

Quantification de l'Érosion Hydrique au Niveau du Bassin Versant à l'Amont du Barrage Hassan II, Haute Moulouya, Maroc, par l'Équation Universelle de Perte en Sol

Amina Kassou, PhD, Professor

Research team "Georesources-Geo-Environment, Geological and Oasis Heritage", Geosciences Department, Faculty of Sciences and Techniques, Moulay Ismail University, Boutalamine, Errachidia, Morocco

Narjisse Essahlaoui, PhD student

Yassin Azzi, PhD

Ali Essahlaoui, PhD, Professor

Research team "water sciences and environmental engineering", Laboratory of Geo-engineering and Environment, Faculty of Sciences, Moulay Ismail University, Zitoune, Meknes, Morocco

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n9p284](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n9p284)

Submitted: 27 August 2022

Accepted: 27 March 2023

Published: 31 March 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Kassou A., Essahlaoui N., Azzi Y. & Essahlaoui A. (2023). *Quantification de l'Érosion Hydrique au Niveau du Bassin Versant à l'Amont du Barrage Hassan II, Haute Moulouya, Maroc, par l'Équation Universelle de Perte en Sol*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (9), 284. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n9p284>

Résumé:

L'érosion hydrique et l'envasement des barrages au Maroc sont des problèmes environnementaux importants qui ont des conséquences négatives sur les ressources en eau et l'agriculture du pays. L'érosion est causée par plusieurs facteurs, tant naturelles qu'anthropiques, notamment l'agriculture intensive, la surexploitation des terres et les changements climatiques. Elle entraîne la dégradation de la qualité des sols, la perte de fertilité et la diminution de la productivité agricole. L'envasement des barrages est également un problème majeur environnemental important. Les barrages sont essentiels pour la gestion des ressources en eau et pour la fourniture d'eau pour l'agriculture et la consommation humaine. Cependant, l'envasement des barrages diminue leur capacité de stockage et peut causer des problèmes de sécurité hydrique. Le bassin versant de la Haute Moulouya situé à l'amont du

barrage Hassan II, s'étend sur une surface de 3379 km² et un périmètre de 512 km. L'objectif principal du présent travail est d'estimer les pertes en sol au niveau du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II (Haute Moulouya, Maroc). La méthodologie adoptée est basée sur l'établissement des principales cartes thématiques permettant d'estimer les pertes en sol en utilisant le modèle de Wischmeier et de cartographier les zones vulnérables à l'érosion. Les résultats obtenus montrent que le facteur d'érosivité (R) est en moyenne de 72,15 avec une valeur maximale de 99,16. Quant au facteur d'érodibilité des sols (K), il varie de 0,1 à 0,45 avec une moyenne de 0,27. Le facteur topographique (LS) varie de 0 à 322. Concernant le couvert végétal (C), On note une protection faible du sol à l'échelle du bassin. En effet, seulement 16,3% de la superficie du bassin versant se caractérise par une bonne protection de sol avec un facteur C inférieur à 0,01. L'étude a montré que la perte en sol moyenne du bassin est évaluée à 9,12t/ha/an, avec 11,24% de la superficie totale du bassin. Cette valeur correspond à une érosion moyennement faible. En plus, 82,7% de superficie du bassin versant est protégée contre l'érosion, où les pertes en sols sont inférieures à 7t/ha/an (le seuil de tolérance). La superficie soumise à de forte érosion de plus de 28t/ha/an, soit 6,5% de la superficie totale, est en grande partie très accidentée à forte pente avec un réseau hydrographique dense. Par conséquent, la topographie et le réseau hydrographique constituent les principaux facteurs explicatifs de la perte en sol.

Mots-clès : Erosion hydrique, Barrage Hassan II, RUSLE, SIG, Télédétection

Quantification of Water Erosion in the Watershed Upstream of the Hassan II Dam, Upper Moulouya, Morocco, by the Universal Soil Loss Equation

Amina Kassou, PhD, Professor

Research team "Georesources-Geo-Environment, Geological and Oasis Heritage", Geosciences Department, Faculty of Sciences and Techniques, Moulay Ismail University, Boutalamine, Errachidia, Morocco

Narjisse Essahlaoui, PhD student

Yassin Azzi, PhD

Ali Essahlaoui, PhD, Professor

Research team "water sciences and environmental engineering", Laboratory of Geo-engineering and Environment, Faculty of Sciences, Moulay Ismail University, Zitoune, Meknes, Morocco

Abstract

In Morocco, Water erosion and siltation of dams are significant environmental issues that have negative consequences on the country's water resources and agriculture. Erosion is caused by several factors, both natural and anthropogenic, including intensive agriculture, overuse of land, and climate change. It leads to the degradation of soil quality, loss of fertility, and reduced agricultural productivity. The siltation of dams is also a major environmental problem. Dams are essential for the management of water resources and for the supply of water for agriculture and human consumption. However, the siltation of dams decreases their storage capacity and can cause water security problems. The Upper Moulouya watershed located upstream of the Hassan II dam covers an area of 3379 km² and a perimeter of 512 km. The main objective of the present work is to estimate the soil losses in the watershed upstream of the Hassan II dam (Upper Moulouya, Morocco). The methodology adopted is based on the establishment of the main thematic maps allowing to estimate of the soil losses using the Wischmeier model and mapping the areas vulnerable to erosion. The results obtained show that the erosivity factor (R) is on average 72,15 with a maximum value of 99,16. As for the soil erodibility factor (K), it varies from 0,1 to 0,45 with an average of 0.27. The topographic factor (LS) varies from 0 to 322. Concerning the vegetation cover (C), There is low soil protection in the basin. Indeed, only 16,3% of the watershed area is characterized by good soil protection with a C factor lower than 0,01. The study showed that the average soil loss in the basin is estimated at 9,12t/ha/year, with 11,24% of the total basin area. This value corresponds to a medium-low erosion. In addition, 82,7% of the watershed

area is protected against erosion, where soil losses are lower than 7t/ha/year (the tolerance threshold). The area subject to high erosion of more than 28t/ha/year, corresponding to 6,5% of the total area, is largely very hilly with a steep slope and a dense hydrographic network. Therefore, the topography and the hydrographic network are the main explanatory factors of soil loss.

Keywords: Water erosion, Hassan II Dam, RUSLE, GIS, Remote sensing

Introduction

L'érosion hydrique constitue la première cause de la dégradation des sols au Maroc. Elle représente un risque naturel multidimensionnel et un défi environnemental de l'écosystème. Elle touche presque toutes les régions du territoire marocain avec bien entendu des intensités différentes. Les pertes en terres annuelles cumulées à cause de l'érosion sont estimées à plus de 100Mt/an, dont près de 60% se dépose dans les retenues des barrages (Ahamrouni, 1996; Debbarh et Badraoui, 2001). Par conséquent, l'envasement des barrages devient alarmant car plus de 75 millions de mètres cubes des capacités des barrages sont perdues chaque année (El Hafid & Akdim, 2018). Ce phénomène est plus préoccupant pour l'aménagement des bassins versants.

