

Evaluation et cartographie des taux d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha (Rif occidental, Nord Maroc)

Evaluation and mapping of water erosion rates in the watershed of the Arbaa Ayacha River (Western Rif, Northern Morocco)

Abdessalam OUALLALI^{1*}, Mohamed MOUKHCHANE², Habiba AASSOUMI³, Farida BERRAD⁴ & Ibrahim DAKIR⁵

1. Université Abdelmalek Essaadi, Faculté des sciences Tétouan, Mhannech II. B.P. 2121, 93002, Tétouan, Maroc, *(abdessalam.ouallali@gmail.com).

2. Université Abdelmalek Essaadi, Ecole Normale Supérieure de Tétouan, Av. Moulay Hassan, B.P. 209, Martil, Maroc.

3. Université Abdelmalek Essaadi, Faculté des Sciences Tétouan, Mhannech II. B.P. 2121, 93002, Tétouan, Maroc.

4. DREFLCD-Service des Etudes d'Aménagements et de Planification, Av des Far, Tétouan, Maroc.

5. Université Abdelmalek Essaadi, Faculté des Sciences Tétouan, Mhannech II. B.P. 2121, 93002, Tétouan, Maroc.

Résumé. L'érosion hydrique constitue la principale menace de la dégradation des sols au Maroc et particulièrement dans la zone rifaine. Elle cause généralement des dégâts agro-pédologiques, des dégâts en amont et en aval des infrastructures hydrauliques tout en affectant la durabilité de ces dernières. L'objectif de cette étude est de caractériser la vulnérabilité du bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha au risque d'érosion hydrique à travers une cartographie de l'intensité de l'aléa d'érosion hydrique. La démarche suivie repose sur l'exploitation des données de télédétection et des systèmes d'information géographique en vue de cartographier les facteurs majeurs intervenant dans le processus érosif (précipitations, couvert végétal, érodibilité des sols, topographie et pratiques anti-érosives) et leur intégration dans l'équation universelle révisée des pertes en sols (RUSLE) adaptées aux conditions marocaines. Les résultats obtenus montrent la forte susceptibilité du bassin versant au risque d'érosion. La carte synthétique obtenue présente la répartition des degrés de sensibilité à l'érosion dans le bassin versant avec un taux moyen annuel des pertes en sols de l'ordre de 25,77 t/ha/an. Ces résultats pourraient servir d'aide aux décideurs et aux aménageurs lors de la prise de décision dans le domaine de préservation des eaux et des sols.

Mots clés : Erosion hydrique, RUSLE, Télédétection, Oued Arbaa Ayacha, Rif occidental, Maroc.

Abstract. Water erosion is the main threat of land degradation in Morocco, especially in the Rif area. It usually causes agropedological damages upstream and downstream of hydraulic structures affecting their durability. The aim of this study is to characterize the Watershed vulnerability of Arbaa Ayacha river, which is a part of the western Rif (occupying an area of 199.9 Km²), its exposition to the risk of water erosion and also to Map quantitatively the intensity of the water erosion hazard in the study area. This approach is based on the use of remote sensing data and geographic information systems mapping major erosion factors in (rainfall, vegetation cover, soils erodibility, topography and erosion control practices and their integration in the Revised Universal soil loss Equation (RUSLE) adapted to Moroccan conditions. The results show the strong watershed susceptibility to the erosion risk. The obtained synthetic map depicts the distribution of sensitivity to erosion in the watershed with an annual average rate of soil loss about 25.77 t/ha/year, and could help decision makers and developers make decisions in the of water and soil preservation field.

Keywords: Water erosion, RUSLE, Remote Sensing, Arbaa Ayacha River, Western Rif, Morocco.

Abridged English version

Introduction

The watershed of the Arbaa Ayacha River with its topographical lithological and climatic characteristics is not immune to the phenomena of water erosion. This area will see the installation of a new dam on the River of Arbaa Ayacha (ABHL 2012). Therefore the erosion risk assessment will guide the development and interventions and to propose effective measures of soil conservation. This quantitative study aims to supplement those of qualitative type by application of the PAP / RAC directives carried out in this watershed by Ouallali *et al.* (2016). It aims to collect

and mapping the different factors involved in the erosive process using GIS, to create an interactive spatial database, to locate the zones that produce the sediments and finally to prioritize the watershed from a quantitative loss point of view.

Material and methods

The methodology involves assessing the major factors of the Revised Universal Soil Loss Equation (Wischmeier & Smith 1978), which involved in the erosion processes.

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

With: (R) is The Rainfall and Runoff Factor

(K) Is the Soil Erodibility Factor

(LS) Is the Slope Factor

(C) Is the Crop/Vegetation and Management Factor

(P) Is the Support Practice Factor

Results and discussion.

Climate aggressiveness factor R

This factor depends mainly on climatic data, exactly the annual and monthly rainfall. Indeed the average annual rainfall in rainfall Arbaa Ayacha station is of the order of 726.7 mm on a 31years range. Arnoldus's formula was used in this study to estimate the values by using the values of surrounding rainfall stations of the study area. The result obtained by interpolating the values of these stations is a distribution map of this factor values ranging from 116.633 to 122.615. The maximum values are recorded in the South-East part of the basin on high altitudes.

The erodibility factor K

This factor depends on structures and soil texture and organic matter percentage. The evaluation of this factor is actually based on the soil map of the study area and by comparison of different soil units with soils analyzed in other parts of the Rif territories, and with analyzes of different kinds of soil (Billaux & Bryssine 1967; El Gharbaoui 1981; El Kamoune 200; Inypsa 1987 ; Alami (in Osrirhi *et al.* 2007)). The results obtained show that the K factor varies from 0.1 to 0.44. The maximum values correspond to little developed soils (25%), and only 26% belongs to the class (0.1 - 0.15), demonstrating the fragility of the soils in the watershed.

The topographic factor LS

Topography plays an essential role as an engine of water erosion. Indeed, the soil losses rates climbs increasingly that the slopes and the slopes length amount. The Most recent studies of water erosion by RUSLE model, using the equation of Mitasova *et al.* (1996), that depends on the slope gradient, flow direction and flow accumulation. It is expressed in the extension Spatial Analyst and ArcGIS as follows:

$$LS = \text{Pow}(\text{accumulation des flux} * \text{résolution}) / 22.1, 0.6) * \text{Pow}((\text{Sin}(\text{pente en gradient}) * 0.01745) / 0.09, 1.3).$$

The application of this equation in the watershed of the Arbaa Ayacha River gives LS values ranging from 0 to 245.84 with 98.29% belonging to the class (0-13), and shows poor distribution in the basin. While the application of the formula of (David 1987) $LS = 0.10 + 0.12 * S^{4/3}$ seems to give fairly realistic values for this watershed. It shows that half of the surface of this area belongs to the class (0-2), and only 4% of the area shows relatively high values (5-13). This is proportional to the watershed topography

that shows relatively low slope (0% - 86%), with only 2% of the surface of this basin with high slopes (35% -86%).

The factor of vegetation covers C

The vegetation cover is the most relevant factor to curb the extent of water erosion phenomenon. The evaluation of this factor in the catchment area of the river Arbaa Ayacha is made by adapting the equation of Van Der Knijff (2000).

$$C = \exp[-\alpha * NDVI / (\beta - NDVI)]$$

Where α , β : parameters determining the shape of the NDVI-C curve with $\alpha = 2$ and $\beta = 1$ and NDVI is normalized difference vegetation index.

The NDVI was evaluated by operating a satellite image Landsat 8 dated 2015, and the result is a distribution map of C factor values with 15% of the pool surface seems protected ($C < 0.2$). The maximum values of C appear in the center of the basin, while the average values are located in the Southeast on surfaces occupied by pine plantations.

The factor of erosion control practices P

In the study site, no practical are performed and therefore this factor is considered equal to 1 for the entire watershed.

The superposition of the factors, and realization of the erosion rate map

The Rasterization and overlay factors of the universal soil loss equation in GIS, provides a map of repair rate of water erosion in the watershed. The average losses are in the order of 25.77 t/ha/year and the maximum and minimum losses are respectively 468 t/ha/ha and 0.11 t/ha/year. According to the classification adopted by the United States which shows that the soil can tolerate losses of up to 7 t/ha/year, whereas above 20 t/ha/year losses are alarming, the study area shows 55% in lower acreage 20 t/ha/year while losses are alarming in the rest of the basin. The highest losses were largely in the southeast of the basin, and are consistent with extreme values of R factor, LS, and K and average values of C. Therefore soil loss correlated well with the factors water erosion. The minimal losses appear in the center of the basin on gentle slopes, low values Erodibility and average values of R and C; except in some places where the elevations are high, high factor C (0.6-0.9 class) and high soils erodibility. This last remark leads to the conclusion that the combined effect of the relief and fragile soils reign much the influence of vegetation.

