

TÉLÉDÉTECTION, SIG ET MODÉLISATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED AMZAZ, RIF CENTRAL

Jamal Chaaouan¹, Ali Faleh¹, Abdelhamid Sadiki², Haytham Mesrar²

1 : L.E.G.A.C, Faculté de Lettres saïss Fès B.P. 59, Maroc - jamal.chaaouan@gmail.com - falehali2001@yahoo.fr

2 : Département de Géologie, Faculté des Sciences Dhar Mahraz, B.P. 1796 Atlas Fès., Maroc - sadiki_a@yahoo.fr

Résumé

Le bassin versant de l'oued Amzaz (Maroc, Rif central) est caractérisé par un climat semi-aride. Des pluies irrégulières, le plus souvent à caractère orageux combinées à une déforestation importante provoquent une érosion sévère. Les sols sont de plus en plus dégradés et les sédiments issus de cette érosion contribuent à l'envasement des retenues de barrages. L'intégration des cartes thématiques des différents facteurs de l'Equation de Gavrilovic (EPM) dans le Système d'Information Géographique (SIG) avec leurs bases de données a permis d'une manière rapide et efficace de démêler la complexité et l'interdépendance des facteurs dans l'analyse des risques d'érosion, de mieux cerner l'impact de chaque facteur et d'évaluer sa contribution aux pertes en sol. L'intégration dans le SIG des formules de Gavrilovic a permis de hiérarchiser les différentes zones du bassin versant en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion, de déterminer le taux d'érosion par le ruissellement en nappe ($10483 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ en moyenne) et d'établir les facteurs décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont par ordre d'importance la pente, l'érodibilité des sols et la couverture végétale.

Mots clés : Maroc, Rif, érosion, Télédétection, Landsat, SIG, Equation de Gavrilovic (EPM).

Abstract

The Amzaz watershed (Morocco, Central Rif) is characterized by a semi-arid climate. Rare and irregular rains, generally of stormy character, combined with important deforestation cause severe erosion. The soils are degraded and the sediments resulting from this erosion contribute to silt up dams. Integration of thematic maps of the Gavrilovic (EPM) Equation factors into a Geographic Information System (GIS) with their databases allowed, in a fast and efficient way, to disentangle complexity and interdependence of factors in erosion risks analysis and to better determine the impact of each factor and to evaluate its contribution to soil loss. Crosscutting of thematic maps and the application of the Gavrilovic formulas made possible to assess on a hierarchical basis the watershed area by producing a synthetic map of sensitivity degrees to erosion, to evaluate the average rate of the sheet erosion ($10483 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$) and to establish the decisive factors which controls erosion which are by order of importance, the slope, the soil erodibility and the vegetable cover.

Keywords : Morocco, Rif, erosion, remote sensing, Landsat, GIS, Gavrilovic equation (EPM).

1. Introduction

Le bassin versant de l'oued Amzaz à l'image du reste de la région rifaine connaît une érosion intense due à la conjugaison de facteurs favorables. C'est l'un des bassins versant les plus arrosés du Maroc (1800 mm/an à Kétama) mais le couvert végétal y connaît une régression alarmante. C'est aussi une zone où l'escarpement du terrain est spectaculaire et la lithologie des formations géologiques montre une prédominance des roches tendres.

En plus de ces facteurs naturels, l'intervention de l'Homme surtout dans la partie amont du bassin versant accentue sa fragilité par le défrichement et la mise en culture de terrains en pente forte. Cette érosion très accélérée a des effets néfastes sur l'écosystème qui se manifestent par :

- La diminution des ressources en eau superficielle

et l'altération de leur qualité ;

- La dégradation des sols et la perte de leur fertilité ;
- L'envasement du barrage Al Wahda en aval.

Les répercussions socio-économiques de l'érosion dans ce milieu fragile pèsent lourdement sur l'économie régionale et font obstacle aux actions de l'état dans l'aboutissement des programmes d'aménagement. Dans certains secteurs la dégradation des sols, étant au stade irréversible, a causé l'abandon des terres et a accéléré les flux migratoires vers les villes intérieures et vers l'Europe.