Le barrage Hassan II se classe actuellement, de point de vue capacité, comme le plus grand barrage dans le bassin de la Moulouya avec une capacité de stockage maximale de l'ordre de 400 millions de mètres cubes (Mm³). C'est une importante réserve d'eau destinée pour l'irrigation et la production d'eau potable et contribue également à la protection des zones aval contre les inondations ainsi que sa participation à l'allègement de l'envasement du barrage Mohammed V situé en aval (Chahboune et *al.*, 2014). Le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II est une zone soumise à une érosion hydrique importante, due aux conditions naturelles (fragilité du milieu physique, conditions climatiques agressives, dégradation de la végétation) (Combe & Simonot, 1971; Chahboune et *al.*, 2014).

La présente étude a pour objectif l'évaluation de l'ampleur du risque d'érosion dans le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II, à travers un modèle spatial de perte en sol à l'aide de la télédétection et du système d'information géographique (SIG).

Par ailleurs, il existe plusieurs modèles pour la quantification de l'érosion hydrique et le choix se fait en fonction des données disponibles. La méthode la plus utilisée à l'échelle nationale est l'équation universelle de perte en sol (RUSLE). Cette équation a été établie par Wischmeier et Smith (1978), puis modifiée par Renard et *al.* (1996). Elle permet de calculer et d'analyser les différents facteurs qui influencent sur l'érosion tels que le facteur d'érosivité des pluies, le facteur d'érodibilité des sols, la topographie, le couvert végétal et les pratiques culturales.

Cette méthodologie adoptée a permis d'établir la carte des zones vulnérables à l'érosion, de reconnaître les facteurs initiateurs du risque d'érosion à l'échelle du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II et discuter leurs paramètres explicatifs et les incidences pratiques des processus en cours.

Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant du barrage Hassan II est de 3379 km² de superficie et de 512 km de périmètre. Il est limité au Sud par le Haut Atlas, au Nord et Nord-Ouest par le Moyen Atlas. La limite Est, est constituée par les massifs primaires d'Aouli. C'est un bassin de montagne où l'altitude varie entre 1255 m et 3750m (ABHM, 2009). Le point culminant est le Jbel El Ayachi avec 3735 m.

D'une forme allongée selon l'axe SW-NE, il est limité (*Figure 1*) :

Au Sud par jbel El Ayachi ;

Au Sud-Ouest par la confluence entre le haut atlas et le moyen atlas ;

Au Nord par le moyen atlas ;

Au Nord-Est par les massifs primaires d'Aouli.



Figure 1. Situation géographique du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II (image extraite de Google Earth)

La zone d'étude est caractérisée par un climat essentiellement aride à semi-aride, une augmentation sensible de la population et une forte hausse de la demande en ressources naturelles (Mokhtari, 2016).

Lithostratigraphie de la zone d'étude

Le zone d'étude est caractérisée par l'affleurement des formations géologiques allant du paléozoïque jusqu'au quaternaire récent.

Le paléozoïque, constituant le socle de la région, est formé par des terrains shisteux intrudés par des pointements granitiques (granite d'Aouli et granite de Bou Mia)

La couverture débute par les terrains détritiques et argileux du trias, ensuite les formations carbonatées du Lias et Dogger. Ces dernières sont couvertes par des terrains du crétacé (infracénomien, cenomien, turonien et le sénonien) avec une lithologie diversifiée (marne, marne à gypse, barre caillasse et une alternance marno-calcaire. L'ensemble est couvert par des formations cénozoïque et quaternaire (*Figure 2*).

Matériel et méthodes

Données utilisées

Les données utilisées dans le cadre de ce travail sont très diversifiées et variées. Nous citons entre autres : le modèle numérique d'élévation global à 30 m de résolution spatiale (téléchargé à partir du site *web earth explorer* : <https://earthexplorer.usgs.gov/>) ; la carte géologique du Maroc au 1/1 000 000 ; la carte pédologique de la zone d'étude; la carte d'occupation des sols de la zone d'étude; les données climatiques sur la zone d'étude et les données d'observations sur le terrain.

Méthodologie adoptée

La quantification des pertes en sol au niveau du bassin versant du barrage Hassan II a été réalisée en adoptant l'équation universelle de perte en sol (RUSLE) établie par Wischmeier (1978) puis modifiée par Renard et al. (1996).

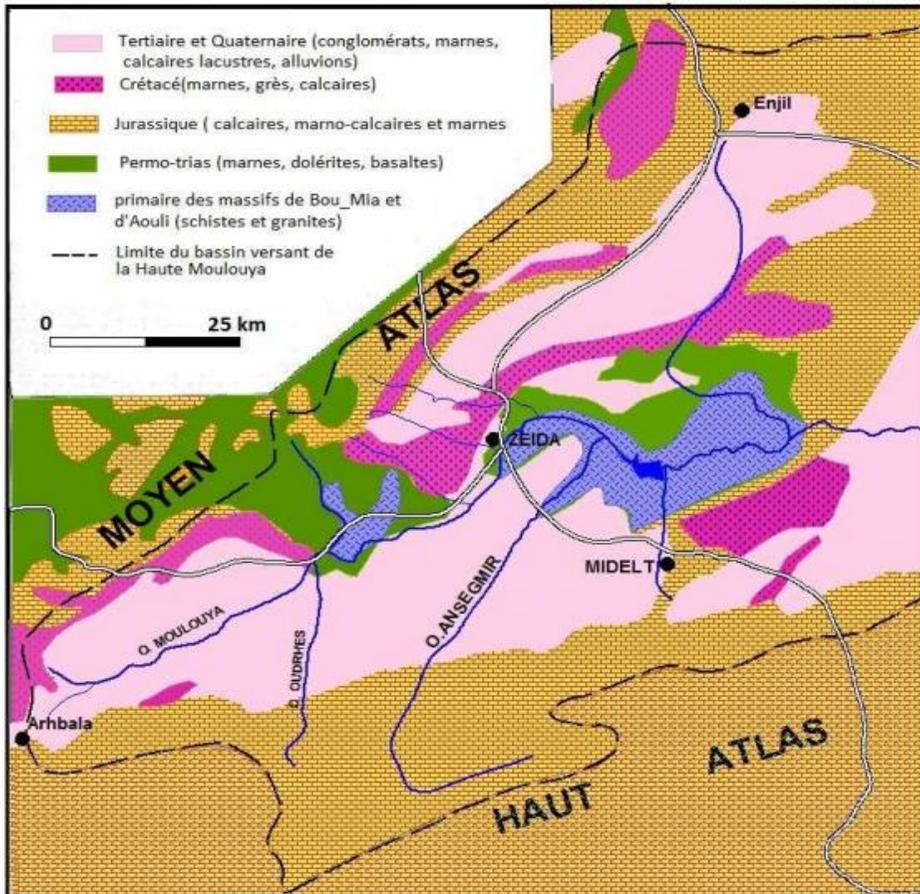


Figure 2. Esquisse lithostratigraphique de la Haute Moulouya (Chaoui, 2013)

La moyenne annuelle de perte en sol (A) est calculée comme suit :

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

Avec :

A= taux annuel moyen de perte en sol en t/ha/an,

R = facteur de l'érosivité des pluies en MJ.mm/ha.H.an,

K =facteur de l'érodibilité des sols en t.ha.H/ha.MJ.mm,

LS =facteur topographique sans dimension combinant la pente (S en %) et la longueur de pente (L en m),

C =facteur du couvert végétal sans dimension,

P =facteur des pratiques culturales antiérosives sans dimension.

