

Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain

ABDELKADER EL GAROUANI

Laboratoire de Géologie des Ressources Naturelles, Faculté des Sciences et Techniques, Route d'Imouzzer, BP 2202, Fès-Saïss 30 000, Maroc
e-mail: garouani@caramail.com

ABDELAZIZ MERZOUK

Laboratoire de Conservation des Eaux et du Sol, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Allal Al Fassi, BP 6202, Rabat, Maroc

ANDRE OZER

Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Université de Liège, Allée du 6 Août 2, B 11 Sart Tilman, B-4000 Liège, Belgique

Résumé La région d'étude est caractérisée par une grande irrégularité des précipitations, une forte pente et une lithologie essentiellement argilo-marneuse ce qui entraîne la mise en place des sols rouges méditerranéens particulièrement fragiles. Dans un article précédent, on a analysé le processus de l'érosion hydrique du sol de point de vue qualitatif en utilisant les données de télédétection. Dans le présent travail, on fait appel à un système d'information géographique (SIG) pour évaluer de façon quantitative l'érosion en utilisant l'équation universelle de pertes en sols sous sa version adaptée aux conditions marocaines (USLE). Des analyses multicritère par le SIG ont permis la manipulation de plusieurs critères et paramètres (sous forme de couches d'information). Les résultats obtenus montrent que les pertes en sols moyennes varient principalement en fonction de l'occupation des terres et de la pente. Ainsi une analyse statistique a été menée pour mettre en évidence des corrélations entre le taux d'érosion et les différents facteurs de ce processus.

Mots clefs érosion hydrique; Maroc; pré-Rif; système d'information géographique (SIG); télédétection; Universal Soil Loss Equation (USLE)

Key words water erosion; Morocco; pre-Rif; Geographic Information System (GIS); remote sensing; Universal Soil Loss Equation (USLE);

INTRODUCTION

L'érosion peut être un processus lent et insoupçonné, ou encore prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme du sol arable. Au pré-Rif marocain, le lessivage de la terre arable peut résulter en une réduction du potentiel de production, en une réduction de la qualité de l'eau de surface et en l'envasement des barrages.

Dans cet article on a procédé à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Jemaa en adoptant le modèle empirique d'évaluation des pertes en sol de Wischmeier modifié par Kalman (1970) pour l'estimation du facteur *R* au Maroc (USLE; Universal Soil Loss Equation). Ce modèle prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme en fonction de l'érodabilité des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures. USLE prévoit

uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent de l'érosion en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement et au vent. Ce modèle peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de "pertes de terre tolérables" ou à un autre système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles.

L'érosion est l'action exercée par les agents climatiques (pluie, vent, etc.) souvent amplifiée par l'action humaine (déforestation, surpâturage, etc.) et qui a pour effet d'enlever la couche superficielle des sols et des roches meubles ou des talus des rivières ce qui finit par provoquer l'affleurement de pavages de pierres gênant ainsi fortement l'infiltration des eaux (Merzouk & Blake, 1991). La réduction de l'infiltration peut aussi être causée par la formation d'une croûte qui tend à sceller la surface. A certains endroits, cette croûte réduit l'érosion en nappe, mais le ruissellement qui l'accompagne peut provoquer des problèmes de ravinement (Arnold *et al.*, 1989).

Dans des travaux antérieurs, on a analysé le processus de l'érosion hydrique du sol du point de vue qualitatif en utilisant les données de télédétection (El Garouani *et al.*, 2001a,b). Dans le présent article, on fait appel à un SIG pour quantifier l'érosion hydrique annuelle en utilisant l'équation universelle de pertes de sols (USLE). En effet, avant d'entamer l'étape de spatialisation des modèles de l'érosion sur tout le bassin versant étudié, il fallait identifier les facteurs et les indicateurs de la dégradation des sols.

L'approche par télédétection et SIG est utilisée pour spatialiser des modèles ponctuels d'évaluation de l'érosion, et pour l'intégration des différentes informations et la cartographie des résultats. Elle constitue un outil d'aide à la décision en permettant la localisation des zones prioritaires et de proposer des scénarios d'intervention.

