# INTÉGRATION DES VARIABLES SPECTRALES ET GÉOMORPHOMÉTRIQUES DANS UN SIG POUR LA CARTOGRAPHIE DES AIRES EXPOSÉES À L'ÉROSION

**Abderrazak BANNARI[1], Abderrazak EL-HARTI[2], Driss HABOUDANE[3], El Mostapha BACHAOUI[2] et Abderrahmène EL-GHMARI[2]**

*[1] Laboratoire de télédétection et de géomatique de l'environnement, Département de géographie, Université d'Ottawa, 60, rue de l'Université, Ottawa (Ontario), Canada K1N 6N5*
*Téléphone : (613) 562-5800 (poste 1042) ; télécopieur : (613) 562-5145 ; courriel : abannari@uottawa.ca*
*[2] Équipe de Télédétection et des SIG appliqués aux Géosciences et à l'Environnement, B.P. 523, 23000, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mella, Maroc.*
*Téléphone : (212) 66 92 81 04 ; télécopieur : (212) 23 48 52 01; courriel : elharti_abder@yahoo.fr*
*[3] Laboratoire d'expertise et de recherche en télédétection et géomatique (LERTG), Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi (Québec) Canada G7H 2B1*
*Téléphone : (418) 545-1105, poste 5673 ; télécopieur : (418) 545-5012 ; courriel : Driss_Haboudane@uqac.ca*

Soumis le 4 décembre 2006 ; révisé le 27 février 2007 ; accepté le 26 juin 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 327-342

***Résumé***

*Dans les régions du Haut Atlas marocain dans le sud du bassin méditerranéen, l'action conjointe des activités humaines, des variations climatiques (températures élevées et déficit hydrique) et de leurs rétroactions sur le milieu engendre des écosystèmes vulnérables face aux processus de dégradation des sols, aux risques de glissement de terrain et à la désertification. Dans ces aires, le suivi des conditions des sols et de la dynamique de la végétation diffuse, comme indicateur régional, constitue la clef de la recherche sur les processus de dégradation et d'érosion hydrique accélérée. En utilisant la spectroradiométrie, il est possible de caractériser les différents niveaux de dégradation des sols en fonction de la variation de leurs propriétés spectrales. Cette recherche porte sur l'application d'une approche géomatique pour l'identification et la cartographie des risques d'érosion dans la région du barrage Hassan-I dans le Haut Atlas marocain. Cette approche utilise des variables géomorphométriques, dont l'indice d'énergie d'eau dérivé d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Elle se base aussi sur l'utilisation de variables spectrales, telles que les indices décrivant la forme des spectres des sols et les indices de végétation vivante et sénescente, calculés à partir des mesures spectroradiométriques et d'une image acquise par le capteur ETM+ de Landsat-7. Ces données ont été corrigées de différents effets perturbateurs (atmosphère, capteur et topographie) et standardisées pour une intégration adéquate avec d'autres données connexes dans un système d'information géographique (SIG). Ce dernier a permis des analyses multicritères pour la cartographie et l'identification des secteurs de susceptibilité à la dégradation. Les résultats obtenus montrent l'apport significatif de l'intégration dans un SIG des variables spectrales et géomorphométriques dérivées, respectivement, des données de télédétection et d'un MNA pour la cartographie des aires exposées à l'érosion dans les versants de la région d'Azilal au Maroc. La validation des résultats obtenus par rapport à la réalité de terrain montre que la méthodologie proposée possède un grand potentiel pour l'évaluation de l'état des ressources en sols et en végétation. Ceci permettra une meilleure planification de stratégies appropriées et d'interventions adéquates pour contrer les effets de la dégradation du sol et renforcer la conservation des ressources sol et végétation.*

**Mots-clés** : érosion, SIG, télédétection, indice d'énergie d'eau, analyse spatiale, variables géomorphométriques, variables spectrales, indices spectraux.