L'application de RUSLE dans le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II a nécessité l'évaluation des différents facteurs de l'équation universelle sur toute la superficie du bassin versant et leur expression sous forme de cartes thématiques moyennant l'outil SIG et la télédétection.

L'organigramme au-dessous (*Figure 3*) présente la méthodologie adoptée pour estimer et cartographier l'érosion potentielle. Elle vise à élaborer, à l'échelle du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II, une carte des pertes en sol. Cette carte prend en considération la plupart des facteurs figurant dans l'équation de Wischmeier et Smith (1978), eux même exprimés sous forme de cartes thématiques. Le croisement de ces cartes numériques à l'aide du SIG nous a permis d'estimer le taux des pertes en sol à l'échelle du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II.

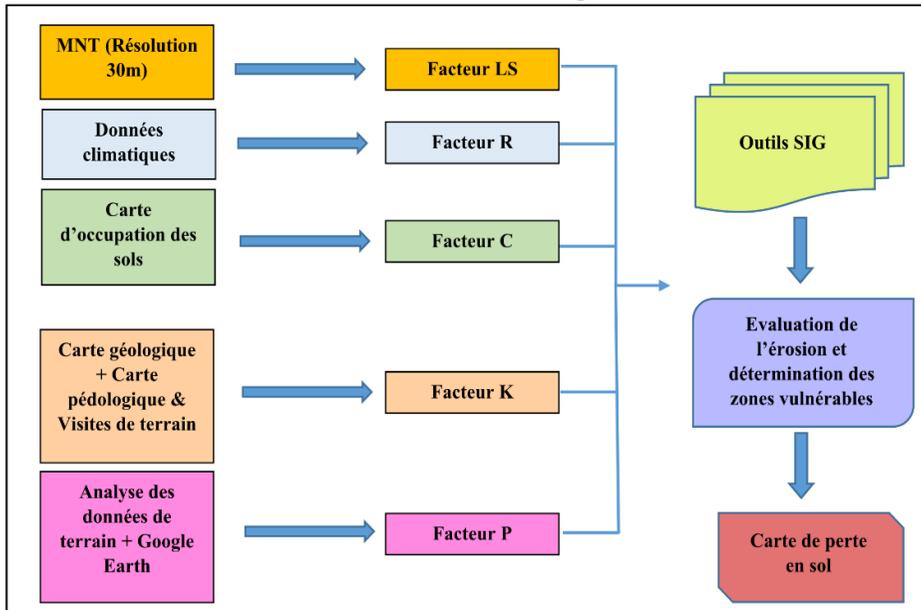


Figure 3. Méthodologie adoptée pour la réalisation de la carte des zones vulnérables au risque d'érosion hydrique dans le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II

Description des facteurs d'érosion

*/ Facteur d'agressivité pluviale R

L'application de la formule de Wischmeier nécessite la disponibilité de données de l'énergie cinétique "Ec" et l'intensité moyenne des pluies en 30mn "I30" suivant l'équation :

$$R = K Ec.I30$$

A défaut de disponibilité de ces données, nous adoptons la relation de Rango et Arnolds (1987), qui permet d'intégrer les données des précipitations mensuelles et annuelles comme suivant :

$$\ln(R)=1.74 \log \sum Pi^2/P+1.29$$

(R = Agressivité pluviale ; Pi = Moyenne des précipitations mensuelles (mm) ; P = Moyenne des précipitations annuelles (mm))

Cette équation est appliquée à quinze stations réparties sur l'ensemble du bassin versant dont les données (précipitations annuelles et mensuelles) sont traitées au niveau de l'analyse climatique (*Tableau 2*). Ensuite on fait appel à une interpolation sur l'ensemble de la zone d'étude.

***/ Facteur indice de pentes LS**

Différentes équations sont disponibles pour calculer le facteur LS. Bizuwerk et *al.* (2008) ont présenté que la longueur de la pente et l'inclinaison de la pente peuvent être utilisés dans un index unique, qui exprime le rapport entre la perte en sol tel que défini par Wischmeier et Smith (1978). Comme indiqué ci-dessous :

$$LS=(X/22,13)^m (0,065+0,045S+0,0065S^2)$$

Avec :

X : longueur de la pente (m) ;

S : Gradient de la pente (%).

Les valeurs de X et Y peuvent être obtenues à partir du modèle numérique d'élévation MNT. Pour calculer la valeur X, l'accumulation de débit a été dérivée à partir du MNT après avoir mené des processus de direction et de remplissage de débit dans ArcGis.

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

En substituant la valeur X, l'équation LS sera :

$$LS = (accumulation\ de\ débit * résolution / 22,13)^m (0,065 + 0,045S + 0,065S^2)$$

(m= Constante qui est égal à 0,5 pour S >5 % ; à 0,4 pour 3,5 < S < 5 % ; à 0,3 pour 1 < S < 3,5 %, et à 0,2 pour S > 1 %).

***/ Facteur érodibilité des sols K**

Le facteur K est fonction de la matière organique, de la texture, de la structure et de la perméabilité du sol, selon la formule suivante (Wischmeier et Smith, 1978):

$$100K = 2,1.M^{1,14}. 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

(M = (% Sable fin + % Limon)*(100 - % Argile) ; a = pourcentage de la matière organique ; b = code de structure de sol ; c = code de perméabilité).

Afin de tenir compte de la présence ou non des éléments grossiers, on a ajusté le facteur K qui est devenu :

$$K \text{ ajusté} = K. (0,983 - 0,0189 X + 0,0000973 X^2)$$

(X est le pourcentage des éléments grossiers de taille > 2 mm en surface).

***/ Facteur du couvert végétal C**

C'est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale dont sa carte est synthétisée à partir de la carte d'occupation du sol. Il permet d'estimer la capacité du sol à atténuer l'effet des gouttes de pluies. La détermination de ce facteur s'est basée sur la carte des occupations des sols. Le *tableau 1* montre le type du couvert végétal existant dans la zone d'étude ainsi que la valeur de C attribuée.