MATERIEL ET METHODE

Région d'étude

Le bassin de l'Oued Jemaa, d'une superficie de 120 km², est localisé dans le pré-Rif marocain (Fig. 1). Il est caractérisé par une grande irrégularité des précipitations, allant de 233 mm en 1998–1999 à 694 mm en 1996–1997. Une image Spot HRV pris le 2 octobre 1997 et des photographies aériennes au 1:40 000 d'octobre 1992 couvrant la région ont été utilisées. Concernant les types d'occupation du sol les plus représentatifs du bassin versant sont: oliviers, céréaliculture et parcours. D'autre part, les matériaux servant de roches-mères pour les sols sont constitués par des argiles, des marnes et des calcaires marneux, ou par des alluvions dérivant de l'altération et de l'érosion de ces roches.

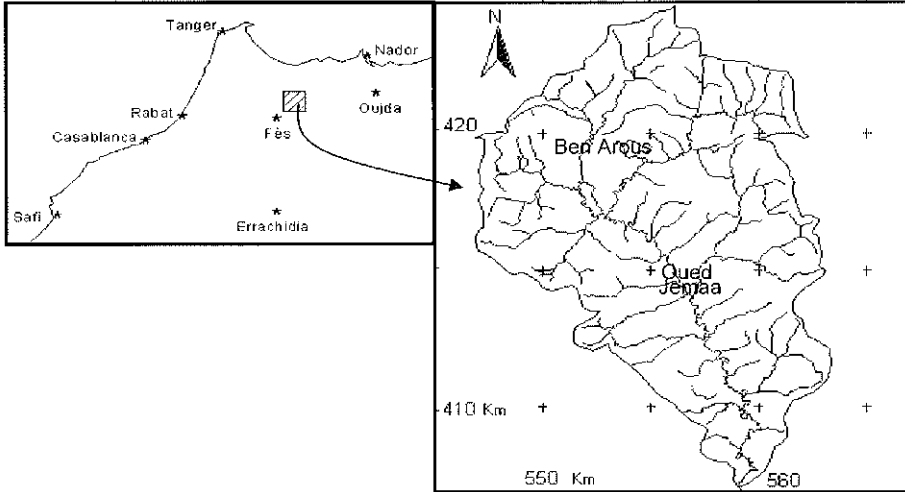


Fig. 1 Situation géographique de la région d'étude.

Cartographie et évaluation de l'érosion hydrique

L'équation universelle des pertes en sol modifiée permet d'estimer le risque d'érosion hydrique. Il s'agit d'un modèle empirique qui réunit les facteurs ayant une incidence sur l'importance de l'érosion. Il se présente comme suit:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

avec:

A = taux de perte de sol ($t \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$),

R = érosivité de pluie,

K = érodabilité du sol,

LS = facteur topographique intégrant la pente et la longueur de pente,

C = facteur de protection du sol par la couverture végétale,

P = facteur exprimant la protection du sol par les pratiques agricoles.

D'après ce modèle, cinq facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de cette méthode peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par contre, à long terme, les valeurs moyennes obtenues par USLE représentent les pertes en sol avec plus de précision (Stone & Hilborn, 2000).

Facteur topographique (LS)

Il est bien entendu que, plus la pente est raide, plus l'eau ruisselée érodera le sol. L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente à cause de l'augmentation de l'énergie érosive de la lame d'eau ruisselée. La fusion de petits champs pour en faire de plus grands a généralement comme conséquence d'allonger les pentes, d'augmenter les risques d'érosion par l'augmentation de la vitesse de l'eau, occasionnant un plus grand lessivage (capacité de transport des sédiments).

La détermination de la longueur et le degré de pente pour l'usage dans des modèles d'érosion se fondent sur mesure longue et difficile sur le terrain et jugée souvent imprécise. Pour avoir une carte de *LS* plus précise est fondée sur des algorithmes mathématiques plus rigoureux, on a utilisé un programme informatique (*Erode*) développé par Hickey (2000), et qui tourne sous le logiciel *Idrisi*.