The comparison of the results with other studies in other watersheds of the western Rif shows the relative reliability of the model applied. Indeed Moukhchane *et al.* (1998) show that the average losses in soils on fragile land territory of the Rif reach 17 t/ha/year, The Nakhla watershed lost on average

38.7 t/ha/year (Ait Brahim *et al.* 2003). Khali Issa *et al.* (2014) found 37 t/ha/year in the watershed of Wadi Khmiss while Dahman (1994) gives 32.5 t/ha/year in losses to the Tlata watershed and Tahiri *et al.* (2014) gives an average value of 47.18 t/ha/year in losses for the sub basin of the Oued Sania at various altitudes from 0 to 2449m. The application of the model in the watershed of Wadi Sahla, (central Rif) gave 22 t/ha/year on average (Sadiki *et al.* 2009) the same author in 2004 found an average loss of 55 t/ha/year in the watershed of Wadi Boussouad (eastern Rif). The application of other evaluation models of water erosion have given similar results to those found in the watershed Arbaa Ayacha. Indeed the Quantification of erosion rates by 137Cs gives in the Nakhla basin 39.6 t/ha/year (Moukhchane 1988).

This author has found 49.10 t/ha/year in the El Hachef basin (Moukhchane 2005). Some particles of the same basin have 35 t/ha/yr in soil loss by (Dammati *et al.* 2004) and finally Zouaghi & Benmansour (2012) found 23 t/ha/year in the watershed Moulay Bouchta Western Rif.

Conclusion

Although the RUSLE method still raises discussions about the conditions of use and its limitations, especially since it does not take into account other forms of erosion such as linear erosion, bank erosion And re- sedimentation phenomena, it remains a tool for decision-making in river basin management by the anti-erosion authorities.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un fléau qui provoque des dégâts non négligeables sur le milieu environnant et affecte d'une manière sérieuse notre vie tant sur le plan écologique que sur le plan socio-économique (Moukhchane 1999). Le Maroc n'est pas protégé des phénomènes d'érosion qui s'accroissent au cours des années, notamment dans les montagnes et les collines du Rif. Cette zone est très vulnérable à l'érosion hydrique, vu qu'elle se caractérise par une régression de sa couverture végétale protectrice conjuguée aux fortes pentes, à la prédominance des formations lithologiques friables (marnes, marno-calcaires et schistes) et aux précipitations abondantes (Heush 1970). L'effet néfaste de l'érosion hydrique se fait sentir surtout en aval des bassins versants par la sédimentation dans les retenues des barrages qui provoque une perte de leur potentiel de stockage des eaux équivalente à 700 millions de m³, soit une perte de surface irrigable de 6000 ha/an (Boutaib 1987, Moukhchane 2002). L'étude de l'érosion hydrique permet de cibler les zones à fort risque d'érosion, et orienter les interventions antiérosives.

Le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha, avec ses caractéristiques topographiques, lithologiques et climatiques n'est pas à l'abri des phénomènes d'érosion hydrique. Cette zone connaîtra l'installation d'un nouveau barrage sur Oued Arbaa Ayacha (ABHL 2012). L'évaluation des risques d'érosion permettra d'orienter les aménagements et les interventions et proposer les mesures efficaces de conservation du sol. Cette étude quantitative vient pour compléter celles de type qualitatif par application des directives PAP/CAR réalisée dans ce bassin versant par Ouallali *et al.* (2016). Elle a pour objectifs de rassembler et cartographier les différents facteurs intervenants dans le processus érosif en utilisant les SIG, réaliser une base de données spatiale interactive, localiser les zones susceptibles de produire des sédiments et finalement hiérarchiser le

bassin versant de point de vue pertes quantitatives. Plusieurs méthodes et modèles ont été appliqués au Maroc, et dans le Rif en particulier. Citons parmi ces méthodes : le modèle WEPP de Flanagan & Nearing (1995); SWAT d'Arnold *et al.* (1998); PAP/CAR (1997); les méthodes fondées sur les radionucléides (Bunzl *et al.* 1988; Ritchie & Machenry 1990; Xinbao *et al.* 2003); la susceptibilité magnétique (Thompson *et al.* 1980); l'équation universelle de perte de sol USLE de Wischmeier & Smith (1978) et sa version modifiée RUSLE de Renard *et al.* (1997). Nous avons choisi la méthode RUSLE est la plus utilisée pour la quantification de l'érosion de surface. Ce choix est dicté par le fait que les données nécessaires à l'application de RUSLE sont disponibles pour le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha. Ainsi que la méthode RUSLE aide à compléter l'aspect qualitatif des études de l'érosion hydrique par la quantification des pertes en sols sur toute la surface du bassin versant.

METHODOLOGIE

L'équation universelle révisée de la perte des sols (RUSLE) (Renard *et al.* 1997) est une mise à jour du modèle USLE de Wischmeier & Smith (1978). Ce nouveau modèle permet d'évaluer le taux annuel moyen de perte en sol et d'établir la répartition spatiale de la carte du risque d'érosion. Il a été reconnu comme le modèle le plus couramment utilisé pour la quantification des pertes en sol et guider les plans de conservation des sols afin de maîtriser l'érosion hydrique (Millward & Mersey 1999). La prédiction des pertes en sols sont calculées sur la base des données disponibles sur le bassin versant de Oued Arbaa Ayacha tels la topographie, la pédologie, les précipitations, l'occupation des sols, les systèmes de culture et les pratiques de lutte contre l'érosion.

Chacun de ces cinq facteurs est une évaluation numérique d'une composante complexe qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Couplé dans l'environnement SIG, il est possible de passer à

ces composantes par une transformation de l'information que portent les couches vectorielles de chaque facteur vers le mode raster. Les pertes en sols seront ainsi calculées pixel par pixel (Millward & Mersey 1999) et elles seront exprimées sous l'outil SIG ArcGis 10.2 d'Esri par la formule suivante (Renard *et al.* 1997) :

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

Avec :

A = perte annuelle en sols en tonne/ha/an. R = facteur d'agressivité climatique en $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{H}^{-1} \text{an}^{-1}$

LS = facteur topographique représentant la longueur (L en m) et l'inclinaison (S en %) de la pente.

K = l'érodibilité des sols en t.ha/MJ.mm. C = facteur du couvert végétal. P = facteur des pratiques antiérosives.

L'évaluation de chacun de ces facteurs nécessite la réalisation d'un ensemble d'opérations d'analyse et de traitement pour l'obtention des données de base, indispensables pour l'élaboration des cartes des facteurs d'érosion hydrique du bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha. En effet, les données climatiques des cinq stations météorologiques (Barrage 9Avril, Dar Chaoui, Arbaa Ayacha, Dar Khrofa, Larache) disponibles à l'Agence des bassins hydrauliques du Loukous permettent l'évaluation du facteur climatique par une interpolation des valeurs de R sous l'outil ArcGis. Ce dernier, permet aussi de calculer le facteur topographique LS après un certain nombre de prétraitement du MNT de type ASTER-GDEM avec une précision horizontale de 30m et verticale de 20m. En effet, la première étape consiste au remplissage des cuvettes pour éliminer les imperfections et les dépressions dans le MNT grâce à la fonction Fill du Logiciel ArcGis. La seconde étape permet de créer un raster des directions des écoulements du réseau hydrographique entre chaque pixel et son voisin de faible altitude. Le résultat de cette dernière permet de calculer l'accumulation des flux et donc d'avoir la carte de la longueur des pentes. Et finalement, l'intégration de la carte d'accumulation des flux et la carte des pentes dans le Raster-Calculator d'ArcGis permet d'évaluer la répartition des valeurs de LS dans toute la superficie du bassin versant. Les données pédologiques, le type des sols et leur classification (Inypsa 1987) sont utilisées pour l'évaluation du facteur d'érodibilité des sols K.

Une image satellitaire Landsat 8 prise le 02 avril 2015 a fait l'objet d'une classification supervisée à l'aide du logiciel de traitement d'image ENVI. Elle a permis d'avoir une carte de répartition des unités d'occupation des sols et le calcul de l'indice de végétation NDVI.

CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant d'Oued Arbaa Ayacha est situé au Nord de la province de Larache et au Sud de la province de Tanger-Assilah (Fig. 1). Le climat de

cette zone est de type méditerranéen subhumide. Il est marqué par une double influence marine atlantique et méditerranéenne (El Gharbaoui 1981). Il présente deux saisons différenciées : une humide et fraîche allant d'octobre à avril et une autre sèche qui dure du mois de mai au mois de septembre.

La pluviosité moyenne annuelle pour la période 1983-2015 varie d'une station à l'autre. Elle est de 726,7 mm à la station d'Arbaa Ayacha, 707,3 mm à la station Dar-Chaoui, 753,6 mm à la station de Dar-Khrofa, 619,3 mm à la station de Larache et 662,4 mm à la station de 9 Avril. La température moyenne annuelle à la station d'Arbaa Ayacha est de 17.85° C, et ne présente pas de grandes différences avec celle de Nakhla (17.7° C), et celle de Tanger (17.68° C) malgré leur différence d'altitude (35m à Arbaa Ayacha, 210m à Nakhla et 33m à Tanger).