Tableau 1. Type du couvert végétal et les valeurs de C

Occupation du sol	Valeur du C
Forêts denses	0,1
Forêts claires	0,75
Steppe à armoise	0,55
Steppe à alfa	0,32
Agriculture	0,55
Terrain nu	1

***/ Facteur des pratiques culturales P**

C'est un facteur qui prend en considération les aménagements et les pratiques antiérosives réalisés par la population. Chaque mesure a un degré de protection dont le coefficient est établi suivant son efficacité à réduire ou à atténuer les sources d'érosion. Ces pratiques peuvent être des labours selon les courbes de niveaux, des banquettes de reboisement, le billonnage, le buttage, les bandes alternées, etc. Du fait que la superficie touchée par ces pratiques est très négligeable par rapport à la superficie totale du bassin versant, la valeur de un (1) a été affectée à ce paramètre sur l'ensemble de la zone d'étude.

Résultats et discussions

Facteur R

Le facteur R a été calculé pour chacune des stations climatiques considérées (*Tableau 2*). la valeur minimale est de 31,7 alors que la valeur maximale est de 105,6. les valeurs maximales de R sont généralement observées pour les stations ayant une altitude élevée (forte précipitation) et inversement les valeurs les plus faibles correspondent aux stations à faibles altitude (faible précipitation). A partir des données ponctuelles des différentes stations, une interpolation (rastérisation) en utilisant la méthode statistique

inverse distance (IDW) a été réalisée sur l'ensemble du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II (Figure 4).

Tableau 2. Valeurs du facteur R pour les stations climatiques

station	Précipitation moyenne (mm)											Total	R	
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J			A
ZAIDA	12,9	77	53,5	0	17,4	4,9	38,3	12,4	7,5	0,02	19,8	11,4	255,1	64,5
Midelt	13,6	37,3	28,8	0	0,5	1,6	12,5	3,2	0,9	7,3	25,7	5,4	136,8	40,4
Laarichat	35	41,5	15	0	0	0	9,5	0	4	8	15	4	132	44
Anzar Oufounes	-	64,6	104,2	1,8	14,7	11,7	35,6	17,1	10,7	1,8	27	3,2	292,4	81
Ansegnir	19,3	71,2	47	0,3	13	3,8	26,3	12,6	9,5	0,5	9,7	9,4	222,6	59
Tabouazz ant	48,9	61,3	41,1	0	23,1	20	26	8,3	8,6	5,8	12,7	13,5	269,3	55,6
Ksibat	24	27,1	11,7	0	0	4,7	8,5	4	0	9,5	7	0	96,5	31,7
El Aouia	6	45	48,6	5,7	29,7	14,4	53	25,5	31	8	3	31,4	301,3	55
Barrage hassan II	14,6	68,8	22,4	0	3	0	20,6	3,9	6	4	14,3	22,5	180,1	55,6
Louggagh	41	68,6	106	13,7	20,9	4,8	47,6	14,1	34,8	13,9	45,9	18,8	430,1	77,3
El kebab	61	75	78	72	43	18	6	8	23	60	82	90	616	88
Anemzi	46	48	58	56	38	18	11	13	32	53	63	60	496	68,9
Aghbala	134	84	96	70	51	28	6	9	37	56	98	98	767	105,6
Zaouiat Cheikh	72	94	99	82	41	13	3	6	11	52	89	104	666	100,6
Naour	69	79	88	75	40	15	5	8	20	56	81	95	631	91,9

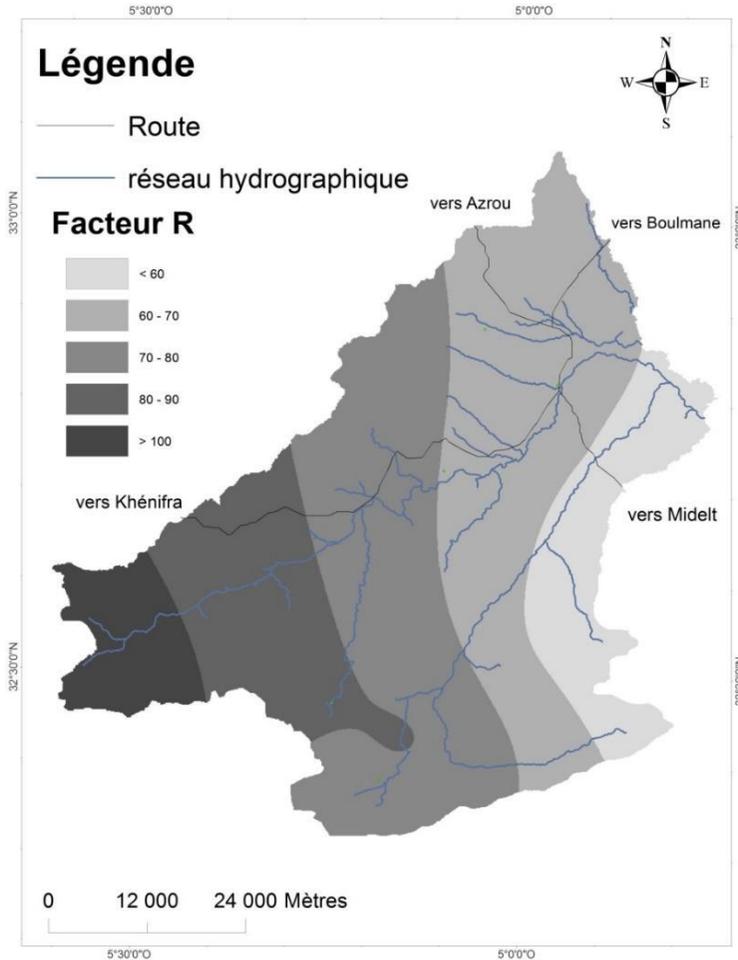


Figure 4. Carte du facteur R au niveau du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II

Dans le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II, le facteur R varie de 50,6 au Sud-Est à 99,16 vers l'Ouest, le Sud-Ouest, avec une moyenne de 72,15 (Tableau 3).

Tableau 3. Statistiques de l'érosivité pluviale

Statistiques d'érosivité	
Min	50,6
Max	99,16
Moyenne	72,15
Ecart type	10,68
Ecart (Max - Min)	74,88

Tableau 4. Superficie des classes d'érosivité pluviale

Classe du facteur R	Superficie (km²)	% BV
<60	441	13,22
60 - 70	1070	32,08
70 - 80	1037	31,09
80 - 90	544	16,31
>90	243	7,28
Total	3335	100

A partir du *tableau 4*, on remarque que presque 92% de la superficie a une agressivité pluviale inférieure à 90 tandis que seulement 7,3% a une agressivité dépassant 90.

L'impact du facteur de l'agressivité pluviale se manifeste par les processus de détachement et de transport des sédiments. Vu les valeurs très peu variables mais élevés, on peut conclure que le facteur R ne pourrait engendrer qu'une faible variabilité de l'érosion, par contre, il pourrait accentuer l'érosion linéaire et donc de fortes valeurs de transport solide.

