

EGIS/MARI '94

Conference Proceedings

FIFTH EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON
GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS

PARIS - FRANCE
Mare 29 - April 1, 1994

Editors
JAN JAAP HARTS
HENK F.L. OTTENS
HENK J. SCHOLTEN

Excutive editor
JOHAN VAN ARRAGON

VOLUME H

EGIS FOUNDATION, UTRECHT/AMSTERDAM, THE NETHERLANDS

SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR L'ÉTUDE DES BASSINS VERSANTS DANS LE PRE-RIF MAROCAIN

Abdel-Ilah Mokadem⁽¹⁾, Marc Binard⁽²⁾ et Sylvia Dautrebande⁽¹⁾

(1) Laboratoire de Télédétection et d'Agrohydrologie. Hydraulique Agricole. FSAGx
2, Passage des Déportés, 5030 Gembloux, Belgique.

(2) Laboratoire SURFACES. Département de Géographie. ULg.
7, Place du Vingt Août, 4000 Liège, Belgique.

RESUME

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet de coopération financé par l'Administration Générale pour la Coopération au Développement (AGCD - Belgique), coordonné par les Services de Programmation de la Politique Scientifique (SPPS - Belgique) et le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire (MARA - Maroc). L'objectif général du projet est de contribuer au développement d'un centre de télédétection au sein du MARA et d'assurer un transfert de compétences et de savoir faire dans le domaine de la télédétection. Notre contribution dans ce projet concerne l'étude et la caractérisation du bassin versant de l'Oued Tasrafete (affluent de l'Aoudour) dans le Pré-Rif marocain. Les techniques les plus récentes de traitement d'images satellitaires et de cartographie numérique ont été utilisées en vue de développer une méthode qui permette de cartographier la sensibilité des terres de versant à l'érosion hydrique et d'évaluer les pertes de sol à l'échelle du bassin versant. Les cartes produites peuvent servir d'aide aux aménageurs et aux décideurs pour orienter les efforts en matière de lutte anti-érosive de manière à rendre ceux-ci plus efficaces et suffisamment rentables.

INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet belgo-marocain financé par l'Administration Générale pour la Coopération au Développement (AGCD - Belgique). La finalité du projet est de contribuer au développement d'un Centre de Télédétection au Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire (MARA - Maroc) et d'assurer une coopération scientifique et technique pour l'application de la télédétection dans trois domaines jugés prioritaires:

- * occupation du sol, potentiel de ruissellement et sensibilité à l'érosion dans le Pré-Rif;
- * mise en valeur agricole, problème de l'épierrage et travaux d'infrastructure;
- * lutte contre l'ensablement.

Les Services de Programmation de la Politique Scientifique (SPPS - Belgique) ont été chargés de promouvoir ces applications, avec comme objectifs la mise au point de méthodologies en matière d'utilisation de la télédétection et le transfert de compétence et de savoir faire dans ce domaine.

Notre contribution dans ce projet concerne le premier domaine d'application: l'étude et la caractérisation du bassin versant de l'Oued Tasrafete (affluent de l'Aoudour) dans le Pré-Rif marocain. L'Oued Aoudour, lui-même, est un affluent de l'Oued Ouergha sur lequel le plus grand barrage d'Afrique du Nord est en construction à M'Jara. Bien que le bassin étudié occupe une faible surface (15219 ha), la méthode mise au point peut être généralisée et appliquée au bassin versant en amont de M'Jara (619000 ha).

Une étude de la FAO (1977) a montré que plus de 12.000.000 d'hectares de terres de culture et de parcours sont menacés par l'érosion au Maroc et que les deux tiers des terres actuellement cultivées nécessitent des interventions urgentes et des mesures de conservation sévères. Cette érosion produite en amont se traduit par une réduction de la productivité des sols.