L'objectif principal de cette étude est de quantifier les pertes en sol et d'établir la carte du risque d'érosion où seront délimitées les zones prioritaires qui nécessitent des interventions urgentes pour freiner l'érosion et diminuer le taux d'envasement dans la retenue du barrage Al Wahda. Le second objectif est de déterminer l'ordre d'im-

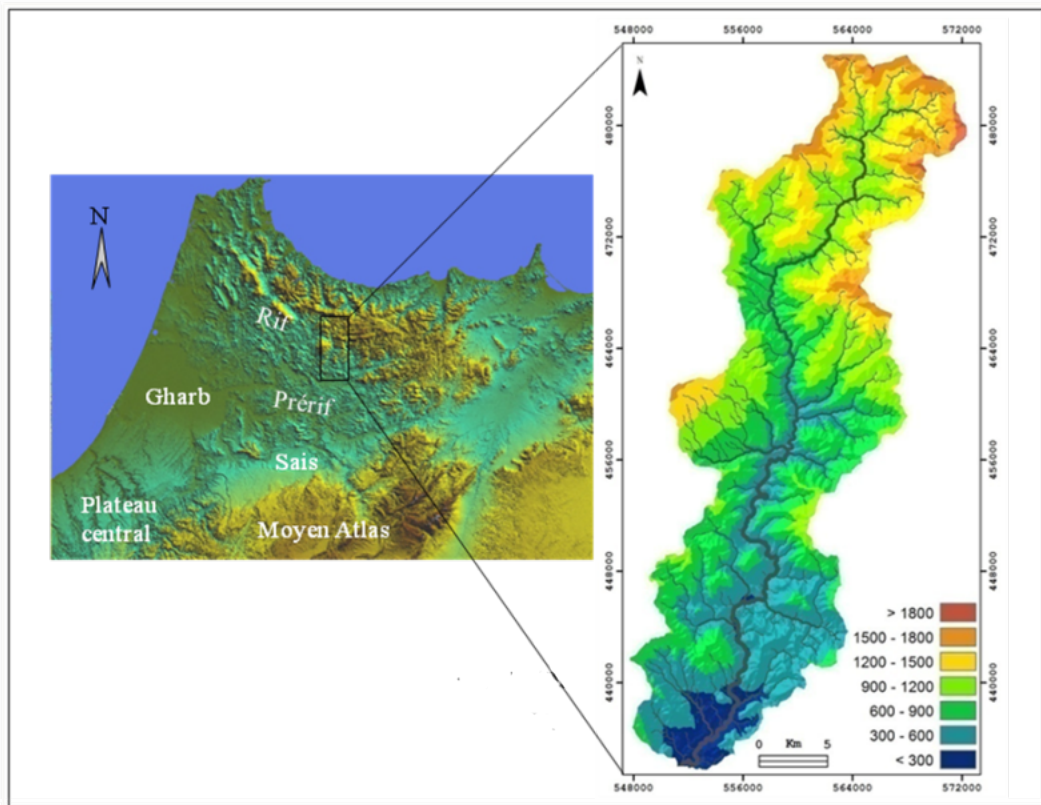


FIGURE 1 : Localisation et carte hypsométrique du bassin Amzaz.

portance des différents facteurs qui contrôlent l'érosion dans le bassin versant.

Ce document de base servira d'aide à la décision aux aménageurs dans les projets d'aménagement du bassin versant de l'oued Amzaz.

2. Situation et cadre naturel de la zone d'étude

La zone d'étude se situe entre le centre communale de Galaz au sud et la route nationale N° 6 au nord sur une superficie total de 572 km². Les altitudes varient entre 206 m en aval du bassin et 2145 m le point culminant du Jbel Dahdouh en amont. L'allure des crêtes suit fidèlement l'orientation de la chaîne rifaine qui dessine un arc dont la concavité est dirigée vers le nord. Les terrains géologiques sont nettement différenciés par la topographie : un massif montagneux, constitué essentiellement par une série gréseuse, sépare des dépressions d'âge Crétacé supérieur. Ces séries présentent les caractéristiques suivantes :

- La prédominance de séries marneuses ;
- La présence de gypse dans certains niveaux notamment le Trias et le Crétacé supérieur ;
- La disposition des roches en strates avec alternance de niveaux marneux et de niveaux gréseux ou calcaires ;

- L'altération développe une épaisse couverture argileuse le plus souvent susceptible de glisser sur les versants.