De point de vue topographique, le bassin versant est caractérisé par une variation altitudinale importante, allant de 6 m à l'exutoire à 549 m sur le sommet le plus élevé (Fig. 2). Deux points culminants dominent le bassin : Es Saf (545m) dans sa partie Sud-Est et Saadana (549m) vers le Sud-Ouest. La partie aval est moins élevée avec Ain Messous à 10 m d'altitude. La majeure partie du bassin versant se situe au-dessus de 50 m d'altitude.

L'hypsométrie (Fig. 3) est considérée comme un facteur majeur reflétant l'aptitude d'un bassin versant au ruissellement. Celle-ci montre deux tranches d'altitudes (50 - 100 et 100 - 150) qui occupent 64% reflétant son caractère collinaire. Les altitudes les plus basses s'étendent sur la partie aval et occupent 18% de surface alors que les plus hautes se situent vers l'extrême Sud-Est du bassin et ne dépassent pas 4%.

Les paramètres morphométriques évalués dans le site d'étude (Tab. 1) montrent que l'indice de compacité de Gravelius K_G est égale 1,4. Il traduit une forme relativement allongée et favorise les faibles débits de pointe. Les dimensions du rectangle équivalent (longueur $L=30,22$ Km et largeur $l= 6,61$ Km) traduisent que la longueur est 4,6 fois plus grande que la largeur. Alors que l'indice global de pente I_g est estimé à 0,016 m/km par application de l'équation de Musy (2005). Il se classe selon la classification de l'ORSTOM (Dubreuil 1974) dans la classe du relief modéré.

Du point de vue géologique, Le bassin versant d'Oued Arbaa Ayacha est couvert par la carte géologique du Maroc, feuille du Rif au 1/50000 (Suter 1980). Ce bassin versant est constitué principalement par (Fig. 4):

- des éboulis récents vers le Sud-Est (5,30% de la superficie totale du bassin versant), et des terrasses fluviales et glaciaires d'accumulation au centre du bassin étalés (19,51%) d'âge quaternaire.

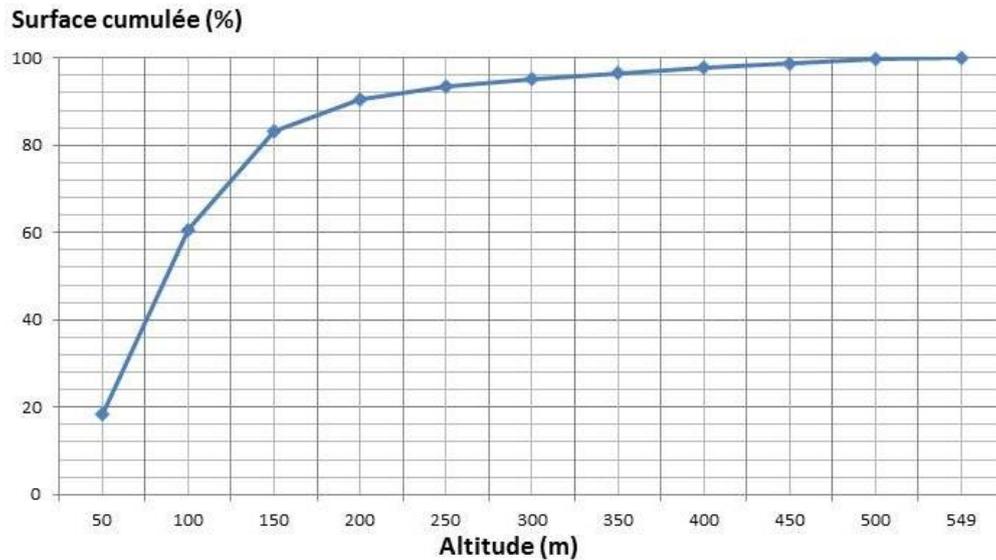


Figure 3. Courbe hypsométrique.

Figure 3. *Hypsometric curve.*

Tableau 1. Paramètres topographiques du bassin versant Arbaa Ayacha.

Table 1. *Topographic parameters of the Arbaa Ayacha watershed.*

Facteur	Formule	Auteurs	paramètres	Valeurs calculées
Indice de compacité K_G	$K_G = \frac{r}{2\sqrt{\pi} \times A} = 0,28 \frac{r}{\sqrt{A}}$	Gravelius (1914)	A : la superficie du bassin en Km^2 P : son périmètre en Km	$K_G = 1,4$
Dimensions du rectangle équivalent (longueur L et largeur l)	$L = \frac{1}{2} * K_G * \sqrt{\pi * A} * (1 + \sqrt{1 - (\frac{2}{\sqrt{\pi} * K_G})^2})$ $l = \frac{1}{2} * K_G * \sqrt{\pi * A} * (1 - \sqrt{1 - (\frac{2}{\sqrt{\pi} * K_G})^2})$	Roche (1963)	K_G : l'indice de compacité A est l'air du bassin versant en Km	L= 30,22 Km l= 6,61 Km
Indice globale de pente I_g	$I_g = \frac{H95 - H5}{Le}$	Dubreuil (1974)	Le : Longueur du rectangle équivalent (Km). H95 : Cote limitant les 5% des superficies les plus élevées. H5 : Cote limitant les 5% des superficies les plus basses	$I_g = 0,016$ m/km

- Des formations villafranchiennes à dominance sableuses vers l'extrême Nord-Ouest (2,63%).

- Des terrasses de sable jaune mal consolidées d'âge Pliocène au Nord-Ouest (moins de 1% de la superficie totale du bassin versant).

- L'unité de Habt est représentée par des formations sableuses d'âge Oligo-Miocènes (g-mi, Fig. 4) vers le Nord-Ouest et occupent 7,6%, et par des formations essentiellement argileuses (em-g, Fig. 4) d'âge Eocène moyen et Oligocène qui couvrent 13,11% de la surface totale du bassin versant.

- Des marnes très argileuses à patine blanchâtre et du silex d'âge Eocène inférieur et Paléocène occupent le centre du bassin sur une superficie de 11,76% de la superficie totale du bassin versant.

- La nappe numidienne est représentée au Sud-Est par des Grès d'âge Oligo-miocène (g-mi, Fig. 4) et occupent 6,6% de la superficie totale du bassin versant.

- L'unité de Tanger est représentée au centre du bassin par des argiles olivâtres du Crétacé supérieur (cs, Fig. 4) représentant 12,16% de la surface totale du bassin versant.

- L'unité de Melloussa constituée par des calcaires argileux d'âge Crétacé moyen à supérieur (ML, Fig. 4) qui affleurent vers l'Est et s'étalent sur 14,66% de la surface totale du bassin versant, et par des pélites

argileux fins à lits de microbrèche d'âge Crétacé moyen (cm, Fig. 4) étalés sur 6,2% de la superficie totale du bassin versant.

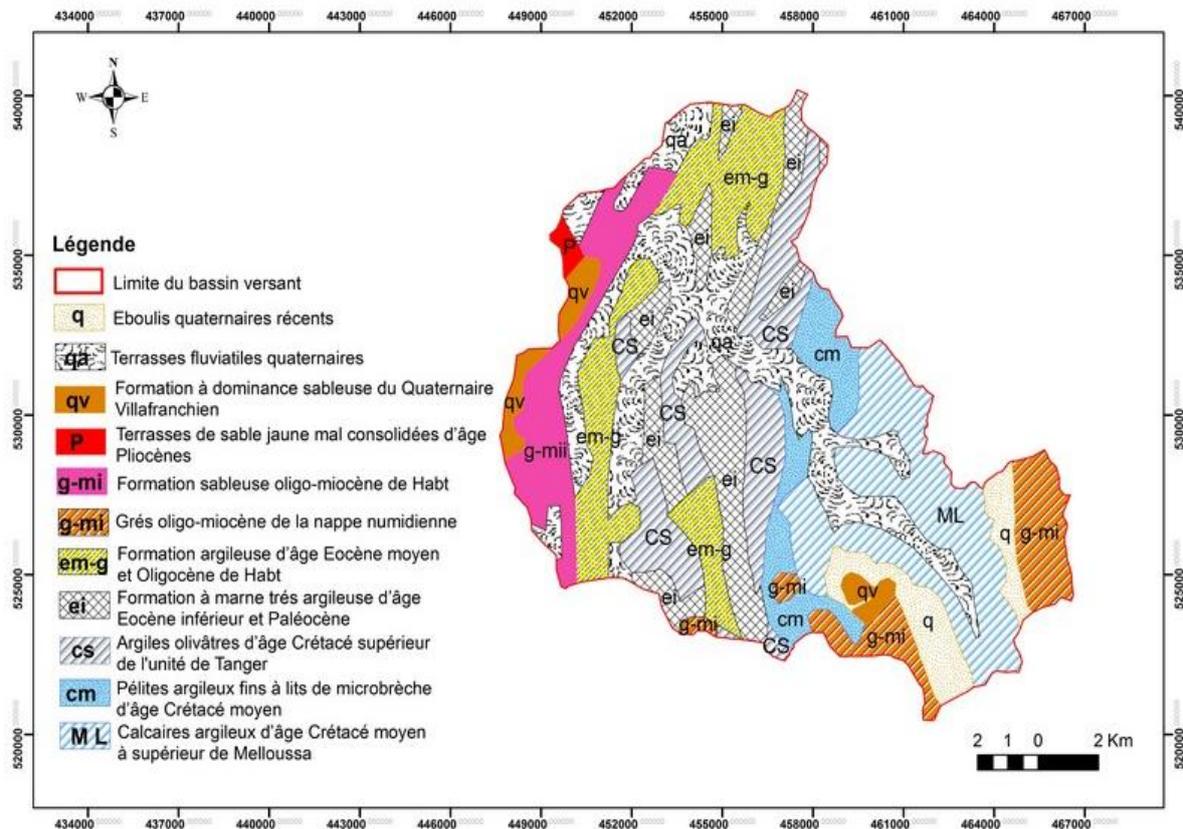


Figure 4. Principales formations lithologiques du bassin versant d'Oued Arbaa Ayacha (d'après la carte géologique de Rif au 1/50000, Suter 1980).

