Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p 69-80

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

ANALYSE SPATIALE DE L'ÉROSION EN NAPPE ET DE L'INFILTRABILITÉ DES SOLS DANS LE PRÉ-RIF MAROCAIN

ABDELKADER EL GAROUANI[a,1], ABDELAZIZ MERZOUK[b,2], RAOUF JABRANE[a] et MOHAMED RACHED BOUSSEMA[c,3]

[a] *Laboratoire de géologie des ressources naturelles et environnement, Faculté des sciences et techniques de Fès, route d'Imouzzer, B.P. 2202, Fès, Maroc*
Téléphone : (212) 55 60 29 53; télécopieur : (212) 55 60 82 14

[b] *Laboratoire de conservation des eaux et du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (IAV), Allal Al Fassi, B.P. 6202, Rabat, Maroc*
Téléphone/télécopieur : (212) 37 77 12 85

[c] *Laboratoire de télédétection et système d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis (ENIT), Tunis-Bévédère, 1002, Tunisie*
Téléphone : (216) 1 87 47 00 ; télécopieur : (216) 1 87 27 29

Courriel [1,2,3] : el_garouani@yahoo.fr ; merzouk@mtds.com ; Rached.Boussema@enit.rnu.tn

(soumis : 25 mars 2004 ; révisé : 26 mai 2004 ; accepté 14 juillet 2004)

Le diagnostic des risques de ruissellement et d'érosion sur un bassin versant exige une bonne compréhension du comportement hydrodynamique des sols et, en particulier, l'origine de la naissance du ruissellement et la capacité d'infiltration du sol en fonction de ses états de surface et des types de sols. L'étude des processus d'érosion présente un intérêt considérable en vue d'une utilisation optimale et durable des sols. Le présent travail consiste en la cartographie de l'occupation du sol, en l'évaluation de l'érosion hydrique et en l'étude de l'infiltration dans le bassin versant de l'oued Jemaa dans le Pré-Rif Marocain. Pour ce faire, nous avons utilisé des données de la télédétection spatiale et un système d'information géographique (SIG). Les résultats de l'évaluation de l'érosion et de la mesure de l'infiltration mettent en évidence les effets de la structure du sol, du type d'occupation du sol et des types de sol sur les transferts de l'eau et les conséquences sur le transport solide. Des corrélations significatives (R^2 = 0,70 à 0,90) ont été observées entre la capacité d'infiltration et certaines caractéristiques du sol (teneur en sable, porosité et densité apparente) et les états de surface. Les expérimentations sur le terrain (mesure d'infiltration) confirment les estimations des pertes en sol données par le modèle USLE (équation universelle de perte de sol).

Mots-clefs : érosion hydrique ; infiltration ; état de surface ; télédétection ; Pré-Rif Marocain ; Maroc.

SPATIAL ANALYSIS OF SHEET EROSION AND SOIL INFILTRABILITY IN MOROCCAN PRE-RIF

Diagnosis of runoff and erosion hazard in a watershed requires a good understanding of the soil hydrodynamic behavior, particularly the runoff origin and the soil infiltration capacity according to landuse and soil type. The survey of the erosion processes offers a great interest for optimal and sustainable sol use. The main part of this study is to achieve a landuse/landcover mapping to assess the water erosion and to identify the soil infiltration in the Oued Jemaa watershed in the Moroccan Pre-Rif by using the spatial remote sensing data and the geographical information system (GIS). The results of the erosion mapping and the infiltration measurements reveal the importance of soil structure, land use/land cover, field labour manner and of soils types on the water transfers and the consequences on the soil losses. The analysis of field permeability data shows a clear correlation (R^2 = 0,70 to 0,90) with soil loss, soil texture, percent vegetation cover, landuse and field labour manner. Indeed, the measurements of infiltration confirm the assessments of the soil losses data derived by the USLE model.

Keywords : water erosion ; infiltration ; land cover ; remote sensing ; Moroccan Pre-Rif ; Morocco.

1. INTRODUCTION

La cartographie et la mesure des phénomènes d'érosion fournissent les bases de l'évaluation des causes, de l'état actuel, de l'intensité et des tendances de l'érosion (PAP/CAR, 1998). Les impacts de l'érosion sur les ressources en sol et en eau, les activités économiques (particulièrement l'agriculture) et l'environnement, ainsi que les conséquences sociales, revêtent une importance primordiale dans de nombreuses régions du Maroc (Benyelloul, 1985 ; Laouina *et al.,* 2000 ; Merzouk and Blake, 1991). En conséquence, l'évaluation de l'érosion fait partie intégrante du processus de gestion intégrée de ces ressources. Plusieurs travaux ont été consacrés à la compréhension et à la prévision des processus d'érosion hydrique dans les reliefs méditerranéens (Clark, 1999 ; Mazour, 1992 ; Mhiri, 2001 ; Nasri *et al.,* 1997 ; Touaibia *et al.*, 2000). Au Maroc, plusieurs chercheurs ont

essayé des approches plus simples, fondées sur le modèle empirique américain de l'équation universelle de perte de sol (USLE) et sur l'évaluation d'indicateurs mesurables, pour la qualification du comportement hydrologique et de l'érodibilité des sols. Ils ont montré que la production de ruissellement d'un sol est fortement liée aux caractéristiques physiques de son état de surface et à sa couverture végétale (Al Karkouri *et al.*, 2000 ; Anis *et al.*, 1994 ; Sabir *et al.,* 2004). L'étude des risques de ruissellement et d'érosion sur un bassin versant exige une bonne compréhension du comportement hydrologique du sol et, en particulier, de la capacité d'infiltration qui dépend de ses états de surface et des types de sols (Coutadeur *et al.*, 2002 ; Desprats *et al.*, 2003 ; Dimanche and Hoogmoed, 2002).

Le présent travail consiste en la cartographie de l'occupation du sol, en l'évaluation de l'érosion et en l'étude de l'infiltration dans le bassin versant de l'oued Jemaa dans le Pré-Rif Marocain. Pour expliquer les différences de ruissellement et de pertes en terre observées entre les types de sol, nous avons recherché l'existence d'éventuelles relations entre la capacité d'infiltration, les pertes en sol et les caractéristiques du sol. On constate que la quantité de sol érodée augmente avec le régime et la vitesse de ruissellement. À cet égard, la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des sols est fondamentale pour l'aménagement des sols sensibles à l'érosion hydrique. La capacité d'infiltration est un terme clef et son évaluation, même relative, permet de donner une idée sur le ruissellement en surface ainsi que sur les dangers d'érosion qui s'en suivent (Roose, 1996 ; Smith and Leopold, 1942).