A cette structure primaire, s'ajoute une structure secondaire d'origine tectonique : l'agencement spatial des roches au niveau des versants et la prédominance des intercalations marneuses créent localement les conditions propices aux déclenchements des mouvements de masse.

Le climat de la région est de type humide à saison hivernale régulièrement pluvieuse et fraîche, et à saison estivale sèche et chaude. La moyenne annuelle des précipitations dans la station de Ktama est de 18000 mm. Les fortes chutes de précipitations en hiver et au printemps provoquent en plusieurs endroits le déclenchement de mouvements de masse sur les versants.

Le bassin versant de l'oued Amzaz est menacé par l'érosion hydrique qui aggrave la dégradation des écosystèmes et accélère les pertes en sols. L'instabilité des milieux naturels, dans cette région, est le résultat de la combinaison de trois facteurs essentiels :

- L'agressivité climatique qui se caractérise par des précipitations concentrées sous forme d'averses torrentielles sur un relief fortement accidenté ;
- La vulnérabilité des sols et des substrats dominés par des roches tendres peu perméables et par

des formations superficielles épaisses associées à une végétation naturelle quasi-nulle donnant libre court au jeu de l'agressivité érosive ;

- L'action anthropique se manifeste par une forte densité démographique, un défrichement du couvert végétal naturel, un surpâturage et une mise en culture des terres marginales.

3. Méthodologie

La méthodologie adoptée en vue d'atteindre les objectifs fixés a pour but final l'élaboration d'une carte synthétique sur les pertes en sols de l'érosion hydrique. Les méthodes couramment utilisées au Maroc pour la quantification de l'érosion hydrique sont le modèle empirique (USLE) de Wischmeier et Smith (1978), la bathymétrie des retenues de barrage, les mesures de débits solides et autres. Les données nécessaires pour l'application fidèle de l'USLE ne sont généralement pas disponibles telles que les mesures de l'intensité instantanée des précipitations. La majorité des stations météorologiques n'enregistrent que des valeurs journalières. Ce modèle est valable pour des topographies peu escarpées ne dépassant pas 20% de pente alors que notre terrain d'étude est une zone montagneuse où plusieurs versants ont des pentes qui dépassent 30%. Ce modèle n'évalue que le taux d'érosion dû au ruissellement en nappes, c'est pourquoi ce modèle n'a pas été utilisé. Les autres techniques indiquées plus haut ne permettent pas de spatialiser et hiérarchiser l'intensité de l'érosion sur l'ensemble du bassin versant.

Le modèle EPM "Erosion Potential Method" Gavrilovic a été conçu dans les années 50 par Gavrilovic pour des bassins versants d'Ex-Yougoslavie. La méthode a été développée pour la prédiction des taux d'érosion annuel des sols d'un ensemble de type d'érosion (érosion en nappes, érosion en rigoles et en ravins et sapement de berges) pour la gestion des pratiques de lutte contre l'érosion. Il se base sur la cartographie et la combinaison de six paramètres qui sont la pente, la sensibilité des sols à l'érosion, l'état érosif, la protection des sols, la température et les précipitations. Le choix de ce modèle pour la quantification de l'érosion dans le bassin versant de l'oued Amzaz été dicté par la disponibilité de toutes les données sur les paramètres du modèle et la similitude des conditions physiques du bassin versant de l'oued Amzaz avec les régions où le modèle a été développé.

L'application du modèle de Gavrilovic a nécessité la cartographie et l'intégration dans un SIG de tous les paramètres nécessaires à l'application du modèle empirique et l'utilisation des techniques d'analyse spatiale pour évaluer les pertes en sols et estimer le poids de chaque facteur et de leurs effets combinés d'une part et de démêler leur interdépendance d'autre part.

Les paramètres utilisés ont été étudiés grâce à la

télé-détection et aux données collectées sur le terrain puis intégrés dans le SIG. Ces paramètres sont :

- Les facteurs permanents de l'érosion hydrique sont la sensibilité à l'érosion, la pente et l'état érosif. Les facteurs dynamiques sont les précipitations, les températures et l'utilisation des sols.
- Les processus et formes de l'érosion réelle et leur hiérarchisation en fonction du degré du risque.