Figure 4. Main lithological formations of the Arbaa Ayacha River watershed (according to the 1/50000 Rif geological map, Suter 1980).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Evaluation des facteurs de l'érosion hydrique.

Les caractères morphologiques et hydrologiques du bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha, sa lithologie friable et l'énorme extension des terrains de cultures conjugués aux précipitations importantes et aux pentes moyennes, font de cette zone un milieu favorable au développement des différentes formes d'érosion hydrique. L'évaluation des taux d'érosion dans ce bassin versant s'est faite par l'application du modèle RUSLE. Elle nécessite le calcul des différents facteurs de RUSLE sur toute la superficie du bassin versant et leur présentation sous forme de cartes thématiques (R: Agressivité climatique, K: Erodibilité des sols, LS: Inclinaison et longueur de pente, C: Couverture végétale et utilisation des sols et P: Pratiques anti-érosives).

L'intégration de ces cartes dans les SIG a permis d'évaluer les taux d'érosion par superposition des valeurs des pixels de chaque facteur.

L'agressivité climatique R

Le facteur d'agressivité climatique R dépend essentiellement des données climatiques. En effet, les précipitations jouent un rôle primordial dans la génération des risques et des formes d'érosion. Dans le bassin versant d'Oued Arbaa Ayacha, la pluviométrie annuelle moyenne est de 726,7 mm. Elle est calculée en rapportant les valeurs moyennes annuelles des précipitations mesurées entre 1983 et 2015 dans les stations environnantes du bassin versant sur le nombre des années. La lame d'eau ruisselée est égale 303mm (ABHL 2005) alors que l'apport moyen annuel en eau est de l'ordre de $60,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ce dernier est évalué par l'application de la relation suivante: $Al = Lr * Sb$

(CNEA 2002) avec Al: Apport moyen annuel en eau, Sb: Superficie du bassin versant en m^2 et Lr: Lame d'eau ruisselée en m. Le Coefficient du ruissellement est déduit de la formule : $Kr = \left(\frac{Lr}{Pa}\right) * 100$.

Il présente une valeur égale à 41,7%. Cela signifie que les eaux de ruissellement se rassemblent et prennent de l'ampleur rapidement et leur évacuation se fait avec une vitesse élevée. Ces eaux peuvent générer un pouvoir érosif plus important surtout si elles sont couplées à des pentes fortes et des terrains friables.

Pour l'évaluation du facteur R, nous avons eu recours aux données disponibles dans les stations à proximité de la zone d'étude (Tab. 2). Elles sont exprimées en moyennes annuelles et mensuelles par conséquent la formule de Rango & Arnoldus (1987) semble la plus appropriée pour l'évaluation de ce facteur d'érosivité climatique. Plusieurs études marocaine sur l'érosion hydrique utilisent cette équation pour l'évaluation du facteur R avec des résultats sont encourageants.

$$\text{Log R} = 1,74 \cdot \text{Log} \sum (P_i^2/P) + 1,29$$

où P_i représente les précipitations mensuelles et P les précipitations annuelles en mm.

D'après la figure 5, les valeurs du facteur R du bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha varient de 116,633 jusqu'à 122,615. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au Sud-Est alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées à l'aval vers le Nord à Nord-Ouest (Fig. 5).

Cette légère différence est due aux variations altitudinales que présente le bassin versant de l'aval à l'amont, et ainsi à l'augmentation des quantités des précipitations enregistrées de l'Ouest vers l'Est. Ces valeurs concordent relativement avec celles trouvées dans le bassin versant de Oued Khmis (Rif occidental) où Khali Issa *et al.* (2014) indiquent des valeurs allant de 87 à 113, en revanche, elles sont relativement élevées par rapport à ceux enregistrées dans le bassin versant de l'Oued Leben (Rif central) où Rahhou (1999) donne des valeurs de 43 à 87. Pour Sadiki *et al.* (2009), R varie de 162 à 192 dans

le bassin versant de l'Oued Sahla. Le Rif oriental dans son bassin versant de l'Oued Boussouab présente des valeurs de 31,2 à 60 (Sadiki *et al.* 2004). Alors que Dhman *et al.* (1997) ont trouvé des valeurs élevées dans le bassin versant de Telata qui varient de 215 à 228. Et enfin Tahiri *et al.* (2014) ont donné à R une moyenne de 50,75 dans le sous-bassin versant de l'Oued Sania et 37,89 MJ*mm/ha/h dans le sous-bassin versant de l'Oued Haricha (Tahiri *et al.* 2016).

L'érodibilité des sols (K)

L'érodibilité des sols dépend essentiellement de la texture et de la structure des sols, de leur perméabilité et de la matière organique. Elle est faible ($K= 0,01$) pour des sols stables et forte pour des sols fragiles ($K= 0,70$). La carte pédologique de l'Oued Arbaa Ayacha est établie en se basant sur la carte pédologique à l'échelle de 1/50000 élaborée par Inypsa (1987), complétée par des vérifications sur le terrain et à partir de la carte pédologique de la zone de Tanger établie par Alami (in Osrihi *et al.* 2007). L'évaluation de l'indice K dans le bassin versant s'est faite sur la base de la carte pédologique obtenue, et complétée par les données des analyses de différents types de sols (Billaux & Bryssine 1967, El Gharbaoui 1981, El Kamoune 2009, Inypsa 1987, Osrihi *et al.* 2007) et à l'aide du monogramme de Wischmeier.

Les valeurs de l'indice K dans le bassin versant se situent entre 0,1 et 0,44 (Fig. 6) prouvant la fragilité des sols (faible à moyenne) et leur susceptibilité à l'érosion. En effet, la carte synthétique obtenue montre que seul 26% du bassin versant montre une faible érodibilité, représentée par la classe des vertisols avec K qui varie de 0,1 à 0,15. Le reste de la surface étudiée présente des valeurs relativement élevées avec prédominance de la classe des sols peu évolués (25%) qui montre une érodibilité forte avec K variant de 0,3 à 0,44.

Tableau 2. Cordonnées des stations météorologiques du bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha et leurs indices R.

Table 2. Coordinates of meteorological stations of the Arbaa Ayacha watershed and their R indices.

Noms des stations	X	Y	Z	R
Larache	431000	510700	12	110.48
Dar-Chaoui	470000	550500	72	118.22
Dar-Khrofa	464250	514650	70	124.61
Arbaa-Ayacha	455200	532500	35	117.91
Barrage-9Avril	460250	551720	37	111.89

Le facteur topographique (LS)

Le facteur topographique a été calculé à partir de la conjugaison de l'inclinaison et longueur de pente. Plusieurs formules permettent l'évaluation de ce facteur à partir du modèle numérique de terrain

(résolution de 25m) tels que celle de Wischmeier & Smith (1978), Kalman (1967), David (1987) et Mitsova *et al.* (1996).

La plupart des études récentes de l'érosion

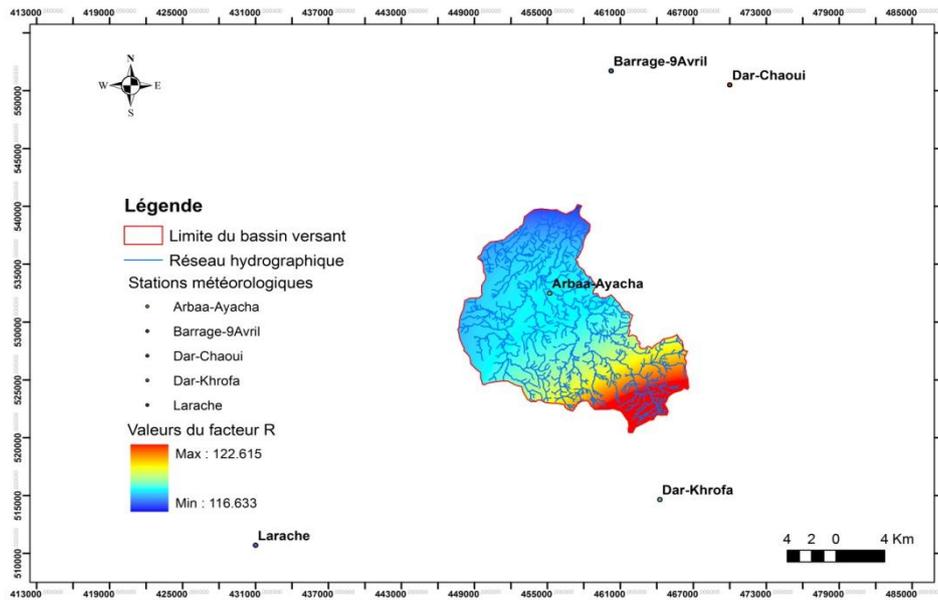


Figure 5. Carte de facteur R et position des stations météorologiques.
 Figure 5. R factor map and position of the meteorological stations.