La mesure de l'infiltration en un point donné du bassin versant est une opération relativement aisée, mais la difficulté réside dans le fait de chercher l'infiltration qui caractérise l'ensemble du bassin, car celui-ci est très hétérogène de point de vue perméabilité. C'est pourquoi il faut faire beaucoup de mesures. Par ailleurs, si les mesures par simulateur de pluie présentent l'avantage d'être proches d'une pluie réelle, elles s'avèrent difficiles à mettre en œuvre dans un temps restreint sur un nombre relativement élevé de points (Morsli et Meddi, 2002 ; Kalman, 1970). De ce fait, l'infiltromètre à double anneau (type Müntz) a été choisi dans un premier temps pour faire le nombre de mesures nécessaire (Boivin *et al.*, 1987 ; Mathieu *et al.*, 2000). Il permet de déterminer l'infiltration de l'eau dans le sol de façon très locale (surface de 100 cm^2) et les données devront être complétées ultérieurement par des mesures avec un simulateur de pluie sur des sites judicieusement choisis à partir des résultats de cette étude.

Par ailleurs, l'utilisation de la télédétection permet d'obtenir les informations sur l'occupation du sol et le potentiel de ruissellement, paramètre hydro-logique de base de processus de l'érosion hydrique (Anis, 1991 ; Cyr *et al.,* 1995). Le SIG est utilisé pour spatialiser le modèle ponctuel d'évaluation de l'érosion et pour l'intégration des différentes informations et la cartographie des résultats (Bonn, 1998 ; Dhman, 1994).

2. MATÉRIÉL ET MÉTHODE

Comme il a été évoqué en introduction, le présent travail est basé essentiellement sur la cartographie de l'occupation du sol, l'évaluation de l'érosion hydrique et l'étude de l'infiltration du sol dans le bassin versant de l'oued Jemaa. Pour atteindre ces objectifs, nous avons poursuivi les étapes de la méthodologie adoptée et schématisée sur la figure 2, après avoir donné un apercu sur le terrain d'étude.

2.1. Région d'étude

Le bassin versant de l'oued Jemaa s'étend sur une superficie de 120 km^2 et appartient administrativement à la commune rurale de l'oued Jemaa qui est dans la province du Taounate. Il est limité au nord par le bassin de l'oued Ouergha, à l'est par celui de Lanasara, à l'ouest par celui du Sebou et limité au sud par l'oued Lebene (figure 1). La région est caractérisée par un climat méditerranéen sub-humide, induisant une répartition irrégulière des pluies dans l'espace et dans le temps. La saison des pluies s'étale en général d'octobre à avril. Ces conditions climatiques sont favorables pour l'intensification des travaux agricoles. Du côté géologique, la zone est constituée par des formations argilo-marneuses avec des pointements gréseux. Le réseau hydrographique est très développé à cause de la nature tendre du substratum marneux et de l'importance du ruissellement (D.P.A., 1994 ; Gartet, 1994).

2.2. Méthodologie

La méthodologie consiste en l'intégration et en la représentation des informations cartographiques et descriptives des composantes du milieu naturel dans un SIG en vue d'étudier le comportement hydrodynamique et érosif des sols. Ainsi, nous avons créé une base de données à références spatiales contenant des informations qualitatives et quantitatives nécessaires sur le bassin versant étudié (figure 2). Pour mettre en œuvre cette méthodologie, nous avons procédé par :

– la cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol en utilisant les données de la télédétection ;

– l'application du SIG pour l'évaluation et la cartographie de l'érosion hydrique ;

– l'étude de la capacité d'infiltration des sols et sa relation avec le processus d'érosion.

2.2.1. Utilisation des données spatiales pour la cartographie de l'occupation du sol

Les données de télédétection utilisées dans ce travail sont : une image HRV de SPOT (prise le 02-10-1997) et deux images ASTER de TERRA (prises le 29-09-2002 et le 28-01-2003). Ces données sont analysées par le logiciel de traitement d'images ERDAS/Imagine.

Ces images sont géoréférencées selon la projection conique conforme de Lambert et calées selon le système de coordonnées de référence de la zone Merchich nord (système du nord du Maroc). Ces prétraitements géométriques ont permis l'intégration des images satellitaires dans le SIG.

L'élaboration de la carte d'occupation du sol est effectuée par un traitement combiné qui comprend deux étapes : une photo-interprétation suivie d'une classification dirigée par le maximum de vraisemblance. Les thèmes sont définis en fonction des caractéristiques du sol, de la végétation et de l'utilisation agricole des parcelles de référence observées sur le terrain.

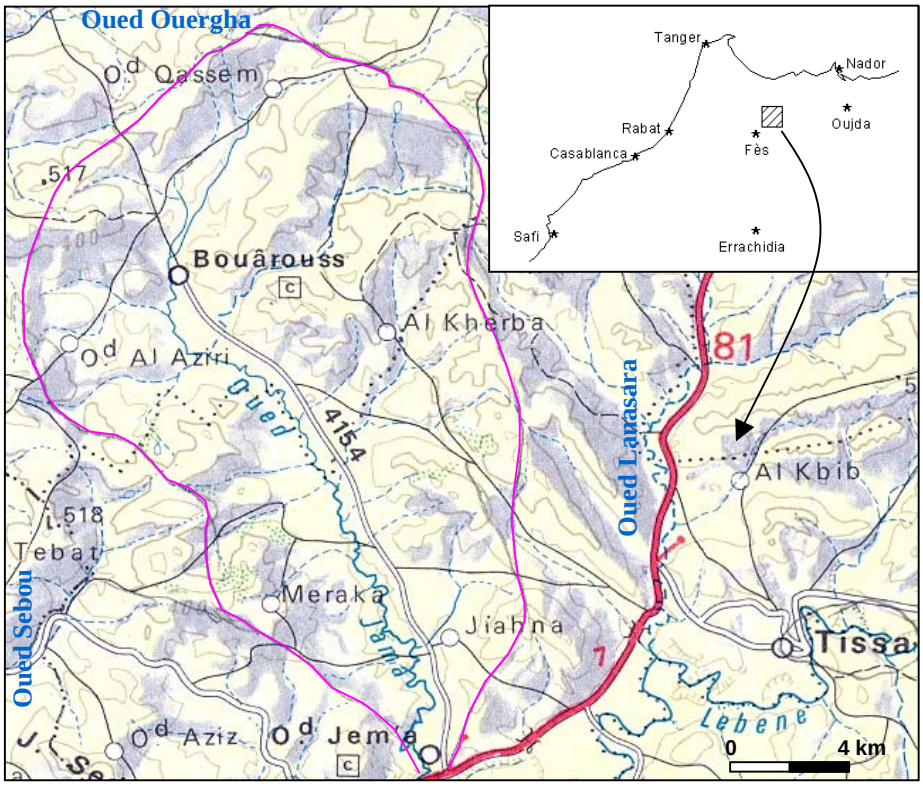


FIGURE 1 Localisation de la région d'étude. *Geographic situation of the study area.*

