



Numéro spécial

## Application de la méthode d'analyse multicritère hiérarchique pour la quantification de perte en sol dans un sous-bassin montagnard -haute vallée de Tifnoute (Haut Atlas marocain)

### Mapping soil erosion risk using Analytic Hierarchy Process (AHP) method: A case of mountainous sub-watershed, high valley of Tifnoute (High Moroccan Atlas)

Lamyaa KACEM <sup>1\*</sup>, M'bark AGOUSSINE <sup>2</sup> Brahim IGMOULLAN <sup>3</sup>, Hicham AMAR <sup>4</sup>, Soraya MOKHTARI <sup>5</sup> & Yassine AIT BRAHIM <sup>6</sup>

**Abstract :** The high valley of Tifnoute is a mountainous area and constitutes a part of High Moroccan Atlas .This area is characterized by irregular terrain and very high altitudes (4167 m) for the Jbel Toubkal the highest mountain in Morocco. The high valley of Tifnoute is considered as a water tower, with the highest natural lake in Morocco (Lake Ifni 2320 m).The climate, geology, topography and anthropogenic factors have contributed to accelerated erosion processes, the high Tifnoute Valley is subject to intense erosion. The consequences of erosion in this study area are filling the lake by sediment transported, the deterioration of the ecosystem especially for species that live in this lake, and destruction of small houses built in the foothills. This study aims to quantify soil loss in the high Tifnoute Valley, specifically in the basin under Lake Ifni to know the amount of sediment transported to the lake. To estimate the rate of sediment in the upper valley Tifnoute we used geographic information systems (GIS), and the method of hierarchical multi-criteria analysis (AHP).The annual loss in soil is higher in areas with high slopes high altitudes as is the case around the lake Ifni. The erosion vulnerability map could be a good tool for decision support including the development of the action plan with a view to ensure protection of this mountain area for sustainable development and protection of Lake Ifni against the filling

Key words: Soil erosion, GIS, AHP, Mountainous watershed

**Résumé :** Le sous-bassin de la haute vallée de Tifnoute fait partie du domaine montagnard du Haut Atlas marocain. Cette zone se caractérise par des terrains très accidentés et des altitudes très élevées (4167 m) pour le jbel Toubkal, la plus haute montagne au Maroc. Cette zone considérée comme un château d'eau, abrite le plus haut lac naturel du Maroc (lac Ifni à 2320 m d'altitude). De part de son climat, sa géologie, son relief et les facteurs anthropiques qui ont largement contribué à l'accélération des processus érosifs, le sous-bassin de la haute vallée de Tifnoute est soumis à une érosion intense. Les conséquences de l'érosion dans ce bassin de la haute vallée de Tifnoute sont le comblement du lac d'Ifni à long terme par les sédiments transportés, la détérioration de l'écosystème surtout pour les espèces qui vivent dans ce lac et la destruction des petites maisons construites en piémont. Cette étude a pour objectif de quantifier les pertes en sol dans la haute vallée de Tifnoute, et plus précisément dans le sous bassin du lac d'Ifni pour savoir la quantité des sédiments transportés vers le lac. Pour estimer le taux des sédiments dans la haute vallée de Tifnoute, nous avons utilisé les systèmes d'information géographique (SIG) et la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP). La perte en sol annuelle est plus élevée dans les zones de haute altitude à fortes pentes comme c'est le cas autour du lac Ifni. La carte de vulnérabilité à l'érosion pourrait être un bon outil d'aide à la décision notamment par l'élaboration du plan d'action dans la perspective d'assurer une protection de ce domaine montagnard pour un développement durable et une protection du lac Ifni contre le comblement.

Mots clés : Bassin montagnard, érosion hydrique, géomorphologie, SIG, AHP

<sup>1\*, 3</sup> Laboratoire Géosciences et environnement, Département des sciences de la Terre, Faculté des sciences et techniques, Université Cadi Ayyad .Avenue Abdelkrim Khattabi, BP 594, 40000 Marrakech, Maroc.

