

Modélisation Du Risque D'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Des Pertes En Terre Dans Le Rif Occidental: Cas Du Bassin Versant De Moulay Bouchta (Maroc)

Anis Zouagui, (Ingénieur forestier, doctorant)

Unité de Recherche: Gestion conservatoire des eaux et des sols (IAV-Hassan II) et CNESTEN, Rabat, Maroc

Pr. Mohamed Sabir,

École Nationale Forestière d'Ingénieurs (ENFI), Salé, Maroc

Pr. Mustapha Naimi,

Pr. Mohamed Chikhaoui,

Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV), Rabat, Maroc

Dr. Moncef Benmansour,

Centre National de l'Énergie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN), Rabat, Maroc

Doi: 10.19044/esj.2018.v14n3p524 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n3p524](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n3p524)

Abstract

Soil erosion causes many environmental and socio-economic problems: loss of biodiversity, decrease in the productivity of agricultural land, siltation of dams and increased risk of flooding. It is therefore essential to establish a detailed evaluation of this process before any spatial planning. To evaluate the effects of soil erosion spatially and quantitatively in order to face this phenomenon, and propose the best conservation and land development strategies, the Universal Soil Loss Equation (USLE) coupled with a geographic information system (GIS) is applied. This model is a multiplication of the five erosion factors: the erosivity of the rain, the erodibility of the soil, the inclination and the slope length, the vegetation cover and the anti-erosion practices. The study area is the Moulay Bouchta watershed (7 889 ha), which is located in the western part of the Rif Mountains, is characterized by a complex and contrasting landscape. The resulting soil loss map shows an average erosion rate of 39.5 (t/ha/yr), 87% of the basin has an erosion rate above the tolerance threshold for soil loss (7 (t/ha/yr)). Soil losses per sub-basin range from 16.2 to 81.4 (t/ha/yr). The amount of eroded soil is estimated at 311,591 (t/yr), corresponding to a specific degradation of 12.1 (t/ha/yr). In the absence of any erosion control, 25% of the soil losses would reach the new

dam located a little upstream of the basin outlet, reducing its water mobilization capacity to 59,625 (m³/yr). The application of Principal Component Analysis (PCA) to soil erosion factors shows a significant influence of topographic factor (LS) on soil erosion process, followed by the effect of support practices (P), then by soil erodibility (K).

Keywords: Erosion, Siltation, USLE, Rif Mountains, Watershed

Resume

L'érosion hydrique des sols est à l'origine de nombreux problèmes environnementaux et socio-économiques : perte de la biodiversité, diminution de la productivité des terrains agricole, envasement des barrages, augmentation du risque d'inondation. Il est donc impérativement primordial d'établir une évaluation détaillée de ce processus avant tout aménagement. Afin d'évaluer spatialement et quantitativement les effets de l'érosion des sols pour faire face à ce phénomène et proposer les meilleures stratégies de lutte, de conservation et d'aménagement des terrains; on a fait appel à l'équation universelle de perte en sol USLE, couplée à un SIG. Ce modèle est une multiplication des cinq facteurs d'érosion à savoir l'érosivité de la pluie, l'érodibilité du sol, l'inclinaison et la longueur de pente, le couvert végétal et les pratiques antiérosives. La zone d'étude est le bassin versant de Moulay Bouchta (7 889 ha), situé dans la partie occidentale du Rif, il est caractérisé par un paysage complexe et contrasté. La carte de pertes en sols résultante montre un taux d'érosion moyen de 39.5 (t.ha-1.an-1), 87% du bassin présente un taux d'érosion supérieur au seuil de tolérance aux pertes en terre (7 t.ha-1.an-1). Les pertes de sol par sous bassin varient de 16,2 à 81,4(t.ha-1.an-1). La quantité de sol érodé est estimée à 311 591 (t.an-1), correspondant à une dégradation spécifique de 12,1 (t.ha-1.an-1). En l'absence de tout aménagement anti-érosif, 25% des pertes en sol parviendraient au nouveau barrage situé un peu en amont de l'exutoire du bassin, réduisant ainsi sa capacité de mobilisation des eaux à 59 625 (m³/an). L'application de l'analyse des composantes principales (ACP) aux facteurs de production de l'érosion des sols, montre une influence importante du facteur topographique (LS) sur le comportement érosif des sols, suivi par le facteur des pratiques antiérosives (P) puis par l'érodibilité des sols (K).

Mots clés: Erosion, Envasement, USLE, Rif occidental, Bassin versant

Introduction

L'érosion des sols et la dégradation des ressources qui en découle sont des phénomènes spatio-temporels très significatifs dans de nombreux pays méditerranéens. L'érosion des sols, associée aux pratiques agricoles non-

appropriées, constitue une menace pesante sur la production agricole durable en amont et réduit la capacité de mobilisation des ressources en eaux en aval. Au Maroc, l'érosion des sols se manifeste essentiellement dans les montagnes du Rif où la dégradation spécifique dépasse souvent 2 000 (t/km².an) suite à la surexploitation des ressources et à la réduction du couvert végétal (Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1995). Cette situation prend des proportions importantes et se traduit dans les ouvrages hydrauliques au niveau des bassins du Rif occidental, les plus touchés par le phénomène d'envasement. C'est le cas de barrage « Ali thelat » dans le bassin versant de Moulay Bouchta, dont la capacité de retenue était de 30 Million m³. Ce barrage, mis en service en 1935, se trouve complètement comblé avant la fin de sa durée de vie. Ces dernières années, dans le cadre du plan Maroc vert et du plan d'aménagement des bassins versants, qui aspirent à une agriculture durable et un développement soutenu, l'érosion des sols est de plus en plus reconnue comme un danger plus grave dans les zones de montagne et les terrains agricoles.

Une évaluation quantitative est nécessaire pour déduire l'étendue et l'ampleur des problèmes d'érosion des sols afin de pouvoir recourir à des stratégies de gestion efficaces. Cependant, la complexité de ses facteurs rend difficile l'estimation précise ou la prédiction de l'érosion. L'évolution des technologies spatiales et des moyens d'acquisition de l'information géographique à distance ont augmenté les méthodes existantes et ont fourni des méthodes efficaces de mesure, d'analyse et de gestion des ressources naturelles à des échelles allant de la parcelle au bassin versant. Le modèle numérique de terrain (MNT) ainsi que les données de télédétection et les SIG peuvent être utilisés avec succès pour permettre une évaluation rapide et détaillée des risques d'érosion (Jain et al., 2001, Kouli et al., 2009). Les informations spatiales et quantitatives sur l'érosion des sols à l'échelle des micro-bassins versants contribuent de manière significative à la planification de la conservation des sols, à la protection de l'environnement et la gestion des hydro-agrosystèmes.