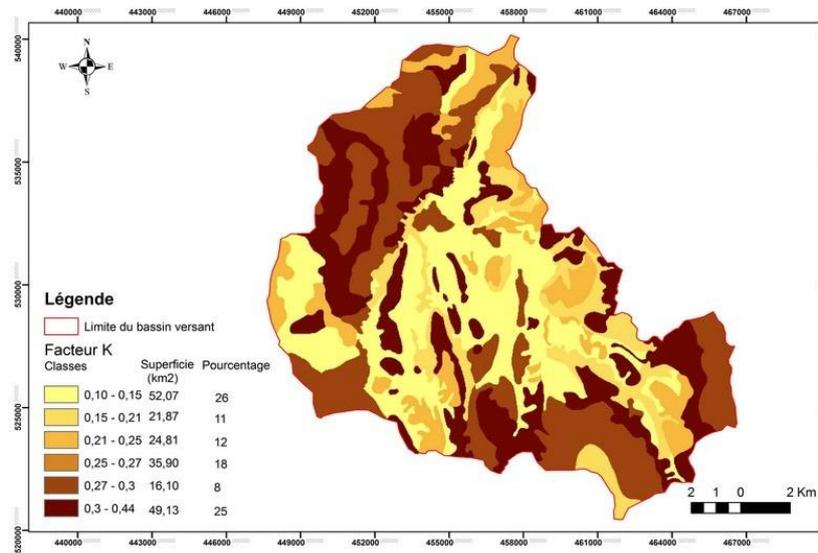


Figure 6. Carte de facteur K.
 Figure 6. K factor map.

hydrique par le modèle RUSLE utilisent l'équation du Mitasova *et al.* (1996), qui dépend de la pente en gradient, de la direction des flux et leur accumulation. Elle s'exprime sous l'extension Spatial-Analyst du logiciel ArcGIS comme suit :

$$LS = \text{Pow}(\text{accumulation des flux} * \text{résolution}) / 22.1, \\ 0.6) * \text{Pow}((\text{Sin}(\text{pente en gradient}) * 0.01745) / 0.09, 1.3)$$

L'application de cette équation dans le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha donne des valeurs de LS qui varient de 0 à 245,84 avec 98,29% appartenant à la classe (0 - 13). Elle montre une mauvaise corrélation avec la longueur et la pente dans ce bassin.

L'application de l'équation de David (1987) $LS = 0.10 + 0.21 * S^{4/3}$ a donné des valeurs avec une répartition logique et contrastée de LS dans le bassin.

La carte du facteur LS selon l'équation de David montre que ce facteur varie de 0,1 à 13,85 (Fig. 7) pour des altitudes allant de 6m à 549m et des pentes de 0% à 85,98%. La majeure partie du bassin appartient à la classe (0-5) alors que les valeurs extrêmes se localisent en majorité dans la partie Sud-Est de la zone d'étude. Ces résultats sont faibles par rapport aux valeurs trouvées dans le bassin versant de

l'Oued Khmis (Rif occidental) allant de 5 à plus de 55, avec des altitudes proches de 758m. Dans le Rif central, Sadiki *et al.* (2009) trouve des valeurs de LS variant de 0,48 à 87,9 pour le bassin versant de l'Oued Sahla avec prédominance de la classe (5-20) qui dépasse 70% pour des altitudes comprises entre 300 m et 1140 m.

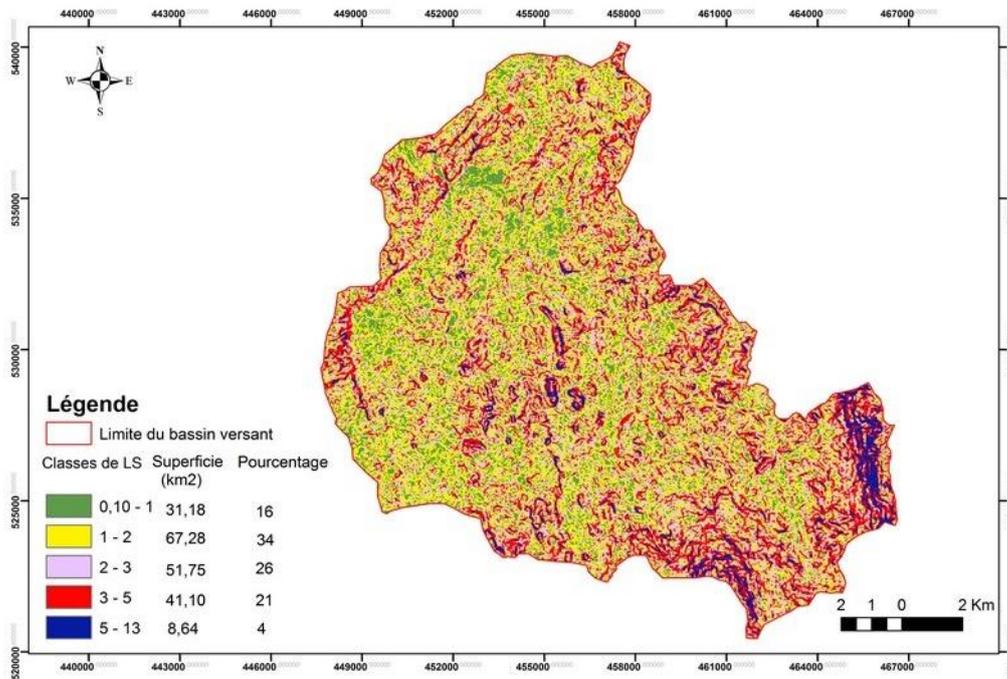


Figure 7. Carte de facteur LS.

Figure 7. LS factor map.

Le facteur du couvert végétal C

Le couvert végétal est le facteur le plus pertinent pour freiner l'ampleur de l'érosion des sols sur les versants. En effet, un couvert végétal dense est d'autant plus efficace pour réduire l'érosion car il dissipe l'énergie des gouttes de pluies, il ralentit l'écoulement des eaux à la surface du sol et maintient une bonne porosité superficielle en évitant l'encroûtement superficiel (Roose 1996, Sabir & Roose 2004). Wischmeier & Smith (1978) ont établi un tableau qui permet d'évaluer le facteur C à partir des cartes d'occupation des sols.

Dans cette étude nous avons exploité les données de la télédétection pour la cartographie de facteur d'intensité du couvert végétal. Une image satellitaire Landsat 8 du 02/Avril, 2015 (Path 201, Frame 36) a servi à une classification supervisée afin d'établir la carte d'occupation des sols de la zone étudiée.

Ce travail a fait l'objet de vérifications sur le terrain, et cette même image a fait aussi l'objet du calcul de NDVI, indice qui permet d'estimer les valeurs du facteur C du site étudié. En effet, De Jong (1994) a déterminé une fonction de calcul du facteur C à partir de l'indice NDVI :

$$C = 0.431 - 0.805 * \text{NDVI}$$

Cette formule donne des valeurs de l'indice C allant de -0,07 à 0,42. Ces valeurs sont faibles, mais significatives et ne dépassent pas 0,43. La fonction de De Jong a été établie pour des types de végétation semi-naturels uniquement. Une autre fonction est utilisée pour évaluer les risques d'érosion en Europe, elle donne des valeurs acceptables dans notre zone d'étude :

$$C = \exp[-\alpha * (\text{NDVI} / (\beta - \text{NDVI}))]$$

Où α , β : Paramètres déterminant la forme de la courbe de NDVI-C avec $\alpha = 2$ et $\beta = 1$ (Van Der Knijff *et al.* 1999).

La carte synthétique obtenue (Fig. 8) montre la répartition des valeurs du facteur C allant de 0,03 jusqu'à 0,99 avec 85% de la superficie du bassin versant présentant un taux de couvert végétal très faible avec $0,3 \leq C \leq 0,9$ et seulement 15% en superficie semble bien protégé avec $C < 0,2$.

