

## Quantification de l'érosion hydrique et de la sédimentation à partir de modèles empiriques dans le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc)

*Quantification of water erosion and sedimentation using empirical models in the Tahaddart watershed (Northwestern Rif, Morocco)*

Mounia TAHIRI<sup>1\*</sup>, Hassan TABYAOUI<sup>2</sup>, Fatima EL HAMMACHI<sup>2</sup>, Mohammed ACHAB<sup>3</sup>, Abdelfatah TAHIRI<sup>3</sup>, Hassan EL HADI<sup>1</sup>

1. Applied Geology, Geomatic & Environnement Laboratory, Ben Msik Sciences Faculty, Hassan II University of Casablanca, Morocco. \*(mouniatahiri88@gmail.com)
2. Natural Resources and Environnement Laboratory, Polydisciplinary Faculty, Taza, B.P. 1223, Taza, Morocco.
3. Geo-Biodiversity and Natural Patrimony Laboratory (GeoBio), Scientific Institute, Geophysics, Natural Patrimony Research Center (GEOPAC) Mohammed V University in Rabat, Morocco.

**Résumé.** L'érosion des sols est un grave problème découlant de la dégradation des sols, de l'intensification de l'agriculture et d'autres activités anthropiques. L'évaluation de l'érosion des sols est utile dans les travaux de planification et de conservation dans un bassin versant. La modélisation fournit une approche quantitative et cohérente pour estimer l'érosion des sols et le rendement des sédiments dans un large éventail de conditions. Dans la présente étude, les modèles de quantification de l'érosion des sols dérivés de l'Équation universelle de perte de sol (USLE) intégrée au SIG ont été utilisés pour estimer les pertes de sol et le module de sédimentation dans le bassin versant de Tahaddart situé dans la partie Nord-ouest du Rif (Maroc). Ce bassin correspond à une zone humide à influence atlantique et méditerranéenne ayant une aire d'environ 1141 km<sup>2</sup>. Il comprend quatre sous-bassins allongés E-W. Les paramètres des modèles révisés (RUSLE) et modifiés (MUSLE) ont été estimés en utilisant des données de télédétection et les zones de probabilité d'érosion ont été déterminées à l'aide de SIG. L'érosivité estimée des précipitations (R), l'érodibilité (K) des sols, les facteurs topographiques (LS) et les facteurs de gestion des cultures (C) varient de 39,21 Mjmm/ha/an, 0,22 à 0,31, 0,5 à 5 et 0,22 à 0,33 respectivement. Les résultats indiquent que pour le bassin versant de Tahaddart, la perte potentielle est de 202,337 t/ha/an, la perte réelle estimée du sol est d'environ 54528 t/an, la perte moyenne pour une crue est de 697894 t/ha, la dégradation spécifique est 34743,45 t/an. Les pertes en terre générées sur les versants l'emportent sur les pertes dues au réseau hydrographique et la sédimentation domine dans les cours d'eau et participe à l'envasement des barrages. Ces valeurs sont réparties de façon inégale d'un sous-bassin à l'autre. Les résultats peuvent certainement aider à mettre en œuvre des pratiques de gestion et de conservation des sols pour réduire l'érosion du sol par sous-bassin et dans le bassin versant de Tahaddart.

**Mots-clés:** Erosion hydrique, sédimentation, modèles empiriques, SIG, bassin versant Tahaddart, Maroc.

**Abstract.** Soil erosion is a serious problem arising from soil degradation, intensification of agriculture and other human activities. Assessment of soil erosion is useful in planning and conservation studies in a watershed. Modeling can provide a quantitative and coherent approach to estimate soil erosion and sediment yields under a wide range of conditions. In this study, soil loss models derived from the Universal Soil Loss Equation (USLE) integrated with GIS has been used to estimate soil losses and sedimentation models in the Tahaddart watershed in the northwestern Rif, Morocco. It is a wetland with atlantic and mediterranean influence, with an area of about 1141 km<sup>2</sup>. It comprises four elongated E-W sub-basins. The parameters of the revised (RUSLE) and modified (MUSLE) models were estimated using remote sensing data and erosion probability areas were determined using GIS. The estimated rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), topographic factors (LS) and crop management factors (C) range from 39.21 Mjmm/ha/yr, 0.22 to 0.31, 0.5 to 5 and 0.22 to 0.33 respectively. The results indicate that the potential loss for the Tahaddart watershed is 202.337 t/ha/yr, the estimated actual soil loss is about 54528 t/yr, the average loss for a flood is 697894 t/ha, the specific degradation is 34743.45 t/year. Soil losses on the slopes outweigh the losses due to the hydrographic network, and sedimentation predominates in the rivers and contributes to the siltation of the dams. These values are distributed unequally from one sub-basin to another. The results can certainly help in implementation of soil management and conservation practices to reduce the soil erosion in each sub-basin and in the entire Tahaddart watershed.

**Keywords:** Water erosion, sedimentation, empirical models, GIS, Tahaddart watershed, Morocco.

## Abridged English version

### Introduction

The purpose of this study is to evaluate the annual soil loss using the revised (RUSLE) and Modified (RUSLE) universal equations of soil loss, and Sedimentation Models in the Tahaddart Watershed (NW Rif, Morocco) as a river catchment area with an outlet to the Atlantic. It synthesizes and completes our detailed works in two of its four sub-basins: Oued Sania sub-basin (Tahiri *et al.* 2014c) and Oued Haricha sub-basin (Tahiri *et al.* 2015). The procedure followed is summarized in figure 1.

### Geology and geomorphology

The Tahaddart watershed, located between Tangier and Assilah is geologically connected to the western Rif consisting of the overlap of several thrust sheets based on the Tangier unit (Suter 1980; Fig. 2). On this geological complex structure, composed by the juxtaposition of terrains with different competence and permeability and affected by an important brittle tectonics, a branched hydrographic network is established (Fig. 2). The main rivers (oued El Hachef and oued Mharhar) extend from east to west over 650 and 480 km respectively and average slopes of 1.20 to 4.10%. Such a situation may encourage the development of stream flows and sediment deposits at the level of the river beds. Four mobilization works control the flow at 37.5% of the total area of the basin (Tab. 1). The Tahaddart basin comprises four sub-basins (SB) (Fig. 3 and Tab. 2): Oued Sania SB (with Ibn Battouta dam), Oued Mharhar SB, Oued Haricha SB (with 9 April 1947 dam) and Oued Hachef SB.

### Physiographic and Hydrological Parameters

The physiographic parameters show that the Tahaddart basin has an elongated shape with a Gravilius compactness index of 1.55 over an area of 114100 ha. Its sub-basins are also elongated and show Kc values between 1.44 and 1.95 (Tab. 2). A Gradex method was used to adjust the series of maximum rains and the corresponding flows (Table 3). The flows selected from analysis and comparison of the flows calculated by various methods (Mallet Gauthier, Fuller II, Fuller I, Hazen-Lazarevich) are summarized in Table 4. Finally, calculation of the concentration time from empirical formulas (Formulas of Turazza, Ventura, Kripich, D. Californian, H. Giandotti, Passini) shows in Table 5, that it is very long for the sub-basins of Kharoub and Mharhar. This engenders a gathering at the outlet, at the lakes and sebkhas surrounding Oued Tahaddart.

### Assessment and quantification of erosion

The various indices have a spatial character and therefore vary according to the climatic aggression

(T) (Tab. 6 and 7), soil occupation (Tab. 8, Fig. 4), erodibility K (Tab. 9, Fig. 5), physical characteristics (LS) (Fig. 6) and conservation practices (P) at each spatial unit of the watershed. The GIS allows to evaluate the different equations and therefore to map the rate of erosion at the watershed scale. We used the 30m x 30m surface unit (pixel size) as the estimation base unit of each parameter.

### Potential erosion

Table 10 summarizes the different calculations of erosion. It follows that the sub-basin El Hachef shows the highest values of the potential erosion (271.26 t/ha/yr). This area is characterized by slopes and steep slopes lengths that led to high values of topographic factor LS whose contribution in the generation of losses by the model used is probably the heaviest. The potential loss to the Tahaddart watershed is 202.337 t/ha/yr.

### Erosion on the slopes: RUSLE model

The crossing of the RUSLE model factors maps (Roose & Georges 2004) allowed to quantify the actual erosion or average annual land losses in t/ha/yr. The results (Tab. 11) show that the Mharhar sub-basin has the highest value of A (RUSLE) at 64.68 t/ha/yr. The actual annual loss for this sub-basin is 20632.92 t/yr. The Kharoub sub-basin has an A (RUSLE) value of 52.17 t/ha/yr, but given its larger surface area, the annual real loss is the highest loss with 22.260 t/yr. The average value of A (RUSLE) for the entire Tahaddart watershed is 47.79 t/ha/yr. This allows deducing that the real annual average loss per sheet erosion and rill in this watershed is 54528 t/yr.

