

## CARTOGRAPHIE DE L'ÉROSION HYDRIQUE EN ZONE MONTAGNEUSE : CAS DU BASSIN VERSANT DES AIT BOU GOUMEZ, HAUT ATLAS, MAROC

J. Abaoui\*, A. El Ghmari\*, A. El Harti\*, E. M. Bachaoui\*, A. Bannari\*\*, A. El Bouadili\*

### RÉSUMÉ

Ce travail présente la cartographie de l'érosion hydrique en zones montagneuses (Haute Atlas, Maroc) en se basant sur trois facteurs principaux : la friabilité du substratum rocheux, le degré de pente et la densité du couvert végétal. La carte du potentiel érosif est obtenue par la somme d'indices attribués aux couches thématiques (la friabilité du substratum rocheux, le degré de la pente et la densité du couvert végétal) multipliés par le pourcentage de contribution de chaque facteur. Dans un environnement de SIG, les pourcentages de contribution ont été obtenus par itération en se référant à la réalité de terrain. Les pourcentages 50%, 30% et 20% retenus correspondent respectivement à la friabilité du substratum, le degré de la pente et la densité du couvert végétal. Ce travail peut être utilisé pour cartographier le potentiel érosif dans d'autres bassins versant du Haut Atlas central qui présentent des faciès géologiques, une topographie et un couvert végétal similaires à la zone des Ait Bou Goumez.

**Mots-clés :** *Erosion hydrique, Haute-Atlas, Maroc.*

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la realización de la cartografía de erosión hídrica en zonas montañosas (Alto Atlas, Marruecos), basándose sobre tres principales factores: la friabilidad del sustrato litológico, el buzamiento y la densidad de la cobertura vegetal. El mapa del potencial erosivo se obtiene por la suma de índices relativos a las capas temáticas (la friabilidad del sustrato litológico, el buzamiento y la densidad de la cobertura vegetal) multiplicado por los porcentajes de contribución de cada factor. Estos porcentajes se han obtenido por iteración refiriéndose a la realidad del terreno. Los porcentajes 50%, 30% y 20% retenidos corresponden respectivamente a la friabilidad del sustrato litológico, el buzamiento y la densidad de la cobertura vegetal. Este trabajo puede ser utilizado para cartografiar el potencial erosivo en otras cuencas de drenaje del Alto Atlas central que presentan facies geológicas, topografía y cobertura vegetal similares a la zona de Ait Bou Goumez.

**Palabras clave:** *Erosión hídrica, Alto-Atlas, Marruecos.*

### Introduction

Le Haut Atlas est une importante chaîne de montagnes longue de 80 km et large de 40 à 80 km, orientée SSO-NNE. Sa structure est formée de synclinaux et d'anticlinaux d'axes allongés parallèlement à la chaîne. Son environnement est très vulnérable du fait que l'équilibre entre les besoins humains et l'environnement, particulièrement les

ressources naturelles qui sont soumises à une surexploitation (déboisement, pâturage et défrichement pour l'extension des cultures).

Par ailleurs, le Haut Atlas constitue une réserve naturelle en eau stockée dans les roches constituées par les calcaires du Lias (Levêque, 1961). Ceci justifie l'importance de la région dans la politique de la gestion de l'eau, menée par le Maroc depuis 1967, par l'installation des barrages pour l'alimen-

\* Laboratoire de Télédétection et des Systèmes d'Information Géographique appliqués aux Géosciences et à l'Environnement, Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal, B.P. 523, Maroc. C.É : abaoui@imel.org

\*\* Laboratoire de Télédétection et de Géomatique de l'Environnement, Ottawa –Carleton Geoscience Center-, Université d'Ottawa (Ontario) Canada K1N 6N5.