Facteur Ka

Les résultats obtenus à partir du calcul et de la spatialisation du facteur d'érodibilité des sols ajusté sont présentés dans les *tableaux 5 et 6 et la figure 5*. Ce facteur suit la lithologie du bassin versant. Il varie d'une valeur minimale de 0,10 au niveau des roches tendres à une valeur maximale de 0,45 au niveau des substratums résistants.

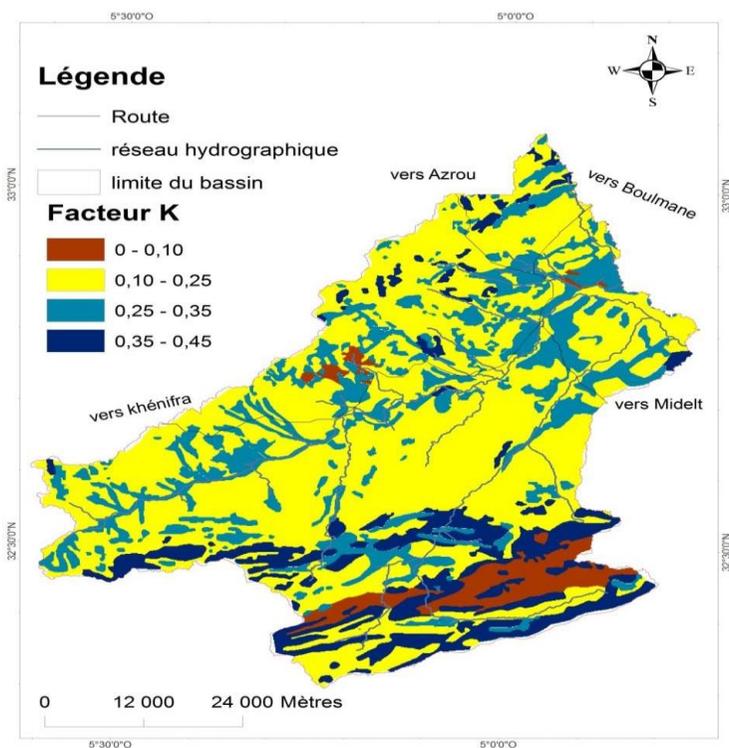


Figure 5. Carte du facteur d'érodibilité des sols ajusté K_a au niveau du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II

Tableau 5. Statistiques du facteur d'érodibilité des sols ajusté K_a

Statistiques d'érodibilité des sols ajusté K_a	
Min	0,1
Max	0,45
Moyenne	0,27
Ecart type	0,09
Ecart (Max - Min)	0,23

Tableau 6. Superficie des classes du facteur d'érodibilité ajusté K_a

Classes du facteur K_a	Superficie (km ²)	% BV
0 - 0,1	158	4,58
0,1 - 0,25	2077	60,27
0,25 - 0,35	754	21,88
0,35 - 0,45	457	13,26
Total	3446	100

A peu près 86% du bassin versant est caractérisé par un facteur K_a inférieur à 0,35 ; et 13% a un facteur K_a supérieur à 0,35. Ceci montre une moyenne fragilité des sols et leur susceptibilité à l'érosion.

Facteur LS

Le facteur LS est synthétisé à partir des cartes de pente et de longueur de pente (*Figure 6*). Le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II, est dominé par la classe de LS inférieure à 5 couvrant ainsi 94,1% de la superficie totale. Sachant que les fortes valeurs du facteur LS peuvent favoriser tout type d'érosion, essentiellement les formes en rigoles et ravinement. La classe correspondant aux valeurs de LS les plus élevées (>15) couvre seulement 1,7% de la superficie du bassin et se trouve très localisée sur les pentes les plus fortes et plus particulièrement aux points où prennent naissance les cours d'eau. Cette classe pourrait engendrer des valeurs de perte en sol très importantes localement (*Tableau 7*).

Tableau 7. Superficie des classes du facteur LS

Classe du Facteur LS	Superficie (km²)	BV (%)
< 5	3183	94,12
5 - 15	133	3,93
15 - 25	37	1,09
25 - 35	14	0,41
> 35	6	0,17
Total	3379	100

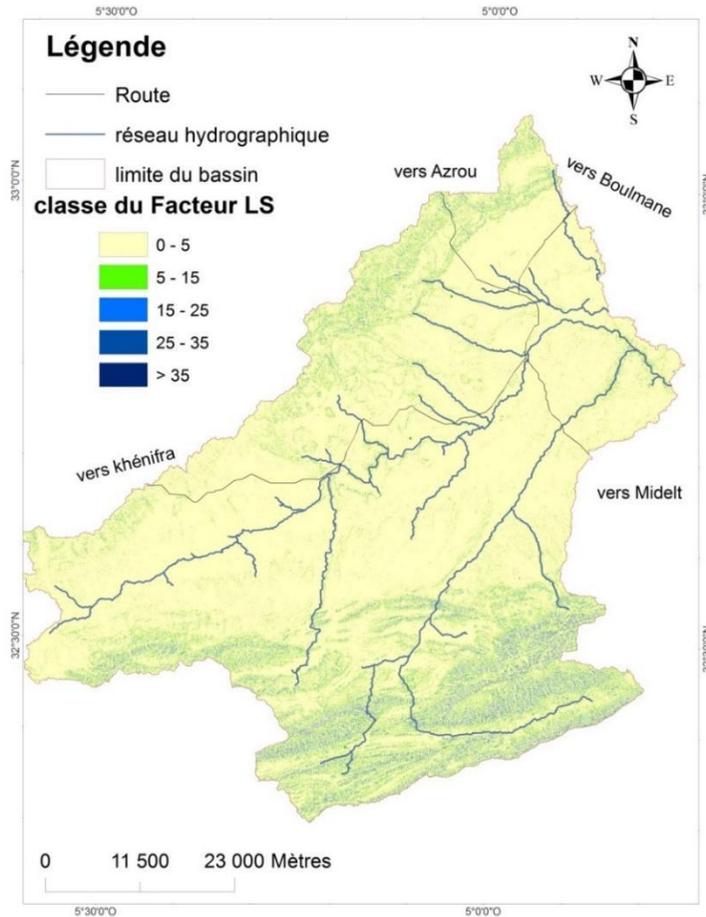


Figure 6. Carte du facteur LS au niveau du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II

Facteur C

L'évaluation des différentes unités de la couverture végétale à l'échelle du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II a été réalisée en se basant sur une carte d'occupation des sols déjà établie sur la zone d'étude. Les valeurs de C varient entre 1 pour une jachère nue et 0,01 pour un sol complètement couvert (Wischmeier et Smith, 1978). Les résultats sont représentés sur le *tableau 8 et la figure 7.*

Tableau 8. Occupations des sols au niveau du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II

Occupation des sols	Superficie (km ²)	% BV
Terrain nu	203	6,07
Agriculture	408	12,21
Steppe à alfa	1130	33,82
Steppe à armoise	685	20,50
Forêts denses	545	16,31
Forêts dégradées	370	11,07
Total	3341	100