### Soil Erosion by MUSLE model

The crossing of the MUSLE model factors (Williams 1975) and the volume of water runoff and instant maximum flows rates in each sub-basin were used to calculate the amount of sediment produced by sub-basin in t/yr (Tab. 12). High losses are observed in Mharhar and Kharoub (SE of Haricha) sub-basins. These results are consistent with those developed by the RUSLE model. This indicates that erosion is very active at the downstream level of the Tahaddart watershed. Losses calculated for this watershed are on average 697894 t/ha, of which 39% are involved in the silting up of dams Ibn Battouta and 9 April and 61% discharged to the Atlantic.

### Specific degradation

Calculation of the specific degradation rates defined by Hession & Shanholz (1988) makes it possible to estimate the rate of erosion at the outlet of sub-basins (Tab. 13). The average specific degradation or quantity of solid transport in the Tahaddart basin is 30.45 t/ha/yr. This value is close to the bathymetric surveys conducted at the Ibn Battouta dam (about 36.52 t/yr for 1989-1994, compared with 26.21 t/y in 1994-2000 and 15.91 from 2000 to 2003).

*Land losses generated by hydrographic network*

The values of soil losses generated by the river network or linear erosion for each sub-basin are calculated based on the subtraction of the values shown by the MUSLE model from those shown by the RUSLE model (Tab. 14). Analysis of the results shows that the losses due to the water system are about 16.6% for the Tahaddart watershed. Losses on the slopes outweigh the losses due to the water system.

*Empirical modeling: sedimentation (deposition)*

Empirical modeling by RUSLE and Sedimentation is used in each sub-basin. It helps clarify the balance of soil losses established in each individual parcel. Calculation results show that regions with high losses dominate mainly on the sub-basin reliefs with 24% of the total area, losses of regions between 0.0 to 50 t/ha/yr are concentrated at the outlet of sub-basins. Sedimentation dominates in the rivers of the major rivers.

*Conclusions*

After careful analysis of the erosion factors involved in the loss prediction models for land, the

crossing maps of different factors in a GIS enabled assessment and quantification of erosion. Potential erosion is estimated for the Tahaddart watershed at 202.337 t/ha/yr with more than 40% of the surface of sub-basin less than 50 t/ha/yr. The actual average loss per rill and sheet erosion in this watershed is 47.79 t/ha/yr, presenting an average level of risk. Total losses at the outlet are on average 697894 t/ha (ie 6.12 t/yr). These losses due to the water system, or linear erosion, are approximately 16%, confirming that the loss on the slopes, or sheet erosion, outweigh the losses due to the water system. The average specific degradation is 30.45 t/ha/yr.

Soil losses from RUSLE and Sedimentation show that sheet erosion is dominant over the reliefs surrounding the Tahaddart basin. The areas of low soil loss or deposition correspond to areas of low slope or plains (up to 50 t/ha/yr of sedimentation).

The results obtained in this study present only relative values that can help in the planning of soil conservation activities and a reduction in siltation of dams. These results provide important support to decision-makers and developers to simulate scenarios for the evolution of the Tahaddart basin and, above all, to plan erosion control interventions.

---

## INTRODUCTION

Le phénomène d'érosion se manifeste par la dégradation de la terre par l'eau de ruissellement, la pluie, le vent, la glace ou autres agents externes, y compris les processus tels que l'ablation, le transport en suspension, le charriage ou les mouvements de masse. A l'échelle nationale, les pertes en terres annuelles cumulées sont estimées à 100 millions de tonnes (Heusch 1970) ; 50 millions de mètre cube d'eau annuelle perdue par envasement au dépens de la capacité de stockage (PNABV 1995). A l'échelle du domaine rifain, les études menées sur une superficie de 4 ha par INYPSA (1987) montrent que la région de Tanger-Tétouan est exposée à un risque réel élevé ou très élevé de 42,4% et un risque d'érosion moyen de 53,6% de la superficie totale de cette zone. Les provinces d' (Al Hoceima- et de Taza) présentent 22,9% de risque élevé ou très élevé, mais 65,3% de risque moyen. Finalement, la région Nord Orientale présente, dans l'ensemble, des risques réels d'érosion élevés ou très élevés plus modérés représentant 13.7% et un risque moyen important d'érosion réelle (sur 78,2% de sa superficie).

Dans la région de Tanger, l'érosion hydrique est le phénomène naturel le plus dominant. Les différentes formes sont observées : l'érosion en nappe se distingue nettement sur les terrains agricoles situés sur des pentes dépassant 10% et l'érosion linéaire exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et

dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). Les causes du phénomène érosif sont: la topographie par ses deux composantes (longueur et degré de pente), les types de roches (généralement très friable : schistes et marnes), le relief ondulé et accidenté de la chaîne rifaine, l'état de la surface du sol (l'encroûtement de surface, la rugosité et la couverture végétale), l'agressivité des pluies et l'opposition des deux saisons, et finalement l'action anthropique. En plus de l'érosion hydrique, sévit aussi une forte érosion éolienne mais reste localisée : on note la formation de dunes sur les sables côtiers à l'Est de la ville d'Assilah au niveau des sols sableux cultivés. Les impacts négatifs des pertes des terres par l'érosion dans ces régions, s'aperçoivent sous de multiples aspects: la réduction de la superficie des sols agricoles et la baisse des rendements des cultures, l'augmentation du taux d'envasement des retenues des barrages, l'aggravation des coulées boueuses mettant en péril les infrastructures avales, ...

La description, la cartographie et la quantification des phénomènes d'érosion permettent de bien cerner ce problème à l'échelle du bassin et des sous-bassins. Différentes approches peuvent être considérées pour évaluer et quantifier les taux d'érosion. Certaines sont basées sur l'expertise (choix par l'expert des paramètres et de la pondération à appliquer), d'autres sur la modélisation (modèles empirique ou physique, globale ou spatialisée, déterministe ou statistique).

Parmi ces modèles, certains modélisent le transport de la lame de ruissellement et la sédimentation, tels que ANSWERS (Beasley 1977),

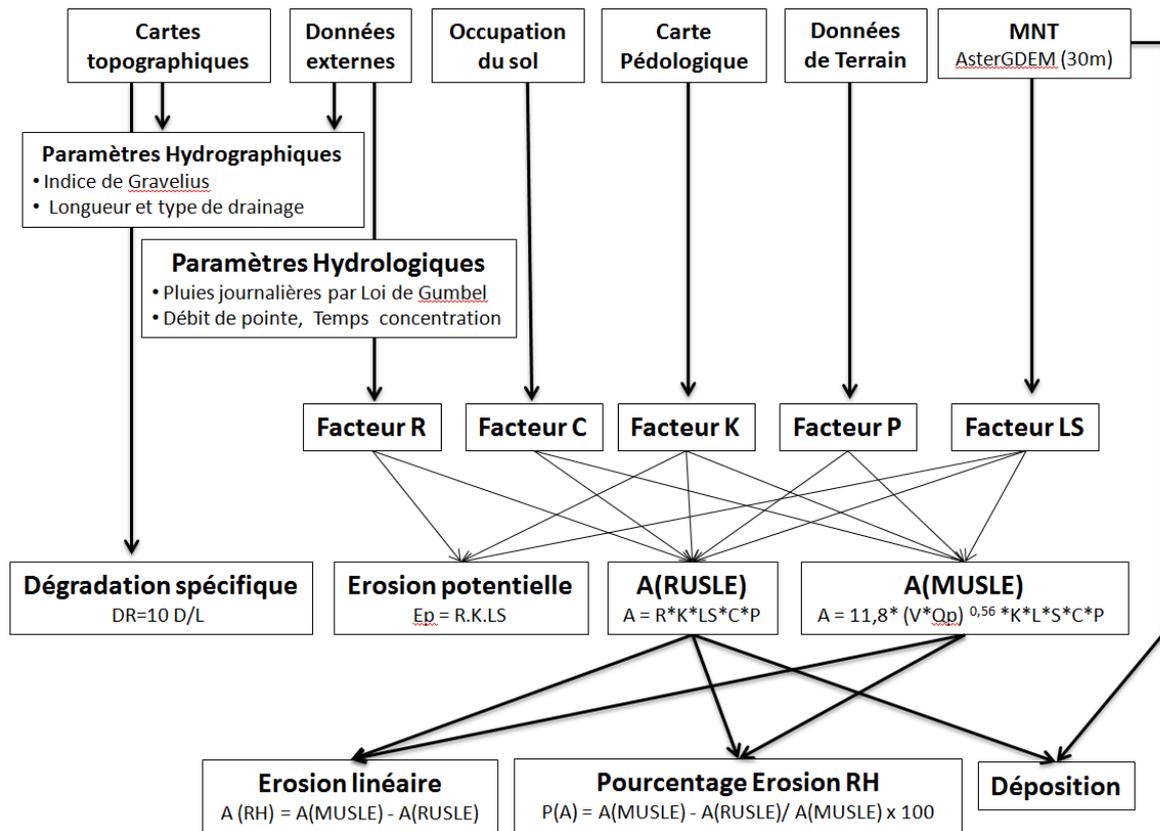


Figure 1. Organigramme de la méthodologie.

Figure 1. Organizational chart of the methodology.