Le volume annuel moyen des sédiments érodés désigné par la lettre (W) est déterminé de la manière suivante :

$$W = T \times H \times \pi \times \sqrt{Z^3}, \quad (1)$$

où :

$$T = \sqrt{\frac{\theta}{10} + 0,1}, \quad (2)$$

et :

$$Z = Xa \times Y \times (\Phi + \sqrt{Ja}). \quad (3)$$

T est le coefficient de température ; H est la moyenne annuelle des précipitations (mm/an^{-1}) ; θ est la température ($^{\circ}\text{C}$) ; Xa est le coefficient de la couverture du sol ($0,01 \leq Xa \leq 1$) ; Y est la sensibilité des sols à l'érosion ($0,1 \leq Y \leq 1$) ; ϕ est le coefficient du type d'érosion ($0,1 \leq \phi \leq 1$) et Ja est la pente (%).

L'organigramme (Figure 2) présente la méthodologie adoptée pour préparer la carte des pertes en sols (W) à partir du module de Gavrilovic (EPM).

Ces facteurs sont calculés à partir des images satellites et des cartes géologique, pédologique, et topographique. Le facteur (Ja) de la pente est calculé à partir des courbes de niveau (on a utilisé les courbes de niveau de 10m d'équidistance pour la précision parce que les MNT existant pour la région sont d'une résolution de 30 m). Le facteur de la sensibilité des sols à l'érosion (Y) est réalisé à partir de la carte pédologique 1/50000 par la codification des types de sols selon les normes proposées par Gavrilovic. Le facteur (H) moyenne annuelle des précipitations est généralisé par la méthode de spline à partir des données des précipitations des stations de la chaîne rifaine (32 stations) entre 1972 et 2011.

Les trois facteurs dynamiques qui restent sont extraits à partir des images satellites de Landsat TM, dont le facteur (T) de la température est calculé après une correction radiométrique dans la bande d'infrarouge thermique TM6, le coefficient de la couverture du sol (Xa) est réalisé par l'ajustement de l'indice de végétation normalisé (NDVI) pour l'adapter à la norme de ce coefficient. Le facteur ϕ de l'état érosif est calculé selon Milevski et al. (2008) :

$$\phi = \sqrt{\frac{TM3}{Q_{max}}}. \quad (4)$$

On a par ailleurs :

$$Q_{max} = \frac{(\pi(L_{max} - L_{min})) + L_{min} \times d^2}{ESUN \times \cos(\text{sunelevation})}, \quad (5)$$

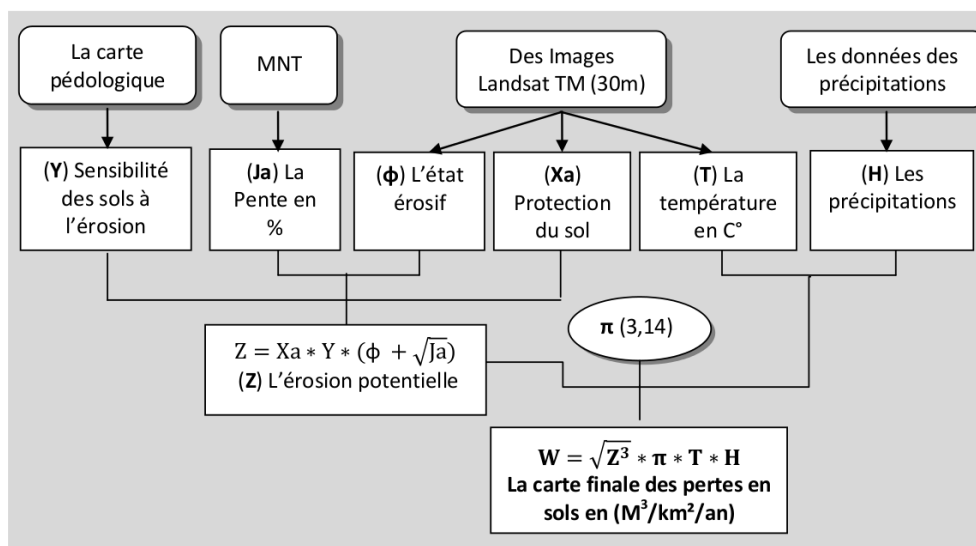


FIGURE 2 : Schéma de la méthodologie adoptée.

où L_{max} : la valeur maximale de la luminance ; L_{min} : la valeur minimale de la luminance ; d : distance du Soleil (en unité astronomique) ; $ESUN_{TM3} = 1536$ (valeur constante matérialisant une partie du rayonnement solaire absorbé par l'espace extra-atmosphérique) ; $sunelevation$: angle d'élévation du soleil.