tation en eau potable, la production de l'énergie hydroélectrique et le développement des aménagements hydroagricoles. Cependant, la majorité des retenues des barrages connaissent un disfonctionnement dû à l'envasement qui se traduit par une diminution du volume utile, suite aux apports excessifs des sédiments résultant de l'érosion hydrique des sol à l'amont des bassins versants. Ainsi, les pertes en eau sont estimées à 50 millions de m<sup>3</sup> par an (Boutayeb, 1988), soit de quoi irriguer plus de 5.000 ha. Le taux de dégradation spécifique dans le Haut Atlas est compris entre 500 et 1.000 t/km<sup>2</sup>/an (Lahlou, 1997). Ces chiffres confirment l'activité dynamique d'érosion très élevée dans la région du Haut-Atlas central rapporté par plusieurs hauteurs (Levêque, 1961; DEFCS, 1986). Ce phénomène engendre l'envasement des barrages en aval des bassins versants. 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 climat affecte également l'érosion d'une manière indirecte par son effet sur la production de la biomasse végétale et la décomposition des résidus (Williams et al, 1996). Ainsi, le couvert végétal protège la surface du sol contre l'impact de l'eau de pluie, réduit la vitesse de ruissellement à la surface du sol et maintient une bonne porosité à la surface grâce aux racines en décomposition (Tricart et al, 1965; Hudson, 1971).

Dans le cadre du développement des zones montagneuses au Maroc, la région d'Azilal a bénéficié d'un projet financé par la FAO (FAO/PNUD/MOR/004). Ce projet avait comme objectif de dresser des cartes thématiques qui peuvent constituer par la suite des documents de base pour toute étude d'aménagement dans la région. Ainsi, des cartes d'occupation des terres, de population et d'érosion, ont été dressées. Néanmoins, cette étude est importante lorsqu'elle est prise à l'échelle régionale et reste peu exploitable à l'échelle d'un petit bassin versant. Ainsi, la carte du bilan morphodynamique (érosion) réalisée dans ce cadre, constitue une description généralisée de l'état de l'érosion, basée sur la friabilité des unités lithologiques de la région d'Azilal.

Pour identifier lequel ou lesquels des facteurs responsables en grande partie de l'érosion et localiser les sources éventuelles des sédiments à l'échelle d'un petit bassin versant, une étude qualitative et automatisée de l'érosion s'avère nécessaire. Pour cela, nous avons choisi un petit bassin versant en hautes montagnes (Aït Bou Goumez, 250,5 Km<sup>2</sup>), inclus dans le projet FAO/PNUD/MOR/004.

La présente étude est basée sur un calcul des sommes des indices attribués aux paramètres (friabilité du substratum lithologique, degrés de pente et densité du couvert végétal). Ces indices sont en

suite multipliés par le pourcentage de contribution de chaque couche. Les couches thématiques sont prélevées sur des inventaires topographiques, géologiques et d'occupations des terres et sont croisées dans un système d'information géographique adapté à l'étude de l'érosion en montagne. Les résultats ont été, par la suite, validés sur le terrain.

## Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant des Aït Bou Goumez (250,5 km<sup>2</sup>) se situe au cœur du Haut-Atlas central, à environ 65 km au sud de la ville d'Azilal (fig. 1). Il s'agit d'un domaine montagneux où les altitudes oscillent entre 1.800 et 3.600 m. La pluviométrie moyenne annuelle est 300 mm. La température moyenne annuelle est 25 °C (température minimale 6 °C, température maximale 35 °C). La vitesse moyenne du vent avoisine les 20 km/h. la végétation est caractérisée par une flore à chênes verts (*Quercus ilex*), thuyas de barbarie (*Calitrix articulata*) et des tâches de genévriers rouges (*Pinerus phoenicia*). À partir de la côte 2.500 m, on trouve les xérophytes épineux de hautes montagnes (*Buffonia murbeckii*, *Alyssum spinosum*). En général la limite supérieure des arbres oscille entre 2.800 et 3.100 m. Toutefois, l'influence dévastatrice de l'homme a varié notablement les limites inférieures des arbres. La zone d'étude s'étend sur des terrains variés allant des roches très résistantes, comme les calcaires massifs jusqu'aux terrains très friables comme les marnes.