CREAMS (Knisel 1980), SWRRB (Williams *et al.* 1985), LISEM (Limburg Soil Erosion Model, De Roo *et al.* 1996), KINEROS (KINematic Runoff and EROsion; Woolhiser *et al.* 1970). D'autres modélisent les processus physiques mis en jeu dans l'érosion hydrique tels que : GUEST (Rose *et al.* 1983, Hairshine & Rose 1992 a et b), WEPP (USDA Water Erosion Prediction Project, Lane & Nearing 1989, Nearing *et al.* 1989), EUROSEM (Morgan *et al.* 1998) et SWAT (Arnold *et al.* 1998). Plusieurs équations ont été établies pour lier les facteurs d'érosion entre eux et quantifier les pertes de sol (Zingg 1940, Musgrave 1949 in Ronard & Foster 1985, Wischmeier & Smith 1978). Plusieurs modèles informatiques ont par la suite vu le jour, dont certains sont basés sur l'équation universelle de perte de sol (USLE) de Wischmeier et ses versions modifiées (MUSLE) et révisées (RUSLE).

L'objet de cette étude est d'évaluer les pertes annuelles de sol en utilisant les équations universelles de perte de sol révisée (RUSLE) et modifiée (MUSLE) et le module Sédimentation, dans le bassin versant de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc) en tant que bassin versant de cours d'eau à exutoire vers l'Atlantique. Elle synthétise et complète nos travaux de détail dans deux des ses quatre sous-bassins :

Sous-bassin de l'Oued Sania (Tahiri *et al.* 2014c) et Sous-bassin de l'Oued Haricha (Tahiri *et al.* 2015). La démarche suivie est synthétisée sur la figure 1.

#### CADRE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Le bassin versant de Tahaddart, situé au sud de Tanger (Rif nord occidental, Maroc, Fig. 2), se rattache géologiquement au Rif occidental constitué par le chevauchement de plusieurs nappes de charriage (nappe de Béni-Ider, nappe Numidienne et nappe de Melloussa) reposant sur l'unité externe de Tanger (Suter 1980, Fig. 3). Les terrains sont représentés par des lithologies essentiellement marno-argileuses et grés-quartzitiques (et flysch) d'âges méso-cénozoïques (Fig. 3). Le relief est polymorphe et la topographie diffère de l'est à l'ouest. Il est aplati à l'ouest et fortement accidenté à l'est. C'est un paysage de basses montagnes. Le point haut de la zone d'étude culmine à 941 m. Il correspond au sommet de Jbel Sehâne à l'Est du bassin. Les pentes dépassent 35% au niveau des escarpements des formations gréseuses ou grésomarneuses se trouvant à l'Est.

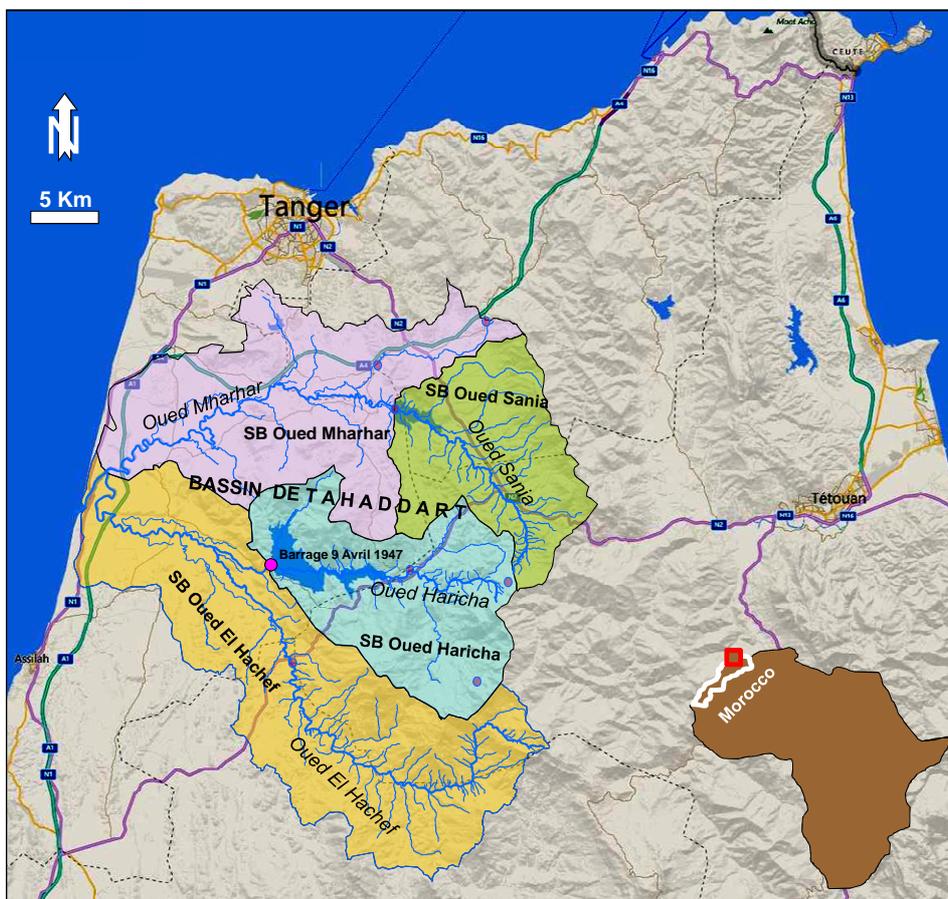


Figure 2. Carte de répartition des sous bassins (SB) de Tahaddart.  
 Figure 2. Repartition map of the Tahddart sub- (SB) basins.

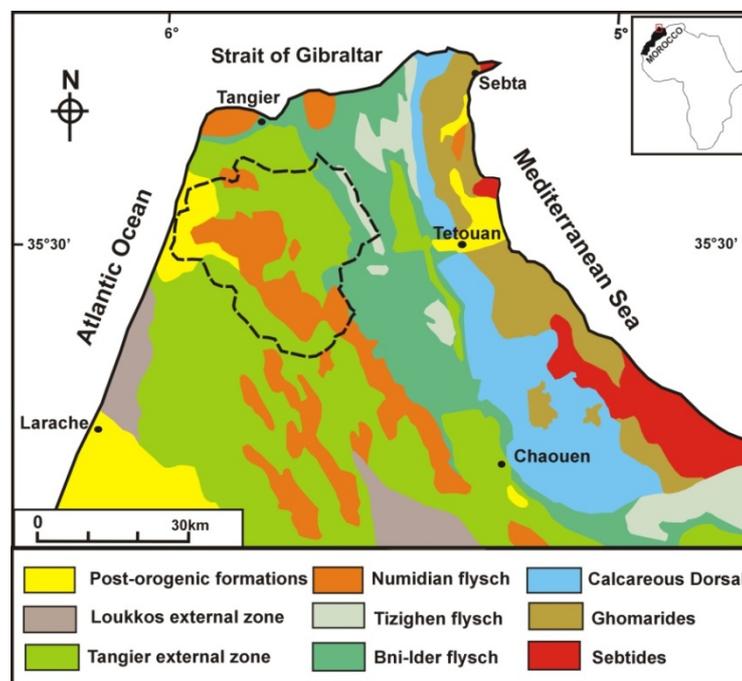


Figure 3. Carte géologique simplifiée du Rif nord occidental; tirets: limite du bassin versant de Tahaddart.  
 Figure 3. Simplified geological map of north western Rif, dashes: Tahaddart watershed limit.

Tableau 1. Les ressources mobilisées dans le bassin versant de Tahaddart (Sources : DGH, 1993).

Table 1. Resources mobilized in Tahaddart watershed (Source: DGH 1993).

Ouvrage	Oued	Apport moyen (Mm <sup>3</sup> )	Volume utile de retenue (Mm <sup>3</sup> )	Volume régularisé (Mm <sup>3</sup> /an)
Ibn Battouta	El Kébir	56	10	26
9 avril	Haricha	89	270	69
Prise de Bougdour	El Kébir	49	-	9,5
Prise de Hachef	Haricha	125	-	17,5
Nappe Charf El Akab				2

Tableau 2. Paramètres physiographique des sous-bassins de Tahaddart.

Table 2. Physiographic parameters of the Tahaddart sub-basins.

Sous-bassin	Surface A (Km <sup>2</sup> )	Périmètre P (Km)	Indice de Gravelius Kc		Altitude max (m)	Altitude min (m)	Pente moy. (%)	Cour d'eau principale	
			Valeur	Forme SB				Nom	Longueur (Km)
El Hachef	219	76,48	1,44	Allongée	941	10	4,11	O. Haricha	24,63
Mharhar	319	67	1,95	Allongée	461	10	1,20	O. Mharhar	35,1
Kharoub	426,70	134,52	1,82	Allongée	915	10	1,49	O. Kharoub	70,31
O. Sania	177	69	1,45	Allongée	690	25	2,14	O. Sania	22,94

Tableau 3. Pluies journalières (Pj) de chaque période de retour avec le Gradex pour les différents sous-bassins.

Table 3. Daily rains (Pj) of each return period with the Gradex for the different sub-basins of Tahaddart.