Pour estimer l'érosion des sols et élaborer des plans de gestion de l'érosion des sols, de nombreux modèles d'érosion ont été développés. Le modèle le plus utilisé dans le monde pour prédire la perte de sol est l'équation universelle de perte en sol USLE, en raison de sa commodité d'intégration dans les systèmes d'information géographique (SIG). Bien qu'il s'agisse d'un modèle empirique, il prédit non seulement les taux d'érosion des bassins en connaissant les caractéristiques des bassins versants et les conditions hydroclimatiques locales, mais il présente aussi l'hétérogénéité spatiale de l'érosion des sols.

Dans cette étude, le modèle USLE a été intégré à un environnement SIG et utilisé pour estimer et analyser les pertes de sol des sous-bassins à

l'intérieur du grand bassin versant de Moulay Bouchta afin d'élaborer des pratiques de conservation appropriées. D'autre part ce modèle a été couplé à un coefficient de délivrance pour estimer le taux d'envasement du nouveau barrage.

Matériels et Méthodes

Site d'étude

Situé dans la partie occidentale des montagnes du Rif, le bassin versant de Moulay Bouchta, d'une superficie de 7889 ha, est localisé à 60 km au Sud-Est de la ville de Tétouan et à 10 km au nord-ouest de Chefchaouen, entre $35^{\circ}14'43.445''N$ et $35^{\circ}20'56.858''N$ de latitude et entre $5^{\circ}25'20.022''W$ et $5^{\circ}17'59.542''W$ de longitude (Fig. 1). Il fait partie intégrante du grand bassin versant Oued Laou, est principalement drainé par l'oued Moulay Bouchta qui déverse dans le barrage « Ali Thlet » dont la capacité de retenue était de 30 Million m³. Cet ouvrage, construit en 1935, est actuellement entièrement envasé. En 2015, ce bassin versant a connu la construction d'un nouveau barrage baptisé Moulay bouchta d'une capacité de 12 Million de m³ destiné à l'approvisionnement en eau potable de la ville de chefchaouen et des centres avoisinants et l'irrigation du périmètre hydro-agricole Dar Aqoubaâ en aval du barrage.

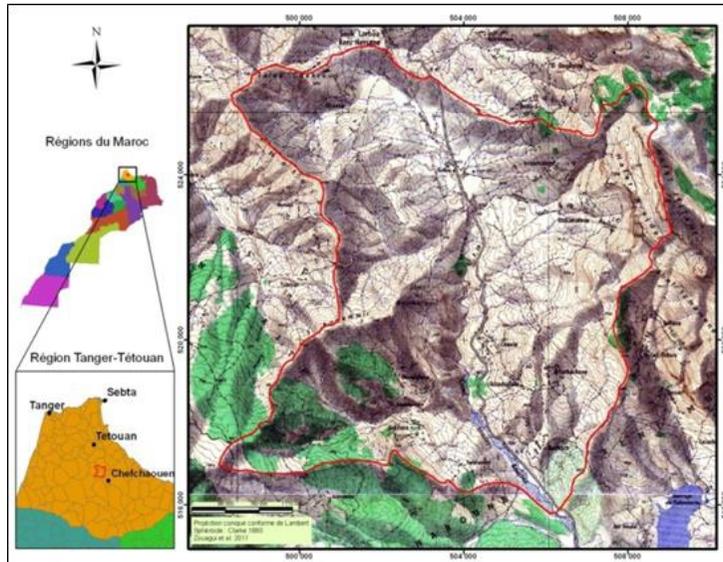


Figure 1: Carte de localisation bassin versant de Moulay Bouchta (Rif Occidental, Maroc).

La topographie du bassin est relativement accidentée, caractérisée par des pentes en général moyennes à fortes, à l'exception de la partie nord du bassin où la pente s'atténue pour céder la place à un plateau perché à 600 mètres d'altitude, l'élévation varie de 300 m à l'exutoire du bassin à 1821 m dans la dorsale calcaire. Le bioclimat de la zone d'étude est dominé par

l'humide à variante tempérée et le subhumide à variante chaude, les précipitations annuelles moyennes varient de 605 à 1770 mm, la température est comprise entre 10,6 et 24,7 °C. Le bassin versant est constitué en grande partie des sols peu évolués (63%), puis, les sols bruns vertiques (19%), sols bruns fersialitiques (10%) et sols minéraux bruts (8%) (Benjelloun, 1993). L'espace est couvert à 78% de terrains agricoles (les céréales, les légumineuses, les cultures maraîchères, les fourrages et les arbres fruitiers), suivi d'une végétation de matorral (14%) parfois très dégradée, et des formations forestières (8%) avec le chêne-liège comme essence prépondérante, ainsi que des reboisements de pin d'Alep, pin maritime et pin radiata (Zouagui et al., 2012). L'analyse du milieu révèle que l'érosion hydrique est très active dans le bassin aussi bien sur les versants que dans le fond des ravins et se traduit par la présence de plusieurs formes d'érosion. Cependant, les transports de fond prédominent sur les formes érosives survenant sur les versants.

Méthodologie

L'équation universelle de perte de sol a été développée par Wischmeier et Smith en 1978 pour estimer la perte annuelle moyenne de sol par l'érosion en nappe. L'USLE est une équation empirique qui calcule l'érosion des sols comme le produit de six facteurs représentant l'érosivité des précipitations, l'érodibilité des sols, la longueur de la pente, l'inclinaison de la pente, les pratiques de gestion des couvertures et les pratiques de conservation. Il est basé sur l'analyse statistique de l'érosion mesurée sur le terrain sur des dizaines de parcelles de test sous des précipitations naturelles et simulées. La perte annuelle de sol due à un site a été prédite selon les relations suivantes:

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

Où :

A: Perte annuelle de sol (t.ha-1.an-1);

R: facteur d'érosivité des pluies (MJ.mm.ha-1.h-1.an-1);

K: facteur d'érodibilité du sol (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1);

L: Longueur de la pente (m);

S: Inclinaison de la pente (%);

C: facteur sans dimension de la couverture végétale et des pratiques culturales, et

P: facteur sans dimension de contrôle de l'érosion et des pratiques de conservation du sol.