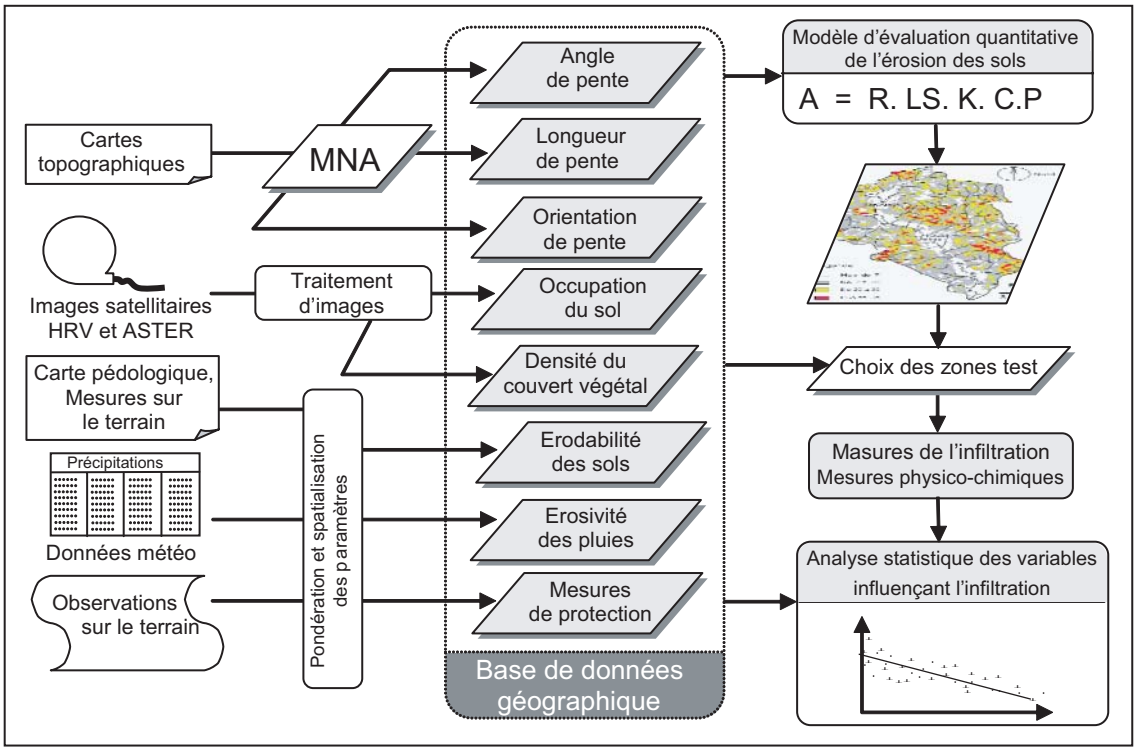


FIGURE 2 Representation schématique de la méthodologie adoptée. *Schematic representation of methodology used.*

2.2.2. Cartographie de l'érosion hydrique des sols

Dans des travaux antérieurs, nous avons analysé le processus de l'érosion hydrique du sol du point de vue qualitatif en utilisant les données de télédétection (El Garouani *et al.*, 2001 et 2003a). La phase suivante du projet est consacrée à l'aspect quantitatif de l'érosion en utilisant un modèle de simulation des pertes en sol sur tout le bassin versant (El Garouani *et al.,* 2003b).

La modélisation du processus de l'érosion hydrique dans la région d'étude a été effectuée en utilisant l'équation universelle de perte de sol (USLE) dans sa version adaptée par Kalman (1967) aux conditions marocaines. Le modèle empirique USLE est intégré dans le SIG Idrisi, pour l'estimation quantitative de l'érosion hydrique. Ce modèle, réunit les facteurs ayant une incidence sur l'importance de l'érosion et se présente comme suit :

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

où :
A = taux de perte en sol (t/ha/an),
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 sol en un endroit donné. Voici la façon dont ces facteurs ont été déterminés.

A) Facteur topographique (LS)

Il est évident 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 détermination de la longueur et du degré de pente pour une utilisation dans des modèles d'érosion se fondent sur des mesures longues et difficiles sur le terrain et jugées souvent imprécises. Avec le développement des SIG, plusieurs chercheurs ont mis au point des outils basés sur le modèles numériques d'altitude (MNA) pour déterminer le facteur topographique LS (Hickey *et al.,* 1994 ; Van Remortel *et al.,* 2001). Dans notre étude, 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 est utilisé avec le logiciel Idrisi.

B) Facteur de protection du sol par la couverture végétale (C)

Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal ou de résidus. Les résidus de culture et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie, tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration (Bannari et al. 1999 ; Cyr et al., 1995). Une approche par classification dirigée des images HRV et ASTER a été appliquée pour déterminer la carte de l'occupation du sol. En plus, par des opérations de seuillage de l'indice de végétation (NDVI), on a établi la carte de densité de couvert végétal (El Garouani et al., 2001). Ce type de carte est utilisé pour en déduire le facteur de protection du sol par la couverture végétale (facteur C). En effet, par analogie à partir des travaux de Heusch (1970) et de Kalman (1967) dans la région, on a attribué, à chacune des cultures et utilisation du sol, des valeurs de facteur C.

C) Autres facteurs (K, R, et P)

À 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 mesures directes de ce paramètre, par analogie à partir des travaux de Heusch (1970), on a attribué pour chaque type du sol des valeurs d'érodabilité (K).

L'évaluation de l'indice R est basée sur la formule de Kalman (1970) qui tient compte les précipitations moyennes annuelles (P) et la moyenne des précipitations maximales en 24 heures pour une période de retour de 20 ans (P_{24}) et s'écrit sous la forme :

$$R = 143 \log (P \cdot P_{24}^{2} \cdot 10^{-6}) + 89{,}7$$

Cette formule a été appliquée dans le modèle adopté pour le projet de Sebou et celui de l'aménagement du barrage Al-wahda (MAMVA, 1992).

En absence des pratiques anti-érosives, on a attribué au paramètre P la valeur 1.

En fin, on a procédé à la spatialisation de ces facteurs en utilisant les techniques du SIG. 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 l'USLE représentent les pertes en sol avec plus de précision (Stone et Hilborn, 2000). Pour la validation des résultats du modèle d'évaluation d'érosion, on a procédé à l'étude de la capacité d'infiltration des sols.

2.2.3. Étude de l'infiltration du sol

En vue de simuler le comportement hydrodynamique des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique, nous avons procédé par la détermination, sur le terrain, des taux d'infiltration des sols sous différents types d'occupation du sol. Une approche similaire a été suivie pour la détermination des facteurs qui agissent sur la capacité d'infiltration.

