 38 (2), 109–129.
- Moguedet G., Texier H., Mayif M. *et al.* 1994. Etude minéralogique des sédiments de l'estuaire de l'Oued Bouregreg (côte atlantique marocaine). Les conséquences de la construction du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah. / The mineralogical study of the

- sediments in the Bouregreg estuary (Atlantic coast of Morocco). Consequences of the construction of the Sidi Mohamed Ben Abdallah dam. *Sciences Géologiques, Bulletin*, 47(1-4), 15-25.
- Mohsine Y. 2009. *Application du magnétisme de l'environnement pour la caractérisation de l'état d'évolution et/ou de dégradation des sols. Application aux sous bassins versants de Mezguida et Ait Azzouz de Bouregreg*. Thèse de Doctorat, Université Mohamed V, Rabat.
- Moussebbih, A., Souissi M., Larabi A. *et al.* 2019. Modeling and mapping of the water erosion risk using Gis/Rusle approach in the Bouregreg river watershed. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 9, 1605-1618.
- Pandey A., Mathur A., Mishra S.K. *et al.* 2009. Soil erosion modeling of a Himalayan watershed using RS and GIS. *Environmental Earth Sciences*, 59 (2), 399-410.
- Paroissien J.B., Darboux F., Couturier A. *et al.* 2015. A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soils in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Journal of Environmental Management*, 150, 57-68.
- PDAIRE. 2011. *Projet Etude du plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia*.
- Poncet P. 1981. Moyens traditionnels de contrôle des processus d'érosion-sédimentation en montagne. C. T. CREF, Groupement de Grenoble. Division : Protection carte les érosions.
- PNABV. 1995. *Rapport du Programme National d'Aménagement des Bassins Versants, Maroc*.
- Rahhou M., 1999. *L'érosion dans le Prérif central, zone interfluviale Leben-Sebou-Ouergha, un prolongement de l'évolution naturelle, une production sociale*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Mohammed V, Rabat, 300 p.
- Rango A. & Arnoldus H.M.J. 1987. Aménagement des bassins versants. Cahiers techniques de la FAO, 36 p.
- Remini B., Leduc C. & Hallouche W. 2009. Évolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. *Sécheresse*, 20(1), 96-105.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. *et al.* 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS)*, Handbook 703, 23 p.
- Renard K.G., Yoder D.C., Lightle D.T. *et al.* 2011. Universal soil loss equation/revised universal soil loss equation. In: Morgan R.P.C. & Nearing M.A. (Eds.) - *Handbook of erosion modeling*. Oxford (England): Blackwell Publishing Ltd., pp. 137-167.
- Ritchie J.C. & Machenry J.R. 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns. *Journal of Environmental Quality*, 19, 215-233.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. *et al.* 1991. RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of soil and water conservation*, 46, 30-33.
- Ritchie J. C. & McHenry J. R. 1990. Application of radioactive 137Cs for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *Journal. Environmental Quality*, 19, 215-233.
- Roose E. 1977. Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa. *Soil Conservation Society of America*, Ankeny, Iowa, pp. 50-71.
- Roose E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique FAO*, Rome, n° 70, 420 p.
- Rouichi H. 1996. *Processus et facteurs de l'érosion dans le bassin versant de Bouregreg (s.s) approche sédimentologique de la quantification de l'érosion*. Thèse de Doctorat, Université Mohamed V, Rabat.
- Sadiki A. Bouhlassa S., Auajjar J. *et al.* 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'Oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre*, 26, 69-79.
- Sadiki A., Faleh A., Navas A. *et al.* 2007. Assessing soil erosion and control factors by the radiometric technique in the Boussouab catchment, Eastern Rif, Morocco. *Catena*, 71(1), 13-20.
- Sadiki A., Faleh A., Zezerze J.L. *et al.* 2009. Quantification de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'Oued Sahla, Rif occidental Maroc. *Cahiers géographiques*, 6, 59-70.
- Shi Z.H., Cai C.F., Ding S.W. *et al.* 2002. Assessment of Erosion Risk with the Rusle and Gis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River. *Proceeding of the 12th ISCO Conference*, Beijing, pp. 73-78.
- SIGMED. 2010. *Approche spatialisée de l'impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en eau de grands bassins versants*. Contrat numéro 59113PS005 (ex-6313PS005). *Projet Méditerranéen de Recherche Scientifique interuniversitaire (MeRSI), Agence Universitaire de la Francophonie*.
- Stone R. & Pet Hilborn D. 2000. Equation universelle des pertes en terre. Fiche technique Ontario. *Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales*, 3p.
- Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F. *et al.* 2014. Évaluation et quantification de l'érosion et la sédimentation à partir des modèles RUSLE, MUSLE et déposition intégrée 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.
- Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F. *et al.* 2017. Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation à partir de modèles empiriques dans le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 39, 87-101.
- Thompson R., Stober J.C., Turner G J. *et al.* 1980 - Environmental applications of magnetic measurements. *Science*, 207, 481-486.
- Tra Bi A.Z., Brou T., Emran, A. *et al.* 2013. Remote sensing and GIS analysis of the dynamic of vegetation in climate variability context on the Bouregreg watershed. In: Boegh E., Blyth E., Hannah D.M., Hisdal H., Kunstmann H., Su B., Yilmaz K.K. (Eds.) - *Climate and land surface changes in hydrology. IAHS Publ*, 359, 403-410.
- Williams J.R. & Berndt H.D. 1976. Determining the universal soil loss equation's length slope factor for watersheds. In *A National Conference on Soil Erosion*, pp. 24-26.
- Williams JR. 1995. Chapter 25: The EPIC model. In Singh V.P. (Ed.) *Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications*, pp. 909-1000.

- Wischmeier V.H. & Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. United States Department of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. United States Department of Agriculture, Washington. Agriculture Handbook No. 282.
- Wischmeier W.H. & Smith D.D. 1965. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. *US Department of Agriculture: Washington, DC, USA.*
- Xinbao Z. Walling D.E. Mingy F. *et al.* 2003. ²¹⁰Pbex depth distribution in soil and calibration models for assessment of soil erosion rates from ²¹⁰Pbex measurements. *Chinese Journal*, 48(8), 813–818.
- Yapo P.O., Gupta H.V. & Sorooshian S. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*, 181(1–4) 23–48.
- Yjjou M., Bouabid R., El Hmaidi A. *et al.* 2014. Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 3(8) 83–91.
- Zhang X.C. 2017. Evaluating water erosion prediction project model using cesium-137-derived spatial soil redistribution data. *Soil Science Society of America Journal*, 179–188.
- Zouagui A. 2010. *Application des techniques isotopiques (¹³⁷Cs) à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de My Bouchta, Rif occidental, Maroc.* Mémoire de 3ème cycle, ENFI, 81 p.

Manuscrit reçu 29/09/2021

Version révisée acceptée le 23/03/2022

Version finale reçue le 24/03/2022

Mise en ligne le 25/03/2022