Le Pré-Rif est une zone purement agricole dans laquelle la forêt a presque totalement disparu. C'est un pays collinaire, formé de manies, de flyschs et de rares affleurements calcaires. L'érosion y est assez active et pose des problèmes de traitement très délicats. Les marnes, et parfois les flyschs, sont exploités en céréaliculture. Les oliviers, seuls arbres fruitiers cultivés en sec, se trouvent localisés sur les flyschs, les calcaires et les grès exposés au Nord. Sur les marnes orientées vers le Sud, on trouve des sols érodés à pentes abruptes dépourvus de végétation et fortement ravinés. Sur les autres expositions et particulièrement l'exposition Nord, les pentes sont plus douces, le sol y est plus épais et l'érosion par décapage est moins marquée; par contre la solifluxion et les glissements de terrain y sont très fréquents. Le labour pratiqué par les paysans se fait souvent le long des courbes de niveau et efface toutes traces de griffes d'érosion de l'année précédente.

Dans la perspective de lutte anti-érosive, la Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols au Maroc entreprend des travaux de conservation des eaux et du sol tels que l'aménagement pastoral, le reboisement et la construction des seuils de sédimentation. Cependant, de tels efforts ne peuvent être efficaces et suffisamment rentables que s'ils sont orientés vers les terres qui présentent la plus grande priorité d'intervention. La méthodologie mise en oeuvre dans cette étude utilise les plus récentes techniques de traitement d'images et de cartographie permettant de dresser l'inventaire du potentiel de ruissellement, de la sensibilité des sols à l'érosion et d'évaluer les pertes en sol à l'échelle des bassins versants marocains.

RUISSÈLEMENT SUR LES VERSANTS

En hydrologie, le ruissellement est formé par les eaux précipitées ayant échappé à l'infiltration, à l'évaporation, à l'évapotranspiration et au stockage superficiel et qui s'écoulent sur la surface du soi ou dans le micro-réseau hydrographique en suivant la ligne de plus grande pente. Les manifestations excessives du phénomène st traduisent par l'érosion des sols, par des colluvionements, par des inondations et par des écoulements de crue dans le réseau hydrographique.

Les facteurs influençant le ruissellement sont nombreux et incluent des aspects aussi divers que la physiographie du terrain et l'intervention humaine (la topographie, les caractéristiques du sol, les précipitations, la couverture végétale, l'occupation du sol, les techniques d'aménagement).

On définit le potentiel de ruissellement d'un sol ou d'un bassin versant comme son aptitude à produire du ruissellement en fonction de ses caractéristiques physiographiques et de sa couverture végétale.

Plusieurs méthodes existent pour évaluer le potentiel de ruissellement. Nous présentons ici la méthode SCS. Cette méthode d'origine américaine (US Soil Conservation Service, SCS; 1972) détermine la production de ruissellement, en établissant une relation simple entre les

hauteurs d'eau précipitées journalières (P) et les lames d'eau écoulées (R). Cette relation est exprimée empiriquement de la manière suivante :

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (1)$$

P = Hauteur journalière totale de la pluie considérée (mm)

S = Paramètre de rétention du sol (mm)

Dans la méthode de base, le paramètre S est déterminé en fonction des critères suivants: la perméabilité du sol, la végétation (degré de couverture, ou types physiologiques d'occupation du sol), les techniques culturales utilisées et le mode d'aménagement. La conjonction de ces différents facteurs permet de définir ce qu'on appelle des complexes hydrologiques, pour lesquels des valeurs de "ruissellement", exprimées à partir d'une courbe paramétrique ou Curve Number (CN), sont prédites. Le potentiel de ruissellement (CN) d'un complexe sol-végétation est relié au paramètre S par la relation fonctionnelle suivante :

$$CN = \frac{1000}{(10 + S)} \quad (2)$$

Les valeurs de CN (pour une pente moyenne du soi de 5%) sont lues dans des tables en fonction de la perméabilité du sol, de la couverture végétale et des pratiques culturales et d'aménagement. Ces valeurs du CN varient de 0 à 100 pour un potentiel de ruissellement croissant. Il existe trois tables de valeurs correspondant respectivement aux conditions climatiques antérieures: humide, normale et sèche.