<sup>2</sup> Ecole nationale des sciences appliquées, Département d'ingénierie industrielle. Université Ibno Zohr, BP 1136 Agadir, Maroc.

<sup>4</sup> Institut scientifique, Avenue Ibn Batouta, B.P 703, 10106 Rabat - Maroc, Rabat, Maroc.

<sup>5</sup> Département du parc national de Toubkal, Direction régionale des eaux et forêts et lutte contre la désertification /Haut Atlas. Ex-villa Jeanette, Cité boukar, bab doukkala, Marrakech, Maroc

<sup>6</sup> Laboratoire de géologie appliquée et géo-environnement, Université Ibno Zohr, BP. 8106 Cité Dakhla 80060 Agadir, Maroc.

Auteur: [lamyaa.kacem@gmail.com](mailto:lamyaa.kacem@gmail.com)

## INTRODUCTION ET OBJECTIFS

L'érosion des sols constitue un vrai problème environnemental, plusieurs régions du Maroc souffrent de ce phénomène surtout en domaine montagnard. Il en résulte que l'érosion a des impacts environnementaux négatifs qui affectent l'approvisionnement en eau, la capacité de stockage des réservoirs et la productivité agricole et écologique (WOO & MYEONG BO 1982, LAL, 1998, KEFI *et al.*, 2009, SHARMA *et al.*, 2011, SAINI *et al.*, 2015) L'érosion et les glissements de terrain posent un vrai problème dans les bassins montagnards, les sédiments transportés se déposent dans les réservoirs d'eau et les réseaux hydrographiques (VIJITH *et al.*, 2012). Souvent, l'estimation de la perte de l'érosion des sols est difficile en raison de l'interaction complexe de nombreux facteurs tels que le climat, la couverture du sol, la topographie et les activités humaines (LU *et al.*, 2004, JINGHU & YAN, 2014).

La haute vallée de Tifnoute, notre zone d'étude, fait partie du Parc national de Toubkal (PNT). Ce Parc appartient au domaine montagnard très intéressant qui abrite les plus hauts sommets de l'Afrique du Nord (Toubkal 4167 m) et il présente une riche diversité d'écosystèmes et d'importantes ressources en eau. Le lac d'Ifni est le plus haut lac naturel au Maroc. Il se situe à une altitude de 2320m et est classé « site d'intérêt biologique et écologique (SIBE) » puisqu'il est caractérisé par une abondance d'espèces endémiques. Le lac d'Ifni, de par sa position géographique et morphométrique est considéré comme un château d'eau naturel qui alimente les sources de la vallée de Tifnoute. Malheureusement un sérieux problème est le comblement du lac par les sédiments arrachés aux versants avoisinants. Or, cette région se caractérise par un relief très accidenté avec des pentes fortes, un climat froid qui accélère la fissuration des blocs rocheux par l'effet du gel et du dégel, une déforestation accentuée et un surpâturage subordonné à un couvert végétal déjà pauvre. Tous ces facteurs conduisent à une forte érosion dont les conséquences par la suite sur le bassin versant du lac Ifni est le comblement du lac par les produits d'érosion. Une quantification des sédiments transportés et la localisation des zones à risque érosif est l'objectif de ce travail. Nous avons utilisé les systèmes d'information géographique (SIG) et la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) pour calculer les facteurs de l'érosion et élaborer la carte érosive finale.

## LA ZONE D'ETUDE

Le lac d'Ifni et la haute vallée de Tifnoute se trouvent dans la commune rurale de Toubkal, Cercle de Taliwine dans la Province de Taroudant. Il est situé sur le flanc sud du jebel Toubkal au cœur du Haut Atlas entre les latitudes (30°59' et 31°5' N) et les longitudes (7°56' et 7°48' W) sous un climat semi-aride (figure 1).