## INTEGARATION OF SPECTRAL AND GEOMORPHOMETRIC VARIABLES IN A GIS FOR EROSION RISK MAPPING

***Abstract***

*Ecosystems with scattered vegetation are common in the semi-arid environment and in the areas with arid-humid climate of the Mediterranean basin. In these areas, the growth of the vegetation is limited by the joint influence of high*

*temperatures and water deficit, leading to an increasing development of sparse vegetation covers and bare soils. This generates ecosystems that are very vulnerable to soil degradation processes, risks of landslides, and desertification. Under such circumstances, soil spectral signatures reflect the properties of observed surfaces and their degradation status. The aim of this research is to use remote sensing and geographical information systems (GIS) for identifying and mapping areas exposed to erosion risks and land degradation processes in the High Atlas Mountains of Morocco. The methodology is based on an integrated approach that combines geomorphometric variables such as the stream power index derived from a digital elevation model (DEM), and spectral indices describing the shape of soil spectra as well as the status of green and senescent vegetation, derived from spectroradiometric measurements and Landsat ETM+ data. The image was radiometrically calibrated, atmospherically corrected, as well as geometrically and topographically rectified. The validation of obtained results according to ground reference information showed the proposed approach holds considerable potential for the elaboration of a computerized decision-making system for land conservation. The latter is of great importance for any sustainable management targeting soil conservation and resource protection against degradation processes and risks.*

**Keywords** : Erosion, GIS, remote sensing, spectral indices, geomorphometric variables, spectral variables, power of water index, spatial analysis.

## 1. INTRODUCTION

Les changements climatiques constituent l'un des plus graves problèmes environnementaux auxquels le monde ait été confronté durant les trois dernières décennies. Selon certaines prévisions, le réchauffement continu de la température terrestre déclencherait une vaste gamme de problèmes climatiques qui pourraient avoir des répercussions considérables sur l'environnement, la santé et l'économie (Schwartz et Randall, 2003). Ces changements représentent un défi d'envergure planétaire qui touche les pays industrialisés tout comme les pays en développement. Toutefois, ils lancent à ces derniers des défis particuliers, notamment pour la préservation du capital sol-eau qui est la clef du développement durable. En effet, durant ces dernières années, il est devenu apparent que l'action de l'humain à travers l'exploitation accrue des ressources naturelles pour faire face à la croissance et à la transformation des besoins des populations est à l'origine des processus de dégradation du milieu (Ben-Souda, 1997). Déclenchés par l'humain, ces processus sont souvent amplifiés par les événements climatiques, notamment dans les pays situés dans les zones semi-arides du globe (Afrique du Nord et sahélienne, Moyen Orient, Amérique du Sud, Inde, etc.) où les écosystèmes sont fragiles, les ressources rares et la biodiversité menacée (UNESCO, 2006).

Par exemple, dans les régions montagneuses du Haut Atlas marocain, la croissance du couvert végétal est limitée par l'action conjointe des températures élevées et du déficit hydrique. Cette situation engendre des écosystèmes vulnérables aux processus de dégradation des sols, de glissement de terrain et de désertification (MAEF, 2001). Au Maroc, la superficie des forêts naturelles perdue annuellement est estimée à 30 000 ha sur un total de 5 millions d'hectares (MAEF, 2001). Les principales raisons expliquant ce déboisement sont, entre autres, le défrichement pour l'expansion des cultures, la récolte de bois d'énergie, le surpâturage et une sécheresse persistante (MAEF, 2001 ; MPEP, 2000) (figure 1). En outre, la surexploitation des terres agricoles risque de devenir plus sévère. On estime à près de 73 % la superficie agricole utile touchée à des degrés divers par les mécanismes d'érosion éolienne et hydrique (MAEF, 2001). Les conséquences de l'érosion sur les terres agricoles sont nombreuses mais celle qui nous intéresse ici est le déplacement de particules fines et de la matière organique qui peut détériorer la structure et modifier la texture du sol. Un changement de texture pourra se traduire par une diminution de la capacité de rétention de l'eau du sol et donc rendre le sol plus susceptible aux conditions extrêmes telle la sécheresse. Cela représente un sérieux problème, car la fréquence élevée des événements de sécheresse est un trait caractéristique du climat marocain (Ben-Souda, 1997). D'ailleurs, la période 1975-2006 représente l'épisode de sécheresse le plus long de l'histoire du pays.