Une modification de la formule précédente permet de tenir compte de l'effet de la pente sur le ruissellement, par ajustement de la valeur de CN (WIL LIAMS. 1985):

$$CN_{2r} = \frac{\sqrt{s} (CN_3 - CN_1)}{\sqrt{s} + e^{(\alpha_1 - r_1 \sqrt{s})}} + CN_1 \quad (3)$$

CN_{2r} : valeur ajustée pour une pente (s) donnée

CN_1 et CN_3 sont les CN pour les conditions sèche et humide

α_1 et r_1 sont des paramètres d'ajustement

L'évaluation du potentiel de ruissellement se résume ainsi à considérer trois paramètres physiographiques : l'occupation du sol, la perméabilité et la pente du sol. Les informations précitées sont habituellement obtenues à partir d'une compilation laborieuse et onéreuse de documents cartographiques et de données de terrain; les techniques de télédétection et les systèmes d'information géographique permettent de les représenter, de les gérer et de les manipuler de manière souple et rapide.

L'occupation du sol

La technique utilisée pour cartographier l'occupation du sol du bassin de l'Oued Tasrafete est la classification supervisée de l'image multispectrale prise le 12 mai 1989 par le capteur Thematic Mapper du satellite Landsat 5. Les thèmes identifiés sont présentés dans le tableau I. Une mission sur le terrain a permis de valider cette classification sur base d'un échantillon de 107 parcelles observées. La précision globale est de 90% après regroupement des thèmes

en quatre classes: culture, forêt, jachère et sol nu. Ce regroupement est nécessaire pour pouvoir utiliser les tables de valeurs de CN.

Occupation du sol	Superficie en ha	Superficie en % du bassin versant
Peuplement de pins maritimes	63	0,41
Peuplement d'eucalyptus	128	0,84
Peuplement de chênes lièges	67	0,44
Reboisement récent	5	0,03
Matorral	73	0,48
Terre de parcours	312	2,05
Oliveraie	512	3,36
Culture très couvrante	6.621	43,51
Culture peu couvrante	6.883	45,24
Sol dénudé de versant	291	1,91
Dépôt alluvionnaire ancien	186	1,22
Plan d'eau	78	0,51
Total	15.219	100,00

Tableau I: Occupation du sol du bassin versant de l'Oued Tasrafete

La perméabilité du sol

La perméabilité de 38 types de sol représentatifs du Pré-Rif a été mesurée lors d'une étude pédologique réalisée par le Centre Régional d'Étude et d'Aménagement (Direction Provinciale des Eaux et Forêt et de la Conservation du Sol de Fès). L'interprétation des cartes géologiques à 1:50.000 a permis de spatialiser cette information. Deux classes de perméabilité ont ainsi été identifiées: rapide à moyenne (83% de la surface du bassin) et modérée (91.7% de la surface du bassin).

La pente du sol

La pente du sol a été déterminée à partir du modèle numérique de terrain. Celui-ci est obtenu par la numérisation des courbes de niveau sur les cartes topographiques à 1:50.000. L'intérêt du modèle numérique de terrain réside dans la possibilité d'en dériver des valeurs de pente. Dans une fenêtre mobile de 3 X 3 pixels, la plus grande pente calculée entre le pixel central et les 8 pixels voisins est attribuée au pixel central. Le relief du bassin versant est visualisé par la figure 1.

Le potentiel de ruissellement

Les étapes précédentes ont permis de réunir l'ensemble des données nécessaires à intégrer dans un système d'information géographique pour la détermination spatiale du potentiel de ruissellement dans le bassin versant. Suivant une démarche mise au point précédemment (Mokadem A.I. et al., 1989 et 1990), un ensemble ordonné de fonctions informatiques permet

de calculer pixel par pixel la valeur du CN dans le bassin en intégrant les caractéristiques demandées par la méthode SCS. Les CN sont présentés par classe de valeurs dans le tableau II.

Potentiel de ruissellement (classe de CN)	Superficie en ha	Superficie en % du bassin versant
0 à 20	100	0,66
21 à 40	154	1,01
41 à 60	1.364	8,96
61 à 80	13.192	86,68
81 à 100	409	2,69
Total	15.219	100,00

Tableau II. Potentiel de ruissellement (CN) dans le bassin versant de l'oued Tasrafete.