La zone d'étude se caractérise par des altitudes très élevées avec un maximum de 4104 mètres et des fortes pentes (figure 2). Le réseau hydrographique est de type dendritique (figure 3) (KACEM *et al.*, 2014).

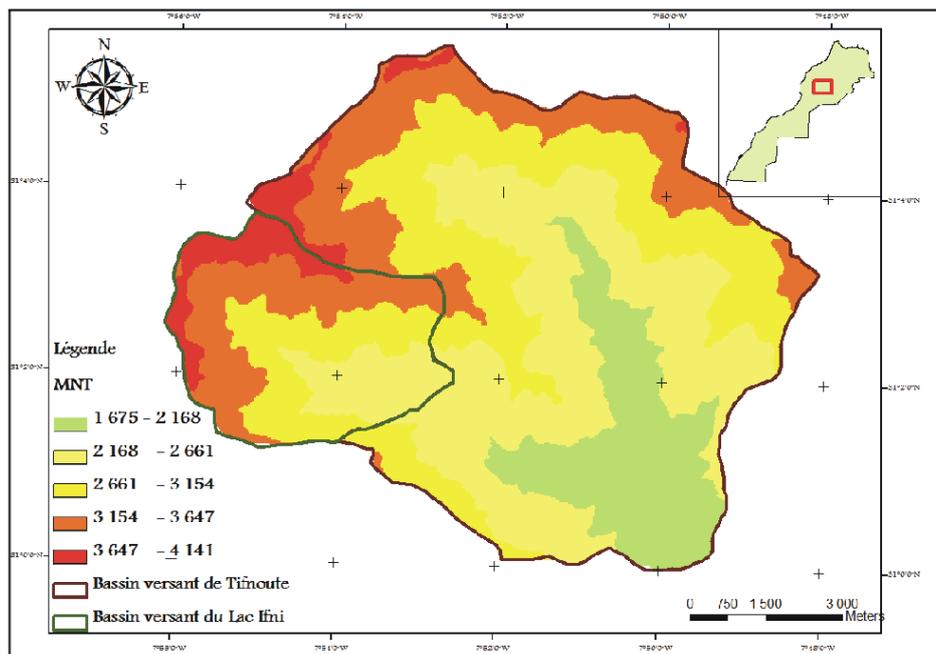
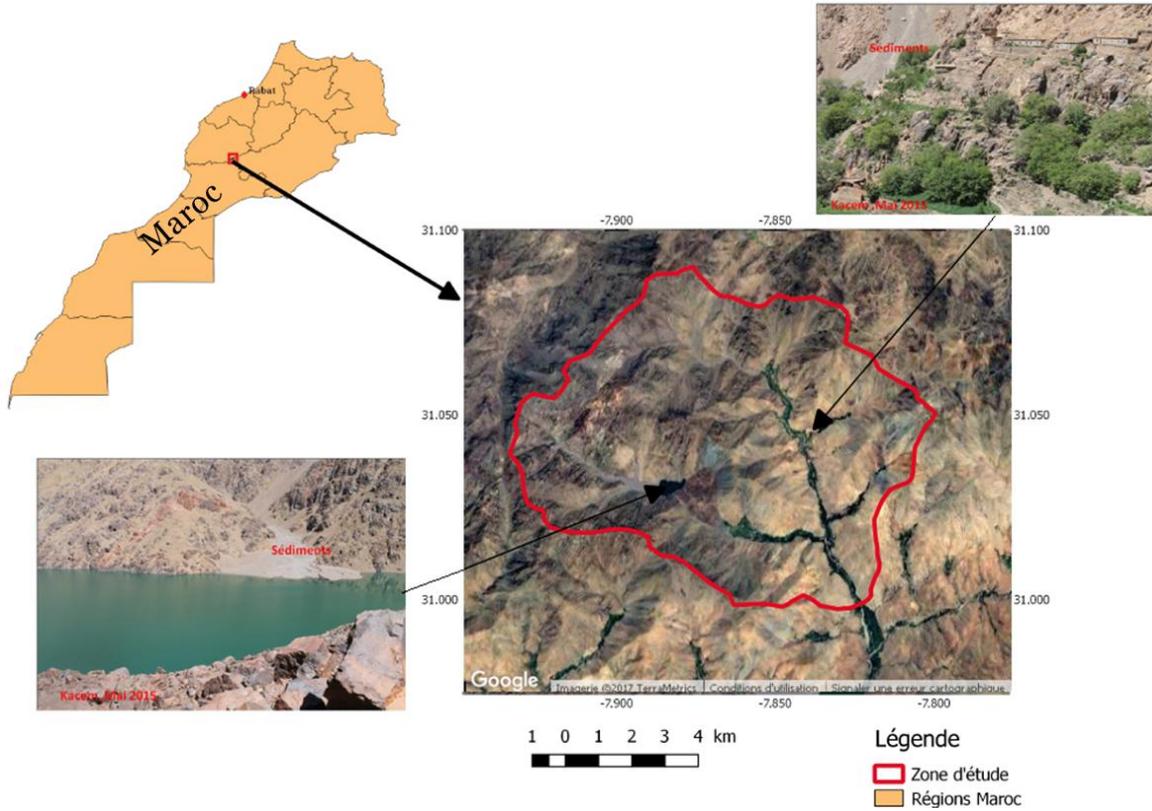
Du point de vue géologique, les roches les plus abondantes dans la haute vallée de Tifnoute sont généralement des roches volcaniques et métamorphiques : basaltes, rhyolites, andésites, diorite, granodiorite à biotite et amphibole granite à grains fins et grossiers. Parfois, on note l'existence de filons granitiques.