## Matériel et méthodes

Pour estimer le taux ou l'état d'érosion, plusieurs méthodes sont adoptées dont les plus utilisées sont : l'équation universelle de perte de sol, USEL, (Wishmeier et al, 1978), la version modifiée, MUSLE, (Foster et al, 1996) et le projet de prédiction de l'érosion hydrique, WEPP, (Lafren, 1991). Le choix du modèle dépend de la variabilité de la surface du bassin, des données ponctuelles et des précipitations (Bonn, 1998; Benmoussa, 1993). Ces modèles nécessitent un échantillonnage très précis à partir de mesures ponctuelles en parcelle et des cartes à échelle supérieure ou égale à 1/50.000. Dans la région d'étude, nous ne disposons que des cartes à 1/100.000. Pour palier cet inconvénient, nous avons opté pour une méthode qualitative et simplifiée reposant sur la décomposition des inventaires topographiques, des inventaires géologiques et d'occupations des terres qu'on a, par la suite, intégré dans un système d'information géographique (fig. 2). La présence d'une seule station climatique dans la zone d'étude qui s'étend sur 250,5 km<sup>2</sup> a rendu les données climatiques peu concluantes pour les intégrer dans l'étude.

Le modèle numérique d'altitude (MNA) obtenu à partir de la numérisation des courbes de niveau de la carte topographique à 1/100.000 de la zone d'étude, a permis d'établir une carte d'altitude (hypsométrie) et une carte des classes de pente. Le nombre de classes a été choisi en fonction de nos connaissances du terrain (tableau 1).

L'identification des différents faciès lithologiques a été effectuée à l'aide de la carte géologique au 1/100.000 (Jossen et al., 1971) et des levés de terrain. Les lithofaciès ont été ensuite