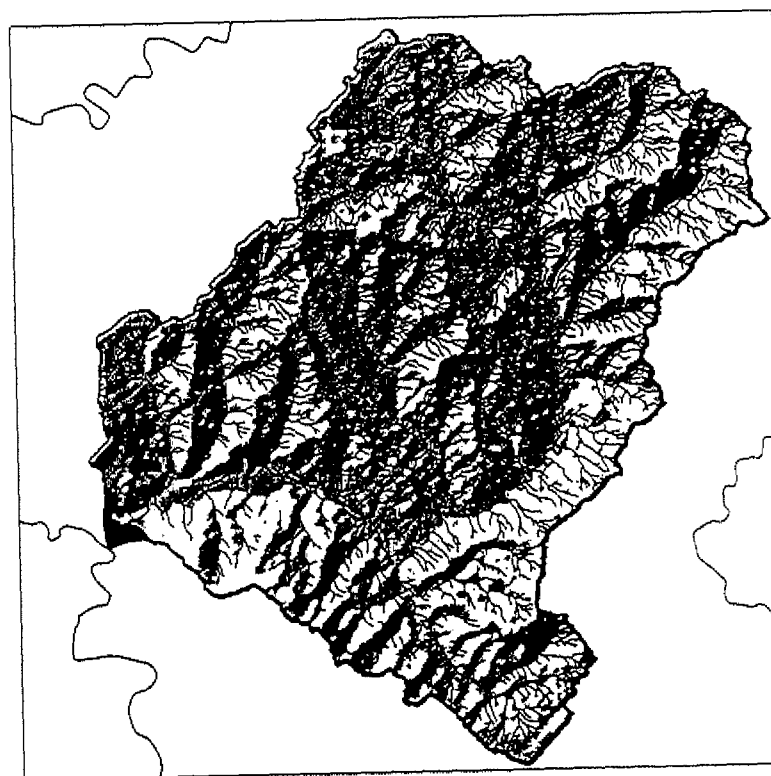


Figure 11 Réseau hydrographique et estompage d'ombre du relief du bassin versant de l'Oued Tasrafete.

EROSION SUR LES VERSANTS

L'Equation Universelle des Pertes de Sol (USLE) de Wischmeier et modifiée (MUSLE) par Williams en 1985 et par Hession et Shanholtz en 1988, met en relation les rendements en sédiment (Et) en fonction des facteurs suivants:

$$Et = RP K LS C PE DR \quad (4)$$

RP: facteur climatique C: facteur cultural

K: facteur pédologique PE: facteur anthropique
LS: facteur morphologique DR: facteur de transportabilité

Chacun de ces facteurs s'exprime sous la forme d'une couche d'information cartographique. L'intégration de l'ensemble de ces couches dans un Système d'Information Géographique permet de modéliser les pertes en sol dans les cours d'eau et d'élaborer les cartes de sensibilité des versants à l'érosion hydrique.

L'érosion potentielle (Ep) est le produit des trois premiers facteurs de l'équation 4:

$$Ep = RP K LS \text{ en tonnes/hectare} \quad (5)$$

L'érosion actuelle (Ea) correspond au produit des cinq premiers facteurs de l'équation 4:

$$Ea = Ep C PE \text{ en tonnes/hectare} \quad (6)$$

Les sédiments transportés sont déterminés par le produit de tous les facteurs intervenants dans l'équation 4:

$$Et = Ea DR \text{ en tonnes/hectare} \quad (7)$$

Facteur climatique de l'érosion (RP)

Heusch (1970) a développé pour le Maroc une formule empirique qui permet de calculer le facteur climatique de l'érosion en fonction de l'érosivité des pluies:

$$RP = 143 \log((p m p^2) / 10^6) + 89.7 \quad (8)$$

p: précipitation moyenne annuelle (mm)

p: précipitation journalière maximale, période de retour 20 ans (mm)

Williams, en 1985, propose d'exprimer ce facteur en fonction des écoulements sur les versants, simulés à partir du ruissellement et du débit de pointe provoqués par une pluie journalière; la formulation est alors:

$$RP = (R Qp)^{.56} \quad (9)$$

$$Qp = R / (360 t) \quad (10)$$

$$t = (l n)^{.6} / (18 s^{-3}) \quad (11)$$

R : ruissellement en mm (équation 1)

Qp : débit de pointe, en m³/s par unité de surface de bassin, provoqué par R

t: temps d'écoulement en heure

l: longueur d'écoulement en m

n: coefficient de rugosité à l'écoulement

s: pente de la longueur d'écoulement en m/m

La longueur d'écoulement "l", en un point du versant, est définie par la distance du chemin suivi par l'écoulement depuis la source du ruissellement (généralement la crête ou le sommet d'une colline) jusqu'à ce point. Le traitement du modèle numérique de terrain permet d'extraire cette information pour la totalité du bassin versant.