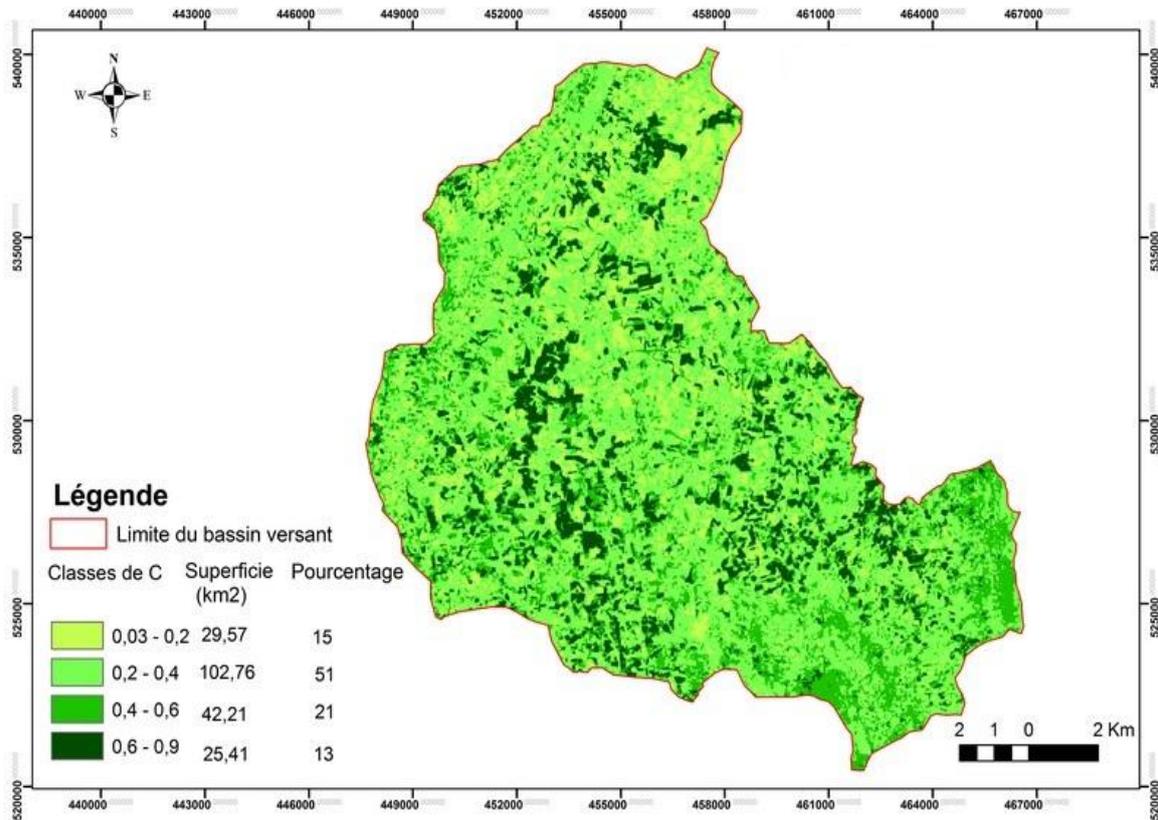


Figure 8. Carte de facteur C.

Figure 8. C factor map.

Le facteur des pratiques anti-érosives P

Les pratiques les plus conservatrices des sols sont les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage. Les recommandations de l'utilisation de l'équation de Wischmeier prévoient que les valeurs de P égales à 1 si aucune de ces pratiques n'existent dans les bassins versants. Dans notre zone d'étude, l'absence de ces techniques de conservation des sols nous permet de considérer P est égal à 1 dans tout le bassin.

Evaluation des pertes en sol

La superposition des cinq facteurs évalués sous les outils d'ArcGis donne une carte synthétique de répartition des taux d'érosion dans le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha (Fig. 9).

Pour une meilleure lisibilité de cette carte, nous avons adopté la classification la plus adoptée dans les différentes études d'érosion utilisant l'application RUSLE. Celle-ci montre que les sols peuvent tolérer des pertes allant jusqu'à 7 t/ha/an alors qu'au-delà de 20 t/ha/an les pertes deviennent alarmantes. Les résultats obtenus pour les unités

homogènes du site d'étude montrent des pertes moyennes de l'ordre de 25,77 t/ha/an, tandis que les pertes minimales et maximales sont respectivement de 0,11 t/ha/an et de 468 t/ha/ha. La carte des pertes en sols montre que 20% de la superficie du bassin présente des pertes relativement faibles et appartient à la classe 0,11 à 7 t/ha/an, 35% de la superficie se situe dans la classe 7 à 20 t/ha/an et reflète des pertes importantes, alors que les pertes dans le reste du bassin versant sont alarmantes (supérieures à 20 t/ha/an) et occupent 45% en superficie (Fig. 10).

Les valeurs maximales de pertes en sols appartenant à la classe 70 à 120 t/ha/an et 120 à 468 t/ha/an se localisent majoritairement en quelques endroits du centre du bassin versant, et vers son extrême Sud-Est. Ce résultat concorde avec celui de l'application de l'approche PAP/RAC (1997) dans ce même bassin versant (Ouallali *et al.* 2016), ils stipulent que les risques très élevés d'érosion hydrique se limitent en grande partie au centre du bassin versant et vers son extrême Sud-Est sur des sites à badlands. Ces dernières correspondent aux terrasses ténifiennes quaternaires (El Gharbaoui 1981) de nature friable, non couvert par la végétation et qui présentent des altitudes élevées.

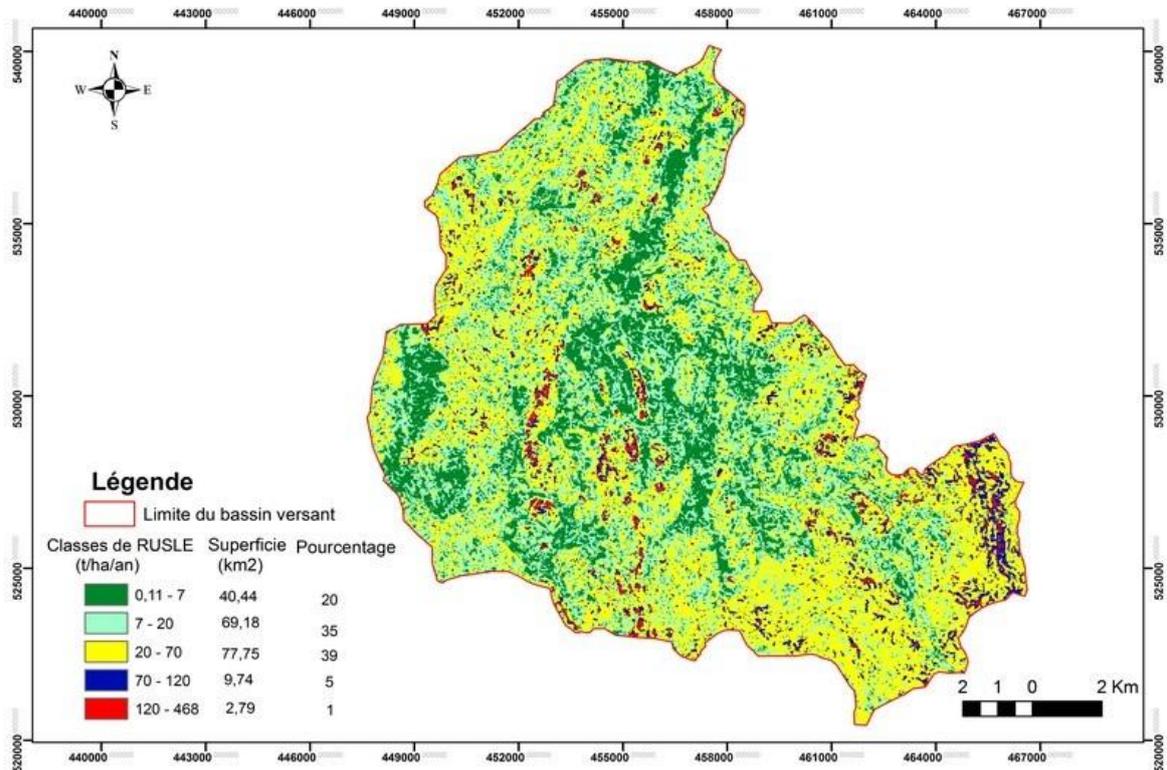


Figure 9. Carte résultante des pertes en sols en t/ha/an.

Figure. Resulting map of soil losses in t/ha/yr.

La comparaison des résultats obtenus avec des études réalisées dans d'autres bassins versant du Rif occidental montre la fiabilité relative du modèle appliqué. En effet Moukhchane *et al.* (1998), montre que les pertes moyennes en sols sur des terrains fragiles du territoire rifain atteignent 17t/ha/an. Le bassin versant Nakhla perd en moyenne 38,7 t/ha/an selon Ait Brahim *et al.* (2003). Khali Issa *et al.* (2014) ont trouvé 37t/ha/an au bassin versant de l'Oued Khmiss, tandis que Dahman (1994) donne 32,5t/ha/an en pertes pour le bassin versant Tlata. Tahiri *et al.* (2014) donnent une valeur moyenne de 47,18 t/ha/an en pertes pour le sous bassin de l'Oued Sania, sur des altitudes variant de 25m à 690m.