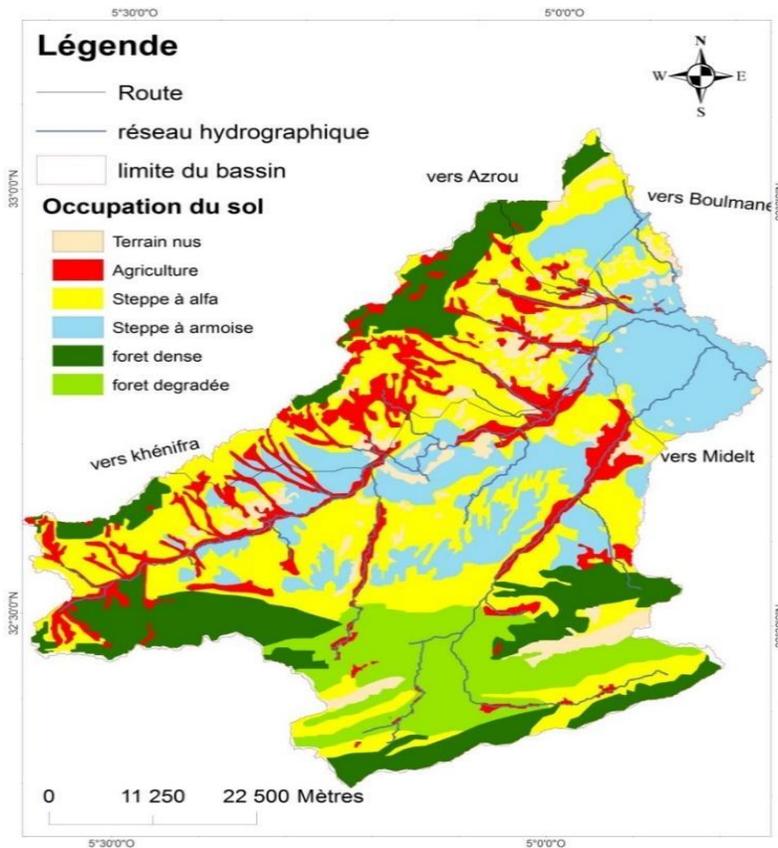


Figure 7. Carte d'occupation de sol du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II (Naimi et al., 2010)

Il en découle que les terrains du Steppe sont le type d'occupation du sol le plus dominant, représentant ainsi 54% de la superficie totale du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II.

Les terrains forestiers viennent en deuxième lieu avec 27,6% de la superficie totale du bassin et sont localisés surtout dans la partie Nord-Ouest

du bassin versant (au piémont du Moyen Atlas) et aussi dans la partie Sud et Sud-Ouest (au piémont du Haut Atlas du Midelt).

Les terrains agricoles couvrent 12% de la superficie totale du bassin versant, on remarque que ce type de la couverture des sols présente un pourcentage faible à cause des conditions qui sont défavorables.

Les terrains nus sont localisés au sein de tous les types des couvertures des sols avec 6% de la superficie totale. Ce sont des terrains où les conditions sont très défavorables ne permettant pas le développement d'une végétation.

Les données de la carte d'occupation de sol ont servi de documents de base pour la détermination du facteur du couvert végétal C. En supposant qu'au niveau des plans d'eau, l'érosion s'annule. L'importance de la distribution des valeurs de C dans le bassin est donnée par *la figure 8 et le tableau 9*.

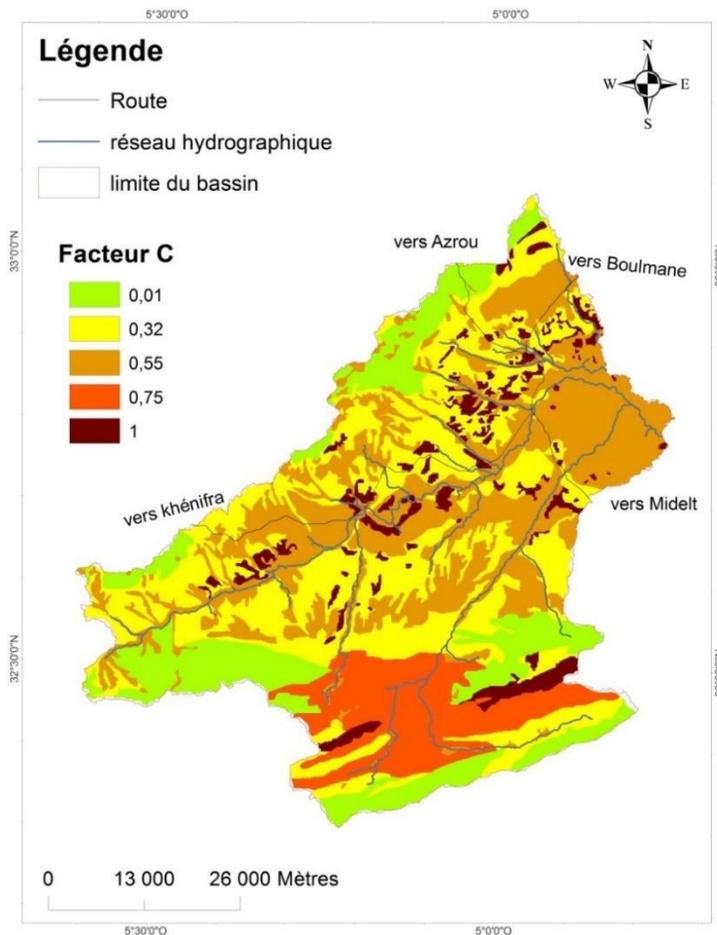


Figure 8. Carte du facteur C au niveau du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II

Tableau 9. Superficie des classes du facteur C

Classe du facteur C	Superficie (km ²)	% BV
0,01	545	16,31
0,32	1130	33,82
0,55	1093	32,71
0,75	370	6,07
1	203	11,07
Total	3341	100

La classe de protection faible (>0,55) couvre plus de 50% de la superficie du bassin. On en déduit que le bassin est caractérisé par une faible protection du sol, expliquée par la dominance des terrains de l'agriculture, de forêt dégradée et de steppe à armoise. Ces types d'occupation sont les moins efficaces en termes de protection contre l'érosion. En effet, l'exposition directe du sol, travaillée en automne ou subissant le parcours et piétinement des bétails aux impacts des gouttes de pluie et du ruissellement, contribue significativement à la diminution de l'efficacité de cette utilisation dans la réduction de l'érosion.

Cependant, on constate que seulement 16,3% de la superficie du bassin versant se caractérise par une bonne protection de sol avec un facteur C faible (0,01). Ce qui pourrait réduire considérablement l'érosion. Cette réduction peut atteindre plus de 90% pour les forêts très denses.