Une fois la base de données géographiques constituée, on a choisi une structure maillée au pas de 30 mètres correspondant à la résolution de modèle numérique du terrain. La combinaison des différents facteurs d'érosion nous a

permis de distinguer 4 niveaux de sensibilité des terrains à l'érosion faible, moyenne, forte et très forte.

Facteur d'érosivité de la pluie (R)

L'érosivité de la pluie est définie comme la capacité potentielle de pluie à causer de l'érosion et donnée comme le produit ($E \cdot I_{30}$) de l'énergie totale de pluie (E) et l'intensité maximale pendant 30 min (I_{30}). Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations dans le bassin ou sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles. C'est la raison pour laquelle on a utilisé la formule alternative de Rango et Arnoldus (1987) :

$$R = 1.735 * 10 (\text{Log } \Sigma(P_i^2 / P) - 0.8188)$$

Où

R : Érosivité des pluies (MJ mm/ha.h.an),

P_i : Précipitations mensuelles (mm) et

P : Précipitations annuelles (mm).

Pour extrapoler les valeurs du facteur R à l'ensemble du bassin versant, des secteurs de même agressivité climatique (isohyètes) ont été tracées selon la méthode déterministe de la Pondération par l'Inverse de la Distance (IDW)

Ainsi, des données de précipitations de 6 stations climatologiques réparties dans la région et étalées sur une période de 30 ans ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

Le facteur R a été calculé pour chaque station, puis on a interpolé les résultats par la méthode d'interpolation IDW, pour avoir la carte du facteur d'érosivité du bassin. Le choix de cette méthode parmi d'autres revient à son adaptation aux variations de terrains.

Facteur d'érodibilité du sol (K)

L'érodibilité des sols est un indicateur de la facilité avec laquelle les particules de sol se détachent. Il est fonction de la structure du sol, de sa texture de sa granulométrie, de sa quantité de matière organique et de sa perméabilité.

Le facteur d'érodibilité du sol K a été calculé à l'aide du monogramme de Wischmeier, et en exploitant les résultats des profils pédologiques issus des travaux de Sabir et al. (2002) et Mandimou (2002) dans le bassin versant de Moulay Bouchta.

$$K = [2,1 * 10^{-4} (12 - MO) M^{1,4} + 3,25 (S - 2) + 2,5 (P - 3)] / 100$$

Où :

K : représente l'érodibilité du sol (tonne/ha) ;

MO : le taux de matière organique dans le sol ;
 M: est le produit des fractions de particules primaires et se calculant de la manière suivante :

$$M = (\% \text{ limon} + \% \text{ sable fin}) * (100 - \% \text{ argile})$$

S : le code de structure ;

P : le code de perméabilité

Certaines surfaces montrent une grande quantité d'éléments grossiers qui ralentissent l'érosion en interceptant les gouttes de pluie et réduisent la vitesse de ruissellement. Ainsi, dans le cas des sols peu évolués et des sols bruns fersialitiques, pour obtenir un facteur K plus proche de la réalité, on a utilisé la formule ajustée (Dumas 1964, Römken et al., in Renard et al., 1996).

$$K_a = K (0,983 - 0,01898 X + 0,000973 X^2)$$

Où :

K_a : Erodibilité ajustée,

K : Erodibilité estimée à partir de la formule de Wischmeier,

X : Pourcentage d'éléments grossiers supérieurs à 2 mm à la surface du sol.

Les sites d'échantillonnage et d'observation ont été choisis sur la base de la carte des unités homogènes, élaborée à partir de la superposition de la carte géologique, la carte du couvert végétal et la carte physiographique. A chaque unité homogène est attribuée la valeur de K qui lui correspond.

Facteur topographique (LS)

Le critère de pente est utilisé pour mettre en évidence la capacité d'un ruissellement à détacher et transporter des particules de sol : plus la pente est importante, plus le ruissellement érodera le sol. D'autre part, plus long est le versant, plus grand est la perte de sols, puisque a mesure qu'il y a la concentration des écoulements, il y a une augmentation du potentiel érosif.

Pour tenir en compte l'impact de la concentration de l'écoulement, le facteur longueur de la pente a été remplacé par la surface amont de l'écoulement. La formule proposée par Mitasova et al. (1996) a été utilisé pour calculé le facteur topographique à partir de la carte d'accumulation de l'écoulement et de la carte des pentes tous les deux dérivés d'un modèle numérique du terrain MNT de 30m de résolution lui-même réalisé à travers la digitalisation et l'interpolation des courbes de niveau des cartes topographiques (1/50 000). Cette formule a été implémentée dans le logiciel SIG:

$$LS = [(FA * RS) / 22.1]^{0,4} * [(\sin(S * 0.01745) / 0.0896)]^{1,4} * 1,4$$

Où

FA : Grille d'accumulation de l'écoulement,
RS : Résolution du modèle MNT (30m),
S : Grille des pentes en degré.

Facteur du couvert végétal (C)

La couverture végétale est l'élément essentiel de la protection du sol contre l'érosion. 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 (Sabir & Roose 2004).

Les valeurs du facteur C varient entre 0 et 1 selon l'occupation du sol. Étant donné que les valeurs de NDVI ont une corrélation avec le facteur C, de nombreux chercheurs utilisent une analyse de régression pour estimer les valeurs de facteur C pour les classes d'utilisation des terres/couverture du sol dans l'évaluation de l'érosion (Ouallali et al., 2016, kouli et al., 2009, Zhou et al., 2008)

Les équations de régression linéaire ou non linéaire sont construites en utilisant une analyse de corrélation entre les valeurs de NDVI obtenues à partir de l'image satellite et les valeurs de facteur C correspondantes obtenues à partir des tables USLE.

L'indice de végétation NDVI se calcule comme un rapport entre les valeurs de la bande du rouge (R) et de la bande du proche infrarouge (PIR), qui reflète la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé.