En plus de la dégradation du sol, support du développement des couverts forestiers et agricoles, les processus de dégradation ont un impact majeur sur la pollution diffuse dans les cours d'eau (figure 2), sur l'envasement des barrages et sur les infrastructures hydrauliques (MAEF, 2001). En effet, au Maroc, l'envasement des barrages réduit de 50 millions de $m^3$/an la capacité de stockage d'eau dans les barrages, ce qui correspond à une perte de près de 5 000 ha de terres irriguées annuellement (Ait-Fora, 1995). Il faut donc apporter d'urgence des corrections aux aires où la dégradation des sols et les risques d'érosion sont les plus intenses. Cependant, il est difficile d'identifier les aires à risque et de prévoir des scénarios d'intervention quand l'information sur le territoire fait défaut. Il faut donc mettre au point des outils permettant d'identifier et d'analyser les processus de dégradation des milieux (végétation et sol) afin de promouvoir le développement durable. Pour ce faire, différents modèles hydrologiques, couplés ou non aux modèles d'érosion, ont été développés. Par exemple, l'équation universelle de perte de sol (USLE) de Wischmeier et Smith (1978) permet de quantifier la perte de sol annuelle à l'échelle de la parcelle et du bassin versant (Anys, 1991). Par ailleurs, des approches combinant la télédétection et les SIG s'avèrent prometteuses (Leone *et al.*, 1995 ; Calzolari *et al.*, 1996 ; Hill, 2000; Melià *et al.*, 2000; Millward and Mersey, 1999 ; Haboudane *et al.*, 2002 ; Reusing *et al.*, 2000 ; Koch, 2000 ; Baban and Yusof, 2001).

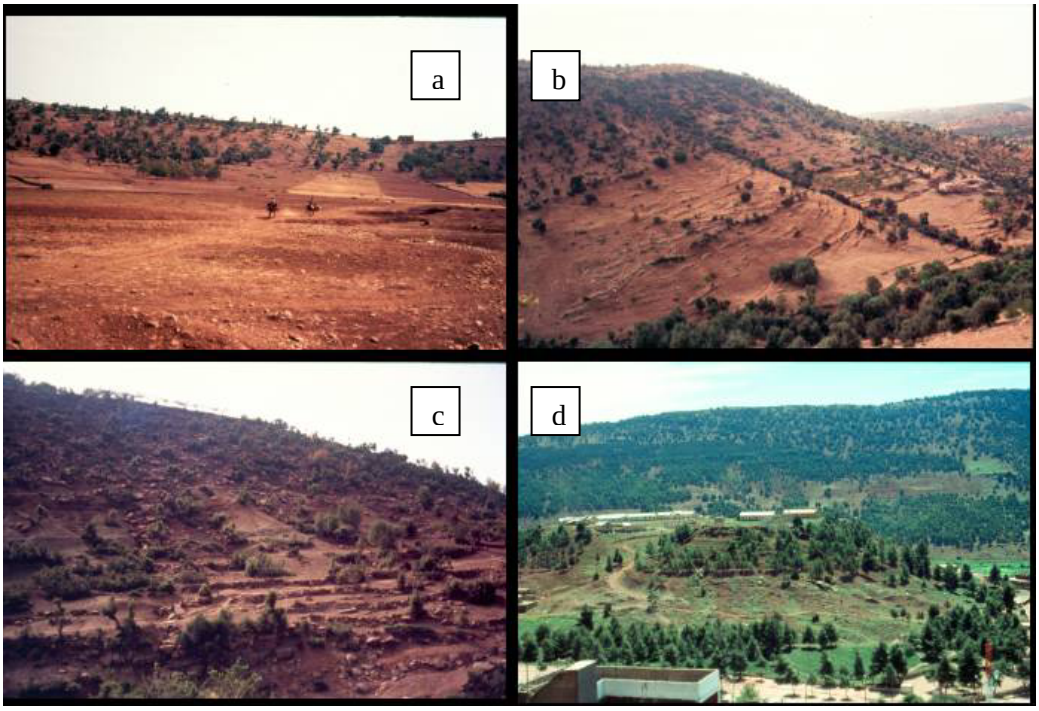



**Figure 1** : Déforestation sévère dans la région d'étude (a, b et c), uniquement les aires proches des installations des gardes forestiers sont protégées (d). *Severe deforestation in the study area (a, b and c), only the areas close to the forester installations are protected (d).*