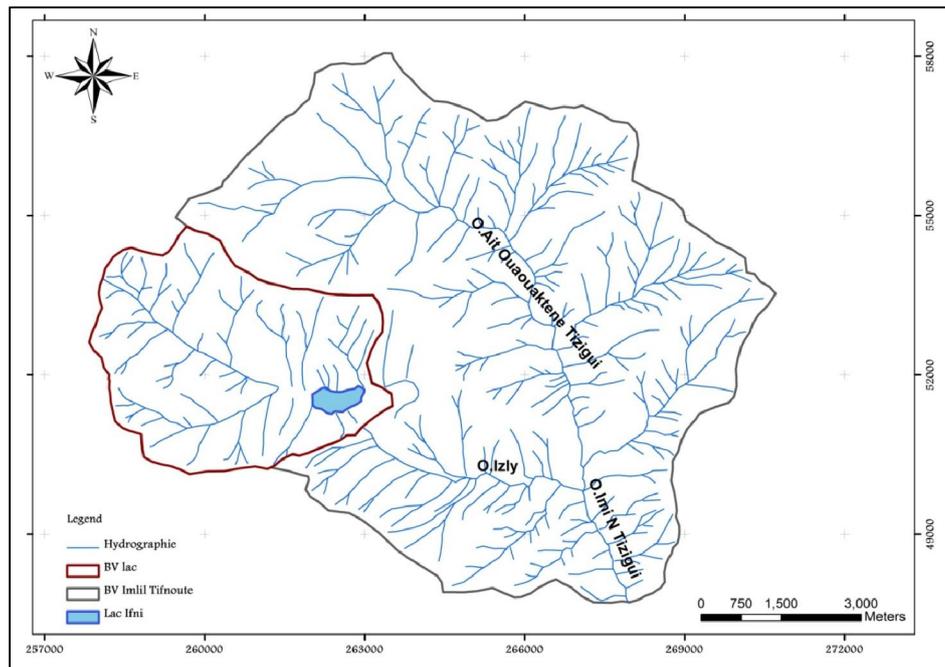
## METHODOLOGIE

Le problème de l'érosion hydrique pose des dégâts économiques et écologiques dans la haute vallée de Tifnoute (Photos 2 et 3) et du bassin du lac Ifni (Photo 1). Pour élaborer la carte des zones à risque érosif dans la haute vallée de Tifnoute nous avons pris en considération les facteurs responsables de l'érosion hydrique suivant :