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Pour les images Landsat7 :

$$\text{NDVI} = (\text{Bande 4} - \text{Bande 3}) / (\text{Bande 4} + \text{Bande 3})$$

Les valeurs du NDVI varient entre -1,0 et 1,0, où les valeurs les plus élevées reflètent la végétation verte et dense et les valeurs faibles représentent les sols nus ou les plans d'eau.

Le facteur C peut être estimé en appliquant la relation de régression suivante (Van Der Knijff et al., 1999) :

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

Où

α , β : Paramètres déterminants la forme de la courbe de NDVI-C, avec $\alpha = 2$ et $\beta = 1$.

Facteur des pratiques antiérosives (P)

Le facteur P décrit les actions humaines conservatrices des sols qui se pratiquent pour contrer l'érosion hydrique. Les valeurs de P varient généralement de 0 à 1, selon la pratique adoptée et selon la pente. Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols (Laouina, 2007).

Carte de risque d'érosion

La superposition des cinq paramètres de l'USLE dans un logiciel SIG permet l'obtention de la carte de risque d'érosion, informant sur le potentiel d'érosion en (t.ha-1.an-1) par unité spatiale (pixel).

Rendement en sédiments et taux d'envasement du nouveau barrage

Le rendement en sédiments est défini comme la quantité de sédiments effectivement rejetée par le bassin versant (Vanoni, 1975). La formule la plus courante qui définit le rapport de sédimentation en tant que rapport entre le rendement des sédiments et la perte totale annuelle de sol du bassin est :

Sediment delivery ratio (SDR) = rendement en sédiments / perte en sol par érosion hydrique

De nombreuses recherches récentes tentent de modéliser cette relation avec différents facteurs : la densité de drainage, l'utilisation des terres, la topographie, alors que d'autres chercheurs considèrent que le climat est le facteur dominant (Walling, 1996, Williams, 1977, Vanoni, 1975). Habituellement, ces modèles ne sont applicables que dans les conditions où ils étaient développés.

Dans cette étude on se base sur la formule de Hession et Shanholtz (1988), qui s'exprime par la relation suivante:

$$\text{SDR} = 10(R/L)$$

Où:

R la dénivelé entre la parcelle et l'exutoire,

L la distance entre la parcelle et l'exutoire.

Ainsi, la quantité de sédiments délivrée à l'exutoire se calcule par la relation suivante :

$$\text{Ad} = \text{SDR} * \text{A}$$

Où :

A : la quantité de sédiments produites aux versants ;

Ad : la quantité de sédiments délivrée à l'exutoire ;

Facteur d'érosivité de la pluie (R)

L'érosivité de la pluie a été calculé à partir des mesures de 6 stations météorologiques situées à proximité du bassin en appliquant l'équation de Rango et Arnoldus (1987) (Tableau 1). L'interpolation de ces données a permis de dresser une carte de répartition des isohyètes dans le bassin versant de Moulay Bouchta (Fig. 2). Les valeurs de R varient de 63 (MJ mm/ ha.h.an) à Beni Hassan au Nord du bassin à environ 76 (MJ mm/ha.h.an) au Sud-ouest à Jbel Bouhachem. Ces valeurs sont relativement en concordance à celles retrouvées par Rahhou (1999) dans le bassin versant Lben qui indique des valeurs allant de 43 à 87,56, et à celle de la vallée de l'Ouergha où le service des Eaux et forêts (Le Landais et al., 1975) a déterminé des valeurs de 51 à 194 et moins importantes que les valeurs retrouvés par Dhman et al. (1997) dans le bassin versant de Telata, où ont trouvé des valeurs de R allant de 215 à 228.

Tableau 1 : Indices de l'érosivité des pluies R calculés à partir des stations météorologiques à proximité du bassin versant de Moulay Bouchta.

Stations	x	y	z	Précipitations annuelles (mm)	Facteur R (MJ.mm.ha-1.h-1.an-1)
Ben Karrich	496566	545587	18	604	60,9
Béni Hassan	501800	527300	700	654	62,7
Nakhla barrage	499418	538697	210	736	64,8
Chefchaouen	512000	507500	560	1001	71,2
Jbel Timezouk	503188	534617	275	1451	76,9
Jbel Bouhachem	491004	512787	1240	1777	80,5

Facteur érodibilité du sol (K)

Dans le bassin on a retrouvé six types de sols : sols bruns vertiques (SBV), sols peu évolués d'érosion (SPE-E), sols bruns fersialitiques (SBF), sols peu évolués à tendance verticale (SPE-V), sols peu évolués à tendance fersialitique (SPE-F) et sols minéraux bruts (SMB). Le facteur K a été estimé en analysant la surface meuble de chaque unité homogène et pour limiter l'influence des autres facteurs, la moyenne de trois à quatre valeurs de K pour chaque formation lithologique a été retenue. Les valeurs d'érodibilité varient de 0.23 (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) sur les sols bruns vertiques à 0.34 (t.ha.h.ha-1.MJ-1.mm-1) sur les sols peu évolués d'érosion et les sols minéraux bruts. La carte de répartition du facteur K épouse celle de la lithologie du bassin versant (Fig. 3).

Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique (LS) (Fig. 5) a été calculé à partir de l'inclinaison des pentes (Fig. 4) et de leur longueur par modélisation SIG. Ce

facteur varie de 0 dans la partie centrale constituée de la plaine alluviale à 116 sur les versants de la dorsale calcaire, avec une moyenne de 8,5.

Facteur de la gestion de la couverture (C)

Pour éviter les variations interannuelles du facteur C, on a calculé une moyenne de l'indice NDVI sur une période de 11 ans de 2002 à 2012. D'autre part, les dates d'acquisition des images satellites coïncident avec les mois d'octobre ou novembre, période à laquelle on estime que le sol est prédisposé à l'érosion vu qu'il se trouve sec après une longue période estivale et devient sensible aux premières pluies d'automne et d'autant plus que les paysans labourent leur terrain en cette période. Le travail de Choukri et al. (2016) dans le bassin versant Saboun, confirme ce constat et démontre que la saison la plus érosive est l'automne, avec une valeur maximale enregistrée durant le mois d'octobre.

Le facteur (C) généré à partir de l'indice NDVI (Fig. 6), donne une valeur moyenne de 0,39, place le site d'étude dans une zone de couverture végétale faible à moyenne. Ceci implique que, malgré l'ambiance humide et subhumide qui caractérise cette partie du Rif, la couverture végétale n'est pas suffisante pour réduire le taux d'érosion du sol par l'eau car le sol est exposé au détachement et au transport des sédiments.