La mesure de perméabilité du sol est faite in situ par la méthode des doubles anneaux dite de Müntz (Boivin *et al.,* 1987 ; Mathieu *et al.,* 2000). Elle consiste à déterminer, sur le terrain, la vitesse d'infiltration de l'eau sous une charge constante de 3 cm pour maintenir une saturation et une alimentation suffisante en eau du sol. Cette charge constante est établie à l'intérieur d'un cylindre métallique de mesure de 11,2 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur enfoncé de 6 cm dans le sol. Aussi, autour du cylindre de mesure, on maintient une charge identique dans un cylindre de garde (32 cm de diamètre et 15 cm de hauteur) concentrique dont le rôle est d'assurer l'humectation latérale parasite du sol et, par conséquent, de permettre d'assimiler le débit du cylindre de mesure à une infiltration cylindrique verticale. La mesure consiste à tracer la courbe de la quantité infiltrée en fonction du temps d'arrosage. Ce test est poursuivi jusqu'à ce qu'on obtienne une vitesse d'infiltration stable.

Nous avons effectué 21 tests d'infiltration sur différents types du sol et sur différentes occupations et utilisations du sol. En laboratoire, on a analysé les propriétés physico-chimiques des échantillons récoltés sur le terrain. Chaque échantillon du sol a fait l'objet d'un certain nombre de préparations avant d'être analysé, soit : la pesée à humide, le séchage à l'étuve et le tamisage à l'eau. Les analyses physiques portent sur la texture (granulométrie), alors que les analyses chimiques concernent la détermination du taux de la matière organique. Ensuite, des analyses par régression ont été effectuées pour identifier les paramètres du sol, de la couverture végétale et de la topographie, lesquels ont un effet sur la perméabilité des sols. Les points de tests considérés pour la validation du modèle sont différents de ceux pris pour l'apprentissage.

3. RÉSULTATS

La connaissance du milieu physique s'est traduite par la réalisation d'une base de données regroupant les paramètres qui caractérisent le milieu

(occupation du sol, modèle numérique d'altitude, hydrographie, pédologie, géologie, paramètres météorologiques, *etc.*) (figure 2). Le résultat des différents traitements d'images de télédétection a mis en évidence une carte d'occupation du sol à jour (figure 3). Cinq classes d'occupation du sol sont identifiées dans le bassin versant pendant la période de prise de vue. On constate que la quasi-totalité du bassin est occupé par des terrains de cultures et de parcours, les zones de relief sont plantées d'oliviers ou occupés par des terrains incultes (parcours).

L'utilisation du modèle USLE a permis l'évaluation des pertes en sols dans le bassin versant de l'oued Jemaa (figure 4). Les pertes en sol calculées dans la région varient de 1 à 264 t/ha/an avec une moyenne pondérée de 28 t/ha/an. 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). Sur la figure 4, on remarque l'importance de l'érosion dans le bassin versant de l'oued Jemaa. Environ 8 % de la surface totale de la région est affectée par une perte en sol supérieure à 35 t/ha/an. Les secteurs les plus touchés correspondent aux zones de fortes pentes (> 22 %) avec un couvert végétal dégradé. Dans les endroits de faible pente généralement réservés pour les céréalicultures, l'érosion est faible à moyenne et peut être maîtrisée par l'amélioration des techniques culturales.

Après avoir effectué la cartographie de l'érosion sur tout le bassin par télédétection, nous avons identifié des zones test pour effectuer des mesures d'infiltration. Cette opération est destinée à valider le modèle. En effet, les mesures de perméabilité faites sur le terrain montrent une bonne corrélation avec ces caractéristiques. D'autre part, l'état de surface (densité du couvert végétal exprimé en terme d'indice de végétation normalisé NDVI) et le degré de pente sont fortement corrélés par rapport au taux de perte en sol (figure 5).

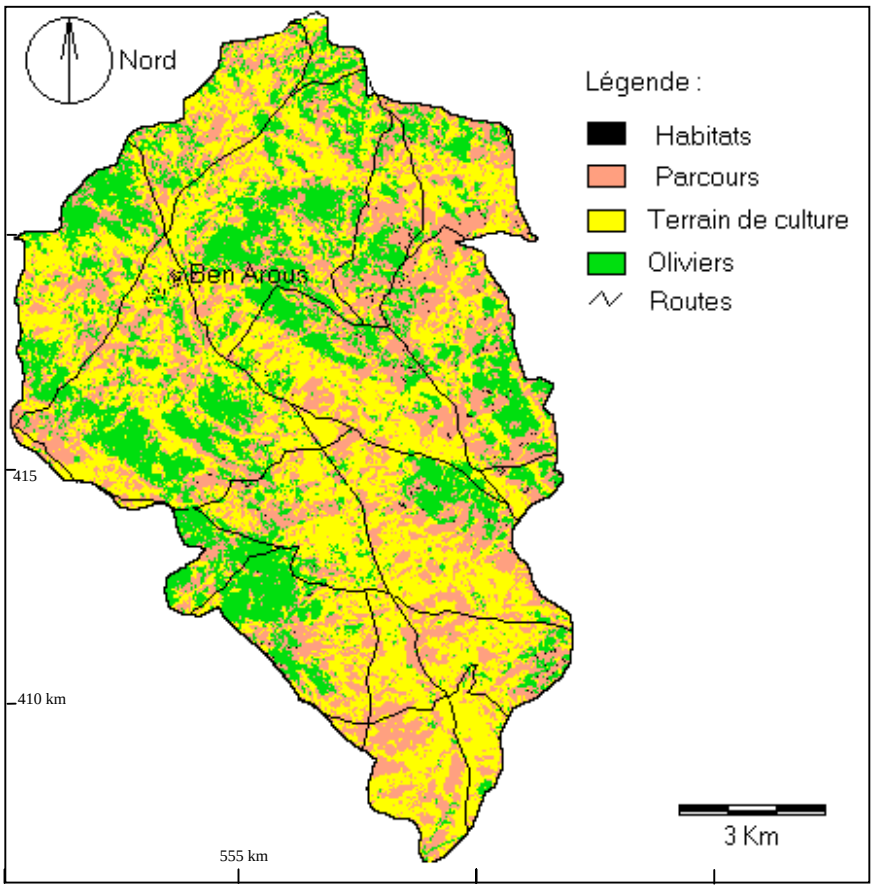


FIGURE 3 Répartition des états de surface établie à partir des données de la télédétection. *Land use map established from remote sensing data.*

