

MISE EN PLACE D'UN MODÈLE QUALITATIF POUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE DANS LA CHAÎNE ATLASIQUE: CAS DU BASSIN VERSANT DE LA TESSAOUTE AMONT. (HAUT ATLAS CENTRAL, MAROC)

Abdenbi Elaloui
Chakib Marrakchi
Ahmed Fekri
Soufiane Maimouni

Laboratoire de Géologie Appliquée, Géomatique et Environnement,
Département de géologie, Faculté des Sciences Ben M'sik Casablanca,
Université Hassan II de Casablanca, Maroc.

Mohamed Aradi

Groupe de recherche sur les villes et la régionalisation au Maroc,
Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines-Béni
Mellal, Université Sultan Moulay Slimane, Maroc.

Abstract

The catchment areas of the Atlas chain are threatened by water erosion phenomena that can degrade soil quality and cause siltation of potential dams. The objective of this current study is to develop a methodology using remote sensing and geographic information systems (GIS). This serves to map areas at risk of water erosion in the watershed upstream Tessaoute (High Atlas of Morocco). In addition to produce potential erosion risk map that can be used as a tool for land planning. To conduct this study, we've chosen to apply on our watershed qualitative model, based on the model proposed by the Bissonnais (2002) and amended by Abaoui et al (2005), as it is applied in the region High Atlas by Bachaoui et al (2007) and Maimouni et al (2012). Through this model the sensitivity of land to erosion is assessed from the sum of the features attributed to classes of three parameters: the land, the friability of materials and the degree of slope. The methodology presented is to integrate in a GIS environment, the three main factors controlling the erosion which enables the establishment of a qualitative model for mapping soil sensitivity to water erosion. The

potential erosion risk map derived therefrom shows four areas of vulnerability to water erosion: low, medium, high and very high.

Keywords: Water erosion, Remote sensing, GIS, qualitative model, High Atlas of Morocco

Résumé

Les bassins versants de la chaîne atlasique sont menacés par les phénomènes d'érosion hydrique susceptibles de dégrader la qualité des sols et provoquer l'envasement d'éventuels barrages. L'objectif de la présente étude est de développer une méthodologie utilisant la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) pour cartographier les zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Tessaoute amont (Haut Atlas du Maroc) et de produire une carte de risque potentiel d'érosion qui peut être utilisée en tant qu'outil de décision auprès des institutions chargées de l'aménagement du territoire. Dans le cadre de cette étude, on a choisi d'appliquer, sur le bassin versant étudié un modèle qualitatif, basé sur le modèle proposée par Le Bissonnais (2002) et modifié par Abaoui et al (2005), comme il est appliqué dans la région du Haut Atlas par Bachaoui et al (2007) et Maimouni et al (2012). A travers ce modèle, la sensibilité des terres à l'érosion est évaluée à partir de la somme des indices attribués aux classes de trois paramètres: l'occupation des sols, la friabilité des matériaux et le degré de la pente. La méthodologie présentée consiste à intégrer, dans un environnement SIG, ces trois principaux facteurs contrôlant l'érosion ce qui permet la mise en place d'un modèle qualitatif pour la cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique. La carte de risque potentiel d'érosion qui en est dérivée montre quatre zones de vulnérabilité à l'érosion hydrique : faible, moyen, fort et très fort.

Mots clés: Érosion hydrique, Télédétection, SIG, modèle qualitatif, Haut Atlas du Maroc

Introduction

Au Maroc, l'érosion hydrique provoque annuellement des pertes de sols allant de 500 tonnes/km² à plus de 5 000 tonnes/km² selon les régions et un envasement des retenues des barrages de l'ordre de 75 millions de m³, soit une réduction annuelle de 0,5 % de leur capacité de stockage, ce qui provoque une importante perte concernant les eaux permettant l'irrigation de 10000 ha/an et la détérioration de la qualité de l'eau potable mobilisée (Haut-commissariat des eaux et des forêts du Maroc, 2008).

L'érosion dans le Haut Atlas est favorisée par la présence de sols nus, de terrains tendres et de pentes exposées aux précipitations de forte intensité

(Heusch, 1971). Le Haut Atlas central, est l'une des régions du Maroc les plus exposées à l'érosion. En effet, le choix du bassin versant de la Tessaoute amont a été dicté par sa richesse en formations lithologiques friables, un relief accentué et un couvert végétal dégradé. Ces derniers, associés aux conditions climatiques semi-arides, rendent la région vulnérable à l'érosion hydrique. D'où une importante contribution à l'envasement du barrage Moulay Youssef sur l'oued Tessaoute.

Pour identifier lequel ou lesquels des facteurs responsables en grande partie de l'érosion et localiser les sources éventuelles des sédiments à l'échelle du bassin versant, une étude qualitative et automatisée de l'érosion s'avère nécessaire. Cette étude a été basée essentiellement sur la caractérisation qualitative des niveaux d'érosion. En effet, les principaux facteurs qui gouvernent l'érosion ont été pris en considération ; l'occupation des sols, la friabilité des matériaux et le degré de pente.

La carte de risque déduite a été ensuite confrontée à la réalité de terrain pour validation. Celle-ci pourrait constituer un outil de décision auprès des institutions chargées de l'aménagement du territoire.