Facteur des pratiques anti-érosives (P)

Les pratiques anti-érosives inventoriées dans le bassin versant de Moulay Bouchta sont surtout des talus et cordons de limites des parcelles, des murettes en pierres sèches, des terrasses et parfois des haies sèches autour de certaines parcelles (Fig. 7).

En fonction de l'efficacité de chacune des structures dans la réduction de l'érosion, nous avons retenu les valeurs de P suivantes :

Tableau 2: Valeurs de P retenues pour le bassin de Moulay Bouchta.

Composante	Valeur de P
Culture avec talus	0.4
Agroforesterie sur terrasses	0.6
Autres	1

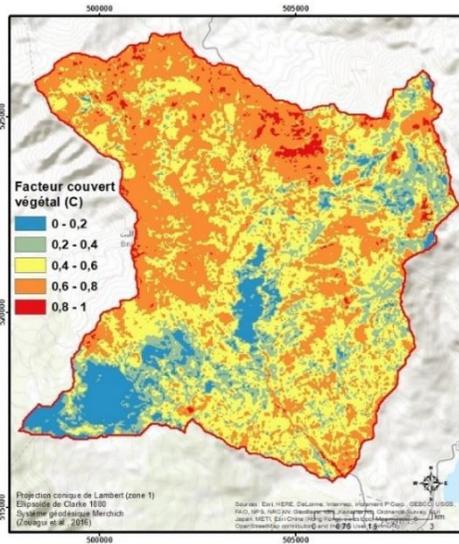


Figure 6: Carte du facteur couvert végétal (C)

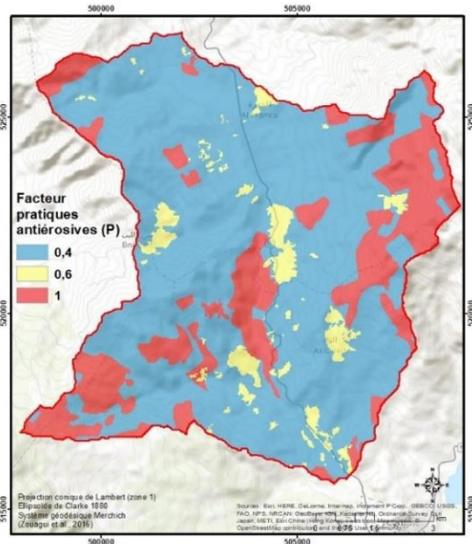


Figure 7: Carte du facteur pratiques anti-érosives (P)

Estimation des pertes en sol

Le croisement des cartes des principaux facteurs intervenants dans l'érosion hydrique des sols permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant (Fig. 8). La perte moyenne par érosion hydrique en nappe pour l'ensemble du bassin de Moulay Bouchta est d'environ 39,5 (t.ha-1.an-1). Les pertes totales annuelles du bassin sont de 311 591 (t.an-1). Les taux d'érosion diffèrent d'une zone à l'autre du bassin versant, selon l'influence des différents facteurs.

Ainsi, pour simplifier la lecture de la carte des pertes en sol et mieux orienter les aménagements de lutte contre l'érosion, on a subdivisé le bassin en 12 sous-bassins (Fig. 9), et on a adopté la même classification des pertes en sols de Sadiki et al. (2004) qui s'est inspiré de la classification faite aux Etats-Unis fondée sur la tolérance des sols aux pertes. Elle suppose qu'en moyenne, les sols peuvent tolérer des pertes allant jusqu'à 7,41 (t.ha-1.an-1) tout en permettant un niveau élevé de production agricole. Au-delà de 20 (t.ha-1.an-1), la perte est forte et les sols sont très dégradés ce qui peut nuire à la production.

Les pertes très fortes ont été enregistrées dans le sous-bassin n° 7 qui sont de 81,4 (t/ha.an). Les pertes moyennes ont été enregistrées dans les sous-bassins n° 2, 3 et 5 qui sont inférieurs à 20 (t.ha-1.an-1). Tandis qu'aucun sous-bassin ne présente une érosion faible (< 7 t.ha-1.an-1) (Tableau 3).

Selon les classes de risque d'érosion (Tableau 4), on observe que 56% du bassin versant présente une érosion forte à très forte, 31% du bassin présente une érosion moyenne et seulement 13% présente une érosion faible.

Tableau 3 : Répartition des pertes en sol et des valeurs des facteurs de l'érosion par sous-bassin dans le bassin versant de Moulay Bouchta (Rif Occidental, Maroc).

Sous-bassin	R	K	LS	C	P	Erosion (t.ha-1.an-1)	Pertes globales (t.an-1)	%
1	63,69	0,33	9,78	0,44	0,57	58,26	23116	7,42
2	62,95	0,27	4,96	0,50	0,44	18,92	4304	1,38
3	63,45	0,30	4,32	0,46	0,41	16,17	8798	2,82
4	64,45	0,30	7,97	0,48	0,48	39,58	14365	4,61
5	63,71	0,30	4,62	0,42	0,47	18,29	6616	2,12
6	64,03	0,33	7,87	0,45	0,42	32,45	21971	7,05
7	64,72	0,31	15,71	0,36	0,62	81,43	81804	26,25
8	64,12	0,29	9,93	0,35	0,60	43,82	68937	22,12
9	65,11	0,33	10,14	0,34	0,53	37,99	11402	3,66
10	69,79	0,32	8,92	0,23	0,66	26,54	20075	6,44
11	66,54	0,32	9,95	0,30	0,51	31,07	13989	4,49
12	65,77	0,29	7,64	0,36	0,52	29,34	36213	11,62
	64,86	0,31	8,48	0,39	0,52	39,50	311591	100,00

Tableau 4: Classification des pertes en sol dans le bassin versant de Moulay Bouchta (Rif Occidental, Maroc).