Le coefficient de rugosité à l'écoulement "n" découle de l'interprétation de la carte d'occupation du sol. A chaque occupation du sol est affectée la valeur de rugosité correspondante d'après E.T. Engman (1983), Cette information est donc dérivée de la carte d'occupation du sol pour tout le bassin versant.

La pente "s" s'exprime par le rapport entre la dénivelée de l'écoulement et sa longueur. Cette couche d'information est obtenue par le traitement du modèle numérique de terrain sur le bassin versant.

Deux couches d'information sont produites pour le facteur climatique de l'érosion selon la formulation utilisée: la première s'exprime par une valeur constante sur le bassin et est fonction de la pluie annuelle (éq. 8), la seconde affecte une valeur variable dans l'espace et dans le temps en fonction de la pluie journalière (éq. 9).

Le facteur morphologique de l'érosion (LS).

Le facteur LS est une combinaison des paramètres les définis ci-dessus. Cette combinaison est exprimée par la formulation suivante (1.0 Arnold and al., 1989):

$$LS = (l / 22.1)^{.6} (1 - \exp(-35.835 s)) (65.41 s^2 + 4.565 s + .065) \quad (12)$$

Une couche d'information "facteur morphologique de l'érosion" est créée en attribuant à chaque point du bassin versant la valeur LS après traitement du modèle numérique de terrain.

Le facteur pédologique de l'érosion (K)

Wischmeier a établi un abaque pour estimer l'érodibilité K du sol en fonction de son pourcentage en limon et en sable, de sa structure, de sa perméabilité et de sa teneur en matière organique.

L'érodibilité de 38 types de sol représentatifs du Pré-Rif a été mesurée lors d'une étude pédologique réalisée par le Centre Régional d'Etude et d'Aménagement (Direction Provinciale des Eaux et Forêt et de la Conservation du Sol de Fès). L'interprétation des cartes géologiques à 1:50.000 a permis de spatialiser cette information. Trois classes d'érodibilité ont ainsi été identifiées sur le bassin versant. Une couche d'information "érodibilité des sols" est ainsi créée par l'attribution à chaque unité lithologique de la valeur de K correspondant aux types de sol générés sur cette unité.

Facteurs cultural (C) et anthropique de l'érosion (PE)

Le facteur C représente le facteur cultural de la sensibilité à l'érosion et PE évalue le degré d'aménagement anti-érosif.

A chaque type d'occupation du sol est affectée de la valeur du facteur C en suivant les directives établies par Wischmeier et figurant dans le "Agriculture Handbook n° 537" de l'USDA aux Etats-Unis. Une couche d'information "facteur cultural de l'érosion" est ainsi créée par un simple recollage de l'occupation du sol.

Pour ce qui concerne le facteur PE, on admet qu'il est égal à 1 pour le bassin versant car ce dernier n'est pas aménagé du point de vue de la lutte anti-érosive.

Facteur de transportabilité de l'érosion (DR)

Le facteur DR permet d'estimer le pourcentage des pertes de sol produites en un point du bassin versant qui sont effectivement acheminées jusqu'au cours d'eau.

Le coefficient de transportabilité des sédiments est défini par Hession et Shanholtz en 1988 à l'aide de l'expression suivante:

$$DR = 10 (s' / l')$$
 (13)

l' : longueur d'écoulement, en mètres, entre le point où se produit la perte de sol et le point du réseau hydrographique auquel aboutit l'écoulement
 s' : la différence d'altitude, en mètres, entre le point où se produit la perte de sol et le point du réseau hydrographique auquel aboutit l'écoulement

Une couche d'information "transportabilité de l'érosion" est élaborée par le traitement conjoint du modèle numérique de terrain et du réseau hydrographique (figure 1).