## Le facteur d'érodibilité du sol (K)

La notion d'érodibilité traduit la sensibilité d'un sol à l'érosion au regard de ses propriétés intrinsèques. L'érodibilité est étroitement liée à la capacité d'infiltration du sol, à sa stabilité structurale, et au pourcentage de la matière organique présent (ROOSE, 1994).





**Figure 3.** Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude.

La granulométrie du sol joue un rôle important dans le facteur d'érodibilité : plus la fraction limoneuse augmente par rapport à l'argile et au sable plus le sol devient érodible. Ainsi, dans un sol à structure stable et teneurs élevées en matière organique, le taux de ruissellement diminue et, par conséquent, le taux de l'érosion aussi.

### ***Le facteur topographique (LS)***

Le facteur topographique LS du modèle RUSLE comporte deux éléments : inclinaison (S) et longueur (L) de pente. Ce facteur est très important et influence directement le phénomène de l'érosion car il conditionne la vitesse de ruissellement. D'après (HUDSON, 1973 et ROOSE, 1994) le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle et de façon exponentielle avec le pourcentage de l'inclinaison de la pente.

### ***Le facteur couvert végétal (C)***

Le facteur C est une mesure de l'efficacité relative des systèmes de gestion des sols et des cultures dans la prévention ou la réduction de la perte de sol (WALL *et al.*, 2002). En terme de protection des sols, la végétation est essentielle car les racines et les troncs d'arbre constituent des obstacles qui ralentissent la vitesse de ruissellement. L'augmentation du couvert végétal diminue le risque de perte en sol.

### ***Le facteur des pratiques anti-érosives (P)***

Le facteur P soutient le facteur de couvert végétal (C). Il prend en considération l'effet des aménagements de conservation du sol sur la réduction de ses pertes. (WALL *et al.*, 2002). Les pratiques anti-érosives contribuent à la diminution de la quantité des sédiments transportés par l'érosion. Il faut que les sédiments soient retenus à l'amont de la pente pour protéger les structures en aval.

La méthode AHP, est un modèle décisionnel multicritère ; elle se base sur la comparaison par paires de facteurs dans le même niveau hiérarchique (JIANG *et al.*, 2014). Elle est développée et utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération (SAATY,

1991 ; YALCIN *et al.*, 2011 ; RAMOS *et al.*, 2014). Elle est utilisée pour de nombreux problèmes requérant une prise de décision, certains ont même souligné que cette méthode avait révolutionné la façon de résoudre des problèmes complexes (SAATY & SODENKAMP, 2010, GRANDMONT, 2013). Pour la méthodologie AHP, nous avons utilisé les facteurs suivants : le facteur topographique (LS), le couvert végétal (C), l'érodibilité du sol (K) et le facteur des pratiques anti-érosives (P). Cette technique demande en premier lieu d'élaborer une matrice de comparaison binaire pour chaque facteur en précisant une échelle allant de 1/9 jusqu'à 9 selon l'importance du paramètre (tableau 1). Les poids attribués aux facteurs sont des jugements issus suite à une bonne connaissance du terrain et la maîtrise de l'importance des facteurs dans le processus de l'érosion. Il est nécessaire de calculer un ratio de cohérence (RC) pour indiquer la fiabilité des jugements de la matrice calculée (SAATY, 1977). Pour montrer que la matrice est cohérente, il faut que la valeur de (RC) soit inférieure à 0.1 (10 %).