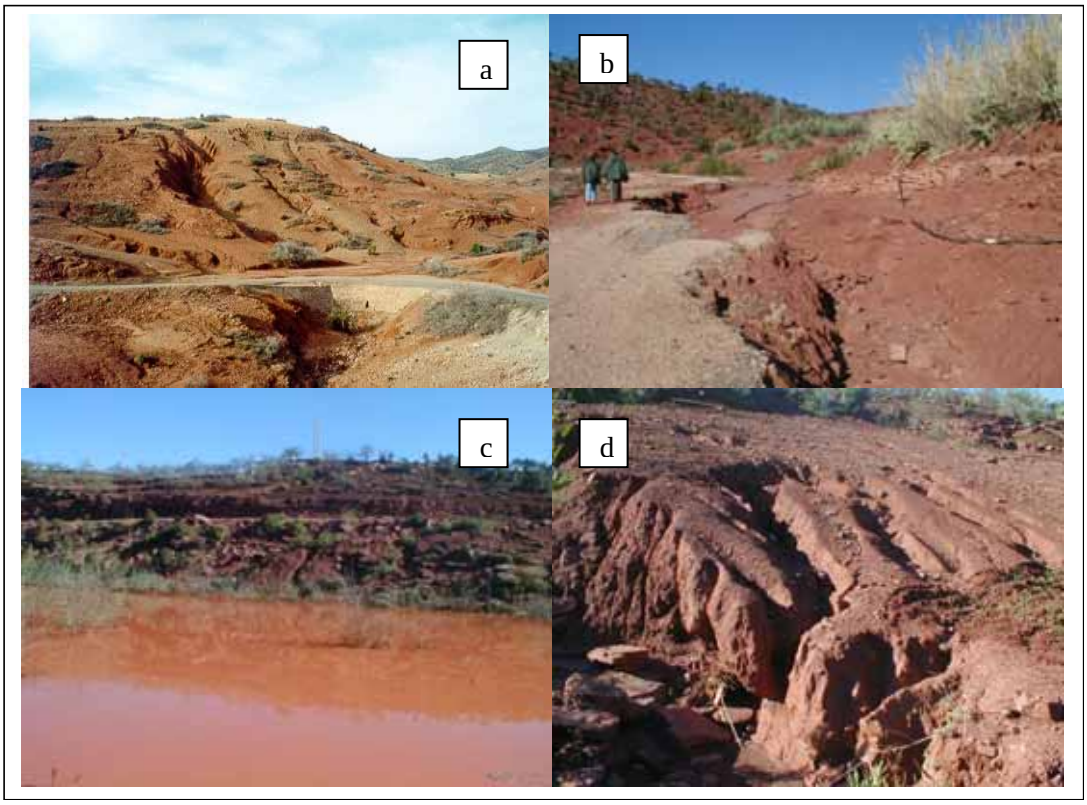



**Figure 2** : Impact de l'érosion dans la région d'Azilal: érosion hydrique en ravinement (a et d), végétation éparse et ravinement (b), envasement du barrage Hassan-I (c). *Impact of erosion in the area of Azilal: hydrous erosion in gullying (a and d), scattered vegetation and gullying (b), silting of the Hassan-I dam (c).*

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette recherche qui vise l'identification et la cartographie des risques de dégradation des sols dans la région du barrage Hassan-I (Haut Atlas marocain). Cette approche contribuera à l'élaboration d'un système d'aide à la décision afin de prendre des mesures d'intervention qui s'imposent pour protéger les aires à risque et aussi pour préserver le patrimoine sol-végétation. Pour atteindre nos objectifs, nous avons exploité des variables géomorphométriques, dont l'indice d'énergie d'eau dérivé d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Entre autres, nous avons considéré des variables spectrales, tels les indices décrivant la forme des spectres de sols ainsi que les indices de végétation vivante et sénescente qui ont été calculés à partir des mesures spectroradiométriques au sol et d'une image acquise par le capteur *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) de Landsat-7. Avant le traitement et l'extraction de l'information, l'image ETM+ a été corrigée de différents effets perturbateurs et standardisée pour une intégration adéquate dans un SIG pour des analyses multicritères (AMC).