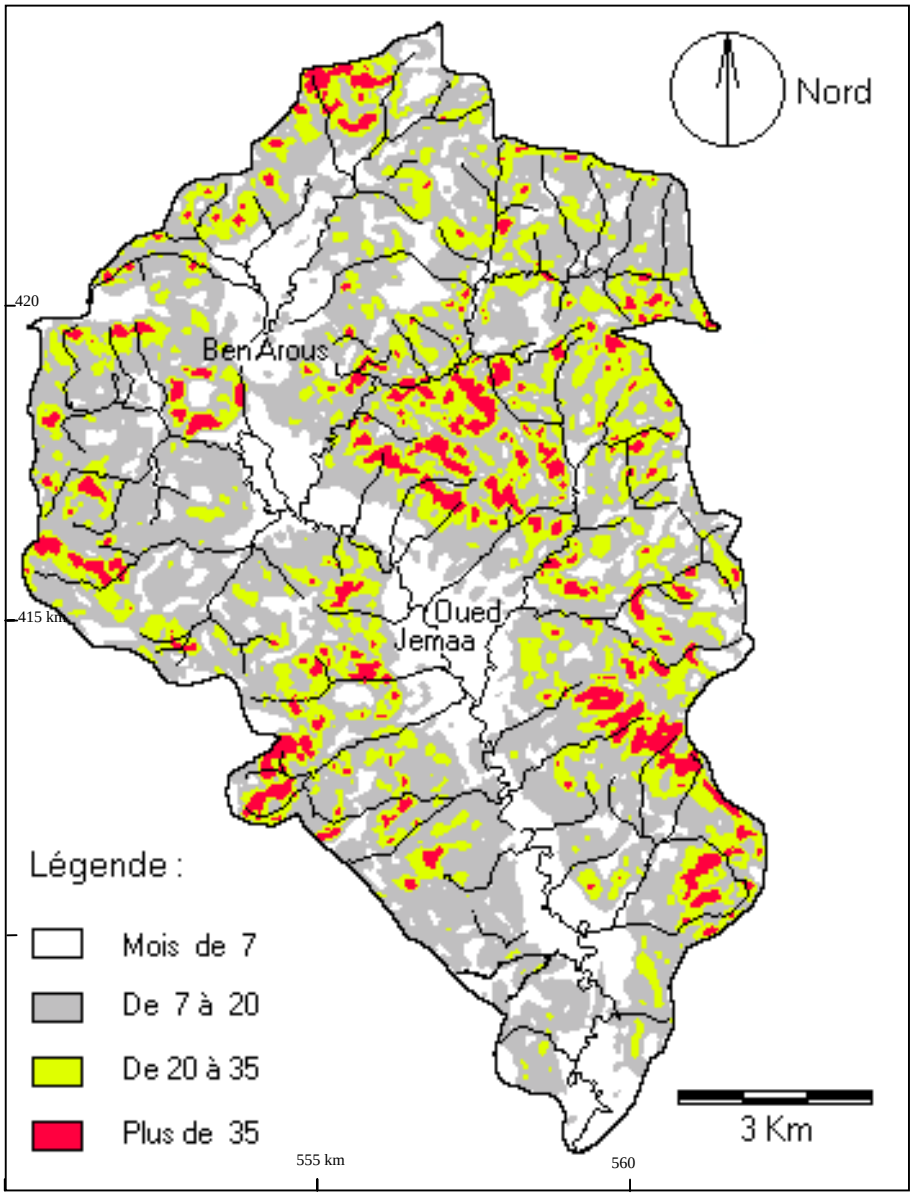


FIGURE 4 Répartition des pertes en sol moyennes annuelles (t/ha/an). *Map of mean annual soil losses (t/ha/an).*

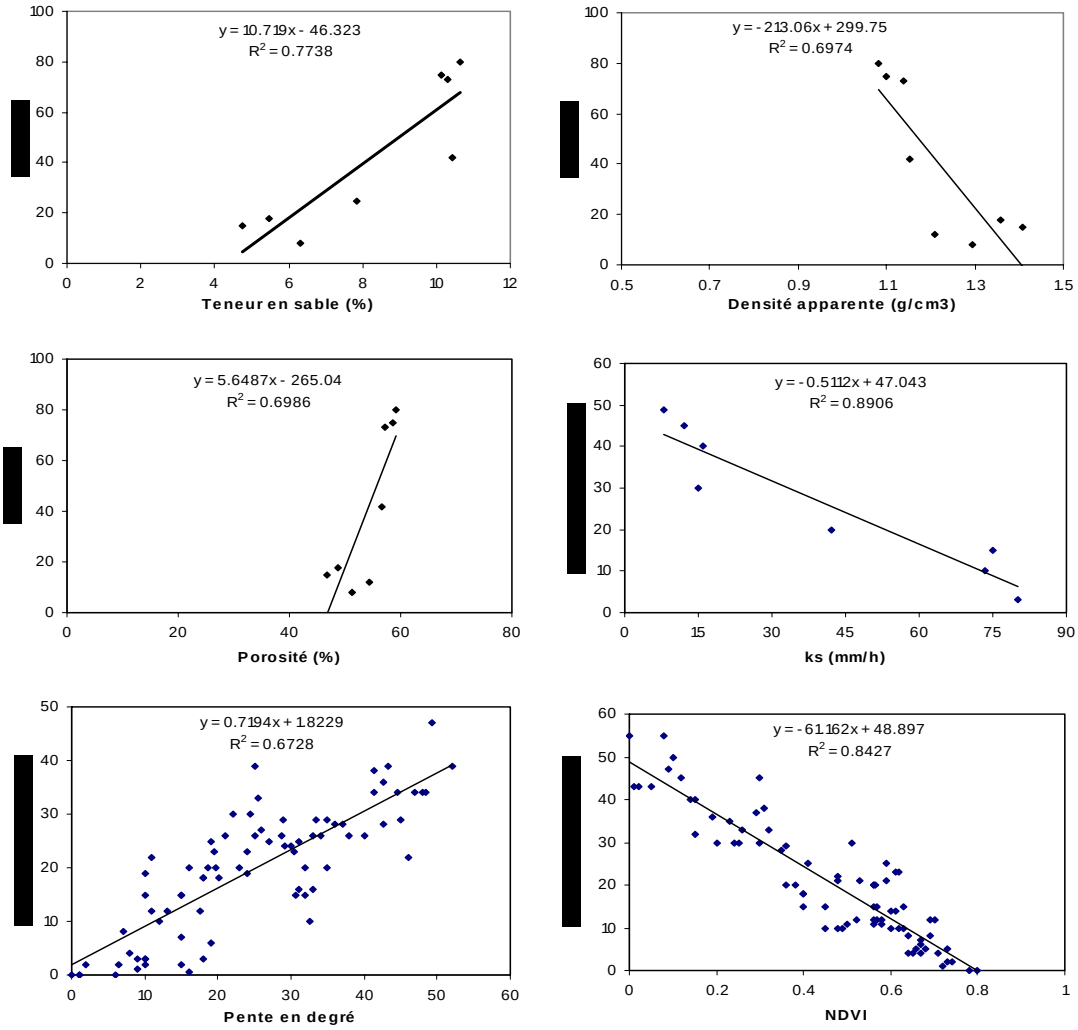


FIGURE 5 Analyse statistique des variables influençant la capacité d'infiltration et l'érosion des sols. *Statistical analysis of the variables influencing infiltration capacity and soil erosion.*

4. DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'utilisation des images satellitaires s'est avérée essentielle pour la cartographie des états de surfaces et de la densité du couvert végétal, qui sont des informations utiles pour le modèle de calcul d'érosion hydrique. 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. La cartographie des risques, 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. L'analyse des mesures effectuées, sur le terrain, de l'infiltrabilité des sols montre des résultats contrastés. Pour expliquer la variabilité spatiale du processus de ruissellement, l'observation des caractéristiques des sols ainsi que la densité du couvert végétal fournissent de bonnes réponses. Ainsi, la densité apparente, la texture (teneur en sable) et la porosité ont permis d'expliquer la variation de l'infiltration (ks). Il apparaît aussi que le piétinement du bétail et le surpâturage modifient la structure du sol (fermeture des pores, tassement, *etc.*) en rendant plus aisé le ruissellement.

4.1. Texture du sol

La texture est un facteur important qui affecte le comportement hydrologique du sol. Ainsi, les données d'infiltration pour plusieurs types du sol dans des terrains d'occupations variées montrent que la vitesse d'infiltration peut être grossièrement corrélés avec la texture des sols (Sabir *et al.* 2004). Les études de corrélation entre les propriétés hydrodynamiques des sols (capacité d'infiltration) et la texture du sol, d'une part, et les paramètres relatifs à l'état de surface (densité apparente, teneur en matière organique, humidité relative du sol), d'autre part, ont montré que le comportement hydrodynamique du sol est fortement lié à son état de surface (figure 5). En effet, le taux d'infiltration est nettement corrélé aux caractéristiques des états de surface et à la teneur en sable de l'horizon superficiel. En revanche, nous n'avons pas trouvé de corrélation significative entre le taux d'infiltration et la teneur en matière organique. Sabir *et al.,* 2004 ont évoqué, par contre, des corrélations importantes entre l'infiltration et la matière organique dans le Rif Occidental. Pour l'ensemble de ces sols, la teneur en sable est le paramètre le plus lié à la capacité d'infiltration ($R^2 = 0,77$). Ces constatations ont été bien confirmées par les analyses en laboratoire qui ont permis de constater que la structure du sol est bonne, aérée et avec une teneur en sable considérable.

4.2. Couverture végétale

La couverture végétale est un facteur important en aménagement des bassins versants. Elle assure une protection du sol contre l'effet de la pluie. La densité de la végétation a aussi un rôle important sur la réduction de ruissellement et du taux d'évaporation ainsi que sur l'augmentation de la capacité de rétention du bassin (Mazour et Roose, 2002). Outre les corrélations avec la texture de la partie supérieure du sol et la capacité d'infiltration, une forte corrélation inverse apparaît pour tous les types du sol entre da densité de couverture du sol exprimée en terme d'indice de végétation normalisé (NDVI) et les variables de pertes en sol. On peut facilement expliquer ces corrélations par l'effet protecteur de la couverture du sol contre l'énergie cinétique des gouttes de pluie (Cyr *et al.*, 1995 ; Mazour et Roose, 2002). En effet, on a constaté que le sol sous un couvert d'oliviers absorbait de 2 à 5 fois plus d'eau que le sol nu. D'autre part, il apparaît nettement que le piétinement du bétail et la dégradation de la strate végétale modifient la structure du sol (fermeture des pores, tassement, *etc.*) en rendant plus facile le ruissellement. En revanche, sur quelques versants, la dégradation de la végétation et des sols entraîne une forte pierrosité de surface qui freine à présent le ruissellement et l'érosion en dispersant l'énergie cinétique des pluies et en favorisant l'infiltration. Les débris végétaux et les résidus de cultures constituent la source essentielle de la matière organique. Cette litière est décomposée par l'activité biologique. Elle donne naissance à des éléments minéraux solubles ou gazeux et à l'humus. L'humus permet l'édification d'une structure aérée et résistante aux processus de dégradation.

4.3. Facteurs reliés à l'utilisation des terres

Dans cette section, l'accent est mis sur l'effet de pâturage et l'effet des opérations de labour sur l'infiltration. Le pâturage entraîne une réduction du couvert végétal et expose le sol aux agents climatiques. Quand l'herbe est coupée et la litière enlevée, les vitesses d'infiltration sont réduites à cause de la perte de la protection en surface. Par contre, le labour dans le sens des courbes de niveau augmente la capacité d'infiltration des sols (Traoré *et al.,* 2002 ; Tribak, 2002).

Dans les parcelles soumises à un système de culture, la couche de sol travaillée joue un rôle particulièrement important dans le cycle de l'eau (Blave *et al.*, 2004). La couche de sol travaillée, riche en matière organique et en micro-organismes, colonisée par le système racinaire du peuplement végétal cultivé, est par ailleurs le siège de nombreux échanges qui conditionnent l'évolution de la composition chimique des eaux d'infiltration (Hien *et al.,* 2002).

4.4. Conclusion

Il ressort de cette approche (combinant les traitements de l'imagerie satellitaire et les données pédologiques et climatiques dans un SIG), que l'érosion en nappe et le ruissellement restent généralement faibles (moins de 8 % de la surface totale de la région est affectée par une perte en sol supérieure à 35 t/ha/an) : elle confirme des résultats obtenus par plusieurs auteurs dans des régions Rifaines (Ait Brahim *et al.,* 2003 ; Dhman, 1994 ; MAMVA, 1992). Même si cette érosion reste modérée, elle est à l'origine de la dégradation des terres et commence dès le défrichement. Elle doit donc être traitée par l'adaptation des systèmes de production (Roose, 2004). On peut donc tenter de maîtriser le ruissellement et l'érosion en améliorant le mode de travail des terres. Les mesures sur ravines, encore plus rare dans la région, sont aussi intéressantes, car elles intègrent l'évolution du ruissellement tout le long du versant (Naimi *et al.,* 2003). Les mesures des débits liquides et solides à

l'échelle des bassins exigent des moyens lourds, et la validité de chaque méthode d'évaluation de l'érosion est limitée par des contraintes et par les effets d'échelle.

À partir de ces résultats, et en fonction de la perméabilité de différents types des sols étudiés, trois classes de risque à l'érosion basées sur le regroupement des différentes formations géologiques et pédologiques ont été identifiées :

– zone peu affectée par l'érosion caractérisée par des sols perméables (sols modaux avec des taux d'infiltration supérieurs à 40 mm/h) ;

– zone moyennement affectée où il y à des sols modaux localement érodés ou vertisols avec des taux infiltration compris entre 20 et 40 mm/h ;

– zone a risque élevé où on trouve des sols moins perméables (vertisols érodés avec affleurement local présentant des taux infiltration inférieurs à 20 mm/h).