CARTOGRAPHIE

La rédaction cartographique de deux cartes à 1:50.000 a été réalisée en utilisant le logiciel Map Publisher d'Intergraph. Cette technique de production entièrement numérique a permis d'imprimer deux cartes en un nombre limité d'exemplaires. La résolution utilisée pour l'impression est de 16 points par mm (soit 400 dpi).

Carte de l'occupation du sol : Région de Béni Ahmed dans le Pré-Rif marocain.

La projection de la carte topographique marocaine à 1:50.000 (projection conique conforme de Lambert Nord Maroc) a été utilisée pour cartographier l'occupation du sol d'une zone carrée de 23 km de côté (soit un peu plus de 50.000 Ha) couvrant la totalité du bassin versant de l'Oued Tasrafete.

D'un format hors tout de 76x 56 cm, la carte comporte 14 classes d'affectation dont huit sont représentées par des couleurs en aplat et quatre par des trames. La transformation du fichier matriciel en un format vectoriel a été nécessaire pour appliquer des trames à ces quatre dernières classes. Afin d'améliorer la lisibilité de la carte, les huit autres classes représentées en aplat sont détournées par un trait noir grâce à une érosion de morphologie mathématique.

Les éléments vectoriels constituant la planimétrie rapportée sont : les limites du bassin versant, les cours d'eau permanents, les cours d'eau temporaires (uniquement au sein du bassin) et les pistes. Les écritures (toponymie) et les éléments vectoriels rapportés sont ouverts dans le fond (détournés de blanc). Un carton de localisation permet de situer la région au sein du Maroc.

Carte de l'érosion : Région de Béni Ahmed dans le Pré-Rif marocain.

Cette carte (figure 2) d'un format hors tout 60 x 40 cm a été réalisée en utilisant la même technique que celle de la carte de l'occupation du sol. Toutefois, toutes les classes sont représentées en aplat et les pertes en sédiments transportés jusqu'au cours d'eau sont données uniquement pour le bassin versant de l'Oued Tasrafete. La division en huit classes de perte de sol a été réalisée de manière à ce que toutes les classes aient un effectif de même ordre de grandeur.