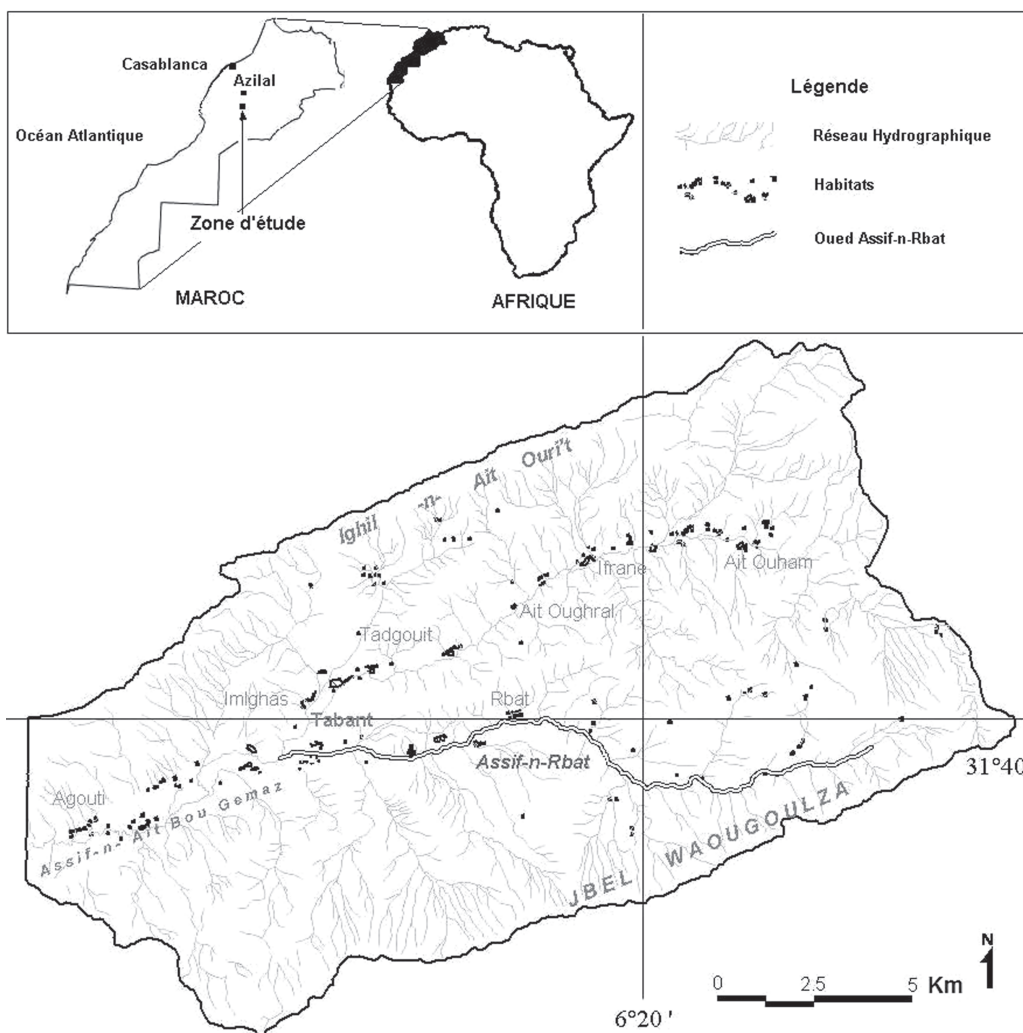


Fig. 1.—Localisation de la zone d'étude (Haut-Atlas Central).

Tableau 1.—Classes de pente et indices attribués

Pente	Indices
> 12°	5
9-12°	4
6-9°	3
3-6°	2
0-3°	1

Tableau 2.—Classes de la friabilité de substratum rocheux et indices attribués

Faciès	Friabilité	Indices
Terres meubles cultivées sur quaternaire Marnes	Matériaux tendres	5
Argiles Conglomérats	Matériaux vulnérables	4
Dolomie et calcaire marneux Eboulement	Matériaux peu vulnérables	3
Basaltes altérés	Matériaux moyennement résistants	2
Roches magmatiques Calcaires massifs	Matériaux résistants	1

classées selon leurs degrés de friabilité (tableau 2). La carte de répartition des formes végétales est extraite de la carte de l'occupation des terres de la région de la province d'Azilal (Kamal et al., 1986). Les formations végétales ont été classées en fonction de la densité, de la hauteur et du système cultural (tableau 3).

Dans un environnement Arcview, le calcul des classes du potentiel érosif est obtenu à partir de la somme des indices

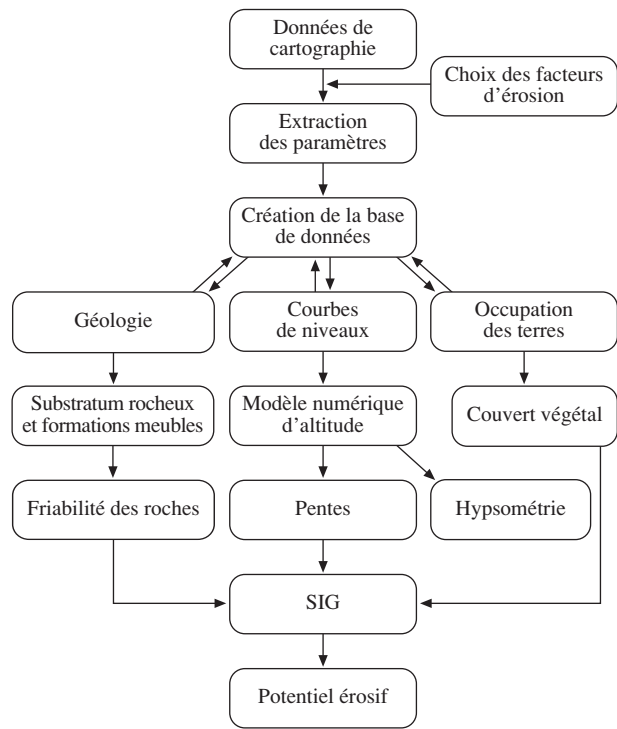


Fig. 2.—Structure conceptuelle des étapes de réalisation d'un modèle du potentiel érosif fondé sur un système d'information géographique pour l'étude de l'érosion hydrique.