L'application du modèle RUSLE dans le bassin versant de l'Oued Sahla, (Rif central) a donné 22 t/ha/an en moyenne par Sadiki *et al.* (2009). Ce même auteur en 2004 a trouvé une moyenne des pertes de l'ordre de 55 t/ha/an dans le bassin versant de l'Oued Boussouab (Rif oriental). L'application d'autres modèles a donné des résultats similaires à ceux obtenus par l'application de RUSLE et confirment la validité de cette technique.

En effet, parmi ces modèles, l'application de la méthode de bathymétrie en aval du bassin versant Telata a donné 47,2 t/ha/an dans le barrage Ibn Batouta (Merzouki 1992). Selon Bonn (1998) et par application de la télédétection a trouvé 39 t/ha/an

dans le bassin versant Tleta, alors que 26,6 t/ha/an a été attribué au bassin versant Raouz par application de cette même technique (Damnati *et al.* 2006). Par ailleurs, la quantification des taux d'érosion par le ¹³⁷Cs donne dans le bassin Nakhla 39,6 t/ha/an (Moukhchane *et al.* 1988). Ce même auteur a trouvé 49,36 t/ha/an dans le bassin El Hachef (Moukhchane *et al.* 2005). Des parcelles de ce même bassin présentent 35 t/ha/an en pertes en sols selon Damnati *et al.* (2004). Zouagui & Benmansour (2012), ont trouvé 23 t/ha/an dans le bassin versant Moulay Bouchta du Rif occidental.

L'inégalité de distribution des pertes en sols dans les différentes zones du bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha est due aux variabilités que présentent les différents facteurs d'un endroit à un autre dans ce site. En effet, l'érosion est faible au centre du bassin sur des pentes très faibles 0% à 15% ($0,10 < LS < 1$) alors que les valeurs maximales se localisent en grande partie au Sud-Est du bassin sur des pentes élevées représentant plus de 30% et des valeurs maximales de LS variant de 5 à 13 conjugués à des valeurs de R maximales. Ceux-ci nous ont permis de conclure que les pertes en sols présentent une bonne corrélation au facteur topographique et climatique.

En amont et en aval du bassin les sols présentent une érodibilité importante; ce sont des sols peu évolués avec des valeurs de K variant de 0,3 à 0,44. Tandis que la partie centrale occupée principalement

par des Vertisols et des sols calci- magnésiens avec une érodibilité faible (K compris entre 0,1 et 0,22), montre de faibles pertes en sols. Cette zone est représentée par les classes (0,03 - 0,2 et 0,2 - 0,4) du facteur C et montre des pertes en sols faibles, les endroits qui présentent des valeurs élevées de ce facteur (classe 0,6 - 0,9) montrent en parallèle des pertes extrêmes.

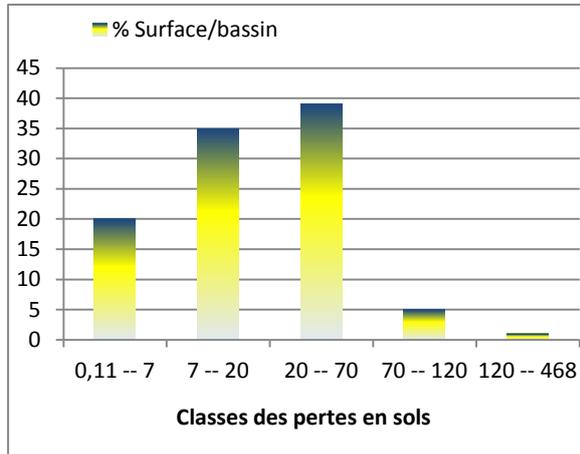


Figure 10. Répartition des classes des pertes en sols en t/ha/an.

Figure 10. Distribution classes of the soil losses in t/ha/year.

La partie Sud-Est du bassin couverte principalement par du matorral et matorral dégradé avec une superficie réduite des forêts. Cette zone montre une anomalie de corrélation avec le risque d'érosion hydrique, ceci est dû au fait que cette partie présente un effet conjugué de l'effet du couvert végétal et de celui des pentes supérieures à 35%. Ces résultats sont en concordance avec ceux du bassin versant d'Oued Boussouab (Sadiki *et al.* 2004) où la forte augmentation des pertes en sols au niveau des terrains de la classe 0,2 - 0,3 de C, due à la dominance de l'effet de la pente par rapport à celui du couvert végétal. De même Sabir *et al.* (2007) montre que le matorral surpâturé couvre beaucoup moins bien le sol et favorise le ruissellement.

CONCLUSION

Le bassin versant d'Oued Arbaa Ayacha est un milieu favorable au développement des phénomènes

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner toute notre reconnaissance aux personnels de la DREFLCD-SEAP du Rif, pour les commentaires et les discussions fructueuses qui ont permis l'amélioration de ce travail. Les évaluateurs anonymes sont remerciés pour leurs commentaires et suggestions.

d'érosion hydrique. Le bassin versant a une longueur 4,6 fois plus grande que la largeur. L'hypsométrie montre que 64% du bassin correspond à des altitudes peu élevées (50-150 m). Le coefficient de ruissellement est égale 41,7% (Valeur très élevée favorisant le ruissellement sur les versants). La lame d'eau ruisselée est de l'ordre de 303mm alors que l'apport liquide moyen est de 60,6 10⁶ m³.

L'estimation quantitative des pertes en sols, obtenue par utilisation du SIG et du modèle RUSLE, montre que :

- 80% de la superficie du bassin est soumise aux risques élevés d'érosion hydrique avec des pertes moyennes annuelles 25,77t/ha/an.
- Les faibles pertes se localisent en grande partie au centre de la zone d'étude sur des pentes faibles, des terrains à faible érodibilité et des valeurs minimales de précipitations.
- Les pertes maximales au milieu du bassin versant coïncident avec les bad lands à fort risque d'érosion trouvés par l'étude qualitative d'érosion dans ce bassin.
- Les facteurs de l'équation universelle révisée (topographie, érodibilité, climatologie et couvert végétal) des pertes en sols présentent une bonne corrélation aux pertes en sols, sauf une seule classe du facteur C.
- L'effet conjugué du couvert végétal et de la topographie montre que les sols deviennent plus sensibles à l'érosion en fonction de la pente plus que le couvert végétal.

Bien que la méthode RUSLE soulève encore des discussions sur les conditions d'utilisation et sur ses limites, d'autant plus qu'elle ne tient pas compte d'autres formes d'érosion tels que, l'érosion linéaire, le sapement des berges et les phénomènes de re-sédimentation, elle reste un outil d'aide à la décision lors des aménagements des bassins versants par les administrations chargées de la lutte antiérosives.

Ces résultats peuvent être conjugués à ceux obtenues par d'autres méthodes d'évaluation de l'érosion hydrique. Pour plus de précision, d'autres méthodes s'avèrent intéressantes ; particulièrement : les méthodes radio-isotopiques, le modèle SWAT (Soils Water Assessment Tools), le modèle SAM (spectral angel mapper), l'étude des griffes d'érosion, les mesures bathymétriques, etc.

REFERENCES

- ABHL. 2005. Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau des bassins Loukkous, Tangérois et côtiers méditerranéens. Agence des bassins hydrauliques du Loukkous, 77p.
- ABHL. 2012. Projet du plan directeur intègre des ressources en eau des bassins du Loukkos, du tangérois et côtiers méditerranéens. Agence des bassins hydrauliques du Loukkous (ABHL), 54 p.