Evaluation des pertes en sol

Après avoir élaboré toutes les cartes thématiques correspondantes aux cinq facteurs du modèle RUSLE, on a procédé au calcul des pertes en sol à l'aide de la fonction « Raster Calculator » du logiciel ArcGis. La carte résultante donne l'information sur les pertes en sol exprimées en t/ha/an à chaque point du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II. La classification de l'érosion prend en considération le seuil de tolérance des sols. La tolérance est définie comme la perte en terre tolérée car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. L'érosion tolérée est supposée n'avoir aucune répercussion négative sur la productivité des sols. Cette tolérance varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols (Renard et al., 1996). Le seuil considéré dans le cadre de cette étude est égal à 7 t/ha/an, valeur utilisée par d'autres études d'érosion (DREF-FB, 1996 ; Sadiki et al., 2004 ; DREF-NO, 2007 ; El Garouani et al., 2007). Au-delà de 20t/ha/an, la perte est forte et les sols sont très dégradés (Sadiki et al., 2004).

La carte résultante (*Figure 9*) est subdivisée en cinq classes de perte en sol : <7t/ha/an, 7-14 t/ha/an, 14-28t/ha/an, 28 - 60t/ha/an et > 60t/ha/an comme décrites dans le *tableau 10*.

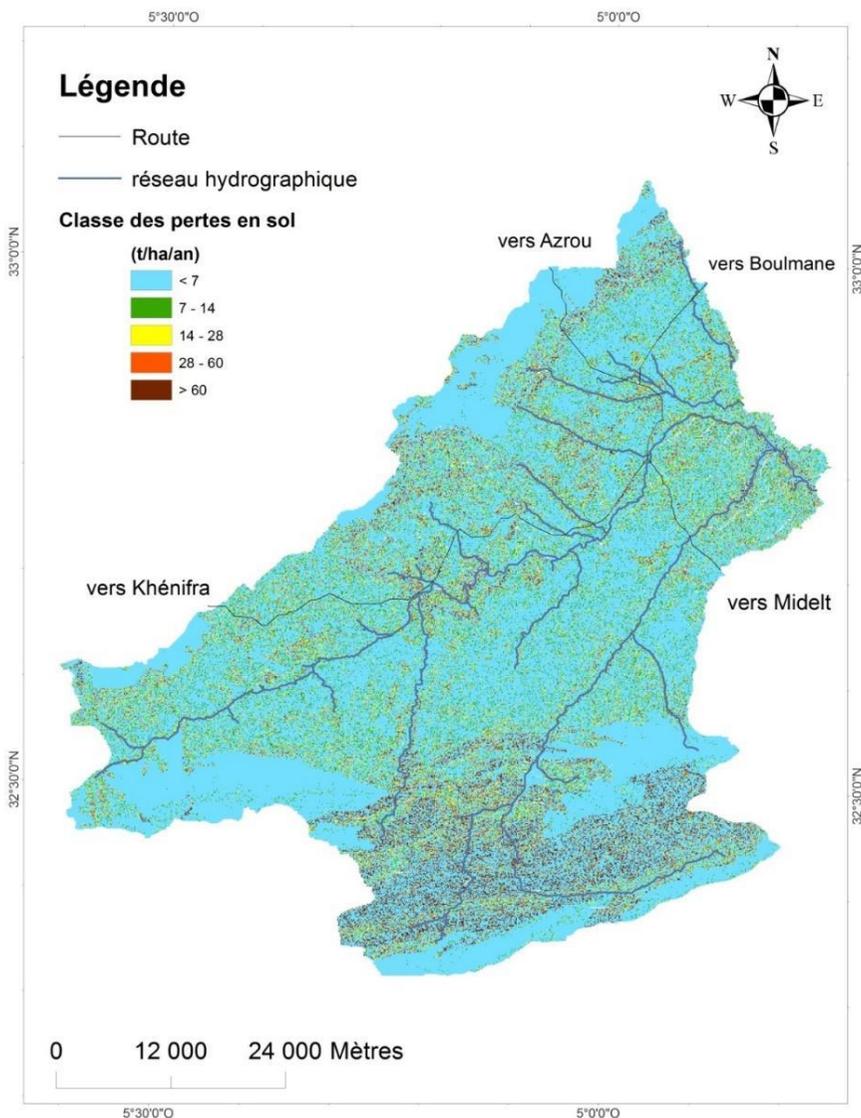


Figure 9. Carte des pertes en sol au niveau du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II

Tableau 10. Superficie des classes de perte en sol en t/ha/an

Classe de perte en sol A (t/ha/an)	Superficie (km ²)	% BV	Degrés d'érosion
< 7	2727	82,68	Faible
7 - 14	200	6,06	Moyennement faible
14 - 28	157	4,76	Moyenne
28 - 60	105	3,18	Forte
>60	109	3,30	Très forte
Total	3298	100	

A partir du *tableau 10*, on remarque que les classes de perte en sol inférieures au seuil de tolérance moyen, qui est de 7t/ha/an, représentent 82,7% de la superficie du bassin versant. Alors que l'érosion très forte dépassant 60t/ha/an attaque 3,3% de la superficie totale. L'érosion moyenne du bassin versant à l'amont du barrage Hassan II est estimée à 9,12t/ha/an.

A partir d'une analyse comparative entre les cartes des facteurs de l'équation de perte en sol, de l'hydrographie, de pente, d'occupation de sol et de perte en sol, on observe que la répartition spatiale des classes de forte érosion épouse celle des classes de forte pente avec une densité importante de réseau hydrographique. Ceci montre que l'érosion est importante dans les parties accidentées du bassin versant qui ont des pentes très élevées. Elle est accentuée par les cours d'eau.

Les zones à forte érosion correspondent généralement à des terrains de relief accidenté et d'un niveau de protection du couvert végétal faible ou nul. On peut dire, en général, que ce sont les zones les plus menacées par le risque d'érosion.

Le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II, étant une zone de transition entre le Haut Atlas et le Moyen Atlas, se caractérise par un relief très contrasté, à caractère montagneux. Par conséquent, l'érosion hydrique peut se manifester sous plusieurs formes, autres que l'érosion en nappe caractéristiques des terrains à pentes faibles. Ces types d'érosion tels que le ravinement ou la solifluxion ne sont pas pris en considération par l'équation de perte en sol de Wischmeier, et donc pourrait amplifier les résultats obtenus et expliquer ainsi l'importance de l'érosion à l'échelle de bassin versant à l'amont du barrage Hassan II, pouvant dépasser 60 tonnes par hectare annuellement.

Outre le fait qu'il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe et que les quantités de pertes estimées n'incluent pas le phénomène de la sédimentation, le modèle considère que toutes les surfaces sont soumises à l'érosion si aucun des facteurs n'est nul. Il ne met pas en évidence les dépôts aussi bien des versants que fluviaux.

Le modèle de Wischmeier néglige certaines interactions entre les facteurs afin de pouvoir distinguer plus facilement l'effet de chacun des facteurs indépendamment des autres (Wischmeier et Smith, 1978). Ce qui explique la répartition des classes de forte érosion suivant la topographie en premier lieu, sans tenir compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente.