Sous-bassin	Station	Gradex 24 h	Pjmax 10 ans	Pjmax 20 ans	Pjmax 50 ans	Pjmax 100 ans
SB Oued El Hachef	9 avril	36,19	151,31	176,45	209,001	233,39
SB Mharhar	Ibn Battouta	27,92	129,18	148,38	173,24	191,86
SB Kharoub	Jbel Hbib	33,22	163,67	187,59	218,55	241,76
SB Oued Sania	Ibn Battouta	24,95	141,53	159,51	182,79	200,23

Tableau 4. Débit retenus des différentes méthodes Q (m<sup>3</sup>/s).Table 4. Debit rates from the different methods Q (m<sup>3</sup>/s).

Q (m <sup>3</sup> /s)	Sous-bassin	T 10 (ans)	T 20 (ans)	T 50 (ans)	T 100 (ans)
		SB d'El Hachef	260	312	379
	SB Mharhar	435	505	594	659
	SB Kharoub	365,47	485	577	644
	SB Oued Sania	250	300	340	380

Sur ce bâti géologique complexe, composé par la juxtaposition de terrains à compétence et perméabilité différentes et affecté par une importante tectonique cassante s'installe le réseau hydrographique du bassin de Tahaddart (Tahiri 2014, Tahiri *et al.* 2014a, 2014b). L'Oued Tahaddart, le cours d'eau principal du bassin, a deux entités principales (Fig. 2) : 1- au nord l'Oued Mharhar appelé vers l'est du bassin Oued El Kébir puis Oued Sania (comportant le barrage Ibn Battouta); 2- au sud l'Oued El Hachef a deux affluents principaux, l'Oued Haricha (avec le barrage "9 Avril 1947") et Oued Kharroub au SE. Ces cours d'eau prennent naissance à partir de sources sporadiques (au contact des grés Numidien avec les argilites et schistes). Quatre ouvrages de mobilisation

contrôlent l'écoulement de la zone d'étude à raison de 37,5 % de la superficie total du bassin (Tab. 1). Les eaux collectées d'une superficie de 706 Km<sup>2</sup> (62,5% de la surface totale du bassin) ne sont que partiellement cheminées vers les stations de traitement et de production d'eau potable par le biais de deux prises de dérivation sans aucune capacité de stockage (Scapeni *et al.* 2008). Les eaux déversent dans l'océan en passant par la zone humide de Tahaddart. Le bassin de Tahaddart comprend alors quatre Sous-Bassins (SB) (Fig. 2 et Tab. 2): le SB de l'Oued Sania (avec le barrage Ibn Battouta), le SB de Oued Mharhar, le SB de Oued Haricha (avec le barrage "9 Avril 1947") et le SB de Oued Hachef. Les variations annuelles du volume et de l'intensité des précipitations, l'humidité et la nature des sols et la

couverture végétale jouent un rôle clé sur l'érosion du sol (Tahiri *et al.* 2014c, Tahiri *et al.* 2015).

### PARAMETRES PHYSIOGRAPHIQUES DES SOUS-BASSINS

Les paramètres physiographiques des sous-bassins de Tahaddart sont résumés sur le tableau 2. Ces paramètres sont importants pour le calcul des pertes en sol. Il en ressort que les sous-bassins diffèrent par leur surface et leur Indice de compacité de Gravelius et ont tous des formes allongées. La valeur de Kc est comprise entre 1,44 et 1,95.

### PARAMETRES HYDROLOGIQUES DES SOUS-BASSINS

#### Ajustement des pluies journalières par la loi de Gumbel

L'application de la méthode Gradex a permis d'ajuster les séries de pluies maximales et les débits correspondants (Tab. 3). Les valeurs les plus faibles pour des Pj max de 10 à 100 ans, sont celle du sous-bassin de Mharhar. Ceci est probablement lié à la position de la station Ibn Battouta à l'amant du sous-bassin et non au centre, comme est le cas des autres sous-bassins.

#### Estimation du débit de pointe par des formules régionales

Les méthodes de calcul recensées en utilisant différentes formules empiriques tiennent compte de deux facteurs essentiels : la taille du bassin versant (ou sous-bassin) et le gradient topographique du bassin versant. Les différentes formules appliquées (Mallet Gauthier, Fuller II, Fuller I, Hazen-Lazarevich) ont permis le calcul des débits de pointe pour chaque période de retour. Les débits retenus à partir de l'analyse et la comparaison des débits calculés par les différentes méthodes présentées précédemment sont synthétisés dans le tableau 4.

#### Calcul du temps de concentration

Nous rappelons que le temps de concentration Tc des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier. Les valeurs retenues pour chaque sous-bassin à partir de formules empiriques (Formules de Turazza, Ventura, Kripich, D. Californienne, H. Giandotti, Passini) montrent (Tab. 5) montrent que le temps de concentration est relativement long pour les sous-bassins d'Oued Sania et El Hachef, dont l'exutoire est un barrage, ce qui va engendrer un rassemblement lent des eaux vers l'exutoire. Le temps de concentration est très long pour les sous-bassins de Kharoub et Mharhar. Ceci

engendre un rassemblement à l'exutoire, au niveau des lacs et sebkhas qui entourent Oued Tahaddart.

Tableau 5. Temps de concentration (Tc) par différents méthodes appliquées aux sous-bassins de Tahaddart

Table 5. Tc by different methods applied to the Tahaddart sub-basins.

Sous-Bassin	Valeur retenue (h)
SB Oued El Hachef	2,70
SB Mharhar	13,67
SB Kharoub	7,70
SB Oued Sania	2,30

### DESCRIPTION DES FACTEURS D'EROSION

#### Facteur d'érosivité pluviale (R)

L'érosion en nappe dépend de la hauteur, de l'intensité, de l'énergie cinétique et de la répartition des pluies. L'application de la formule de Masson (1971), qui représente l'intensité moyenne sur 30min des gouttes de pluie de chaque averse, à la station de Kayala a permis à Pepin & Hammouda (2012) de déduire la valeur  $R = 54,75 \text{ MJ}^* \text{mm/ha/h}$  comme moyenne annuelle des érosivités sur 30 années (1980-2010). Cependant, en absence de données sur les l'intensité moyenne des pluies chaque 30 min pour les autres stations, de nombreuses équations permettent le calcul de R en fonction des précipitations mensuelles, annuelles ou de l'indice de Fournier (Kalman 1967, Roose 1977, Arnoldus 1980, Renard *et al.* 1991). Ces équations de substitution ont été appliquées dans différents travaux impliquant une modélisation USLE (Morschel & Fox 2004, Sadiki *et al.* 2004, El Gouarani *et al.* 2008) et ont montré des résultats satisfaisants. L'application de l'équation d'Arnoldus (1980) dans le bassin versant de Tahaddart, a permis de calculer le facteur d'agressivité climatique aux différentes stations situées au centre et autour des sous-bassins (Tab. 6).

Tableau 6. Les valeurs du Facteur R calculé par station par la formule d'Arnoldus (1980).

Table 6. The R-Factor values calculated per station by the Arnoldus formula (1980).

Station	Erosivité (Mjmm/ha/an)	Période (année)
Dar Chaoui	34,37	1941-2012
09-avril	33,55	1971-2012
Béni Harchane	35,35	1977-2012
Jbel Hbib	46,5	1970-2012
Kalaya	33,50	1969-2012
Romane	33,97	1977-2012
Ibn Battouta	42,34	1983-2012

La spatialisation des stations a permis de définir la valeur minimale, la valeur maximale, la moyenne et l'écart type de l'indice R pour chaque sous-bassin. Le tableau 7 montre les moyennes retenues pour chaque sous-bassin.

Tableau 7. Les moyennes retenues des valeurs de l'indice R pour chaque sous-bassin.

Table 7. Mean values of the R- Factor for each sub-basin.

Sous-bassin	Facteur R (Mjmm/ha/an)
SB de El Hachef	34,42
SB de Mharhar	43,54
SB de Kharoub	39,93
SB de Oued Sania	38,96

La cartographie de l'indice R dans le nord du Maroc montre que la valeur moyenne calculée pour le bassin versant de Tahaddart ( $R = 39,21$  Mjmm/ha/an) est légèrement inférieure aux valeurs du Rif occidental, central et son avant-pays. Dans le Rif occidental l'indice R montre des valeurs variant entre 94,73 et 95,27 dans le bassin versant de Kalaya (Khali Issa *et al.* 2016), pour la partie centrale et son avant-pays. Dans le Rif central, R varie de 43 à 87,56 dans le bassin versant de Oued Lben (Rahhou 1999) et il est estimé de 51 à 194 dans la vallée de l'Ouergha (Le Landais & Fabre 1975). Dans l'avant-pays oriental, cet indice est estimé à 56,3 dans le bassin versant de l'Oued Tleta (El Garouani *et al.* 2010), et varie de 40 à 50 MJmm/ha/an dans le bassin versant de l'Oued Boussouab (Sadiki *et al.* 2004).

Il faut noter que malgré les faibles valeurs de l'indice d'agressivité des pluies, l'activité de l'érosion est toujours intense comme en témoignent les paysages très dégradés et les versants ravinés observés sur le terrain. Cette situation paradoxale semble indiquer que les séries de pluies saturantes et la faible épaisseur du sol sont à l'origine de ces phénomènes de ravinement bien plus que l'agressivité des pluies orageuses, très intenses mais limitées dans l'espace et dans le temps.