Tous ces paramètres ont été intégrés dans le SIG sous format raster avec la même résolution (pixel de 30m de coté) ce qui a permis une superposition pixel à pixel.

4. Résultats

4.1. Répartition spatiale

La comparaison de nos résultats avec la classification de Zachar (1982), son ouvrage "soil erosion" où il classe les taux d'érosion en se rapportant à plusieurs modèles, cette moyenne est classifiée dans le niveau 5 appelé : érosion très forte (Tableau 1).

En se basant sur cette classification, Les pertes en sol mesurées par le modèle de Gavrilovic sont inégalement réparties sur le bassin versant (Figure 4). Environ 17% de la superficie du bassin versant de l'oued Amzaz est affectée par une érosion hydrique qui a atteint un stade catastrophique et 65% subi une érosion forte à très forte. Cela montre que plus de 90% de la surface du bassin versant fournit de grande quantité de sédiments qui peuvent nuire d'une manière considérable au barrage Al Wahda.

4.2. Facteurs causaux

La différence entre les taux d'érosion observés d'une zone à l'autre du bassin versant est liée à l'influence des différents facteurs physiques qui contrôlent l'érosion.

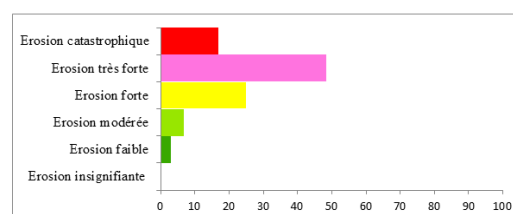


FIGURE 4 : Proportion de chaque classe de pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Amzaz.

La matrice de corrélation entre les facteurs d'érosion et les résultats des pertes en sol (Tableau 1) montre que les précipitations avec un coefficient de corrélation de 0,58 est le facteur dominant les autres facteurs causaux qui contrôlent l'érosion hydrique dans le bassin versant Amzaz. Les autres sont par ordre d'importance, la protection du sol (0,49), la pente (0,41) et l'érodibilité des sols (0,39).

La comparaison des résultats obtenus par le modèle EPM avec la carte des états érosifs actuels qui sont un des facteurs impliqués dans le modèle a permis de dégager les tendances globales de l'évolution superficielle des sols du bassin versant. Ainsi on a pu faire sortir la coïncidence de certains états très dégradés avec des formes d'érosion spectaculaires et d'autres états plus stables avec des formes d'érosion mineurs ou carrément des zones stables, cependant cette comparaison fait sortir aussi le contraire sur certaines zones ce qui montre l'insuffisance du modèle pour expliquer la répartition des taux d'érosion. Le modèle n'intègre pas le facteur anthropique car il y a une population assez importante dans le bassin versant qui peut provoquer des pressions sur les ressources naturelles notamment par le surpâturage. Une grande partie du terrain est un pâturage avec un