Pertes en sols (t.ha-1.an-1)	Classe	Surface (ha)	Pourcentage (%)
0 - 7	faible	1059	13
7 - 20	moyenne	2498	31
20 - 70	forte	3478	43
> 70	très forte	1014	13

Sédiments délivrés au nouveau barrage

La perte totale annuelle de sol dans la zone d'étude est estimée à 311 591 (t.an-1), ce qui représente une érosion importante du sol, cette quantité est directement liée à l'effet de l'érosion du sol sur le site, l'effet hors site se voit à travers le colmatage précoce du barrage Ali thelat et éventuellement on aura le même effet sur le nouveau barrage Moulay Bouchta s'il n'est pas accompagné d'un plan de conservation de sol adapté en amont.

La quantité de sol érodé disponible comme matière en suspension pendant le processus du transport, dont une partie parviendra à l'exutoire nommé « rendement en sédiment ». Le tableau 5 montre le calcul de ce dernier qui est estimé à 80 494 (t.an-1) et la dégradation spécifique moyenne est 12,1 (t.ha-1.an-1), obtenue grâce à un coefficient de délivrance moyen de 25,8% (Fig. 10).

L'analyse des pertes globales au niveau de chacun des sous bassin montre que les quantités totales délivrées varient de 552,5 (t.an-1) dans le sous bassin n° 2 à 28 519,7 (t.an-1) dans le sous bassin n° 7 (Tableau 5).

Les deux sous-bassins n° 7 et 8 contribuent à eux seuls à 63,1% au rendement en sédiments globale du bassin pour une superficie qui ne représente que 38,7% de la superficie totale, ce qui les classe parmi les sites prioritaires d'aménagement avec les sous bassins 9 et 11 qui présentent un coefficient de délivrance élevé de 41,2 et 35,4 et une dégradation spécifique importante de 15,6 et 11,0 (t.ha-1.an-1), respectivement (Fig. 11).

En considérant une valeur moyenne entre les densités mesurées de la vase et du sol (1,35 (t/m³)), la charge sédimentaire parvenant au nouveau barrage peut s'exprimer également en 59 625 (m³/an).

Sachant que la retenue du barrage a une capacité de 12 millions m³, l'érosion en nappe contribue annuellement à 0,5% de l'envasement du barrage, donnant lieu à une durée de vie de 201 ans, en omettant les autres sources de sédiment (érosion linéaire, érosion en masse érosion hydrographique) et en supposant que les sédiments en suspension ne quittent pas le barrage pendant les vidanges de fond et l'évacuation des crues.

Tableau 5: Coefficient de délivrance et dégradation spécifique par sous bassin

Sous bassin	% surface	Coefficient de Délivrance	Dégradation spécifique	Charge sédimentaire (t.an-1)	%
1	6,0	14,8	8,6	3 517,4	4,4
2	3,4	12,1	2,3	552,5	0,7
3	8,2	13,1	2,1	1 204,9	1,5
4	5,5	18,7	7,4	3 297,8	4,1
5	5,4	16,1	2,9	1 117,2	1,4
6	10,2	17,3	5,6	3 841,3	4,8
7	15,1	28,0	22,8	28 519,7	35,4
8	23,6	29,7	13,0	22 234,6	27,6
9	4,5	41,2	15,6	4 524,0	5,6
10	11,4	32,7	8,7	6 549,5	8,1
11	6,8	35,4	11,0	5 135,4	6,4
	100,0	25,8	12,1	80 494,2	100,0

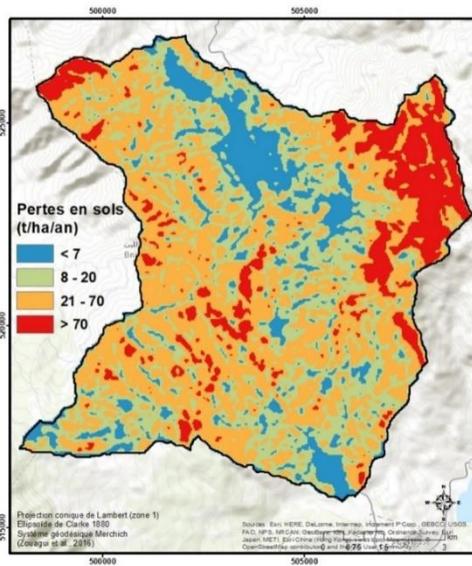


Figure 8: Carte des risques d'érosion hydrique.

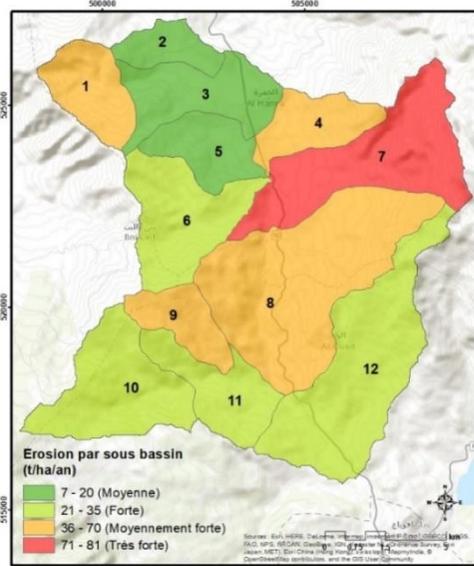


Figure 9: Carte des pertes en sols par sous bassin.

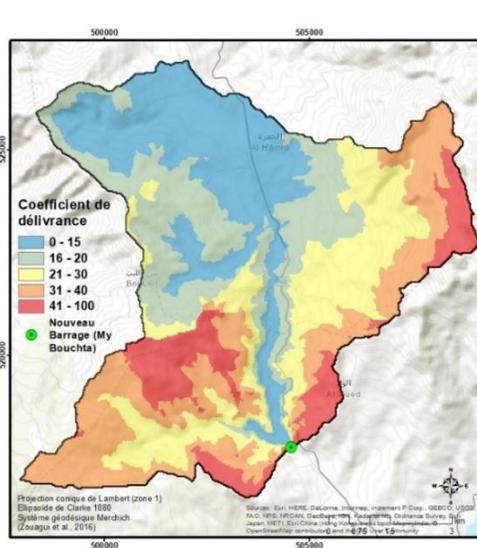


Figure 10: Carte du coefficient de délivrance.