## 2. SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude est situé dans le Haut Atlas marocain, à 30 km au sud-ouest de la ville d'Azilal, au Maroc. Il couvre une superficie de 100 km$^2$ entre les coordonnées géographiques suivantes : 31° 46' N et 31° 52' N et 6° 45' O et 6° 52' O (figure 3). Il se caractérise par un climat semi-aride avec des températures annuelles moyenne de 20,5 °C et maximale de 45 °C, et une pluviométrie annuelle moyenne de 300 mm (Agoumi et Debbarh, 2006). Le couvert végétal est principalement composé de chênes verts, d'oliviers, de lauriers, d'euphorbes, de cactus et de palmiers nains.




**Figure 3** : Carte de localisation du site d'étude (région d'Azilal au Maroc). *Study site location map (Azila region in Morocco).*

Les altitudes varient entre 800 et 1 500 m, le terrain épouse la forme d'une dépression sensiblement allongée en direction est-ouest, qui correspond au synclinal de Guettioua. Le cœur de ce dernier est occupé par la formation géologique de Guettioua, composée de sédiments continentaux, détritiques et rubéfiés (Monbaron *et al.*, 1999). Le synclinal est entouré par des anticlinaux à grand rayon de courbure où affleurent les terrains calcaires du Jurassique inférieur. Les crêtes qui limitent le synclinal de Guettioua peuvent atteindre une altitude supérieure à 1 500 m. Les pentes sont relativement plus fortes au sud qu'au nord. Sur le plan de la litho-stratigraphie, on distingue, de la base vers les sommets, des argiles roses et des coulées basaltiques du Trias, des calcaires et des dolomies du Jurassique inférieur, une alternance de marnes et de calcaires du Jurassique moyen, des grès, des pélites et des conglomérats rouges du Jurassique supérieur. Le barrage Hassan-I est situé au centre du site d'étude et il est construit sur une formation

relativement imperméable du Jurassique supérieur. Cette formation est de nature gréso-pélitique imperméable, formée par une alternance de bancs pélitiques et de bancs gréseux (Monbaron *et al.*, 1999).

## 3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La méthodologie de cette recherche s'articule autour de différents prétraitements et traitements complémentaires et inter-reliés en exploitant des données multisources. Les différentes étapes de l'aspect méthodologique de ce travail sont illustrées par l'organigramme de la figure 4.