Situation géographique et contexte géologique

Le bassin versant de la Tessaoute en amont du barrage Moulay Youssef, fait partie du grand bassin versant d'Oum Er-Rbia qui renferme le bassin de l'Oued Oum ER-Rbia et le bassin Côtier Atlantique d'El Jadida-Safi. Il est délimité par (Fig. 1) :

- Les bassins de Bou Regreg et des côtiers Atlantiques de Rabat à El Jadida au Nord.
- L'océan Atlantique à l'Ouest.
- Les bassins de Tensift et de Draa au Sud.
- Les bassins du Ghris et Moulouya à l'Est.

Le grand bassin versant d'Oum Er-Rbia s'étend sur une superficie de 48070 km² dont le bassin de l'Oum Er-Rbia (35.000 km²) et les bassins Côtiers Atlantiques situés entre El Jadida et Safi (13.070 km²), soit près de 7 % de superficie totale du pays, et avec un allongement de 550 km, c'est l'un des plus grands bassins du Royaume et qui renferme l'Oum Er-Rbia qui est le plus long fleuve permanent du Maroc (près de 600 km), Il prend origine au Moyen Atlas à 1800 m d'altitude, traverse la chaîne du Moyen Atlas, la plaine du Tadla et la Meseta côtière et se jette dans l'océan Atlantique à Azemmour, à environ 16 km de la ville d'El Jadida.

Le périmètre objet de notre présente étude est l'unité hydrologique du bassin versant de la Tessaoute en amont du barrage Moulay Youssef, qui fait partie de la zone subatlasique septentrionale dite Atlas de Demnate et s'étend sur une zone délimitée au Nord par les Jbilet, au Sud par le piedmont du Haut-Atlas, à l'Est par l'Oued Lakhdar et à l'Ouest par la limite du bassin de

l'Oued Tensift. Il constitue l'impluvium du barrage Moulay Youssef ou bien la retenue d'Ait Adel et le barrage Timin'Outline (barrage de compensation), l'Oued Tessaoute est considéré comme le plus important et principal affluent de l'Oued Oum Er-Rbia.

Cette entité géographique est situé à 35Km de la ville de Demnate et environs à 90 km de la ville de Marrakech, s'étend sur une superficie de 1418,35 km² (141835,04 Hectares) et un périmètre de 246 km, L'altitude varie de 809 m à 3898 m et se situe entre les latitudes Nord 31°33'56" et 31°64'47" et les longitudes Ouest 6°48'40" et 7°33'40". IL empiète administrativement sur trois provinces: Azilal, Marrakech et Ouarzazate.

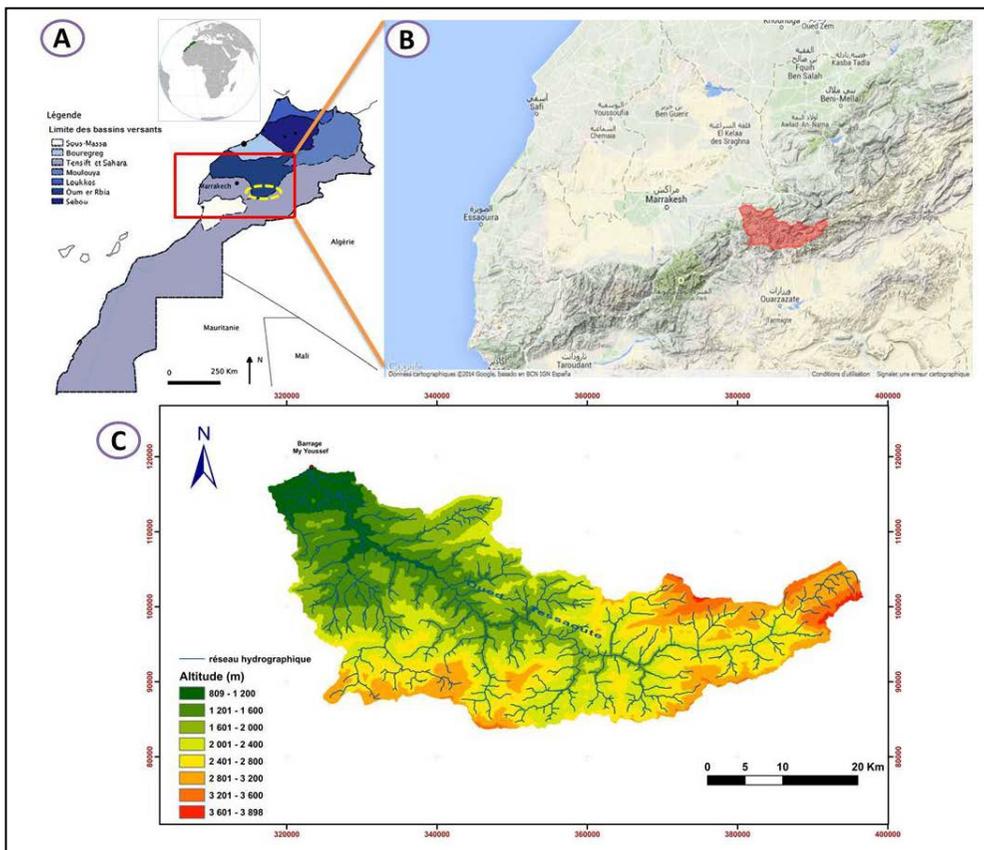


Fig. 1 : Localisation de la zone d'étude (A : Localisation du bassin versant d'Oum Er-Rbia, B : Situation géographique du bassin versant de la Tessaoute amont, C : Carte hypsométrique du bassin versant de la Tessaoute amont).