Protection du sol par la couverture végétale

Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal ou de résidus. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration (Cyr *et al.*, 1995; Bannari *et al.*, 1999). Une approche par classification supervisée de l'image Spot a été appliquée pour déterminer la carte de l'occupation du sol. Cette carte a été vérifiée par les observations du terrain et les photographies aériennes. En plus, par des opérations de seuillage de l'indice de végétation on a établi la carte de densité de couvert végétal (El Garouani *et al.*, 2001a). Ces cartes sont utilisées pour en déduire le facteur de protection du sol par la couverture végétale (facteur *C*). En effet, on a affecté par analogie, à partir des travaux de Heusch (1970) et de Kalman (1967) dans la région, pour chacune des différentes cultures et utilisation du sol des valeurs de facteur *C*.

Les autres facteurs (*K*, *R*, et *P*)

A l'aide de la base de données pédologiques et climatiques établie durant la première phase du projet et d'après des expertises de terrain, on a déterminé le reste des facteurs et paramètres intervenant dans le modèle utilisé. L'évaluation du facteur *K* est basée sur la détermination des différentes unités pédologiques du bassin versant de l'Oued Jemaa. En effet, faute de mesure directe de ce paramètre, on a attribué par analogie à partir des travaux de Heusch (1970) pour chaque type du sol des valeurs d'érodabilité (*K*). A partir des données climatiques l'évaluation de l'indice *R* est basée sur la formule de Kalman (1970) qui tient compte les précipitations moyennes annuelles et la moyenne des pluies maximales en 24 h. Cette formule a été appliquée dans le modèle adopté au projet de Sebou et celui d'aménagement du barrage Al-wahda (MAMVA, 1992). Concernant le facteur *P*, en absence des pratiques anti-érosives, on a attribué à ce paramètre la valeur 1.

En fin, on a procédé à la spatialisation de ces facteurs en utilisant les techniques du SIG. La méthodologie adoptée dans ce travail est illustrée par la Fig. 2.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

La gestion conservatoire du sol consiste à maintenir l'érosion sol à un niveau tolérable. La perte en sol tolérable est la quantité annuelle maximale de terre qui peut être retirée avant que la productivité naturelle du sol à long terme ne soit compromise.

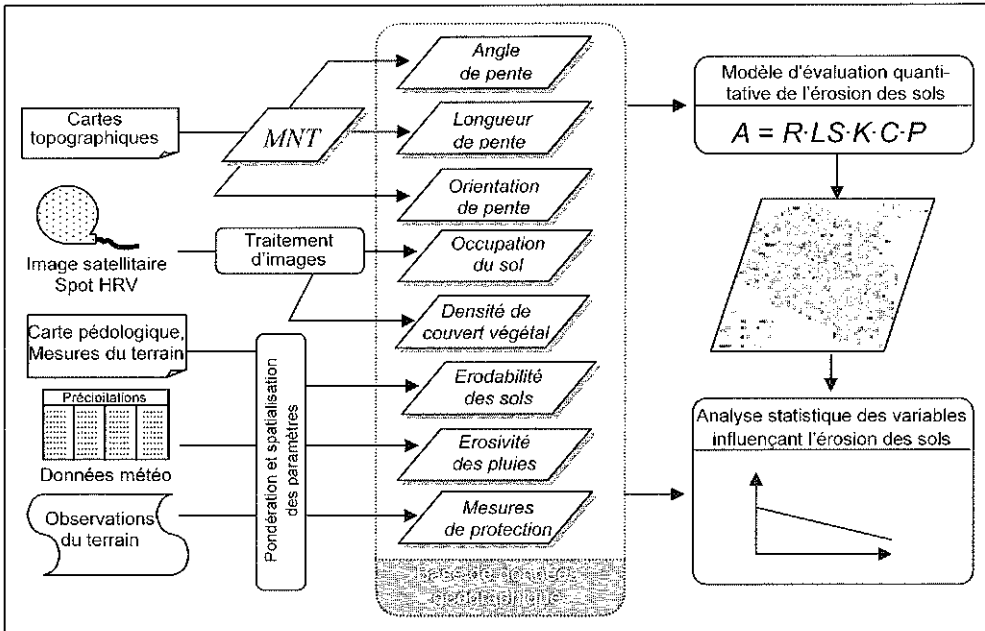


Fig. 2 Méthode utilisée pour l'évaluation quantitative des pertes en sol.

Les répercussions de l'érosion sur un type de sol donné et, par conséquent, le niveau de perte de terre tolérable varient selon le type de sol et la profondeur du sol. En général, on présume que les sols qui sont dotés d'une couche arable profonde, uniforme et dépourvue de pierre et/ou qui n'ont pas été soumis auparavant à l'érosion possèdent une limite tolérable supérieure à celle des sols qui sont peu profonds ou qui ont déjà subi une érosion.