Le découpage des limites 20 et 40 mm/h est déduit à partir de la confrontation des résultats des essais d'infiltration, des valeurs des pertes en sol et de la carte pédologique.

5. CONCLUSION

L'information satellitaire s'est avérée fondamentale pour évaluer et cartographier les états de surfaces vis-à-vis de l'érosion hydrique. Elle offre la possibilité d'identification, de localisation et de classification des grands ensembles d'occupation et d'utilisation du sol afin de les cartographier. 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. La cartographie des risques, 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. Les résultats de l'opération de la cartographie de l'érosion et la mesure de l'infiltration mettent en évidence l'importance de la structure du sol, de type d'occupation du sol, du mode de travail des terres et des types des sols sur les transferts de l'eau et les conséquences sur les pertes en sols. L'analyse des mesures de perméabilité faites sur le terrain montre une bonne corrélation avec le type d'occupation des sols, le mode de travail des terres, les formations géologiques et plus précisément les types des sols. Les expérimentations sur le terrain (mesure d'infiltration) confirment les estimations des pertes en sol données par le modèle USLE. Enfin, bien que la lithologie marneuse de bassin versant étudié laisse suggérer une grande sensibilité à l'érosion hydrique, l'action érosive est d'autant plus accentuée que lorsque le sol est en jachère ou en parcours et non protégé par une couverture végétale.

À la lumière de ces résultats, on peut suggérer certaines recommandations et propositions qui peuvent améliorer la qualité de drainage et d'infiltration des différentes unités du bassin versant de l'oued Jemaa et, par la suite, diminuer le ruissellement et l'érosion :

– encourager la population à la pratique de l'arboriculture, surtout sur les versants de forte pente, qui offre la possibilité de conservation des sols et des eaux ;

– sensibiliser la population contre certaines méthodes d'exploitation inadéquates (labour dans le sens de la pente) ;

– mise en place des aménagements sylvo-pastorales qui visent à augmenter la production fourragère des espèces pastorales, et cela afin de mieux gérer l'exploitation pastorale dans la région.

Bien que la méthode utilisée soit fondée sur une approche qualitative, sa pertinence a pu être justifiée lors de plusieurs travaux dans des régions méditerranéennes. Elle est cependant destinée à évoluer grâce à la poursuite d'expérimentations qui vont permettre de mieux caractériser les critères de diagnostic. En outre, pour améliorer les résultats de cette étude, nous formulons les perspectives de recherche suivantes :

– d'autres études semblables doivent être faites mais avec le simulateur de pluie qui donne des résultats proches de la réalité ;

– tenir compte de l'érosion par ravinement et essayer de l'intégrer dans un modèle global des pertes en sol ;

– faire des mesures à l'échelle de la parcelle et étudier le phénomène dans son contexte naturel au niveau du paysage et du bassin versant, pour mieux identifier la nature des risques liés au ruissellement et préconiser une solution adaptée au problème.

Remerciements

Le présent travail a pu être mené grâce à l'appui financier de l'Agence Universitaire de la Francophonie (Réseau Télédétection) sous forme d'une action de recherche en réseau. À cet effet, nous présentons nos remerciements aux responsables de l'AUF. Nous remercions également messieurs Ferdinand Bonn, de l'Université de Sherbrooke, ainsi que Yves Auda et François Blasco, de l'Université Paul-Sabatier, pour leurs remarques et suggestions au cours de l'évaluation de cet article.

Références

Ait Brahim, L., Sossey Alaoui, F., Siteri, H. et Tahri, M. (2003) Quantification des pertes en sols dans le bassin versant Nakhla (Rif septentrional). Sécheresse, vol. 14, n°2, p. 101-106.

Al Karkouri, J., Roose, E., Laouina, A. et Sabir, M. (2000) État de surface, infiltration et risque d'érosion dans la vallée de Beni Boufrah. Bulletin du Réseau Érosion, n°20, p. 342-356.

Anis, H. (1991) Utilisation des données de télédétection dans SIG pour l'étude de l'érosion hydrique du bassin versant d'oued Aricha (Settat, Maroc). Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 83 p.

Anis, H., Bonn, F. and Merzouk, A. (1994) Remote sensing and GIS based mapping and modeling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. Geocarto International, vol. 9, n°1, p. 31-40.

Bannari, A., Haboudane, D. et Bonn, F. (1999) Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents. Proceeding of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition and 21st Canadian Symposium of Remote Sensing, 21-24 juin 1999, Ottawa, Canada, Université d'Ottawa, p. 359-366.

Benyelloul, A. (1985) Caractéristiques hydriques de dix sols marocains en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques. Mémoire de 3e cycle, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, 120 p.

Blave, D., De Noni, G., Roose, E., Maillo, L., Laurent, J. Y. et Asseline, J. (2004) Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France). Sécheresse, vol. 15, n°1, p. 111-120.

Boivin, P., Touma, J. et Zante, P. (1987) Mesure de l'infiltration du sol par la méthode du double anneaux : Résultats expérimentaux. Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie, vol. 24, n°1, p. 17-25.

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, vol. 9, n°3, p. 185-192

Clark, A. (1999) Approche géomatique pour la classification des paysages et applicabilité des modèles de perte de sols : basin versant du Simeto, Sicile, Italie. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 93 p.

Coutadeur, C., Coquet, Y. et Estrade, J.R. (2002) Modélisation de l'infiltration de l'eau dans les sols cultivés. 1ères journées scientifiques interdisciplinaires de l'INA (Institut national agronomique) : Environnement, écosystème, biodiversité et gestion durable. Paris-Grignon 9-10 avril 2002, France, p. 1-2.

Cyr, L., Bonn, F. et Pesant, A. (1995) Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. Ecological Modeling, vol. 79, p. 277-285.

Desprats, J.F., Pinel, D., Ayral, P.A., Sauvagnargues, L.S. et Bressand, F. (2003) cartographie du potentiel de l'infiltration des sols du bassin versant du Gardon d'Anduze comme élément d'amélioration du modèle de prévision de crue du Gard. Colloque sur les systèmes d'information et risques naturels, Bureau de recherche géologique et minière (BRGM), Orléans, 29-30 janvier 2003, p. 1-7.

Dhman, H. (1994) Modélisation des pertes en sols par l'érosion hydrique basée sur l'utilisation d'un SIG et des images satellitales Spot : application au bassin versant de Tleta (Rif occidental). Mémoire de troisième cycle, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, 40 p..

Dimanche, P.H. and Hoogmoed, W.B. (2002) Soil tillage and water infiltration in semi-arid Morocco: the role of surface and sub-surface soil conditions. Soil and Tillage Research, vol. 66, n°1, p. 13-21.