Géologiquement le bassin versant est situé entre le Haut Atlas occidental, constitué de roches sédimentaires, éruptives et métamorphiques antérieures au Permien (précambrien et primaire), et le massif Jurassique à l'Est d'Azilal. Les séries géologiques les plus représentées dans le bassin

versant sont le Permo-Trias et le Lias. Alors que les séries postérieures autres que le quaternaire n'occupent que quelques synclinaux.

Du point de vue structure, le bassin versant est formé de synclinaux liasiques d'altitudes élevées : Les synclinaux de la région des sources, de la moyenne vallée, d'Azrif-Iskt, d'Ouadaker-Tihlatine et enfin la boutonnière d'Ait Tamlil.

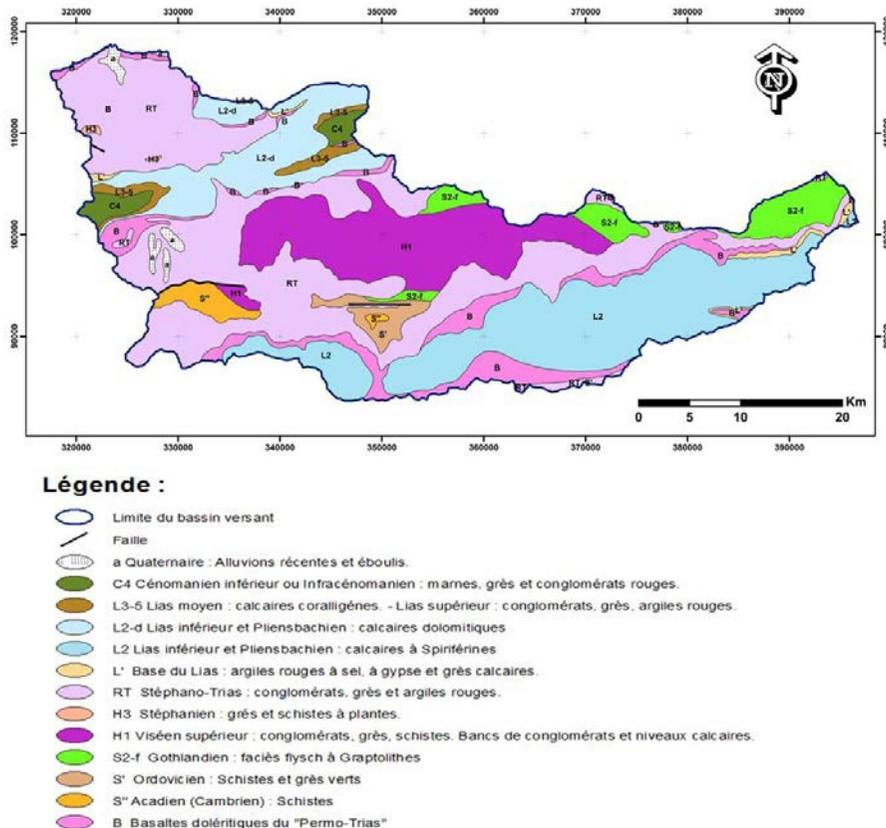


Fig. 2 : Carte géologique du bassin versant de la Tessaoute amont, d'après la carte géologique de Demnate et Telouete au 1/200000 (Henri TERMIER.1941).

Méthodes et matériels

Dans l'objectif de mettre en place d'un modèle qualitatif pour la cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Tessaoute amont, nous avons opté pour une méthode qualitative repose sur l'exploitation des données topographiques, géologiques ainsi que sur des observations effectuées sur le terrain. Puis le traitement des images satellitaires Landsat et le modèle numérique de terrain SRTM dont la résolution est de l'ordre de 30m, ainsi que la saisie, la cartographie et le croisement des divers paramètres dans un environnement

SIG (ArcGIS) dans le but de cartographier les zones exposées à l'érosion hydrique.

Les données multisources utilisées dans cette étude comprennent :

- La carte géologique au 1/200.000 (Henri TERMIER et al. 1941). Les lithofaçons ont été ensuite classées selon leurs degrés de friabilité.
- La carte de répartition des formes végétales est extraite de l'image satellite Landsat 8 en se basant sur L'indice de végétation par différence normalisée "NDVI".
- Le modèle numérique de terrain SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) dont la résolution est de l'ordre de 30m nous a servi de produire une carte d'altitude (hypsométrie) et une carte des classes de pente.
- Des données auxiliaires comprennent les cartes topographiques, ainsi que les observations et les mesures de terrain (prélèvement des coordonnées GPS des points de contrôles pour la validation, prise des photos...).

Dans le but de la réalisation d'une évaluation qualitative du risque potentiel d'érosion des sols du bassin versant de la Tessaoute amont, nous avons opté pour une méthode qualitative et simplifiée reposant sur la décomposition des inventaires topographiques, des inventaires géologiques et d'occupations des sols qu'on a, par la suite, intégré dans un système d'information géographique (fig.3).