Facteurs	K	LS	C	P
K	1	1/3	3	5
LS	3	1	2	3
C	1/3	1/2	1	2
P	1/5	1/3	1/2	1

**Tableau 1.**Matrice de comparaison élaborée par la méthode AHP.

Le ratio de cohérence (RC) se calcule par l'équation suivante

$$RC = IC/RI$$

Avec (RC) ratio de cohérence, (RI) indice aléatoire élaboré par SAATY 1977 (tableau 2) et (IC) l'index de cohérence calculé par l'équation ci-dessous

$$IC = \lambda \max - n/n-1$$

$\lambda \max$  : valeur propre maximale de chaque facteur dans le tableau de la matrice et n la taille de la matrice

n	1	2	3	4	5	6	7	8
R.I	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

**Tableau 2.** Indice aléatoire de cohérence (RI) pour n=1,2,.....8 (SAATY, 1977)



**Photo 1.** Transport de sédiments dans le bassin du lac Ifni ; les sédiments transportés constituent des cônes de déjection autour du lac Ifni.



**Photo 2.** Transport de sédiments dans le bassin de la haute vallée de Tifnoute.



**Photo 3.** Le transport des sédiments cause des dégâts pour les douars situés sur les versants

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

A partir de la matrice réalisée deux à deux pour les facteurs K, LS, C et P, nous avons calculé le poids normalisé pour chaque facteur ; le ratio de cohérence a aussi été calculé selon l'équation de SAATY (1977), dont la valeur obtenue est 0.065. (Tableau .3)

Facteurs	K	LS	C	P
K	1	1/3	3	5
LS	3	1	2	3
C	1/3	1/2	1	2
P	1/5	1/3	1/2	1
Poids normalisé	0.323	0.426	0.16	0.091
RC: 0.065				

**Tableau 3.** Calcul de pondération de tous les critères utilisés

Selon les jugements apportés au niveau de la matrice de comparaison, on relève les informations suivantes :

Le facteur topographique LS qui contribue le plus dans la perte des sols avec un pourcentage de 42,6% suite aux jugements assignés. Le facteur LS est suivi par le paramètre d'érodibilité des sols K avec 32,3%, le facteur du couvert végétal avec 16% et le facteur anti-érosif avec 9,1% (tableau 3). La carte des pertes des sols a été réalisée par l'ArcGis 10 selon l'équation suivante :

$$A = k*0.323 +LS *0.426+C*0.160+P*0.091$$

Le tableau 4 et la figure 4 montrent le pourcentage de perte en sol par la méthode AHP. La perte en sol estimée est séparée en 5 classes selon l'intensité de l'érosion. La première classe 0 -0.3 pour de très faibles pertes en sols, la classe 0.3-0.4 avec une perte faible des sols, la classe 0.4-0.5 présente une perte moyenne des sols, la classe 0.5-0.7 pour une perte forte et finalement 0.7-2.08 pour