### Facteur du Couvert végétal (C)

Le couvert végétal protège les sols et assure l'amortissement des gouttes de pluie, le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration. Il pourrait varier de 0,001 pour les sols bien couverts jusqu'à 1 comme valeur maximale pour les sols complètement dénudés. Pour le bassin de Tahaddart, ce facteur est déterminé à partir de la mise à jour sur le terrain de la carte d'occupation du sol établie par Kouraimi (1997) (Fig. 4). Les valeurs affectées aux différents modes d'utilisation de sols se situent entre 0,0 (lacs et habitations rurales) et 0,7 (Céréaliculture et parcours). Les moyennes calculées pour chaque sous-bassin sont résumées dans le tableau 8. L'indice C pour le bassin versant de Tahaddart varie de 0,22 et 0,33.

Tableau 8. Les moyennes retenues des valeurs du Facteur C pour chaque sous-bassin.

Table 8. Mean values of the C- Factor for each sub-basin.

Sous-bassin	Facteur C
SB El Hachef	0,21
SB de Mharhar	0,31
SB de Kharoub	0,30
SB de Oued Sania	0,33

### Facteur d'érodibilité du sol (K)

L'érodibilité K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. Le facteur K peut être déterminé suivant l'équation de Dumas (1965), la formule ajustée de Wischmeier et Smith (Römkens *et al.* in Renard *et al.* 1997) ou calculée à l'aide du triangle de texture (Brown, 2003) et du tableau de correspondance de Stone et Hilborn (2000). Les valeurs de K pour chaque unité du sol ont été estimées en utilisant les analyses des différents types de sols (Billaux & Bryssine (1967), Gharbaoui (1981), Alami (in Osrihi *et al.* 2007)). Les valeurs de K se situent entre 0,01 (sols peu évolués d'apport colluvial) et 0,4 (Lithosols). Les moyennes calculées pour chaque sous-bassin sont représentés sur la figure 5 et résumées dans le tableau 9. L'indice K pour le bassin versant de Tahaddart varie alors de 0,22 à 0,31.

Tableau 9. Les moyennes retenues des valeurs du Facteur K pour chaque sous-bassin.

Table 9. Mean values of the K- Factor for each sub-basin.

Sous-bassin	Facteur K
SB de El Hachef	0,31
SB de Mharhar	0,28
SB de Kharoub	0,21
SB de Oued Sania	0,29

### Facteur des pratiques culturales (P)

La représentation cartographique de la carte de pente de chaque sous-bassin montre que les pentes inférieures à 25 degrés sont les plus dominants. Les visites sur le terrain confirment l'absence de techniques de pratiques anti-érosives. Ceci nous conduit à attribuer la valeur 1 pour ce facteur dans chaque sous-bassin. Cette valeur 1 va neutraliser l'effet de ce facteur.

### Facteur LS

La longueur, la forme et surtout l'inclinaison de pente sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols (Roose 1994). La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle. De même, les transports solides croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente (Zingg 1940, Hudson

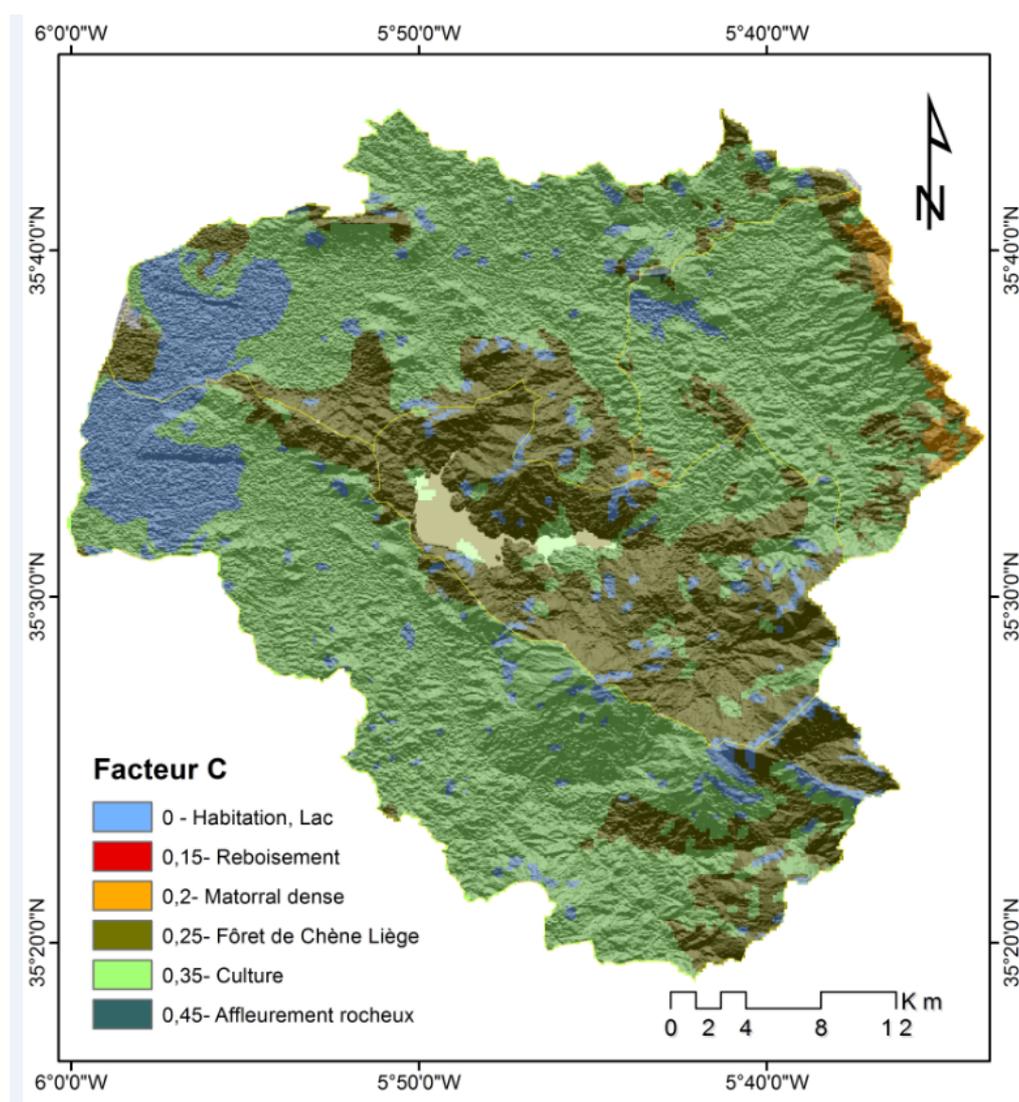


Figure 4. Carte du facteur Couvert végétal du bassin versant de Tahaddart superposée à un MNT estompé à 315 sur 45°.

Figure 4. Map Vegetation factor of Tahaddart watershed superimposed on a DTM hillshade at N315 -45.

1973, Roose 1994). Les résultats du croisement des couches de l'inclinaison (S) et la longueur (L) de la pente pour chaque sous-bassin montrent que les valeurs de LS varient de 0,1 à 5. Ces valeurs coïncident avec les situations les plus fréquentes de culture en Afrique de l'Ouest. Elles peuvent atteindre 20 en zones de montagne. Le relief à l'aval et au centre du bassin de Tahaddart (Fig. 6), présente une morphologie assez aplatie et montre le faible rôle que pourrait jouer cet indice dans la quantification de l'érosion.

## EVALUATION ET QUANTIFICATION DE L'ÉROSION

Les différents indices ont un caractère spatial et par conséquent varient en fonction des caractéristiques physiques, d'occupation des sols, et des pratiques de conservation au niveau de chaque unité spatiale du bassin versant.

Le SIG s'apprête bien à l'évaluation de différentes équations et par conséquent à la cartographie du taux d'érosion à l'échelle du bassin versant. Nous avons utilisé l'unité de surface de 30 m x 30 m (dimension du pixel) comme unité de base de l'estimation de chaque paramètre. La superposition des différentes grilles de données dans le SIG nous donne la valeur du taux d'érosion au niveau de chaque unité de surface.