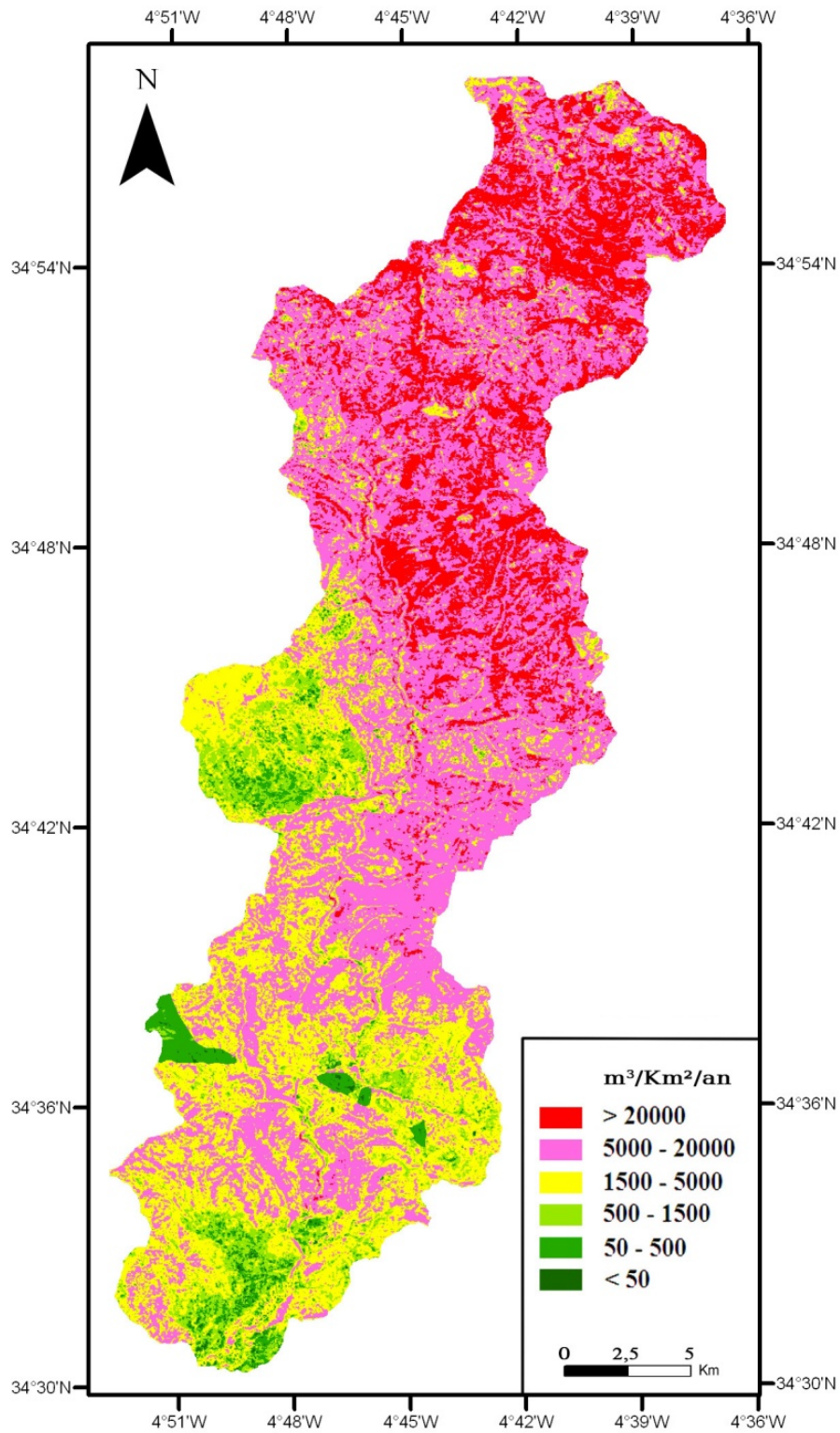


FIGURE 3 : Carte des classes de pertes en sols dans le bassin Amzaz.

Code	Classe (m ³ /km ² /an)	Type	Superficie (ha)	%
1	< 50	Erosion insignifiante	15195	0,3
2	50 – 500	Erosion faible	166637	3,0
3	500 – 1500	Erosion modérée	379447	6,7
4	1500 – 5000	Erosion forte	1407924	25,0
5	5000 – 20000	Erosion très forte	2725507	48,3
6	> 20000	Erosion catastrophique	945948	16,8

TABLE 1 : Répartition des classes de pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Amzaz.

	EPM	ϕ	H	Ja	T	Xa	Y
EPM	1	0,19	0,58	0,41	0,18	0,49	0,39
Etat Erosif (ϕ)	0,19	1	0,01	0	0,11	0,23	0,09
Précipitation (H)	0,58	0,01	1	0,21	-0,3	-0,1	0,37
Pente (Ja)	0,41	0	0,21	1	0	-0,1	0,24
Température (T)	0,18	0,11	-0,3	0	1	0,44	0
Protection du sol (Xa)	0,49	0,23	-0,1	-0,1	0,44	1	0
Lithologie (Y)	0,39	0,09	0,37	0,24	0	0	1

TABLE 2 : Matrice de corrélation entre les pertes en sol et les facteurs d'érosion.

cheptel assez important qui peut avoir des actions sur le tassement des sols, le désherbage etc.