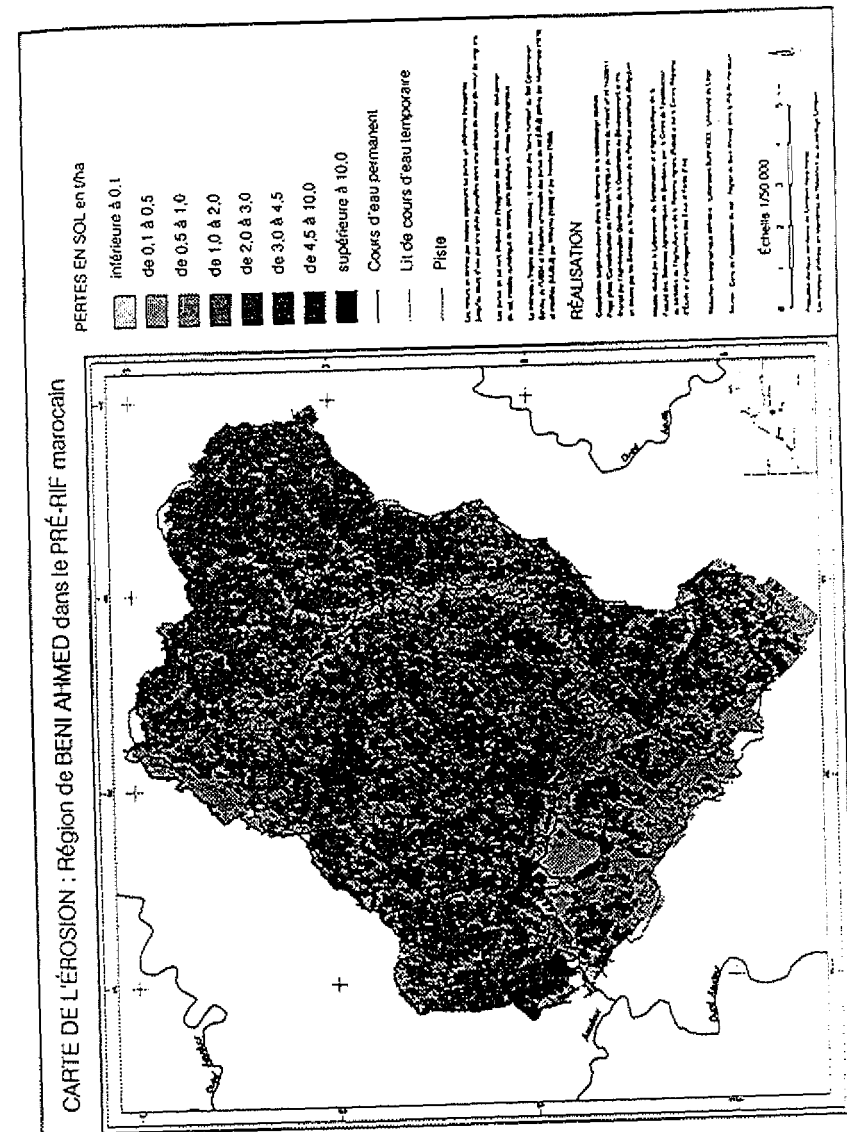


Figure 2 : Réduction de la carte de l'érosion de la région de Béni Ahmed.

CONCLUSION

L'emploi d'images satellitaires et de cartes dans un système d'information géographique, couplé à l'utilisation de modèles hydrologiques, permet d'évaluer le ruissellement, la perte en soi et son transport jusqu'au cours d'eau. La manipulation de ces données par les logiciels de traitement d'images et de cartographie facilite grandement l'analyse de la variation spatiale et temporelle des caractéristiques hydrologiques du bassin versant. De telles données ne remplacent évidemment pas les levés précis et détaillés réalisés sur le terrain, mais peuvent servir d'aide aux aménageurs et aux décideurs pour orienter les efforts en matière de lutte anti-érosive de manière à rendre ceux-ci plus efficaces et suffisamment rentables.

BIBLIOGRAPHIE

- Arnold J-3., Williams J-R., Nicks A-D. and &arrimons N.B., (1989). *SWRRB, a basin scale simulation mode! for soil and water resources management*. Texas A&M University Press, Temple.
- Engman E.T. (1983). *Roughness coefficients for routing surface runoff*. Proc. ASCE Speciality Conf. Frontiers of Hydraulic Eng.
- F.A.O. (1977). *Erosion et aménagement des bassins versants dans les pays méditerranéens*. Terre, Eaux et Hommes, N°30, vol 9, pp. 27-45.
- Hession W.C., et Shanoltz V.O., (1988). *A geographic information system for targeting nonpoint-source agricultural pollution*. Journal of soil and water cons., may-june, pp. 264-266.
- Heush B., (1970). *Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique*. Soc. Sci. Nat. Phys. Maroc, pp. 41-54.
- Mokadem A., Dautrebande S.. (1989). *Characterisarion of watersheds by integration of remote sensing and cartographie digital data*. International Conference on Friends in Hydrology, Dolkejo, Norway. IAHS Publ. n°187, FRIENDS in Hydrology, pp. 147-152.
- Mokadem A., Oropeza M., Dautrebande S., (1990). *Intégration des données cartographiques numérisées et de l'imagerie satellitaire en vue de la caractérisation des bassins versants*. Proc. Symposium S.P.P.S. Programme de Recherche Scientifique dans le domaine de la Télédétection Spatiale, Bruxelles. SPPS publ., pp. 135-157.
- USDA, Sol Conservation Service, (1972). *National Engineering Handbook, Hydrology Section 4*, chap. 4-10.
- Williams J-R., Nicks A-D. and Arnold J-G., (1985). *SWRRB, a Simulator For Water Resources in Rural Bassins*. Journal of Hydraulic Engineering 111(6), pp. 970-986.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide ta conservation planning*. USDA Agric. Handbook n°537. 58 pp.