Les pertes en sol calculées dans la région varient de 1 à 264 t ha⁻¹ an⁻¹ avec une moyenne pondérée de 27.5 t ha⁻¹ an⁻¹. C'est une valeur qui entre bien dans la gamme des taux d'érosion publiés pour la région rifaine en se basant sur des extrapolations obtenues à partir des données d'envasement des barrages (MAMVA, 1992). Il faut rappeler que la recherche sur la modélisation des processus d'érosion a été très active durant les dix dernières années au Maroc pour faire face au grand manque de données de mesures au champs des pertes en sols.

La Fig. 3 permet d'exprimer l'importance de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Jemaa. En effet, environ 8% de la surface totale de la région est affectée par une perte en sol supérieur à 35 t ha⁻¹ an⁻¹. Les secteurs les plus touchés correspondent aux zones de fortes pentes (>22%) avec un couvert végétal dégradé. Dans les endroits de faibles pentes généralement réservés pour les céréalicultures, l'érosion est faible à moyenne, et peut être maîtrisée par l'amélioration des techniques culturales.

Le recours aux techniques statistiques notamment la régression multiple permet de mieux approcher ce phénomène. Appliquée au bassin versant de l'Oued Jemaa, l'analyse multivariée de l'érosion spécifique a permis de rechercher les facteurs qui contribuent d'avantage au phénomène d'érosion hydrique. En effet, le SIG avec l'analyse statistique spatialisée a permis de pondérer le poids de chaque facteur et plus précisément son impact sur la spatialisation des zones à haut risque.

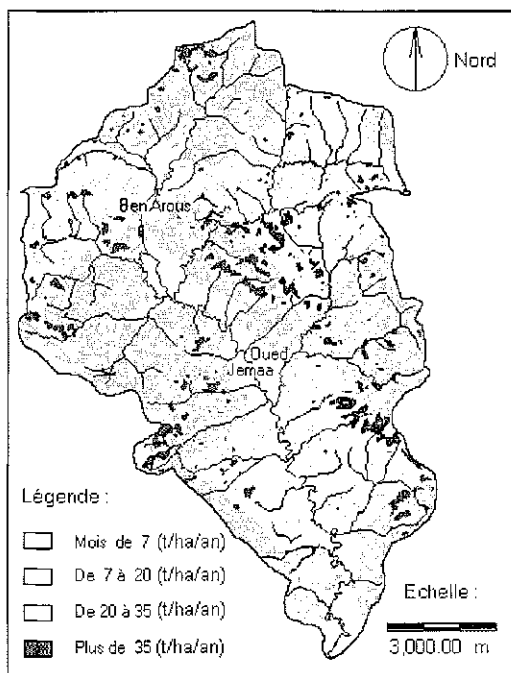


Fig. 3 Carte des pertes en sol moyennes annuelles dans la région de l'Oued Jemaa.

Le Tableau 1 met en évidence l'importance de l'érosion dans la région en fonction de degré de pente et de l'occupation du sol.

A partir des formations pédologiques existantes dans le bassin versant de l'Oued Jemaa, l'érodabilité des sols varie entre 0.4 et 0.6. D'après les normes de la classification de l'érodabilité des sols, ces derniers sont fortement érodables. En plus, la régression du couvert végétal au profit de la culture en pente des céréales avait touché une grande partie de la région. Cette transformation de l'occupation du sol rend les versants très vulnérables à l'action érosive de la pluie et du ruissellement entraînant un phénomène de ravinement très important.

A l'état actuel de nos recherches dans la région, le taux d'érosion spécifique annuelle calculé par le modèle doit être considéré à titre indicatif et son importance réside dans le suivi de la variation temporelle du processus. En effet, les intervalles de confiance pour les valeurs des paramètres ne peuvent être délimités par manque de mesures sur les parcelles et les microbassins pour étalonnage. Une campagne de mesure sur le terrain (Expérimentation au simulateur de pluie) fera l'objet de la prochaine phase de notre projet.