Afin de produire la carte du potentiel érosif, on a utilisé l'outil superposition pondérée dans l'environnement ArcGIS. Cet outil fait intervenir l'une des approches les plus employées pour résoudre des problèmes de multicritères, donc le calcul des classes du potentiel érosif est obtenu à partir de la somme des indices attribués aux classes de différents paramètres. Chaque indice est multiplié par le pourcentage de contribution de la couche thématique correspondante (paramètres), attribué à partir d'un test de plusieurs scénarios d'analyse multicritères, des données de littérature et connaissances sur les conditions du milieu. On a adopté pour la carte de risque potentiel d'érosion générée un scénario qui présente mieux la réalité de terrain avec les pourcentages de contributions $A = 20/100$, $B = 50/100$ et $C = 30/100$ correspondent respectivement à la densité du couvert végétal, la friabilité du substratum et le degré de la pente, Comme suivant :

$$Pe = (I_V \times A) + (I_F \times B) + (I_P \times C)$$

Avec : Pe : Potentiel érosif.

I_V : Indice de densité du couvert végétal

I_F : Indice de friabilité

I_P : Indice de degré de pentes

A , B et C : Pourcentage de contribution.

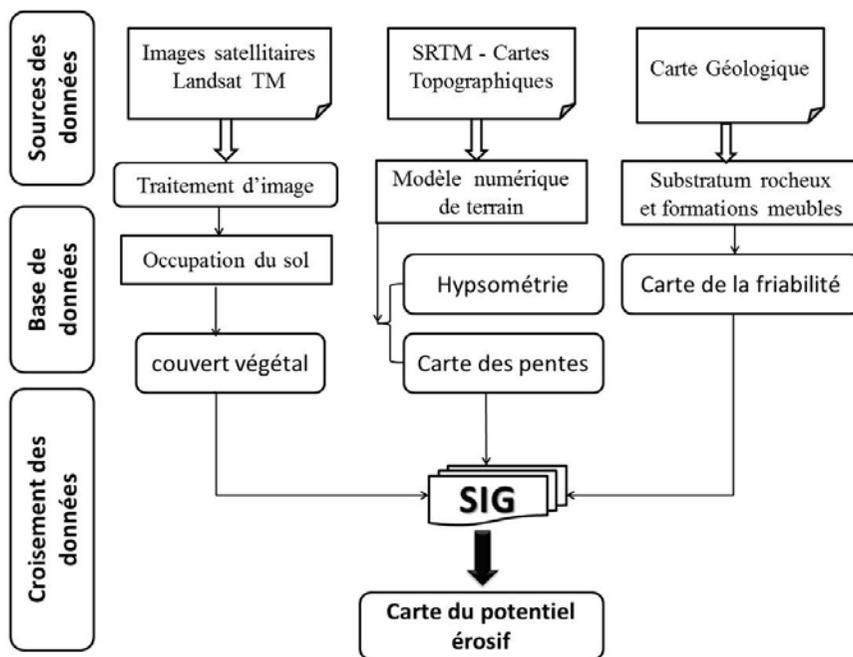


Fig. 3 : Organigramme méthodologique suivie dans cette étude.

Le traitement d'image a été effectué à l'aide du logiciel ERDAS IMAGINE, qui est dédié à l'extraction et au traitement d'information géographique des différents thèmes. En plus de l'utilisation du logiciel ArcGIS pour la standardisation, la classification, l'attribution des poids de pondération, le calcul des superficies des différentes unités et la superposition et le croisement des informations.

Les résultats seront illustrés par des cartes thématiques qui permettent l'établissement des priorités de l'action dans le bassin versant : Carte de la friabilité des matériaux, carte des pentes, carte du couvert végétal et la carte de risque potentiel d'érosion.

Résultats

Evaluation de la friabilité

Plusieurs études ont montré qu'il existe une corrélation étroite entre la lithologie, les formes d'érosion et l'intensité des transports solides (Heusch, 1982 ; Demmak, 1984). Dans le même sens, une analyse hydrologique et géomorphologique (Demark, 1984) conclut que les transports solides spécifiques à l'échelle des bassins versants sont étroitement liés à la lithologie. Cela justifie l'emploi de la carte de friabilité comme facteur déterminant dans le phénomène de l'érosion.

Afin de déterminer la friabilité des matériaux affleurant, une étude lithologique a été réalisée grâce à l'exploitation des cartes géologiques au 1/100.000, 1/200.000, 1/500.000 et des visites de terrain. Cette étude met en évidence la dominance des faciès des séries suivantes qui seront départagées en quatre classes suivant la dureté des roches, et leur contribution à l'envasement du barrage Moulay Youssef par les éléments qu'elles libèrent après altération (tableau 1): résistants, moyennement résistants, vulnérables et très vulnérables (Fig. 4). À chaque classe est assigné un indice variant entre 1 et 4 ; 1 étant affecté aux matériaux moins exposés à l'érosion et 4 aux matériaux les plus exposés à l'érosion.

Faciès	Friabilité des matériaux	Indice attribué	Superficie en %
Les calcaires dolomitiques du Lias inférieur. Les formations du Dévonien, Silurien et Ordovicien (grès intercalé de quartzite gris). Les Flyschs gréso-calcaires.	Matériaux résistants	1	36,42
Les basaltes doléritiques du Trias. Les calcaires du Lias moyen (avec intercalation marneuse et argileuse).	moyennement résistants	2	9,42
Les grès et conglomérats rouges du permo-Trias. Les formations d'Infracénomanien (marnes, grès et conglomérats rouges). Les pélites et les schistes.	Matériaux vulnérables	3	52,54
Les formations du Lias supérieur (conglomérats, grès et argiles rouges). Les formations de la base du Lias (argiles rouges à sel, à gypse et grès calcaires). Les argiles roses salines du Trias. Les formations alluviales du quaternaire, colluviales et endoréiques facilement entraînées par les eaux (Épandages d'éboulis).	Matériaux très vulnérables	4	1,62