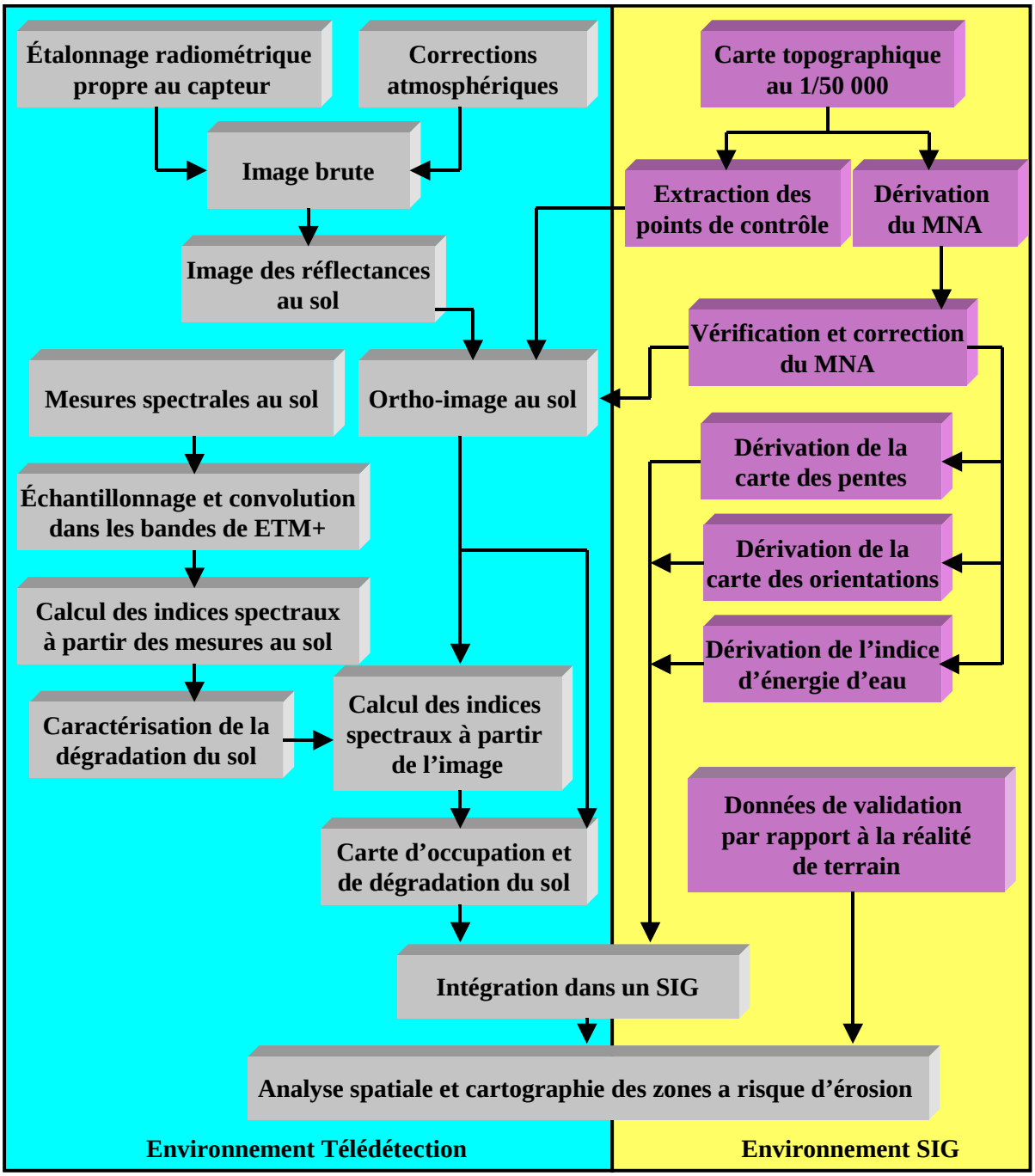



**Figure 4** : Organigramme de la méthodologie. *The methodology flow chart.*

## 3.1. Mesures spectroradiométriques

Les mesures spectroradiométriques de terrain ont été effectuées entre le 29 décembre 2001 et le 16 janvier 2002 sur différents affleurements rocheux et sur des sols nus représentant différents niveaux de dégradation à l'aide d'un spectroradiomètre portatif *Analytical Spectral Devices* (ASD Inc., 1999). Ce dernier opère entre 350 et 2 500 nm avec un pas d'échantillonnage de 1,4 nm dans le visible et le proche infrarouge (350 à 1 050 nm) et de 2 nm dans le moyen infrarouge (1 000 à 2 500 nm). La signature de chaque cible a été mesurée 20 fois, puis l'instrument a calculé une moyenne arithmétique. Les mesures ont été prises à l'heure zénithale selon une direction de visée verticale avec un angle d'observation (*Field of view*) de 25° à une hauteur de 40 cm du sol, ce qui permet de viser une surface d'environ 315 $cm^2$. Une surface de référence lambertienne (Spectralon) a été utilisée afin de normaliser et de corriger les mesures, ce qui permet d'obtenir les réflectances au sol (Jackson *et al.,* 1980). Ces réflectances bidirectionnelles dépendent à la fois de la géométrie d'éclairement et de celle d'observation. Cet effet bidirectionnel demeure négligeable dans cette étude puisque les mesures ont été réalisées durant des intervalles de temps courts et rapprochés tout en gardant l'angle d'observation dans une position verticale. Les signatures spectrales des sols ont été ré-échantillonnées et soumises à une convolution spectrale en fonction des réponses des filtres caractérisant les bandes spectrales du capteur ETM+ (Bannari *et al.,* 2004). Cette étape a permis d'établir la correspondance entre la spectroradiométrie des sols et leur niveau de dégradation.