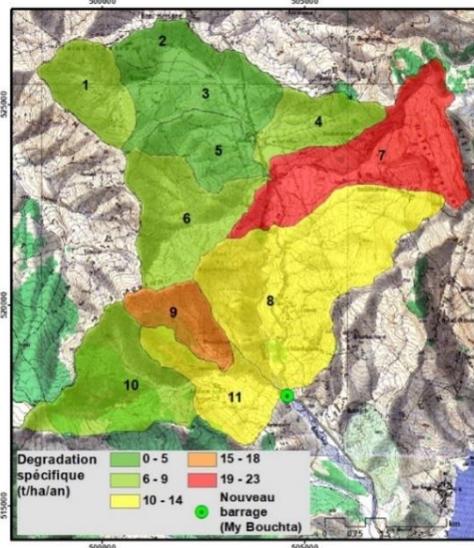


Figure 11: Dégradation spécifique par sous bassin.

Comparaison avec des études réalisées au Rif occidental

L'application de l'équation universelle de pertes en sols USLE a donné des valeurs (39,5 (t.ha-1.an-1)) similaires à celles obtenues dans des travaux réalisés dans le Rif occidental. A titre de comparaison, dans le bassin versant Nakhla, qui est un bassin adjacent à notre bassin d'étude, la perte en sol atteint en moyenne 65 (t.ha-1.an-1) au niveau du champ (Naimi et al. 2005), 38,7 (t.ha-1.an-1) selon Ait Brahim et al. (2003). Khali Issa et al. (2014) ont trouvé

37 (t.ha-1.an-1) au bassin versant de l'Oued Khmiss, tandis que Dhman et al. (1997) donnent 32,5 (t.ha-1.an-1) en pertes pour le bassin versant Telata. Tahiri et al. (2014) donnent une valeur moyenne de 47,18 (t.ha-1.an-1) en pertes pour le sous bassin de l'Oued Sania et 25,77 (t.ha-1.an-1) en pertes pour le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha (Ouallali et al. 2016).

Cependant, Zouagui et al. (2012) ont appliqué les techniques radio-isotopiques (^{137}Cs - Modèle de conversion MBM2) dans le même bassin versant et ont trouvé des pertes en sols pondérées par la surface du bassin de 23 (t.ha-1.an-1). Et avec la même grandeur, à l'aide de cette même méthode et dans le bassin adjacent Nakhla, Moukhchane et al. (1998) ont trouvé des pertes en sols pondérées de 16,6 (t.ha-1.an-1). Tandis que Damnati et al. (2013) ont trouvé des pertes en sols plus importantes de 41,3 (t.ha-1.an-1) sur des parcelles du même bassin.

Analyse statistique des facteurs de production de l'érosion

Dans cette analyse, on se base sur l'analyse des composantes principales (ACP) pour déceler les facteurs qui contribuent le plus au processus érosif dans notre zone d'étude (Fig. 12). Pour accorder la même importance aux facteurs qui ont des unités de mesure différentes, on a centré et réduit ces facteurs.

On remarque une corrélation positive importante des pertes en sols avec le facteur topographique ($R^2=0,91$), et une corrélation moyenne avec le facteur des pratiques anti-érosives (P) ($R^2=0,59$) et corrélation relativement faible avec l'érodibilité des sols (K) ($R^2=0,34$). Tandis que l'érosivité des pluies (R) et le facteur du couvert (C) sont indépendants des pertes en sols (Tableau 6).

En effet, les sous bassin n° 2, 3 et 5 ont un facteur C important, Cependant, ils ne présentent qu'une érosion moyenne. Dans le même ordre, les sous bassins n° 10 et 11 présentent une érosivité importante néanmoins, on observe une érosion moins importante (26 t.ha-1.an-1).

Le facteur qui est fortement corrélé aux pertes en sols qui est le facteur topographique se traduit clairement dans le sous bassin n° 7 et à moins degré dans le sous bassin n° 1, qui présentent un facteur LS de 15,71 et 9,78 donnant lieu à des pertes en sols fortes et très fortes d'environ 58,26 (t.ha-1.an-1) et 81 (t.ha-1.an-1), respectivement.

Les sous bassins n° 8 et 9 sont sujets aux facteurs qui contribuent le plus à l'érosion des sols (LS, P et K). En effet, ce sont des sous bassins présentant des terrains relativement friables et érodible sur des pentes plus longues (9,93 et 10,14) et où on répertorie moins de pratiques antiérosives.

De cette analyse, on conclut qu'il faut accorder une importance capitale à ces trois derniers facteurs, en adoptant des pratiques de conservation qui visent la rupture de la longueur de la pente générant ainsi moins de

ruissellement et encourager les pratiques culturales qui améliorent l'état de surface.

Sur le plan spatial, on recommande la mise en place de ces techniques, en premier lieu, dans les sous bassins n° 1 et 7 dont le facteur LS est important et les pratiques de conservation se font rare, et en deuxième lieu, dans les sous bassins n° 8 et 9 qui génèrent le plus de sédiments contribuant à l'envasement du nouveau barrage.

Tableau 6: Matrice de corrélation (Pearson)

Variabes	R	K	LS	C	P	Erosion / sous-bassin
R	1	0,361	0,290	-0,872	0,623	-0,043
K	0,361	1	0,443	-0,338	0,276	0,340
LS	0,290	0,443	1	-0,480	0,725	0,905
C	-0,872	-0,338	-0,480	1	-0,761	-0,130
P	0,623	0,276	0,725	-0,761	1	0,588
Erosion/sous bassin	-0,043	0,340	0,905	-0,130	0,588	1

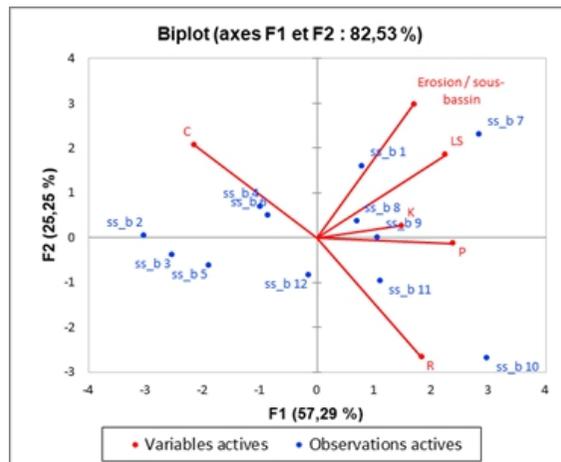


Figure 12: Graphe Biplot montrant les corrélations des variables (facteurs) entre elles et entre les variables et les observations (sous bassin), (ss_b : sous-bassin).