Tableau 3.—Classes des formations végétales et les indices attribués

Formations végétales	Indices
Espaces dénudés ou érodés sans ou avec végétation très maigre.	5
Zones de cultures en sec discontinues sur versants aménagés. Cultures annuelles en sec sans arboriculture. Cultures irriguées sans arboriculture.	4
Formations steppiques à armoise ou xérophytes épineux. Formations herbacées peu denses.	3
Associations claires de formations arborées hautes et formations arborées basses ou arbustives. Associations claires de formations arborées ou arbustives et formations arborées hautes. Formations arborées hautes claires. Formations arborées basses ou arbustives claires.	2
Associations moyennement denses de formations arborées hautes et formations arborées basses ou arbustives. Formations arborées basses ou arbustives moyennement denses.	1

attribués aux classes de différents paramètres. Chaque indice est multiplié par le pourcentage de contribution de la couche thématique correspondante (paramètres). Le résultat est classifié en cinq classes équivalentes.

$$Pe = (I_v \times A) + (I_{fr} \times B) + (I_{p_i} \times C)$$

- Pe : Potentiel érosif.
- I<sub>v</sub> : Indice de densité du couvert végétale.
- I<sub>fr</sub> : indice de friabilité.
- I<sub>p<sub>i</sub></sub> : indice de degré de pentes.
- A, B et C : Pourcentage de contribution.

La validation des résultats est faite à partir d'observation in situ de 16 sites (points de contrôle). Ces points sont repartis sur tout le bassin et intéressent toutes les classes du potentiel érosif. A partir des observations, nous avons pu calculer la précision totale du modèle :

$$Pt = PCv/PCt$$

- Pt : Précision totale.
- PCt : Nombre total de points de contrôle.
- PCv : Nombre des points de contrôle valides à la confirmation sur terrain.

### Résultats et discussions

L'hypsométrie de la région est caractérisée par des zones de basses altitudes comprises entre 1.700 m et 2.094 m représentant 25% de la superficie totale, et des zones plus élevées situées entre 2.094 m et 3.704 m couvrant 75% de la superficie du bassin versant (fig. 3).

Les faibles pentes (<3°) représentent 12,4% de la superficie totale (fig. 4). Cette catégorie occupe surtout le centre du bassin versant. Elle correspond essentiellement à des cours alluviales, utilisées en agriculture et d'autres endroits sur la totalité du bassin sur les autres formations lithologiques. Les pentes situées entre 3° et 6° représentent 15,7%. Cette classe s'étend le long des cours d'eau des deuxième et troisième ordres et aussi des ravins. Elles tapissent toutes les formations friables du centre. Les pentes situées entre 6° et 9° constituent 22,9% de la superficie. Cette catégorie forme des plages occupant une partie minoritaire du bassin versant sur les formations friables et résistantes, sauf au sud du bassin où dominent les calcaires massifs. Les pentes très fortes (>12°) représentent 49%, elle occupent toutes les formations rocheuses de la zone d'étude. Les pentes fortes accélèrent le ruissellement et par conséquent le transport des particules solides au niveau des matériaux friables et des matériaux résistants. L'action des pentes est contrôlée par la friabilité du substratum lithologique qui paraît la plus contributive dans l'érosion.

Dans la région des Aït Bou Goumez, les formations à matériaux résistants représentent 12% (fig. 5). Les formations à matériaux moyennement résistants représentent 27%. Les matériaux peu vulnérables et vulnérables occupent respectivement 16% et 22% du bassin. Les matériaux tendres formés de terres meubles et de marnes, représentent



Tableau 4.—La distribution des classes du potentiel érosif dans quatre cartes générées par le modèle. Les valeurs A, B et C sont respectivement les pourcentages de contribution du couvert végétal, de la friabilité du substratum lithologique et du degré de pente

Pourcentages de contribution (%)			Surface à potentiel érosif (%)						Précision totale (%)
A	B	C	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort		
20	50	30	10,40	27,10	31,30	29,60	1,60	60,53	
20	40	40	4,22	22,89	49,08	23,01	0,77	45,12	
33	33	33	4,07	18,04	44,84	28,01	5,02	22,53	
50	25	25	4,97	20,95	32,82	36,26	4,98	15,48	

23% de la zone d'étude et s'étendent le long des cours d'eau principaux qui seront probablement des zones à potentiel érosif important.