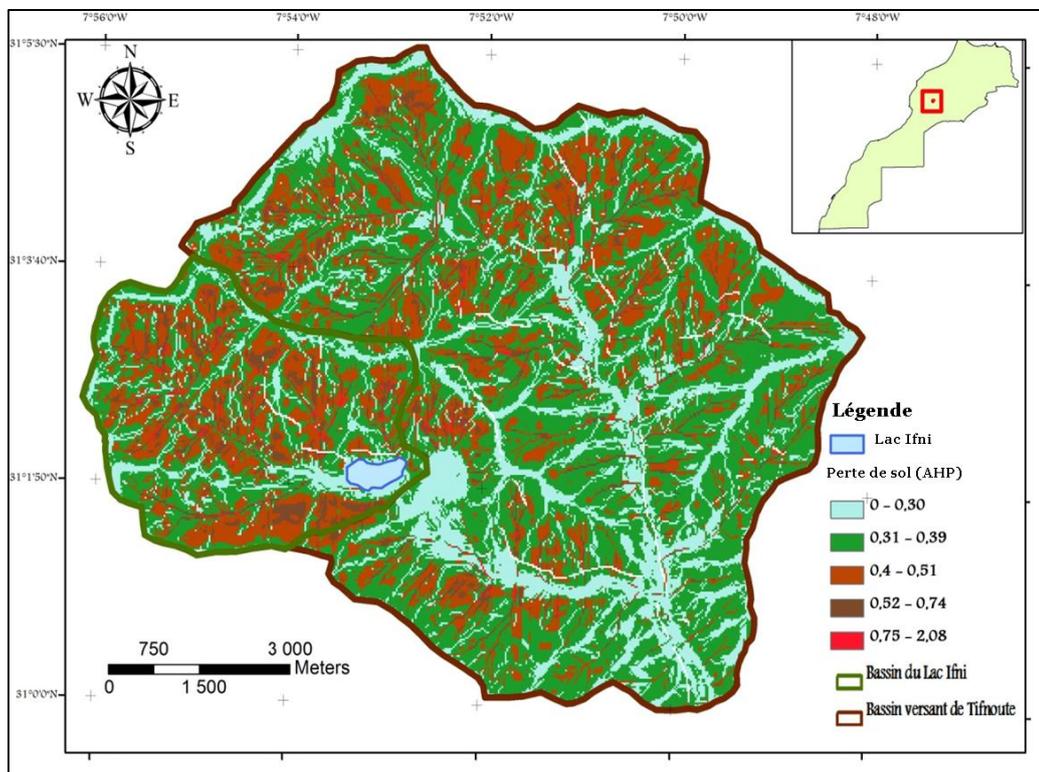
une très forte perte en sol. Les valeurs les plus élevées en érosion sont observées dans le sous-bassin du lac Ifni et au nord de la haute vallée de Tifnoute.

Les surfaces correspondantes aux classes de perte de sol très faible et faible sont trop élevées au niveau de la haute vallée de Tifnoute (21% pour la classe très faible et 52% pour la classe faible). Par contre, les surfaces de perte de sol au niveau du bassin du lac Ifni sont supérieures à celles de la vallée de Tifnoute (33% et 10 % pour les classes moyenne et forte respectivement). La classe de perte de sol très forte est similaire pour les deux zones du bassin du lac Ifni et la vallée de Tifnoute. D'après cette analyse, le bassin du lac Ifni est connu pour des pertes de sol importantes au niveau des alentours du lac Ifni (tableau 4 et figure 4).

Classe	Intensité	Surface du bassin en %	
		Bassin du lac Ifni	Haute vallée de Tifnoute
0-0.3	très faible	17%	21%
0.3 - 0.4	faible	39%	52%
0.4 - 0.5	moyenne	33%	22%
0.5 - 0.7	forte	10%	5%
0.7 -2.08	très forte	1%	1%

**Tableau 4.** Perte en sol dans la haute vallée de Tifnoute par la méthode AHP

Cette perte en sol reste élevée avec des valeurs importantes observées dans les hautes altitudes et est liée essentiellement aux facteurs topographiques LS et au facteur C (figure 4). Le facteur K a une grande importance dans le processus de l'érosion suite au poids ressorti par la matrice de comparaison et son rôle dans la stabilité des terrains et l'infiltration des sols. L'absence du couvert végétal, la nature lithologique et la topographie élevée favorisent la production des sédiments.