Tableau 1 : Classes de la friabilité des matériaux et indices attribués

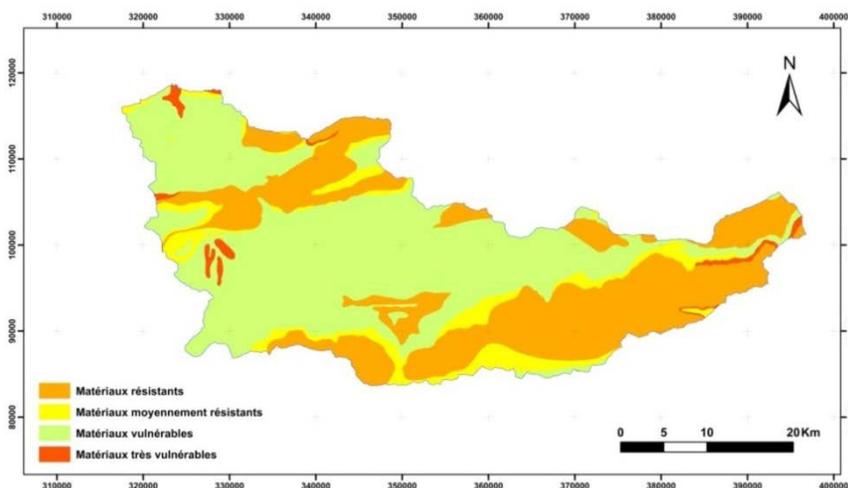


Fig. 4 : Carte de la friabilité des matériaux.

La distribution des classes de la friabilité des matériaux dans la carte obtenue, montre que les sols les plus érodibles (les matériaux vulnérables et très vulnérables) se situent en grande partie au centre et à l’aval du bassin versant et occupent plus que la moitié du bassin versant ; soit environ 54,16% de la superficie total.

Evaluation de la pente

L'effet de la topographie sur la production de sédiments se traduit essentiellement par le degré de la pente. En effet, plusieurs chercheurs ont trouvé que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l’inclinaison de la pente (Zingg, 1940 et Borst et Woodburn, 1940). Alors que Smith et Witt (1947) ont trouvé que les pertes sont proportionnelles à la pente.

La carte des pentes (Fig. 5) émane du modèle numérique de terrain (MNT) de la région, de type SRTM d’une résolution de 30m, qui a été subdivisée en quatre classes de pentes : 0 à 5°; 5 à 15°; 15 à 35° et 35 à 73°. Pour chaque classe de pente est assigné un indice variant entre 1 et 4 (tableau 2), 1 étant affecté aux pentes faibles (< 5°) et 4 aux pentes fortes (> 35°). Les classes de pentes sont définies en fonction de nos connaissances du terrain et à partir des mesures de pente reliées aux observations sur l’état de l’érosion sur le terrain.

A partir de la carte des pentes générée, quatre classes de pentes dans la région d’étude sont définies. Les pentes les plus fortes (15-73°) dominent 62,59 % de la superficie totale du bassin versant. Tandis que les pentes les plus faibles et moyennes ne couvrent que 37,41 % de celle-ci.

pente (°)	Sensibilité à l'érosion	Indice attribué	Superficie (%)
0-5	Faible	1	7,41
5-15	Moyenne	2	30,00
15-35	Élevé	3	56,56
35-73	Très élevé	4	6,03

Tableau 2 : Classes des pentes et indices attribués.

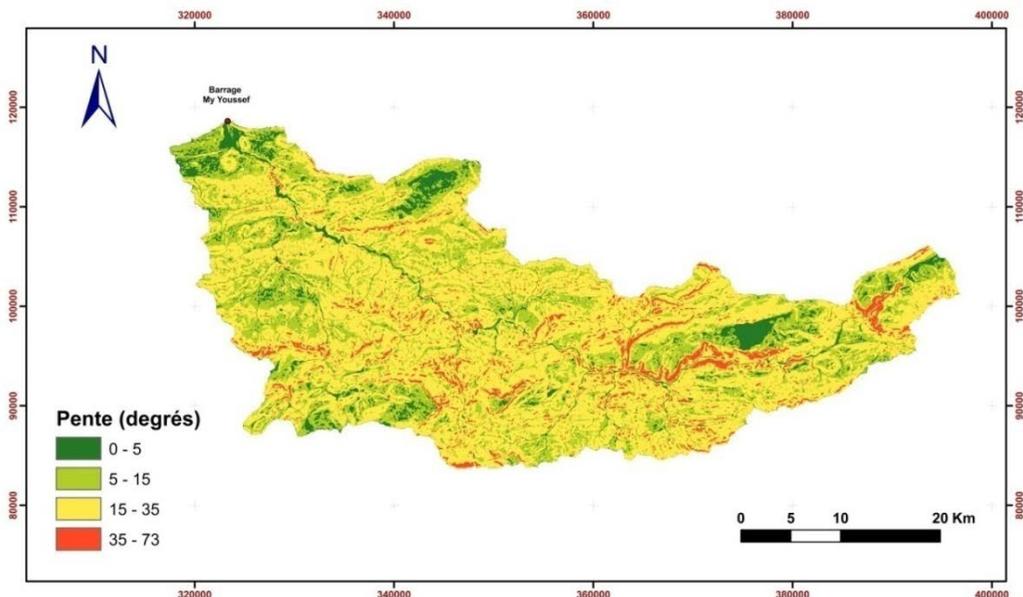


Fig. 5 : Carte des pentes.