Ces contraintes étant admises, l'intégration du modèle dans un SIG a présenté en revanche beaucoup d'avantages, surtout ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans l'érosion. Cette intégration a permis de gérer d'une façon rationnelle une multitude de données qualitatives et quantitatives relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols. Elle

a également facilité l'élaboration d'une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion des différentes zones du bassin versant.

Chaque zone du bassin versant est ainsi analysée à travers la combinaison des facteurs intervenant dans le processus érosif.

Il est à reconnaître également l'utilité pratique de ce modèle dont les résultats donnent une très bonne classification des terres selon leur sensibilité aux conditions climatique, topographique, lithologique et de végétation et selon l'importance du phénomène de l'érosion.

Cette équation constitue ainsi un outil de gestion important qui permet d'avoir une visibilité en matière de gestion de l'espace et des techniques antiérosives à mettre en œuvre dans chaque cas particulier de l'aménagement de territoire.

Enfin, la création d'un SIG propre à la zone d'étude a constitué une base de données à actualiser et à enrichir par les données pour permettre de visualiser l'évolution de l'état du bassin dans les années à venir plus particulièrement l'impact des aménagements antiérosifs dans la réduction de l'érosion.

Conclusion

Le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II se caractérise par une érosivité pluviale moyenne de 72,15, avec une valeur maximale de 99,16 atteinte vers la partie Sud-Ouest du bassin et une valeur minimale de 50,6 dans la zone Est et Nord-Est. On note que seulement 8% du bassin est soumis à de forte érosivité dépassant 90.

L'érodibilité des sols peut être qualifiée de faible à moyennement faible du fait que 86% de la superficie totale a un facteur K_a inférieur à 0,35 et 13% a un K_a supérieur à 0,35 avec une valeur moyenne de 0,27 pour l'ensemble du bassin. Ce qui montre une moyenne fragilité des sols et leur susceptibilité à l'érosion.

En ce qui concerne le facteur topographique, 94,12% de la superficie totale du bassin se caractérise par un LS inférieur à 5 alors que les fortes valeurs de LS dépassant 15 ne couvrent que 1,7% de la superficie.

Concernant le couvert végétal, on note une protection faible du sol à l'échelle du bassin du fait que la majorité du territoire est occupée par des terrains de cultures et que seulement 16% de la superficie du bassin versant se caractérise par une bonne protection de sol, sachant que plus de 50% de la superficie est caractérisée par un C dépassant 0,55.

L'étude a montré que le bassin versant est à 82,7% de superficie protégée contre l'érosion, celle-ci étant inférieure à 7 t/ha/an (le seuil de tolérance). La perte en sol moyenne du bassin est évaluée à 9,12t/ha/an. Cette valeur correspond à une érosion moyennement faible. La superficie soumise à de forte érosion de plus de 28t/ha/an, soit 6,5% de la superficie totale, est en

grande partie très accidentée à forte pente avec un réseau hydrographique dense. Donc, la topographie et le réseau hydrographique constituent les principaux facteurs explicatifs de telles valeurs, d'autant plus qu'ils sont des facteurs limitant du modèle de Wischmeier. Ces valeurs d'érosion doivent être prise avec prudence vu que le dite modèle ne calcule pas la sédimentation qui pourrait réduire énormément l'impact de l'érosion sur le sol.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le projet thématique 4 « Gestion Intégrée des Ressources en Eau » du Programme de Coopération Universitaire Institutionnel (CUI, VLIR-UOS) pour son soutien quant à la réalisation de ce travail.

Conflits d'intérêts: Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.

References:

1. ABHM (Agence du bassin hydraulique de la Moulouya), (2009). Etude du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de la Moulouya (PDAIRE), *Mission II, Développement des ressources en eau du Bassin, 185p.*
2. Ahamrouni, J. (1996). Erosion hydrique dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc Oriental) : Recherche des zones sources d'envasement de la retenue du barrage Mohamed V. *Thèse de 3cycle, Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Dakar, Sénégal, 147 p.*
3. Bizuwerk, A., Taddese, G. & Getahun, Y. (2008) Application of GIS for Modeling Soil Loss Rate in Awash Basin, Ethiopia. *International Livestock Research Institute, Addis Ababa, Ethiopia*
4. Chahboune, M., Chahlaoui, A. & Zaid, A. (2014). Contribution to comparative study of the physico-chemical quality of waters of Moulouya and Ansegmir rivers in upstream of Hassan II dam (Province of Midelt, Morocco). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES), 4(2), 278-288. ISSN: 2220-6663 (Print) 2222-3045 (Online).*
5. Chaoui, M. (2013). Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et métallique des eaux de surface (Oued Moulouya/ Barrage Hassan II) au voisinage de la mine abandonnée Zeïda (Haute Moulouya). *Université caddi ayad, Marrakech.*
6. Combe, M. & Simonot, M. (1971). La Haute Moulouya, le sillon d'Itzer-Enjil et le massif de Bou-Mia Aouli. Ressources en eau du Maroc (Tome1). Domaine du Rif et du Maroc oriental. *Notes et Mém. Serv. Géol., Maroc : 193-201.*

7. Debbarh, A. & Badraoui, M. (2001). Irrigation et environnement au Maroc : situation actuelle et perspectives. *In Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation (pp. 14-p). Cirad-IRD-Cemagref.*
8. DREF-FB. (1996). Etude d'aménagement du bassin versant de l'oued Sebou en amont du barrage Allal El Fassi.
9. DREF-NO. (2007). Etude d'aménagement de bassin versant de l'Oued Beht en amont du barrage El Kansera.
10. El Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Tribak, A. & Abahrour, M. (2007). Apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc). *Acte des JSIRAUF, Hanoi.*
11. El Hafid D. et Akdim B. (2018). Quantification De L'érosion Hydrique En Utilisant Le Modèle RUSLE et Déposition Intégrée Dans Un Sig. Cas Du Bassin Versant De L'oued Isly (Maroc Oriental). *European Scientific Journal, Vol.14, No.5, ISSN: 1857 – 7881.*
12. Mokhtari N. (2016). etude de la dynamique de la desertification dans le bassin versant de la moulouya en integrant les donnees issues de la teledetection et les donnees socio-economiques. *Thèse de Doctorat de l'Université de Liège-Gembloux agro-bio-tech, Belgique, 326p.*
13. Naimi, M., Ezzine, H., Baghdad, B. & Zante, P. (2010). Evaluation de l'érosion des sols dans le bassin versant à l'amont du barrage Hassan II, Haute Moulouya, Maroc. *PFE, Institut agronomique et vétérinaire Hassane II, Rabat.*
14. Rango, A. & Arnoldus, H.M.J. (1987). Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO.*
15. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Mccool, 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 Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 703. 404 p.*
16. Sadiki, A., Bouhlassa, S., Auajjar, J., Faleh, A. & Macaire, J.J. (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. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 2004, n°26, p 69-79.*
17. Wischmeier, WH. & Smith, DD. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *Washington: US Depart. Agric. Handbook, 282-58 p.*