**Figure 4.** Carte de perte en sol dans la haute vallée de Tifnoute par la méthode AHP.

## CONCLUSION

La méthode d'analyse hiérarchique multicritère nous a permis de déterminer les zones à forte érosion dans le bassin de la haute vallée de Tifnoute. A partir de la carte de répartition des aléas érosifs, nous avons identifié les zones les plus érosives en amont des deux sous-bassins de la haute vallée de Tifnoute, notamment dans les zones avec des terrains totalement nus et avec des pentes très élevées. Aussi autour du lac Ifni, le transport actif de ces sédiments vers le lac induit un comblement de ce dernier. En outre, aux berges des oueds on remarque un taux d'érosion faible, et cela à cause de la présence d'une couverture végétale et de faibles pentes. Cette carte a confirmé les observations sur le terrain qui montrent que les deux sous- bassins sont soumis à une érosion élevée.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GRANDMONT K, 2013. Utilisation de systèmes d'information géographique pour l'évaluation des risques liés à la dégradation du pergélisol. Étude de cas : Tasiujaq, Nunavik, Québec. Mémoire présenté à la Faculté des arts et des sciences en vue de l'obtention du grade de maîtrise en géographie ; 103 p.
- HUDSON N.W, 1973. .Soil conservation, Batsford ,London ; 320 p.
- JIANG C, YILONG Z, ZONGYU C & ZHENLONG N., 2014. Improving assessment of groundwater sustainability with analytic hierarchy process and information entropy method: a case study of the Hohhot Plain, China. *Environ Earth Sci*. DOI 10.1007/s12665-014-3583-0
- JINGHU P & YAN W., 2014. Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China. *Nat Hazards* 71:2187–2205.
- KACEM L, IGMOUILLAN B, MOKHTARI S, AMAR H & AGOUSSINE M., 2014. Morphometric characterization of upstream mountainous watershed using geographic information system GIS: high valley of Tifnoute High Moroccan Atlas. *Journal of biodiversity and environmental sciences*, 5:62-66.
- KEFI M, YOSHINO K, ZAYANI K & ISODA H (2009) Estimation of Soil Loss by Using Combination of Erosion Model and GIS-Case of Study Watersheds in Tunisia. *Journal of arid land studies* 19:287 -290.
- LAL R, 1998. Soil Erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical review plant science* 1:319-464.
- LU D, LI G, VALLADARES GS & BATISTELLA M., 2004. Mapping soil erosion risk in Rondonia ,Brazilian Amazonia :Using RUSLE ,Remote sensing and GIS .*Journal of Land degradation and development* 15:499-512
- RAMOS A, CUNHA L & CUNHA P.P., 2014. Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz–Nazaré . *Geo-Eco-Trop.*, 38, 1 : 33-44
- ROOSE, E., 1994. Introduction à la GCES .*Bulletin pédologique FAO*, Rome ; 70 ;420 p.
- SAATY T.L, 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15:234-281
- SAATY T. L, 1991. Método de Análise Hierárquica . São Paulo, McGraw-Hill, Makron. 367p.
- SAATY T.L. & SODENKAMP M, 2010. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Measurement Processes : The measurement of intangibles. Dans C. Zopounidis et P.M. Pardalos (dir.) Handbook of Multicriteria Analysis, Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag. : 91-166
- 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 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.
- SAINI S.S, JANGRA R, & KAUSHIK S.P., 2015. Vulnerability assessment of soil erosion using geospatial techniques-a pilot study of upper catchment of Markanda river . *International Journal of Advancement in Remote Sensing, GIS and Geography*.3: 9-21.
- SHARMA A, KAMLESH N, TIWARI PB & BHADORIA S., 2011. Effect of land use land cover change on soil erosion potential in an agricultural watershed .*Environ Monit Assess* 173:789-801.
- SOUTTER M, MERMOUD A & MUSY A, 2007. Ingénierie des eaux et du sol : processus et aménagement. Presses polytechniques et universitaires romandes. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ; 294 p.
- VIJITH H, SUMA M, REKHA VB, SHIJU C & REJITH PG., 2012. An assessment of soil erosion probability and erosion rate in a tropical mountainous watershed using remote sensing and GIS. *Arab J Geosci* .5: 797–805.
- WALL G.J, COOTE D.R, PRINGLE E.A & SHELTON I.J, 2002. RUSLE-CAN Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de la contribution AAC2244F, 117 p.

WOO & MYEONG BO (1982) Soil erosion control in South Korea. *Journal of Soil and Water Conservation* 37: 149-150

YALCIN A, REIS S, AYDINOGLU A.C & YOMRALIOGLU T., 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* 85: 274-287