### L'érosion potentielle

L'érosion potentielle désigne le pouvoir d'un sol sous l'effet des dégradations des gouttelettes des pluies, dans son environnement morphologique de produire des sédiments. C'est une fonction multiplicative de trois facteurs qui s'introduisent dans la formule de Wischmeier ; elle est décrite comme suit :

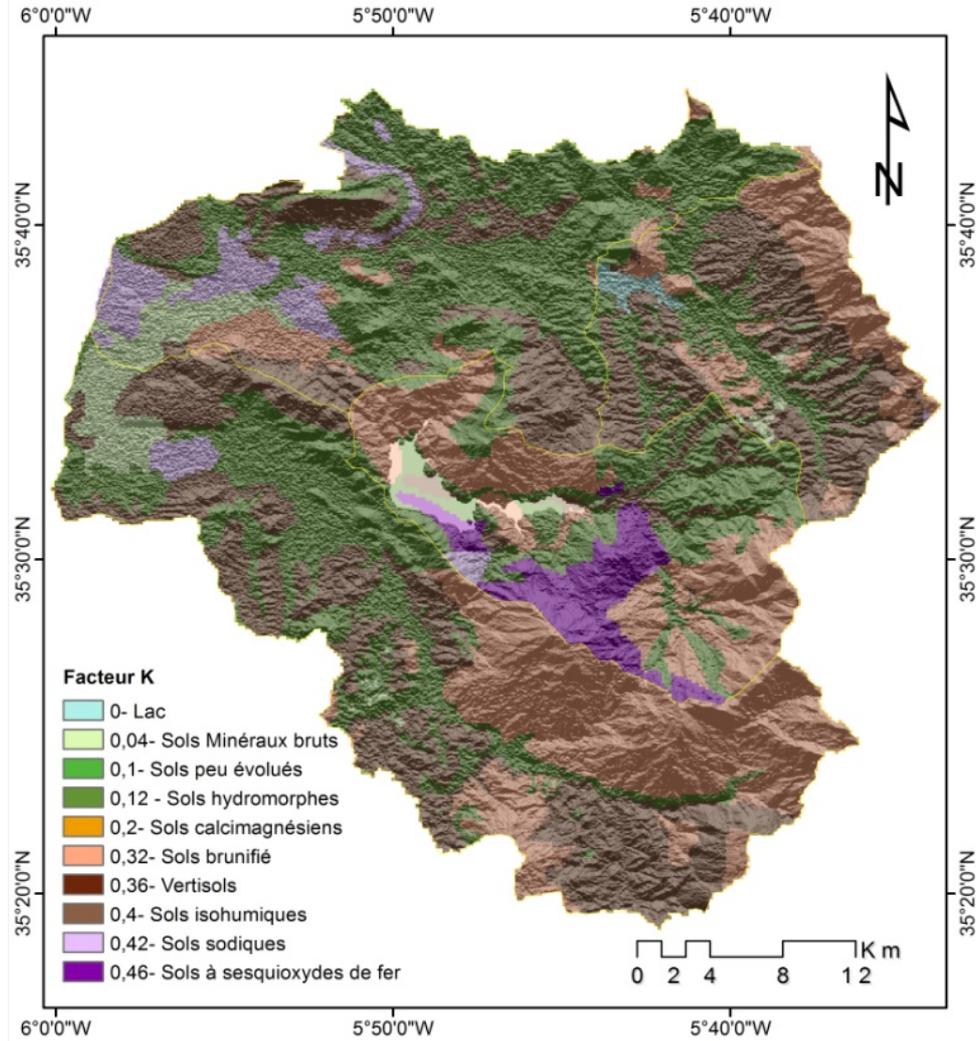


Figure 5. Carte d'érodibilité du bassin versant de Tahaddart superposée à un MNT estompé à 315 sur 45°.

Figure 5. Map of erodibility of the Tahaddart basin superimposed on a DTM hillshade at N315 - 45°.

$$E_p = R.K.LS$$

Avec

$E_p$  : Erosion potentielle (t/ha/an)

R : Agressivité pluviale

K : Erodibilité des sols

LS : Indice de pentes

Le croisement sur un SIG, des cartes synthétiques des différents facteurs de l'érosion potentielle a permis de la quantifier. Le tableau 10 synthétise les différents calculs de l'érosion. Il en ressort que le sous-bassin d'El Hachef présente les valeurs les plus élevées de l'érosion potentielle (271,26 t/ha/an). Cette zone est caractérisée par des pentes et longueurs de pentes élevées qui ont conduit à de fortes valeurs du facteur topographique LS dont sa contribution dans la génération des pertes par le modèle utilisé est sans doute la plus pesante. La perte potentielle pour le bassin versant de Tahaddart est de 202,337 t/ha/an.

Tableau 10. Pertes potentielles pour chaque sous-bassin du bassin versant de Tahaddart.

Table 10. Potential losses for each sub-basin of the Tahaddart Watershed.

Sous-bassin	$E_p$ . (t/ha/an)
SB de El Hachef	271,25
SB de Mharhar	210,97
SB de Kharoub	180,22
SB de Oued Sania	146,9

### L'érosion sur les versants : modèle de Wischmeier

Le modèle RUSLE permet d'estimer la perte moyenne annuelle de sol. C'est une version révisée de l'équation universelle de pertes de sol (USLE) de Wischmeier & Smith (1978). Selon Roose & Georges (2004), l'érosion est une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies (le facteur R) que multiplie la résistance du milieu, laquelle comprend le facteur

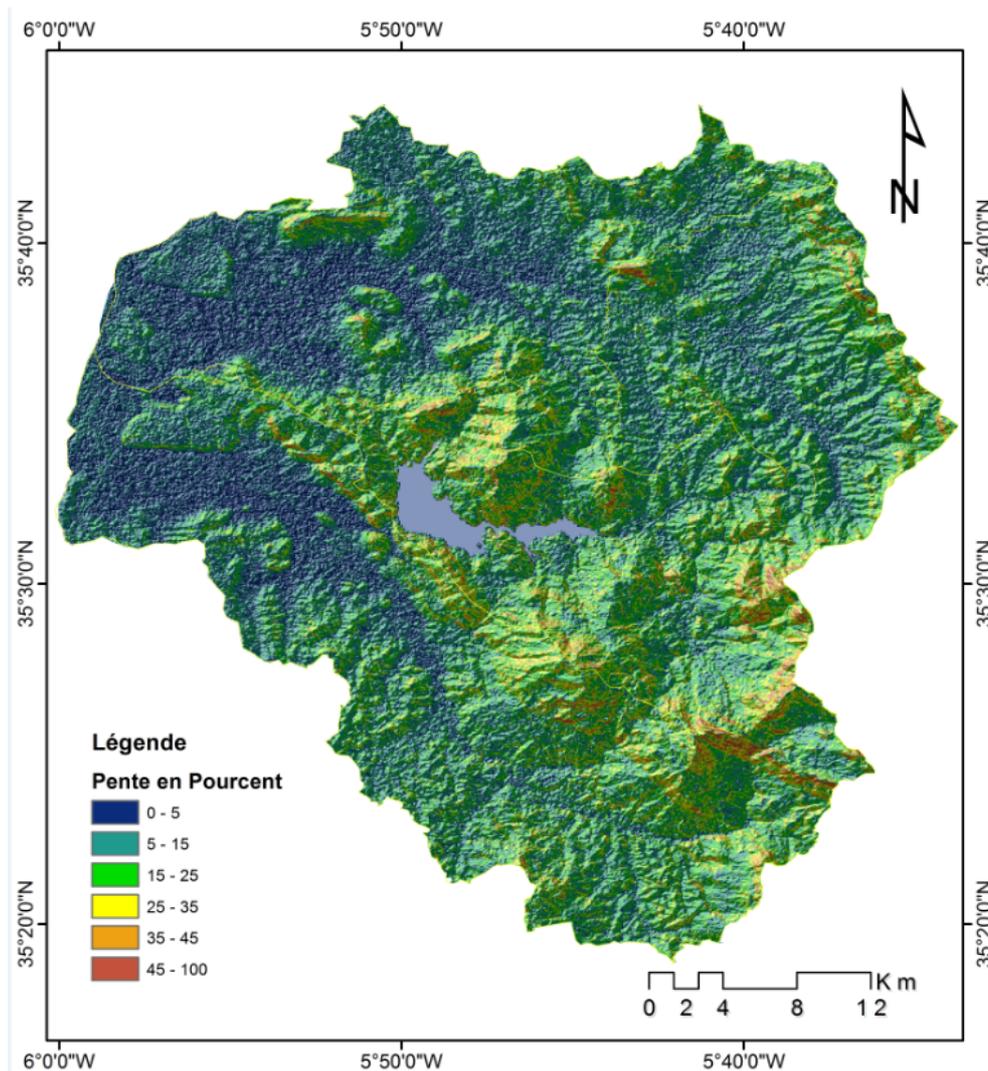


Figure 6. Carte de pente (en pourcent) du bassin versant de Tahaddart superposée à un MNT estompé à 315 sur 45°.

Figure 6. Slope map (in percent) of the Tahaddart basin superimposed on a DTM hillshade at N315 - 45°.

d'érodibilité du sol (K), la topographie (LS), les pratiques antiérosives (P), le couvert végétal (C) et les pratiques culturales (P). L'équation universelle des pertes en sol est de la forme :

$$A = R * K * LS * C * P$$

Le croisement des cartes synthétiques des différents facteurs du modèle RUSLE a permis de quantifier l'érosion réelle ou pertes annuelles moyennes en terre en t/ha/an. L'analyse des résultats pour les quatre sous-bassins (Tab. 11) montre que le sous-bassin de Mharhar enregistre la plus forte valeur de  $A_{(RUSLE)}$  avec 64,68 t/ha/an. La perte réelle annuelle pour ce sous-bassin est de 20632,92 t/an. Le sous-bassin de Kharroub, quand à lui, présente une valeur  $A_{(RUSLE)} = 52,17$  t/ha/an, mais vue sa surface qui est plus importante, la perte réelle annuelle est la plus forte perte avec 22260,94 t/an. La valeur moyenne de  $A_{(RUSLE)}$  pour l'ensemble du bassin versant de Tahaddart est de 47,79 t/ha/an. Ceci permet de déduire que la perte moyenne réelle

annuelle par érosion en nappe et rigole dans ce bassin versant est de 54528,39 t/an.