Les pertes en sol fournies par le bassin versant de l'oued Amzaz s'élève à 5 700 000 m³ de sédiments annuellement dont une partie est piégée avant la confluence avec l'oued Ouergha et une partie importante de cette quantité contribue à l'envasement du barrage Al Wahda.

5. Conclusion

L'érosion hydrique dans le bassin versant Amzaz constitue une lourde contrainte dans le domaine de l'aménagement du territoire et du développement pour la population. L'érosion accélérée qualifiée de «risque permanent», représente un grave problème qui se manifeste par la perte de la fertilité des sols et la réduction des surfaces cultivables qui diminuent la production et la productivité ainsi que l'altération de la qualité de l'eau par l'augmentation de la turbidité des cours d'eau.

L'intégration dans un SIG du modèle de Gavrilovic a permis de hiérarchiser les différentes zones du bassin versant en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion et de déterminer le taux d'érosion (10 000 m³/Km²/an en moyenne). L'analyse des résultats de ce modèle a permis d'établir les facteurs causaux décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique et qui sont par ordre d'importance les précipitations, la densité du couvert végétal, la pente et l'érodibilité des sols.

D'après la classification des taux d'érosion de Zachar, plus de 90% de la surface du bassin versant est affectée par une érosion forte à catastrophique. Le bassin versant fournit de grande quantité de sédiments

qui peuvent nuire d'une manière considérable au barrage Al Wahda. Le bassin versant de l'Oued Ouergha, en amont du barrage El Wahda, couvre une superficie de 6140 km² alors que la surface du bassin versant d'Amzaz ne fait que 572 km², soit environ 9,4%. Selon le modèle le bassin d'Amzaz perd environ 5 700 000 m³ de matériaux or il n'y a pas de grandes plaines dans le bassin versant d'Amzaz ce qui nous permet de dire qu'une grande partie de ces matériaux atteint le barrage. Il est donc urgent de diminuer cette quantité en aménageant des lacs collinaires et en végétalisant ce bassin versant.

Références

- Al Ghamdi S., 2009. Application of Gavrilovic's model for water erosion hazards in the wadi Naman Basin through remote sensing and GIS techniques. *Egyptian Journal of environmental change* 1(8) : 8–33.
- Faleh A., 2004. Evaluation qualitative et quantitative, modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans le Prérif central et occidental. PhD thesis, University Mohamed Premier, Oujda, Morocco, 380p..
- Maurer G., 1968. Les montagnes du Rif central. PhD thesis, Rabat, Morocco, 481p.
- Merzouk A. and Dahman H., 1998. Shifting land use and its implication on sediment yields in the Rif mountains (Morocco). *Advance in Geocology* 31 : 333–340.
- Milevski I., 2008. Estimation of Soil Erosion Risk in the Upper part of Bregalnica Watershed-Republic of Macedonia, Based on Digital Elevation Model and

Satellite Imagery. In : 5th ICGIS 2008, Istanbul, Turkey.

Nicholas M.S., 1982. The Landsat tutorial workbook : Basics of satellite remote sensing. NASA publication, 554p.

Panizza M., 1996. Environmental geomorphology. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 268p.

Sabir M. 199. Impact du pâturage sur certaines propriétés physiques et hydrologiques d'un sol brun calcaire en milieu pastoral aride : Aarid, Haute Moulouya, Maroc. PhD thesis, Rabat, Morocco, IAV HII, 196p.

Sadiki A., Bouhlassa S., Auajjar J., Faleh A. and Macaire J.J., 2003. Application d'un SIG dans la cartographie et l'évaluation des risques d'érosion. Exemple : le bassin versant de l'oued Boussouab, Rif oriental. Bull. Inst. Sci. Rabat, n°26.

Sadiki A., 2005. Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Maroc nord oriental : application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope ¹³⁷Cs et de la susceptibilité magnétique. University Mohamed Premier, Oujda, Morocco, 300p.

Wischmeier W.H. and Smith D.D., 1978. Prediction rainfall erosion losses, a guide to conservation planning Science U.S. Dep Agric. Agric. Handbook n°537.

Zachar D., 1982. Soil Erosion. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 547p.