Conclusion

Cette étude met en relief la vérocité de l'érosion hydrique dans cette partie du Rif occidental. En effet, sur une surface du bassin de 7 889 ha, 87% du bassin présente un taux d'érosion supérieur au seuil de tolérance aux pertes en terre (7 t.ha-1.an-1). Donnant lieu à un rendement en sédiments en aval de 80 494 (t/ha). Le facteur topographique (LS) est le facteur le plus incriminé dans le processus érosif (R2= 0,91), suivi du facteur pratiques anti-érosives (R2= 0,59) et du facteur erodibilité des sols (R2= 0,34). La présente étude a démontré que les techniques SIG et télédétection permettent la détermination précise de la distribution spatiale des paramètres USLE à grande échelle. Il

s'agit également d'un outil simple et peu coûteux pour modéliser l'érosion des sols, dans le but d'évaluer le potentiel et le risque d'érosion pour une zone inaccessible où les mesures sur terrain sont rares voire inexistantes.

References:

1. Ait Brahim, L., Sossey Alaoui, F., Siteri, H. & Tahri, M. (2003). *Quantification of soil loss in the Nakhla watershed (northern Rif)*. Sécheresse - Science et changements planétaires, Vol. 14 (2), 101-106.
2. Benjelloun, H. (1993). Soil genesis, classification and nitrogen cycling in forest ecosystem of northwestern Rif. *Morocco.Ph.D Thesis, Oregon State University, USA*, 249 pp.
3. Damnati, B., Ibrahim, S. & Radakovitch, O. (2013). *Quantifying erosion using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in cultivated soils in three Mediterranean watershed: Synthesis study from El Hachef, Raouz and Nakhla (North West Morocco)*. Journal of African Earth Sciences 79:50–57
4. Dhman, L., Merzouk, A., Sabir, M. & Fenjiro, I. (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.
5. Dumas, J. (1964). Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *ORSTOM Tunis, série pédologie*, 3, 307-333.
6. Hession, W.C. & Shanholtz, V.O. (1988). *A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution*. J. Soil Water Conserv. 43 (3), 264–266.
7. Choukri F., Chikhaoui M., Naimi M., Raclot D., Pepin Y. & Lafia K. (2016). *Impact du changement climatique sur l'évolution de l'érosivité des pluies dans le Rif Occidental (Nord Du Maroc)*. European Scientific Journal, 12(32): 79-93
8. Jain, S.K., Kumar, S. & Varghese, J. (2001). *Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using GIS technique*. Water Resources Management 15, 41-54.
9. Khali Issa, L, Raissouni, A., El Arrim, A. & Moussadek, R. (2014). *Mapping and assessment of water erosion in the Khmiss Watershed (North Western Rif, Morocco)*. Current Advances in Environmental Science, 4, 119-130.
10. Kouli, M., Soupios, P. & Vallianatos, F. (2009). *Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece*. Environmental Geology 57, 483-497.

11. Laouina, A. (sous la dir. de) (2007). Gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc : la diversité des réponses paysannes à la dégradation des terres. *Publ. de la FLSH, Univ. Mohammed V Agdal, Rabat*, 172 p.
12. Le Landais F. & Fabre G. (1975). Plan d'aménagement anti-érosif du bassin versant de l'oued Ouergha en amont du barrage El Ouahda. *Rapport inédit, Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols*.
13. Mandimou, S. (2002). Modélisation et cartographie de l'érosion hydrique en vue de l'aménagement intégré du bassin Versant de Moulay Bouchta (Rif occidental). *Mémoire de 3ème cycle, ENFI, Salé*, 105 pp.
14. Ministère de l'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols. (1995). La désertification au Maroc : Causes, ampleur et réalisations. *Terre et Vie* ; 15-16 ; 17.
15. Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. & Iverson, LR. (1996). *Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS*. *Int J GIS* 10:629–642
16. 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.
17. Naimi M, Tayaa M & Ouzizi S. (2005). Cartographie des formes d'érosion dans le bassin-versant de Nakhla (Rif occidental, Maroc). *Sécheresse* 1, n° 2, 79-82.
18. Ouallali, A., Moukhchane, M., Aassoumi, H., Berrad, F. & Dakir, I. (2016). Evaluation et cartographie des taux d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha (Rif occidental, Nord Maroc). *Bull. Inst Sci. Rabat, sec. Sci. Terre* n° 38, 65-79.
19. 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.
20. Rango, A. & Arnoldus, H.M.J. (1987). Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*. 36p.
21. Renard, K.G., Foster, G.R., Wessies, G.A., Mc Cool, D.K. & Yoder, D.C. (1996). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *US Dept. Agric. Handbook* 703, 384 p.
22. 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, IRD, Montpellier, N°23, 11, 144-154.*
23. Sabir, M., Roose, E., Machouri N., & Nouri, A. (2002). Gestion paysanne des ressources naturelles dans deux terroirs des montagnes méditerranéennes du Rif occidental. *Bulletin du réseau érosion, IRD, Montpellier, N° 21, pp. 456-471.*
 24. Sadiki, A. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation Universelle de Perte en Sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'Oued Boussouab. *Bull. Inst Sci. Rabat, sec. Sci. Terre 26, 69-79.*
 25. Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F., Tahiri, A. & El Haddi, H. (2014). *Evaluation et quantification de l'érosion 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.
 26. 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.
 27. Vanoni, V.A. (1975). Sedimentation engineering: American society of civil engineers. *Manuals and reports on engineering practice. No. 54.* p. 745.
 28. Walling, D.E. (1996). Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. *Proceedings of an International Symposium Held at Exeter, UK, from 15 to 19 July 1996.* 236, IAHS.
 29. Williams, J. (1977). *Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models.* IAHS Publ 122, 168-179.
 30. Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion losses, *Agriculture Handbook no. 57, US Department of Agriculture.* Washington DC. USA. 58p.
 31. Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T. & Nieminen, J. (2008). *Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed.* Catena 75 (3), 319-325.
 32. Zouagui, A., Benmansour, M., Amenzou, N. Noura, A., Sabir, M., Benjelloun, H., Marah, H. & Benkdad A. (2012). Application de 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.* https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/viewFile/284/250