Tableau 11. Erosion réelle pour chaque sous-bassin du bassin versant de Tahaddart.

Table 11. Real erosion for each sub-basin of the Tahaddart watershed.

Sous-bassin	A (RUSLE) (t/ha/an)
SB de El Hachef	27,13
SB de Mharhar	64,68
SB de Kharoub	52,17
SB de Oued Sania	47,18

Ces résultats montrent que les valeurs enregistrées dans le bassin de Tahaddart ainsi que les résultats des études antérieures dans le Prérif (El Garouani *et al.* 2010, Heusch 1970, Ait Fora 1995, Siteri *et al.* 2003, Laaroussi 2014) sont beaucoup plus élevés que les niveaux de tolérance ( $A_{(RUSLE)} > 11$  t/ha/an). Cela montre la gravité de la dégradation spécifique des

sols due au type d'utilisation du sol, la lithologie et le climat local qui favorisent l'érosion des sols.

### L'érosion sur les versants : modèle Williams

La formule de Williams (1975) (MUSLE) est une version modifiée du modèle USLE et permet d'attribuer la part de l'érosion à chaque crue. La perte moyenne en sol pour une crue est une fonction multiplicative du volume de la crue ( $V$  en  $m^3$ ), le débit de pointe de la crue ( $Q_p$  en  $m^3/s$ ), l'érodibilité du sol ( $K$ ), l'indice de pente ( $S$ ), la longueur de pente ( $L$ ), le couvert végétal ( $C$ ) et les pratiques culturales ( $P$ ). La formule de Williams est estimée de la forme suivante :  $A = 11,8 * (V * Q_p)^{0,56} * K * L * S * C * P$

Le croisement des cartes synthétiques des différents facteurs du modèle MUSLE ainsi que les volumes d'eau ruisselé et les débits maximums instantanés dans chaque sous-bassin ont permis de calculer la quantité de sédiments produite par sous-bassin en t/an (Tab. 12).

Tableau 12. Erosion réelle totale pour chaque sous-bassin du bassin versant de Tahaddart.

Table 12. Total actual erosion for each sub-basin of the Tahaddart watershed.

Sous-bassin	A (MUSLE) (t/an)
SB de El Hachef	106 106,25
SB de Mharhar	196 584,74
SB de Kharoub	176 963,20
SB de Oued Sania	128 239,80

Les pertes élevées s'observent au niveau du sous-bassin de Mharhar et le sous bassin de Kharoub. Ces résultats sont conformes à celles élaborées par le modèle RUSLE. Ceci indique que l'érosion est très active au niveau aval du bassin de Tahaddart. Les pertes calculées pour ce bassin versant sont en moyenne de 697894 t/ha dont 39 % participent à l'envasement des barrages 9 Avril et Ibn Battouta et 61 % déversent vers l'Atlantique.

### Dégradation spécifique

Le calcul des taux de dégradation spécifique permet d'estimer le taux d'érosion à l'exutoire des sous-bassins (Tab. 13). Ce coefficient est défini par Hession & Shanholz (1988) par la formule  $DR=10.D/L$  où  $D$  est la dénivelée du bassin versant entre le point culminant et l'exutoire du bassin et  $L$  est la Longueur du talweg principal. La dégradation spécifique moyenne ou la quantité des transports solides dans le bassin de Tahaddart est de 30,45 t/ha/an. Cette valeur est proche des levés bathymétriques réalisés au niveau du barrage Ibn Battouta (environ 36,52 t/an pour la période 1989 - 1994, contre 26,21 t/an en 1994-2000 et 15,91 de 2000 à 2003).

Tableau 13. Dégradation spécifique pour chaque sous-bassin du bassin versant de Tahaddart.

Table 13. Specific degradation for each sub-basin of the Tahaddart Watershed.

Sous-bassin	DR (t/ha/an)
SB de El Hachef	26,80
SB de Mharhar	23,85
SB de Kharoub	24,24
SB de Oued Sania	46,92

### Les pertes en terre générées par le réseau hydrographique

Les valeurs de la perte en terre générées par le réseau hydrographique ou érosion linéaire, pour chaque sous-bassin, est calculée en se basant sur l'hypothèse de soustraction des valeurs ressorties par le modèle MUSLE de celles ressorties par le modèle RUSLE (Tab. 14).

Tableau 14. Pertes en terre pour chaque sous-bassin du bassin versant de Tahaddart.

Table 14. Land losses for each sub-basin in the Tahaddart watershed.

Sous-bassin	A (RH) (t/an)	P(A) (%)
SB de El Hachef	226 432,65	9,74 %
SB de Mharhar	175 951,08	17,87%
SB de Kharoub	45 281,005	18,97 %
SB de Oued Sania	441 106,33	19,80 %

L'analyse des résultats montre que les pertes dues au réseau hydrographique sont d'environ 16,6% pour le bassin versant de Tahaddart. Les pertes sur les versants l'emportent sur les pertes dues au réseau hydrographique.

### Modélisation empirique: sédimentation (déposition)

La modélisation empirique par RUSLE et Sédimentation est utilisée dans chaque sous bassin. Elle permet d'apporter des précisions sur le bilan des pertes en sol établies dans chaque parcelle élémentaire. Les résultats des calculs des pertes en sol annuelles nettes montrent que :

- Les régions de fortes pertes dominent surtout sur les reliefs des sous-bassins. Elles correspondent à des zones de forte pente et occupent 24% de la surface totale.
- Les régions de pertes entre 0,0 à 50 t/ha/an se concentrent à l'exutoire des sous-bassins. Ces pertes participent à l'envasement des barrages Ibn Battouta et 9 Avril à hauteur de 40% alors que 60% se déversent vers l'Oued Tahaddart.
- Les régions à pente faible correspondent à des endroits où dominant la sédimentation (ou déposition) sur l'érosion. Ces endroits occupent le centre des sous-bassins,
- La sédimentation domine dans les cours d'eau des principaux Oueds.

## CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant de Tahaddart comprend quatre sous-bassins dont deux sont en amont de deux barrages : barrage 9 avril et barrage Ibn Battouta. Le bassin montre une forme allongée avec un indice de compacité de Gravilius est de 1,55 sur une superficie de 114100 ha. Le réseau hydrographique est ramifié. Les principaux cours d'eau (Oued El Hachef et Oued Mharhar) s'allongent de l'est vers l'ouest sur des distances respectives de 650 et 480 km et des pentes moyennes de 1,20 à 4,10 %. Une telle situation pouvant favoriser le développement des écoulements fluviaux et les dépôts des sédiments au niveau des lits des Oueds. Le temps de concentration, déduit des données pluviométriques est en moyen de 2,50 h pour les sous-bassins d'Oued Sania et El Hachef, dont l'exutoire est un barrage, ce qui va engendrer un rassemblement lent des eaux vers l'exutoire. Le temps de concentration est très long pour les sous-bassins de Kharoub et Mharhar. Ceci engendre un rassemblement à l'exutoire, au niveau des lacs et sebkhas qui entourent Oued Tahaddart. Après une analyse minutieuse des facteurs d'érosion entrant dans les modèles de prédiction des pertes en terres, le croisement des cartes synthétiques des différents facteurs dans un SIG a permis une évaluation et une quantification de l'érosion. L'érosion potentielle est évaluée pour le bassin versant de Tahaddart à 202,337 t/ha/an avec plus de 40% de la surface des sous-bassins a moins de 50 t/ha/an. La perte moyenne réelle par érosion en nappe et rigole dans ce bassin versant est de 47,79 t/ha/an, présentant un niveau de risque moyen. Les pertes totales à l'exutoire sont en moyenne de 697894 t/ha (soit 6,12 t/an). Ces pertes dues au réseau hydrographique, ou érosion linéaire, sont d'environ 16% et confirment que les pertes sur les versants, ou érosion en nappe ou en rigole, l'emportent sur les pertes dues au réseau hydrographique. La dégradation spécifique moyenne est de 30,45 t/ha/an. Les pertes en sols établis par RUSLE et Sédimentation montrent que l'érosion en nappe est dominante sur les hauts versants du bassin versant de Tahaddart. Les régions de faible pertes en sol ou de déposition correspondent à des zones de faible pente ou à des plaines (jusqu'à 50 t/ha/an de sédimentation).

Les résultats obtenus dans cette étude bien qu'elle ne présentent que des valeurs relatives, elles sont précieuses, Elles peuvent servir de base pour aider dans la planification des activités de conservation des sols et une réduction de l'envasement des barrages. Ces résultats apportent une aide importante aux décideurs et aménageurs pour simuler des scénarios d'évolution du bassin de Tahaddart et surtout planifier les interventions de lutte contre l'érosion.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les évaluateurs anonymes pour leurs remarques et suggestions.