Les formations arborées ou arbustives moyennement denses et claires couvrent les endroits plus ou moins résistants formés de calcaire et des affleurements friables au nord formés de marne, grès et conglomérat (fig. 6). Le centre du bassin versant, dominé par les formations les plus friables (terres meubles, marne et grès), est couvert par une mosaïque de formations steppiques ou de formations herbacées et de zones de cultures (sec ou irriguées) sans arboriculture, des couverts végétaux peu protecteurs contre l'impact de la pluie sur la surface du sol et surtout le ruissellement. Les espaces dénudés sans ou avec végétation très maigre recouvrent surtout les calcaires massifs où il y a peu de sol. Cette répartition exerce très peu de contrôle sur les formations friables et laisse transporter les particules du sol par ruissellement.

Le modèle utilisé permet d'imposer les pourcentages de contribution relatif à chaque paramètre et d'en déduire différentes cartes du potentiel érosif (tableau 4). L'analyse spatiale de la carte avec les pourcentages de contributions A = 33/100, B = 33/100 et C = 33/100 générée par le modèle montre des distributions des classes du potentiel érosif fort sur le nord et le sud du bassin versant. Ce résultat n'est pas conforme à la réalité de terrain. Ces endroits sont occupés par des calcaires massifs. Vu l'importance de la friabilité du substratum rocheux dans la dynamique du bassin par rapport au couvert végétal et la pente et par itération nous avons cherché la combinaison la plus proche à la réalité de terrain.

La carte générée avec les pourcentages de contributions A = 20/100, B = 50/100 et C = 30/100 a révélé que la zone au nord de l'oued Assif-n-Rbat (figs. 1, 7) est potentiellement la plus exposée à l'érosion, ce que nous avons remarqué sur le terrain. Ceci est dû à une grande présence des marnes et des conglomérats. Par

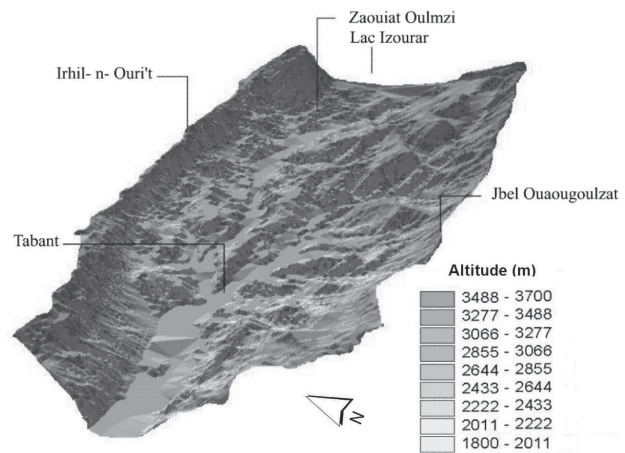


Fig. 3.—Modèle numérique d'altitudes du bassin versant.

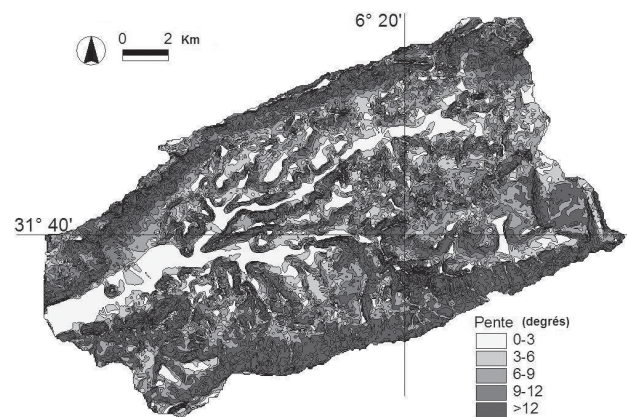


Fig. 4.—Carte des pentes du bassin versant.