Carte d'occupation des sols

L'érosion hydrique augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal ou résidus. Ces derniers jouent un rôle important dans le contrôle des phénomènes d'évapotranspiration, d'écoulement, d'infiltration et de l'enrichissement du sol en matière organique. Dans la région étudiée, la couverture végétale, constitue un élément essentiel pour le maintien de l'équilibre du milieu naturel. D'abord le milieu est rude, à la fois aride en été et froid en hiver, ce qui est peu propice à un développement normal de la végétation. En outre, les peuplements et le sol sont souvent fortement dégradés par une action humaine intense.

Le couvert végétal est la résultante de l'occupation du sol que nous ne pouvons mieux apprécier qu'à travers une classification qui adopte l'approche basée sur le NDVI « L'indice de végétation par différence normalisée », basée sur l'observation directe des catégories d'utilisation des terres, ce qui nous a permis d'obtenir une carte d'occupation des sols (Fig. 6). Quatre classes sont ainsi identifiées : les terrains nus, les terrains cultivés (parcelles agricoles), végétation éparse ou de densité moyenne et végétation très dense. Chaque classe est assignée à une valeur entre 1 et 4 ; 1 étant affecté à la classe la moins vulnérable et 4 à la classe la plus vulnérable (Tableau 3).

Occupation des sols	Sensibilité à l'érosion	Indice attribué	Superficie en %
Végétation très dense	Faible	1	3,41
Végétation éparse ou de densité moyenne	Moyenne	2	13,47
Terrain cultivé (Parcelles agricoles)	Élevé	3	3,18
Terrain nu	Très élevé	4	79,94

Tableau 3 : Occupation des sols et indices attribués.

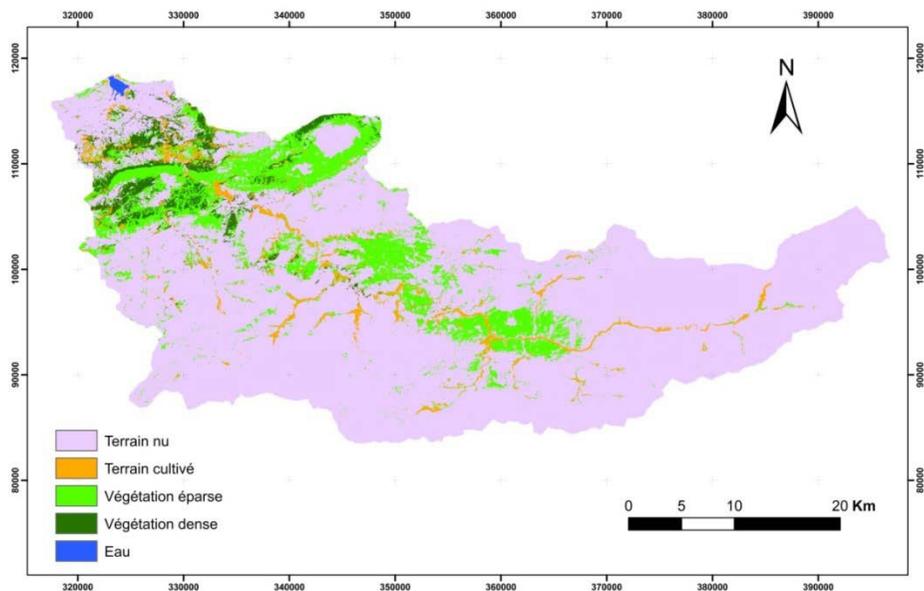


Fig. 6 : Carte de l'occupation des sols.

La carte de l'occupation des sols réalisée montre que dans le bassin versant, il existe quatre classes, la classe majoritaire est de terrain nu occupe la quasi-totalité du bassin versant ; soit environ 80% de la superficie totale, alors que les classes ; végétation éparse, végétation dense et terrain cultivé qui se localisent essentiellement dans la partie aval du bassin versant et au voisinage de l'oued Tessaoute et ces principaux cours d'eau ne dépassent guère 20 % de la surface, ce qui reflète une faible couverture du terrain et augmente la superficie des zones vulnérables à l'érosion dans le bassin versant.

Carte de risque potentiel d'érosion

La carte de risque potentiel d'érosion (Fig. 7) basée sur l'utilisation de la méthode des sommes d'indices a permis de visualiser différentes zones échelonnées en quatre niveaux de vulnérabilité à l'érosion hydrique : faible,

moyen, fort et très fort. Les résultats obtenus correspondent bien aux observations qui ont été faites sur le terrain.

Les secteurs qui présentent des risques d'érosion très élevés occupent 27,09% (38418,72 ha) de la superficie totale du bassin versant, suivie par la classe d'érosion fort qui couvre 55,86% (79228,87ha) du bassin puis par les zones où l'érosion est moyenne avec 16,87% (23926,45 ha) de la superficie du bassin. Les zones à risque d'érosion faible représentent 0,03% (40,47ha) de la superficie du bassin.

Globalement, La carte de risque potentiel d'érosion montre que les zones à grands risques d'érosion correspondent particulièrement à des terrains avec un taux de friabilité des sols assez élevé et un taux de recouvrement faible à très faible. On constate que l'érosion s'avère active et apparente sur plus des 3/4 du bassin versant (82,95% de la superficie de risque potentiel d'érosion fort et très fort).