- Aït Brahim L., Sossey Alaoui F., Siteri H. *et al.* 2003. Quantification of soil loss in the Nakhla watershed (northern Rif). *Sécheresse - Science et changements planétaires*, Vol. 14 (2), 101-106.
- Billaux P., Bryssine G. 1967. Les sols du Maroc. In : Congrès de pédologie méditerranéenne : excursion au Maroc. *Cahiers de la Recherche Agronomique*, 1 (24), 59-101.
- Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah R. S. *et al.* 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), 73-89.
- Bonn F. 1998. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, vol 9, n°3, 185-192.
- Boukheir R., Cerdan O. & Abdallah C. 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, vol. 82, 347-359.
- Boukheir R., Girard M.-Cl., Khawlie M. *et al.* 2001. Erosion hydrique de sols dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 8, 4, 231-245.
- Boutaib N. 1987. Impact de la dégradation des bassins versants sur l'économie nationale. *Séminaire National sur l'Aménagement des bassins versants*, 11p.
- 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, 114p.
- CNEA, 2002. *Étude d'avant-projet pour la réalisation du lac collinaire oued Saidan*, Tunisie, 15-21.
- 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 Tanger-Tétouan). *TANCA-01. Workshop sur les techniques analytiques, nucléaires et conventionnelles, et leurs applications*, Rabat, p38.
- Damnati B., Radakovitch O. & Ibrahim S. 2004. Utilisation du césium-137 pour l'estimation des taux d'érosion dans un bassin versant au Nord du Maroc. *Sécheresse*, 15 (2), 195-199.
- David W.P. 1987. Soil and water conservation planning. Policies, Issues and recommendations. DENR Quezon City. *Journal of Philippine Development*, N26, Volume 15, 47-84.
- De Jong S.M. 1994. Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a Mediterranean environment. *Nederlandse geografische studies*, 177p.
- Dhman H. 1994. *Utilisation des SIG et des télédétections dans l'étude de l'érosion hydrique: application au bassin versant de Tleta*. Mémoire de troisième cycle, ENFI, Salé, 120 p.
- Dhman L., Merzouk A., Sabir M. *et al.* 1997. Cartographie des pertes en terre dues à l'érosion hydrique par utilisation d'un système d'information géographique et des images satellites. Cas du bassin versant de Telata. *Atelier de travail sur la modélisation de l'érosion hydrique par « RUSLE »*. Marrakech, 52-65.
- DREF du Nord-Est. 2007. *Étude d'aménagement du bassin versant d'Oued Beht en amont du barrage El Kansera*. Direction Régionale des Eaux et Forêts, Fès. 56 p.
- Dubreuil P. 1974. Initiation et analyse hydrologique. Masson. ORSTOM, in Walling D., Probst J., Human impact on erosion and sedimentation. *IAHS publication*, 245 p.
- El Gharbaoui A. 1981. La terre et l'Homme dans la péninsule tingitane : étude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif Occidental. *Travaux de l'Institut Scientifique, série Géologie Géographie Physique*, 15, 1-439.
- El Garouani A., Chen H. & Lewis L. 2007. The impacts of land use/land cover changes and climate regime on the spatial patterns of erosion and deposition by remote sensing and GIS: Case of Tleta river catchment (Morocco)”. *2nd International Conference of GIS/RS in Hydrology, Water Resources and Environment*, Guangzhou, China, 7-13.
- El Kamoune I. 2009. *Application du modèle STREAM pour la simulation de l'érosion dans le bassin versant Tleta*. Mémoire de 3ème cycle. Sciences du Sol. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. 158p.
- Flanagan D.C., Nearing M.A. 1995. USDA-Water Erosion Prediction project: *Hill slope profile and watershed model documentation*, NSERLR eport no. 10 USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, 47097-1196.
- Gravelius II. 1914. Rivers in German. Berlin, Germany: Göschen. Grundri[dtilde] der gesamten Gewässerkunde, Band I. *Flußkunde Compendium of Hydrology*, vol.1. 37p.
- Inypsa. 1987. *Étude des sols au 1/100.000 (Edition au 1/50.000)*. Projet Intégré de développement Agricole de Tanger-Tétouan, Secteur de Tétouan. Inypsa -Maroc, S.A. et Direction Provinciale de l'Agriculture de Tétouan, Carte, 1p.
- Issa L., Raissouni A., Moussadek R. *et al.* 2014. Mapping and assessment of water erosion in the Khmiss Watershed (North Western Rif, Morocco). *Current Advances in Environmental Science*, 4, 119-130.
- Kalman R. 1967. Essai d'évaluation pour le pré-Rif du facteur couverture végétale de la formule de Wischmeier de calcul de l'érosion. In: *Rapport pour l'administration de la forêt et d'eau*, Rabat, 1-12.
- Merzouki T. 1992. Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. *La Revue marocaine du Génie civil*, 38, 46-50.
- Millward A., Mersey JE. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Catena*, 38, 109-129.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M. *et al.* 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10, 629-641.
- Moukhchane M. 1999. *Contribution à l'étude de l'érosion hydrique dans le rif occidental. Application des méthodes expérimentales du ¹³⁷Cs et de la susceptibilité magnétique aux bassins versants Nakhla, El Hachef et Smir*. Thèse d'état, Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc, 260 p.
- Moukhchane M., Bouhlassa S. & Chalouan A. 1998. Approche cartographique et magnétique pour l'identification des sources de sédiments : cas du bassin versant Nakhla (Rif, Maroc). *Sécheresse* 3, n° 9, 227-232.
- Moukhchane M., Bouhlassa S., Ahmed Chalouan A. *et al.* 2005. Détermination des zones vulnérables à l'érosion par la méthode magnétique. Application au bassin versant d'El Hachef (région de Tanger, Maroc). *Revista de la Sociedad Geologica de Espana*, 18 (3-4), 225-233.
- Moukhchane M. 2002. Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin versant du Nakhla (Rif Occidental, Maroc). *Bulletin Réseau Erosion*, N°21, 255-266.

- Moussa R., Voltz M. & Andrieux P. 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behavior of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16, 393-412.
- Musy A. 2005. *Cours d'hydrologie générale*. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM). Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement. École polytechnique fédérale de Lausanne. 105p.
- Nearing M.A., Lane L.J. & Lopes V.L. 1994. Modeling soil erosion. In: Lal, R.: *Soil erosion research methods*. Second Ed. *Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press, FL.*, 127-156.
- Ouallali A., Moukhchane M., Aassoumi H. *et al.* 2016. The mapping of the soils degradation state by adaptation the PAP/RAC guidelines in the watershed of Wadi Arbaa Ayacha, Western Rif, Morocco. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, 77-88.
- Osrihi A., Eloumri M. & Moussadek R. 2007. *Vocation agricole des terres de la province de Tanger-Rapport et cartes*. Rapport. Institut National de la Recherche Agronomique. 27p.
- PAP/RAC. 1997. Guidelines for mapping and measurement of rainfall-induced erosion processes in the Mediterranean coastal areas. PAP-8/PP/GL.1. Split, *Priority Actions Programme Regional Activity Centre (PAM/PNUE)*, in collaboration with FAO, 72p.
- Rahhou M. 1999. *L'érosion dans le Prérif central, zone interfluviale Leben-Sebou-Ouergha, un prolongement de l'évolution naturelle, une production sociale*. Thèse Doctorat d'Etat, Université Mohammed V, Rabat, 300p.
- Rango A. & Arnoldus H.M.J. 1987. Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*. 36p.
- Renard KG., Foster GR., Weesies GA. *et al.* 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation Planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture Handbook No.703, USAD-ARS, Washington*, 407 p.
- 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.
- Roche M. 1963. *Hydrologie de surface, office de la recherche scientifique et technique outre-mer, Paris*. 431p. www.pseau.org/outils/ouvrages/ird_hydrologie_de_surface_marcel_roche_1963.pdf
- Roose E. 1996. Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bulletin Réseau Erosion*, N°16, 87-97.
- Sabir M., Roose E. 2004. Influences du couvert végétal et des sols sur le stock de carbone du sol et les risques d'érosion et de ruissellement dans les montagnes méditerranéennes du Rif Occidental (Maroc). *Bulletin Réseau Erosion* N°23, 11, 144-154.
- Sabir M., Roose E., Ouagga T. *et al.* 2007. Utilisations des terres et risques de ruissellement et d'érosion dans les montagnes au Maroc. *Actes des JSIRAUF, Hanoi*, 1-6.
- 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, Rabat, section Sciences de la Terre*, n°26, 69-79.
- 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*, N6, 59-70.
- Souchere V., Cerdan O., Dubreuil N. *et al.* 2005. Modeling the impact of agri-environmental scenarios on overland flow in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena*, 61, 229-240.
- Suter G. 1980. Carte géologique/structurale de la chaîne rifaine, échelle 1:500,000. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 245a/b.
- Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F. *et al.* 2014. Evaluation et Quantification de l'Erosion et la Sédimentation à Partir des Modèles RUSLE, MUSLE et Déposition Intégrés dans un SIG. Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 125, No 2, 157-178.
- Tahiri M., Tabyaoui H., Tahiri A. *et al.* 2016. Modeling Soil Erosion and Sedimentation in the Oued Haricha Sub-Basin (Tahaddart Watershed, Western Rif, Morocco): Risk Assessment. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, 107-119.
- Thompson R., Bloemendal J., Dearing F. *et al.* 1980. Environmental applications of magnetic measurements. *Science*, 207, 481-486.
- Vander Knijff J.M., Jones R.J.A. & Montanarella L. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe. *European Soil Bureau, European Communities, EUR19044EN*, 32p.
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A. & Montanarella L. 1999. Soil erosion risk assessment in Italy. *European Soil Bureau, Joint Research Center of the European Commission*. 54p. <https://pdfs.semanticscholar.org/18f2/cb0145c0c027d8d27c280b533d7aa6fef5f3.pdf>
- Wischmeier H., & Mannering J. V. 1969. Relation of soil properties to its Erodibility. *Soil Science Society of America*. Vol N° 33.
- Wischmeier W.H., & Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses - a guide for conservation planning Science, U.S. Dept. of Agriculture. *Agriculture Handbook, Washington, D.C.*, 537p.
- Wischmeier W.H., & Smith D.D. 1960. Prediction rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains : a guide for selection of practices for soil and water conservation. U.S. Dept. *Agriculture Handbook*. 282p.
- Zouagui A., Benmansour M., Amenzou N. *et al.* 2012. Application la technique de ¹³⁷Cs à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Moulay Bouchta, Rif occidental, Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1, 53-58.
- 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*, Vol 48, n°8, 813-818.