D.P.A. (Direction provinciale de l'agriculture de Fès) (1994) Étude pédologique au 1/100 000 en vue de la mise en valeur agricole dans le cercle de Fès – Boulmane, de Karia et de Tissa, Maroc. Fès (Maroc), 180 p.

El Garouani, A., Merzouk, A., Hinaje, S., Jabrane, R. and Boussema, M.R. (2001) The water erosion study by remote sensing in Oued Jemaa watershed (pre-Rif, Morocco). Symposium International « Les régions arides surveillées depuis l'espace: de l'observation à la modélisation pour la gestion durable », Faculté des sciences, Marrakech, du 12 au 15 novembre 2001, Maroc (affiche).

El Garouani, A., Merzouk, A., Jabrane, R. et Boussema, M.R. (2003a) Cartographie de l'érosion des sols dans le bassin versant de l'Oued Jemaa (pré-Rif, Maroc). GéoMaghreb, n°1, juillet 2003, p. 39-46.

El Garouani, A., Merzouk, A. and Ozer, A. (2003b) Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif Marocain. Dans : Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions. Red Books, International association of hydrological sciences (IAHS) Publication, n° 278, p.380-386.

Gartet, A. (1994) Morphogenèse et hydrologie dans le bassin versant de l'oued Lebène (Rif méridional et pré-Rif Central et Oriental, Maroc). Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille I, Aix-en-Provence (France), 345 p.

Heusch, B. (1970) L'érosion du pré-Rif, une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-Rif Occidental. Annales de la Recherche Forestière du Maroc, tome 12, Rabat, p. 9-176.

Hickey, R. (2000) Slope angle and slope length solution for GIS. Cartography, n° 29, p. 1-8.

Hickey, R., Smith, A., and Jankowski, P. (1994) Slope length calculations from a DEM within Arc/Info GRID. Computing, Environment and Urban System, vol. 18, n°5, p. 365-380.

Hien, E., Ganry, F., Oliver, R. et Hien, V. (2002) Effet de la mise en culture sur le stock de matière organique d'un lixisol plinthique au Sud-Ouest du Burkna Faso. Colloque International sur : Gestion de la biomasse, Érosion et Séquestration du carbone, Montpellier, du 24-28 septembre 2002 (affiche).

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 de la Direction des eaux et forêts, Rabat, 12 p.

Kalman, R. (1970) Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie). Annales de la Recherche Forestière au Maroc, tome 12, Rabat, p. 177-287

Larouina, A., Nafaa, R. et Chaker, M. (2000) Problématique de la gestion de l'eau et du développement des communautés locales rurales au Maroc. Mosella (Revue de l'université de Mettez, France), vol. 28, n°3-4, p. 431-446.

MAMVA (Ministère d'agriculture et de mise en valeur agraire) (1992) Plan Directeur pour la lutte anti-érosive dans le basin du Ouargha (Phase I). Rapport, Direction des Eaux et Forêt et de la Conservation des Sols, Rabat, 247 p.

Mathieu, C., Pieltain, F., Asseline, J., Chossat, J.C et Valentin, C.H. (2000) Analyse physique des sols. Édition Lavoisier Tec/Doc, Paris, 251 p.

Mazour, M. (1992) Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'oued Isser: Tlemcen, Algérie. Bulletin du Réseau Erosion, n°12 p. 300-313.

Mazour, M. et Roose, E. (2002) Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du nord-ouest de l'Algérie. Bulletin du Réseau Érosion, n° 21, p. 320-330.

Merzouk, A. and Blake, G. (1991) Indices for the estimation of Interrill erodibility of Moroccan soils. Catena, vol. 18, p. 537-550.

Mhiri, A. (2001) Phénomènes d'érosion et de désertification au Maroc, en Algérie et en Tunisie : Processus prédominants, caractéristiques communes et spécificités. Atelier sur le contrôle de l'érosion et de la désertification dans les pays de l'ouest méditerranéen. Centre d'activités régionales pour le programme des Nations Unis pour l'environnement, 24-26 septembre 2001, Rabat, p. 1-10.

Morsli, B. et Meddi, M. (2002) Étude du ruissellement et du transport solide sur parcelles expérimentales. Utilisation de la simulation de pluies. Actes du Séminaire sur la gestion de l'eau, Université Mascara, Mascara, Algérie, p. 80-88.

Naimi, M., Tayaa, M., Ouzizi, S., Choukra-Llha, R. et Kerby, M. (2003) Dynamique de l'érosion par ravinement dans un bassin versant du Rif occidental au Maroc. Sécheresse, vol. 14, n°2, p. 95-100.

Nasri, S., Hamza, A. et Sfar, F. (1997) contribution de l'étude de la dynamique érosive dans le bassin versant de l'oued Ettiour (région de Haffouz, Tunisie centrale). Bulletin du Réseau Érosion, n°17 p. 314-332.

PAP/CAR (Programme d'action prioritaire/Centre d'activité régionale) (1998) Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. Centre d'activités régionales pour le programme des Nations Unis pour l'environnement en collaboration avec la FAO, Split, Croatie, 72 p.

Roose, E. (1996) Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. Bulletin du Réseau Érosion, n°16, p. 87-97.

Roose, E. (2004) Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive : vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Sécheresse, vol. 15, n°1, p. 9-18.

Sabir, M., Barthes, B. et Rosse, E. (2004) Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). Sécheresse, vol. 15, n° 1, p. 105-110.

Smith, H.L. and Leopold, L.B. (1942) Infiltration studies in the Pecos river watershed, New Mexico and Texas. Soil Science, vol. 53, p. 195-204.

Stone, R.P. et Hilborn, D. (2000) Équation universelle des pertes en terre (USLE). www.gov.on.ca/omafra/frech/engineer/facts/00-002.htm.

Touaibia, B., Gommer, D. et Aidaoui, A. (2000) Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro bassins expérimentaux de l'oued Mina, Algérie. Bulletin du Réseau Érosion, n°20 p. 478-484.

Traoré, K.B., McCarthy, G., Gigou, J.S., Doumbia, M.D., Bagayoko, A., Yost, R.S., Konaré, H., Dioni, L., Coulibaly, H., Sidibe, A. et Kablan, R.A. (2002) Aménagement en courbe de niveau et conservation du carbone. Colloque international sur : Gestion de la biomasse, Erosion et Séquestration du carbone, Montpellier, du 24-28 septembre 2002 (affiche).

Tribak, A. (2002) Stratégies et techniques de lutte antiérosive dans les montagnes du pré-Rif oriental. Bulletin du Réseau Érosion, nº 21, p. 45-55.

Van Remortel, R., Hamilton, M. and Hickey, R. (2001) Estimating de LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. Cartography, n°30, p. 27-35.