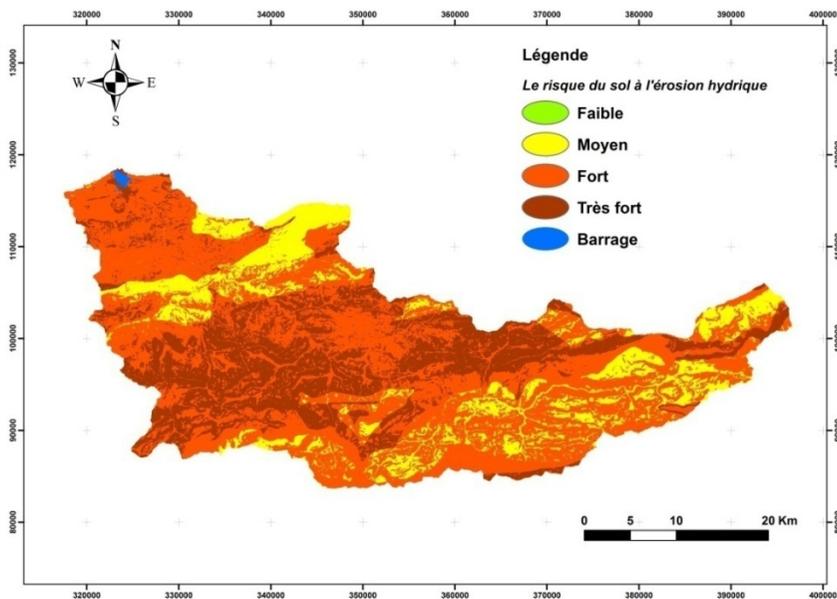


Fig. 7 : Carte de risque potentiel d'érosion.

Validation des résultats

La modélisation du procédé d'érosion est un travail important et stratégique, donc elle a besoin des procédures strictes de validation.

La validation de nos résultats est faite à partir d'observation in situ de 20 sites (points de contrôle). Ces points sont repartis sur tout le bassin et intéressent toutes les classes du potentiel érosif (5 points de contrôle pour chaque classe).

A partir des observations, nous avons pu calculer la précision totale du modèle :

$$Pt = PCv/PCt$$

Pt : Précision totale.

PCv : Nombre des points de contrôle valides à la confirmation sur terrain.

PCt : Nombre total de points de contrôle.

La validation des résultats obtenus a été faite par confrontation directe avec la réalité de terrain. Le taux d'exactitude (précision totale) a été évalué à environ 85% lors d'une mission sur le terrain à la suite de la production de la carte de risque, et ce en examinant le résultat à une vingtaine de points bien répartis sur la totalité du bassin versant et couvrant les différentes classes d'érosion. Aussi, ces points étaient différents de ceux qui avaient été choisis lors de l'acquisition des données.

Les résultats de ce travail sont très concordants avec ceux obtenus dans le Haut Atlas; Abaoui et al (2005), Bachaoui et al (2007) et Maimouni et al (2012).

Discussion

L'analyse spatiale de la carte du risque potentiel d'érosion avec les pourcentages de contributions $A = 20/100$, $B = 50/100$ et $C = 30/100$ générée par le modèle qualitatif adopté, permet de dresser une carte où sont localisées les zones exposées aux plus forts risques d'érosion (faible, moyen, fort et très fort).

La superposition de la carte d'aléa d'érosion avec les différentes cartes des paramètres de l'érosion montre clairement une correspondance des zones à érosion élevée avec des formations friables et permet d'en tirer que le bassin versant de la Tessaoute amont, est formé pratiquement en toute sa totalité par des formations vulnérables à l'érosion, en l'occurrence les argiles rouges, les marnes, les pélites, les schistes, les éboulis et les terrasses fluviales quaternaires. Ceci rend le bassin versant favorable à une érosion forte, et la sensibilité à l'érosion est d'autant plus importante si on ajoute le fait qu'une grande superficie du bassin est occupée par des terrains nus ou bien cultivés, comme le cas de la région d'étude où le couvert végétal est fortement dégradé.

Par référence aux cartes des différents facteurs de l'érosion, on remarque une concordance nette entre la répartition des différentes classes de risque d'érosion et la répartition des classes de la friabilité des matériaux et de couvert végétal. Ces deux paramètres peuvent être considérés comme des facteurs déterminants et les plus contribuant dans le processus de l'érosion dans notre bassin versant. Cependant, la présence d'une végétation dense, même en présence de pentes fortes et de sols friables, minimise fortement les taux d'érosion. En revanche sur les sols nus les pentes exposées aux précipitations de forte intensité favorisent l'érosion sur les matériaux résistants.

Les résultats de cette étude montrent que la géologie régionale joue un rôle primordial, en ce qui concerne la sensibilité à l'érosion hydrique. Cela est dû à la présence des terrains nus sur plus des 3/4 du bassin versant avec des matériaux friables de forte érodabilité.

La validation des résultats sur terrain et la comparaison avec les autres travaux antérieurs similaires dans la région, confirment que l'application de ce modèle qualitatif a fourni un résultat fiable même en manque de données détaillées surtout sur les sols. Nos résultats semblent être similaires par rapport à d'autres travaux effectués dans d'autres bassins versants du Maroc (Badraoui et al. (2003 et 2005) ; El Bouqdaoui (2007) ; Raissouni et al, (2012)) et nous permettent la mise en place d'un modèle qualitatif pour la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans la chaîne atlasique.