## REFERENCES

- Ait Fora M. 1995. *Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin versant du Rif marocain: Validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments*. PhD, Université de Sherbrooke, Québec, 200p.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Mutiah R.S. *et al.* 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of American Water Resources Association*, 34, 73-89.
- Arnoldus H. M. J. 1980. An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss Equation. In: De Boodt, M. and Gabriels, D., Eds., *Assessment of Erosion*. FAO Land and Water Development Division, Wiley & Sons, Chichester, 127-132.
- Beasley D. B. 1977. ANSWERS. *A Mathematical Model for Simulating the Effects of Land Use and Management on Water Quality*. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana. 220p.
- Billaux P. & Bryssine G. 1967. Les sols du Maroc. In : Congrès de pédologie méditerranéenne: Excursion au Maroc. *Cahiers de la Recherche Agronomique*, 1, 59-101.
- Brown R.B. 2003. *Soil Texture*, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida, Fact Sheet SL29, 8p.
- Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS). 1967. *Classification des sols*. Laboratoire de Géologie et de Pédologie, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Grognon, France, 87p.
- De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.J. 1996. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: I. Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10, 8, 1107-1117.
- DGH. 1993. Les ressources mobilisées dans le bassin de Tahaddart. *Rapport de la Direction Générale de l'Hydraulique*, Maroc. 56p.
- Dumas J. 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques *O.R.S.T.O.M.* Tunis, sér. pédologie, 3, 307-333.
- El Garouani A., Tribak A. & Abahrour M. 2010. Assessment the Effects of Land-Use Cover Changes on Regional Soil Loss Susceptibility Using RUSLE Model and Remote Sensing Data. Red Books. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 340, 343-349.
- El Gharbaoui A. 1981. La terre et l'homme dans la péninsule tingitane: Etude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif Occidental. *Travaux de l'Institut Scientifique, série Géologie Géographie Physique*, 15, 1-439.
- ESRI. 1999. ArcView GIS 3.2. *Environmental Systems Research Institute*, Inc., Redlands.
- Hairshine P.B. & Rose C.W. 1992a. Modeling water érosion due to overland flow using physical principles. 1. Sheet flow. *Water Resources Research*, 28, 237-243.
- Hairshine P.B. & Rose C.W. 1992b. Modeling water érosion due to overland flow using physical principles. 2. Rill flow. *Water Resources Research*, 28, 245-250.
- Hession W.C. & Shanholtz V.O. 1988. A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution. *Journal of Soil Water Conserv.* 43, 3, 264-266.

- Heusch B. 1970. L'érosion dans le Prérif: Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Prérif occidental. *Annales des recherches forestières*, 12, 9-176.
- Hudson N. 1973. Soil Conservation. London, B.T. Batsford, c1, 320p.
- Inypsa 1987. Etude 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.
- 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.
- Khali Issa L., Ben Hamman Lech-Hab K., Raissouni A. *et al.* 2016. Quantitative Mapping of Soil Erosion Risk Using GIS/USLE Approach at the Kalaya Watershed (North Western Morocco). *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 7, 8, 2778-2795.
- Knisel W.G. 1980. Erosion and Sediment Yield Models--An Overview, *Proceedings of ASCE Symposium on Watershed Management*, Boise, Idaho, 1, 141-150.
- Kouraimi B. 1997. *Cartographie et analyse de la production pastorale et ligneuse du matorral dans le Rif Occidental : Cas du Bassin Versant de Tleta*. Mémoire de 3ème cycle. Pastoralisme. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, 50p.
- Laaroussi O. 2014. *Etude de l'érosion et de la déposition des sols à l'échelle du bassin versant de l'Oued El Maleh (Fès, Maroc) par l'utilisation conjointe de la télédétection, du SIG et des techniques de mesures sur le terrain*. Doctorat, Faculty of Sciences and Technology, Fès, Morocco, 141p.
- Lane L. J. & Nearing M. A. eds. 1989. USDA Water Erosion Prediction Project: *Hillslope profile model documentation*. NSERL Report No. 2. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- 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*.
- Masson J.M. 1971. *L'Érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et techniques du Languedoc-Montpellier 2, , 213p.
- Morgan R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E. *et al.* 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 527-544.
- Morschel J. & Fox D. 2004. « Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais », *M@ppemonde*, 76, 11 p. <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.pdf>
- Nearing M. A., Foster G. R., Lane L. J. *et al.* 1989. A process-based soil erosion model for USDA *Water Erosion Prediction Project technology*. *Trans. ASAE* 32, 5, 1587-1593.
- Osrihi A., El Oumri M., Moussadek R. *et al.* 2007. Vocation agricole des terres de la zone d'Oujda, Rapport et cartes. *Rapport Institut National de la Recherche Agronomique*. [www.inra.org.ma/envirom/docs/cvat/oujda/oujda.pdf](http://www.inra.org.ma/envirom/docs/cvat/oujda/oujda.pdf).
- Pepin Y. & Hammouda N. 2012. Variabilité de l'Intensité des pluies dans la région de Tanger sur une période de 30 ans. *Revue marocaine des sciences agronomiques et vétérinaires*, 1, 23-27.
- PNABV. 1995. *Rapport du Programme National d'Aménagement des Bassins Versants, Maroc*.
- Rahhou M. 1999. *L'érosion dans le Prérif central, zone interfluviale Leben-Sebou-Ouergha, un prolongement de l'évolution naturel, une production sociale*. Thèse Université Mohammed V, Rabat, Morocco, 250p.
- Renard K.G. & Freimund J.R. 1994. « Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE », *Journal of Hydrology*, 157, 287-306.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. *et al.* 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30-33.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. *et al.* 1997. Predicting Soil Erosion by Water: *A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, Washington DC.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A. *et al.* 1996. Predicting soil erosion by water: *A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook Number 703, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Tucson, AZ, USA, 101-142.
- Roose E. & Georges D. N. 2004. Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : revue et perspectives. *Revue Sécheresse*, 15, 1, 12-19.
- Roose E. 1977. « Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa », *Soil Conservation Society of America*, Ankeny, Iowa, 50-71.
- Roose E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO N°70*, Rome. 420 p.
- Rose C.W., Williams J.R., Sander G.C *et al.* 1983. A mathematical model of Soil erosion and deposition process: I. *Theory for a plane land element*. *Soil Science Society of America*, 47, 991-995.
- 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*, 26, 69-79.
- Siteri H., Aït Brahim L., Sossey A.F. *et al.* 2003. Intégration du modèle USLE dans un SIG pour la détermination de la dégradation spécifique des sols dans le Rif septentrional (cas du bassin versant de l'oued Nakhla). *Travaux de l'Institut Scientifique de Rabat, Série Géologie et Géographie Physique*, 21, 241-276.
- Stone R.P. & Hillborn D. 2000. *Universal Soil Loss Equation*. Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA) Ontario, Canada. [www.gov.on.ca/omafra/frech/engineer/facts/00-002.htm](http://www.gov.on.ca/omafra/frech/engineer/facts/00-002.htm).
- Suter G. 1980. Carte structurale de la chaîne rifaine au 1/500 000. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, 245b.
- Tahiri M. 2014. *Contribution de l'outil de l'observation de la Terre à l'analyse du milieu environnemental du bassin de Tahaddart (Rif nord occidental, Maroc)*.

- Doctorat, Hassan II University of Casablanca, Morocco, 256p.
- Tahiri M., Achab M., Emran A. *et al.* 2014a. Lithology Data Contribution in Hydrographic Network Distribution Using Remote Sensing and GIS: Case of the Tahaddart Basin, Northwestern Rif, Morocco. *International Journal of Advanced Research*, 2, 380-391.
- Tahiri M., Hakdaoui M., Emran, A. *et al.* 2014b. Contributions du SIG et de la Télédétection à la corrélation entre le NDVI et la pluviométrie pour l'étude de la variabilité climatique dans le bassin de Tahaddart (Rif, Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 122, 253-274.
- Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F. *et al.* 2014c. Evaluation et Quantification de l'Erosion et la Sédimentation à Partir des Modèles RUSLE, MUSLE et Déposition Intégrés dans un SIG. Application au Sous-Bassin de l'Oued Sania (Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 125, 157-178.
- Tahiri M., Tabyaoui H., Tahiri A. *et al.* 2015. Modelling 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.
- Williams J. R., Nicks A. D. & Arnold J. G. 1985. Simulator for Water Resources in Rural Basins. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE 3, 6, 970-986.
- Williams J. R. 1975. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor, Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40, USDA, *Agricultural Research Service*, Washington D. C., 244-252.
- Wischmeier W.H. & Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses- *A Guide to Conservation Planning*. USDA Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station.
- Woolhiser D. A., Hanson C. L. & Kuhlman R. 1970. Overland Flow on Rangeland Watersheds, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 9, 2, 336-356.
- Zingg A. W. 1940. Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff. *Agricultural Engineering*, 21, 2, 59-64.

Manuscrit reçu le 30/06/2017

Version révisée acceptée le 28/12/2017

Version finale reçue le 29/12/2017

Mise en ligne le 29/12/2017