Tableau 1 Répartition des classes de perte en sol dans le bassin versant de l'Oued Jemaa.

| Classes des pertes en sol | Pertes en sol (t ha ⁻¹ an ⁻¹) | Pentes moyennes (%) | Occupation du sol | Surfaces (ha) | Pourcentage |
|---------------------------|--|---------------------|-------------------------|---------------|-------------|
| I | <7 | 2.6 | Céréaliculture | 2797 | 23% |
| II | 7-20 | 10.2 | Parcours/céréaliculture | 6004 | 51% |
| III | 20-35 | 15.1 | Olivier/céréaliculture | 2391 | 20% |
| IV | >35 | 22.0 | Parcours/céréaliculture | 656 | 6% |

CONCLUSION

Le modèle empirique d'évaluation des pertes en sol (USLE) a été intégré dans le système d'information géographique *Idrisi*, ce qui a permis la manipulation de plusieurs critères et paramètres. En plus, une analyse statistique a été menée pour mettre en évidence des corrélations entre le taux d'érosion et les différents facteurs et indicateurs de ce processus. Les résultats obtenus ont montré que les pertes en sols moyennes varient principalement en fonction de l'occupation des terres et de la pente.

L'évaluation des pertes en sol a permis de mettre en évidence une classification des surfaces en fonction de l'importance de risque à l'érosion. Le zonage de cette cartographie, en particulier celle des surfaces de plus forts taux d'érosion, facilitera les décisions d'intervention ainsi que le choix et la planification des mesures de conservation.

Remerciement Le présent travail a pu être mené grâce à l'appui financier de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) sous forme d'une Action de Recherche Partagée. A cet effet, nous présentons nos remerciements aux responsables de l'AUF.

REFERENCES

- Arnold, J. B., Wall, G., Moore, N., Baldwin, C. S. & Shelton, I. J. (1989) L'érosion du sol: causes et effets. <http://www.gov.on.ca/omafra/frech/engineer/facts/89-064.htm>
- Bannari, A., Haboudate, D. & Bonn, F. (1999) Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. In: *21st Canadian Symposium on Remote Sensing* (June 1999, Ottawa, Ontario, Canada), 359–366. Université d'Ottawa, Canada.
- Cyr, L., Bonn, F. & Pesant, A. (1995) Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. *Ecol. Modelling* **79**, 277–285.
- El Garouani, A., Merzouk, A., Hinaje, S., Jabrane, R. & Boussema, M. R. (2001a) The water erosion study by remote sensing in Oued Jemaa watershed (pre-Rif, Morocco). In: *Symposium International sur les Régions Arides Surveillées depuis l'Espace: de l'Observation à la Modélisation pour la Gestion Durable* (Marrakech, Maroc, novembre 2001). Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- El Garouani, A., Merzouk, A., Hinaje, S., Jabrane, R. & Boussema, M. R. (2001b) Identification des géorisques par télédétection: érosion des sols et glissement des terrains au pré-Rif marneux (Maroc). *IXes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie* (Yaoundé, Cameroun, 29 novembre–2 décembre 2001). Ecole National Supérieure Polytechnique, Yaoundé.
- Heusch, B. (1970) L'érosion du pré-Rif, une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-Rif Occidental. *Ann. Recherche Forestière du Maroc* **12**, 9–176. Rabat.
- Hickey, R. (2000) Slope angle and slope length solution for GIS. *Cartography* **29**, 1–8.
- Kalman, R. (1967) Essai d'évaluation pour le pré-Rif du facteur couverture végétale de la formule de Wischmeier de calcul de l'érosion. Rapport, Rabat. Service de Recherche Forestière, Rabat.
- Kalman, R. (1970) Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie). *Ann. Recherche Forestière du Maroc* **12**, p. 117. Rabat.
- MAMVA (Ministère d'Agriculture et de Mise en Valeur Agricole (1992) Plan Directeur pour la lutte anti-érosive dans le bassin du Ouargha. Phase I. Direction des Eaux et Forêt et de la Conservation des Sols, Rabat.
- Merzouk A. & Blaké, G. (1991) Indices for the estimation of interrill erodibility of Moroccan soils. *Catena* **18**, 537–550.
- Stone, R. P. & Hilborn, D. (2000) Equation universelle des pertes en terre (USLE). <http://www.gov.on.ca/omafra/frech/engineer/facts/00-002.htm>