Conclusion

La présente étude contribue à l'analyse et la cartographie de l'érosion hydrique du bassin versant de la Tessaoute amont. Cette méthode de cartographie de risque érosif, reste un outil de gestion intéressant et un modèle assez fiable qui, avec des mises à jour continues et une amélioration des données sources, peut être un outil important pour l'évaluation spatio-temporelle du phénomène dans la chaîne atlasique. La carte de risque potentiel d'érosion élaborée pourrait constituer un document de base pour tout aménagement proposé et permet aux décideurs de mieux cibler les zones prioritaires et de mieux planifier leurs stratégies d'intervention pour tout aménagement antiérosif.

En somme, cette étude a abouti à des résultats satisfaisants et présente plusieurs avantages:

- Le modèle qualitatif permet un aperçu global et rapide de l'ampleur de la vulnérabilité des sols dans le bassin versant.

- Il est moins coûteux par rapport aux modèles quantitatifs dans le cas de grandes surfaces comme pour des études à l'échelle territoriale, régionale ou à l'échelle des grands bassins versants.

- Il est simple et rapide à réaliser.

Ce modèle simplifié peut être généralisé dans le Haut Atlas central car la région présente les mêmes caractéristiques lithologiques et morphologiques.

References:

Abaoui, J., El Ghmari, A., El Harti, A., Bachaoui, E. M., Bannari, A., & El Bouadili, A. Cartographie de l'érosion hydrique en zone montagneuse: Cas du bassin versant des Ait Bou Goumez, Haut Atlas, Maroc. *Estudios Geológicos*, 61(1-2), 33-39, 2005.

- Bachaoui, B., Bachaoui, E. M., El Harti, A., Bannari, A., & El Ghmari, A. Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique: exemple du haut Atlas marocain. *Téledétection*, 7, 393-404. 2007.
- Badraoui, M. et Aziki, S., Analyse du Programme d'Action National de Lutte contre la désertification au Maroc: Identification des domaines et zones d'action prioritaires MADR/Mécanisme Mondial, Rabat, Maroc. 2003.
- Badraoui M., Bouabid R. et Rouchdi M., Élaboration d'un Programme de lutte contre la désertification dans le bassin de Souss par analyse d'images satellitaires. Phase I de l'étude contractée entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement et la Société ADI, Rabat, Développement de la méthodologie, 68 p. 2003.
- Badraoui M., Bouabid R. et Rouchdi M., Elaboration d'un Programme de lutte contre la désertification dans le bassin de Souss par analyse d'images satellitaires. Phase II de l'étude contractée entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement et la Société ADI, Rabat. Elaboration de la base de données et dérivation de la carte de la sensibilité à la désertification, 72p. 2005.
- Bonn, F. La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, vol. 9, no 3, p.185-192,1998.
- Borst, H. L. & Woodburn, R. Rain simulator studies of the effect of slope on erosion and runoff. U.S. Dept. Agr. SCS-TP-36, 1940.
- Demmak A. Recherche d'une relation empirique entre les apports solides spécifiques et les paramètres physico-climatiques des bassins : cas algérien. In. AISH Public no 144 : 403-414,1984.
- El Bouqdaoui, Khaddouj. "Approche méthodologique de l'évaluation du risque potentiel d'érosion des sols du bassin versant du Srou (Moyen Atlas, Maroc) à l'aide de la télédétection et du SIG.", 2007.
- Henri TERMIER. la carte géologique provisoire des régions de Demnate et Telouete au 1/200000. Imp. GAILLAC-MONROCO et Cie Paris,1941.
- Heusch, B. L'érosion du Pré-Rif. Une étude qualitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuse du Pré-Rif occidental. *Ann. Recherche Forestière au Maroc*, pp. 129-176, 1970.
- Heusch, B. Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. *Soc Sci Nat, Phys Maroc*, 37, 41-54, 1971.
- Heusch, B. Étude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. Recherche bibliographique sur l'Afrique du Nord. Projet RAB/80/04 PNUD, 83 p, 1982.
- Laflen, J. M., Leonard, J. L. et Foster, G. R. WEPP: A new generation of erosion predicting technology, *J. of Soil and Water Conservation*, 46: 34-38, 1991.

- Lahlou, A. Eau, Erosion, Désertification, Espace géographique et société marocaine. Spécial Environnement et développement, 1: 16-36, 1997.
- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., & King, D. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46(2), 207-220, 2002.
- Maimouni, S, El Harti, A., Bannari, A.& Bachaoui, E. M. Water erosion risk mapping using derived parameters from digital elevation model and remotely sensed data, *Geo-spatial Information Science*, 15:3, 157-169, 2012.
- Raïssouni, A., KHALI Issa, L., Arrim, A., Maâtouk, M., Passalacqua, R., GIS-based model to assess erosion sensitivity in Northern Morocco. Laou watershed case study. *International Journal of Geosciences*, 2012, vol. 2012.
- Smith, D.D. et Whitt, D.M. Estimating losses from field area of claypan soil. *Proc. Soil. Sei. Am.* 12 485-490 apud KIRKBY, M.J. et MORGAN, R.P.C., ed. *Soil Erosion*. New York, John Wiley. Chap.2, 1947.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning*. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning, 1978.
- Zingg, A.W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in run-off. *Agricultural Engineering*. Vol. 21, pp. 59-64, 1940.