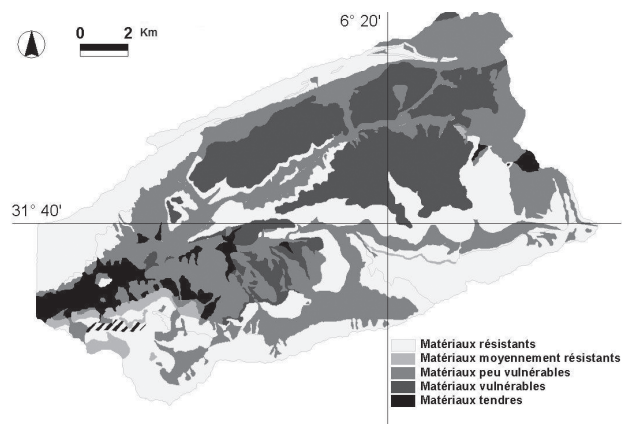


Fig. 5.—Carte de friabilité du substratum lithologique du bassin versant.

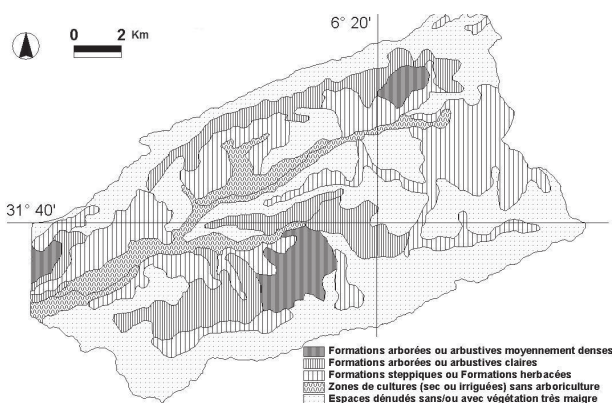


Fig. 6.—Carte des formations végétales du bassin versant, tirée de Kamal et Idar (1986).

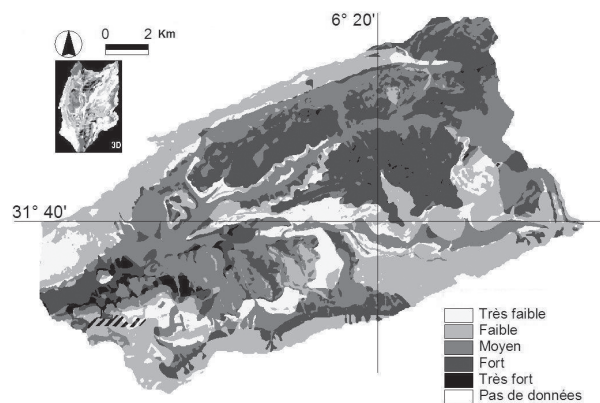


Fig. 7.—Carte du potentiel érosif issu du modèle avec les pourcentages de contributions A = 33/100, B = 33/100 et C = 33/100 dans le bassin versant.

contre, la zone au sud est potentiellement moins touchée, grâce à l'existence en majorité des calcaires et des basaltes et à une couverture végétale dense, installées sur les versants à orientation nord et sur les substratums rocheux les plus friables. Les zones à très faible et faible potentiel érosif représentent 37,5%. Elles se localisent sur les formations résistantes dans le sud et le sud-est du bassin. Les zones à moyen et fort potentiel érosif occupent 60,9%. Ces terrains se situent surtout au nord de l'oued Assif-n-Rbat. Les zones à très fort potentiel érosif ne dépassent pas 1,6%. Elles sont surtout sur les terrains meubles du quaternaire en aval du bassin et sur les formations rocheuses les plus friables du centre.

La confirmation de la carte avec les pourcentages de contribution A = 20/100, B = 50/100 et C = 30/100 sur terrain a donné une précision totale égale à 60% par rapport à la carte avec les pourcentages de contributions A = 33/100, B = 33/100 et C = 33/100 (22%) (tableau 4). Ce qui confirme la précision qu'ont porté les indices de contribution : 50% pour la friabilité du substratum lithologique, 30% pour le degré de pente et 20% pour le couvert végétal.

## Conclusion

Les éléments contenus dans les inventaires topographiques, les inventaires géologiques et d'occupation des terres ont été croisés dans un système d'information géographique. L'analyse et la modélisation spatiale de la friabilité du substratum lithologique, du couvert végétal et le degré de pente ont permis d'avoir une idée claire sur la gestion du bassin versant des Aït Bou Goumez et par conséquent produire un projet plus en harmonie avec la nécessité de protéger les barrages, situé en aval, contre l'envasement et la désertification dans la région.

Les pourcentages de contribution 50%, 30% et 20% correspondant respectivement aux couches : la friabilité du substratum rocheux, les pentes et le couvert végétal, ont donné des résultats très proches à la réalité terrain. Dans le bassin versant des Aït Bou Goumez où la présence des sols nus et des pentes exposées aux précipitations de forte intensité, l'utilisation de la méthode des sommes d'indices a permis de visualiser différentes zones échelonnées en potentiel érosif faible, moyen, fort et très fort. Ces derniers nous ont montré les zones où il y a une intensification de l'érosion et, par conséquent, les endroits qui peuvent libérer facilement les sédiments lors des crues. Ces endroits dépassent 43% de la superficie du bassin versant. Les zones à très faible et faible potentiel érosif avoisinent 56%. Les zones à moyen et fort potentiel érosif présentent 38%. Les zones à très fort potentiel érosif avoisinent 4%.

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

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Mr Badraoui Mohamed de Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II pour sa contribution scientifique et à l'amélioration de la présentation de ce travail.

## Références

- Benmoussa, M., El yamani, M. et Saidi, A. (1993). Application de l'équation universelle des pertes en sol au bassin versant de Oued Tasrafet. *Géo-observateur, Rabat, Maroc*, 3: 83-93.
- Bonn, F. (1998). La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilité, erreurs et limites, *Sécheresse*, 9: 185-192.

- Boutayeb, N. (1988). Impact de la dégradation des bassins versants sur l'économie nationale. *Acte du Séminaire national sur l'aménagement des bassins versants, Rabat*, pp. 18-23.
- DEFCS (1986). *Aménagement et développement des zones de montagnes du haut atlas central*, Rapport intérimaire. Projet FAO/PNUD/MOR/004, 16 pp.
- DEFTT (1971). Carte topographique du Maroc. Zaoyt Ahnçal : Division de la Carte, Feuille NH-29-XXIV-4.
- Foster, G. R., Meyer, L. D., Onstad, C. A. (1996). An erosion equation derived from basic erosion principles. *Trans of the A.S.A.E.*, 20: 672-687.
- Heusch, B. (1970). L'érosion du Pré-Rif. Une étude qualitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. *Ann. Recherche Forestière au Maroc*, pp. 129-176.
- Hudson, N. W. (1971). *Soil conservation*, Batsford, London, 320 pp.
- Jossen, J. A., Couvreur, G., Benshili, K. H., Dresni, R. D., Elmi, S. et Stephani, M. (1971). Carte géologique du Maroc. Zaoyt Ahnçal. SGM. Feuille NH-29-XXIV-4.
- Kamal, M. et Idar, M. (1986). *Aménagement et développement des zones de montagne du Haut Atlas Central. Carte de l'occupation des sols de la région de la province d'Azilal*, Projet FAO/MOR/01/004.
- Lafren, J. M., Leonard, J. L. et Foster, G. R. (1991). WEPP: A new generation of erosion predicting technology, *J. of Soil and Water Conservation*, 46: 34-38.
- Lahlou, A. (1997). Eau, Erosion, Désertification, Espace géographique et société marocaine. *Spécial Environnement et développement*, 1: 16-36.
- Levêque, P. (1961). *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de l'Atlas de Demnate*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de Bordeaux, 366 pp.
- Tricart, J. et Cailleux, A. (1965). *Traité de géomorphologie, Tome 1, Introduction à la géomorphologie climatique*. SEDES, Paris, 306 p.
- Williams, J., Nearing, M. A., Nicks, A., Skidmore, E., Valentine, C., King, K. et Savabi, R. (1996). Using soil erosion models for global change studies, *J. of Soil and Water Conservation*, 51: 381-385.
- Wishmieier, W. H., Smimith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall erosion losses, A guide to conservation planning*, USDA, Agriculture Handbook, pp. 537-557.

Recibido el 26 de octubre de 2004  
 Aceptado el 16 de marzo de 2005