## 3.2. Prétraitements des données images

L'image utilisée a été acquise le 16 janvier 2002. Elle a été corrigée des anomalies radiométriques propres au capteur et des effets de l'atmosphère en utilisant les données atmosphériques acquises lors du passage du satellite au-dessus du site d'étude à l'aide d'un photomètre solaire (Microtops-II). Elle a aussi fait l'objet d'autres prétraitements, dont les corrections géométriques et topographiques en utilisant un MNA.

### *3.2.1. Étalonnage radiométrique du capteur et corrections atmosphériques*

L'étalonnage radiométrique (relatif et absolu) est une étape obligatoire qui consiste à corriger les anomalies propres au capteur afin d'extraire une information fiable et précise à partir de l'image (Bannari *et al*., 1999). L'étalonnage relatif permet la normalisation et la correction de l'effet du dérayage causé par les 16 détecteurs qui forment le capteur ETM+. Quant à l'étalonnage absolu, il permet la transformation des comptes numériques mesurés par le capteur satellitaire en haut de l'atmosphère en luminance apparente équivalente. Sans ces deux opérations, les changements causés par les anomalies relatives au capteur peuvent être attribués incorrectement aux changements des paramètres biophysiques et géophysiques au sol. Par conséquent, des erreurs se propageraient dans toutes les étapes ultérieures de traitement d'image, telles que: le calcul d'indices spectraux, la création de mosaïque, les analyses multitemporelles et le processus de classification (Price, 1987 ; Teillet, 1994 ; Bannari *et al*., 1999). Les valeurs du gain et du décalage (*offset*), coefficients d'étalonnage absolu, ont été livrées avec l'image par la NASA.

Quant aux effets atmosphériques, ils sont dominés par deux processus responsables de la modification du signal satellitaire, soit l'absorption par les gaz (l'ozone, la vapeur d'eau et le $CO_2$) et la diffusion par les aérosols et les molécules (Deschamps *et al.*, 1981 ; Kaufman, 1988). Ces phénomènes causent une atténuation du signal dans la direction d'éclairement. Une correction précise des effets atmosphériques exige une connaissance *a priori* des paramètres atmosphériques qui interfèrent lors de l'acquisition de l'image (Tanré, 1982). Ces paramètres ont été mesurés lors du passage du satellite au-dessus du site d'étude, soit le 16 janvier 2002, à l'aide d'un photomètre solaire de type Microtops II. Cet instrument est muni de cinq filtres centrés sur 305 nm, 320,5 nm, 500 nm, 936 nm et 1 020 nm, avec un angle de visée de 2,5°. Dans ces longueurs d'ondes, il mesure la concentration en ozone, en vapeur d'eau et l'épaisseur optique de l'atmosphère. Des mesures ont été acquises chaque 5 minutes entre 9 h 30 et 12 h. Bien entendu, les mesures qui concordaient avec le temps exact d'acquisition de l'image ont été retenues. Ensuite, elles ont été introduites dans le modèle de transfert radiatif H5S (*Simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire*) (Teillet and Santer, 1991) pour calculer les paramètres atmosphériques nécessaires pour la correction de l'image. Afin de conserver l'intégrité radiométrique de l'image, l'étalonnage radiométrique et les corrections atmosphériques ont été réalisées en une seule étape (Richards, 1993 ; Teillet, 1992).

### *3.2.2. Corrections géométriques et topographiques*

L'intégration de données multisources dans un SIG exige que les données images soient projetées dans un système de projection cartographique et corrigées des distorsions géométriques pour permettre la superposition avec d'autres données cartographiques (Bannari *et al.*, 1995a). Cette opération est d'une grande importance dans le cadre de cette recherche, car la topographie affecte aussi bien la radiométrie de l'image (ombre, variations d'illumination, etc.) que sa géométrie à cause du déplacement horizontal des pixels induits par le relief et l'angle de balayage (Radeloff *et al.,* 1997). Les distorsions causées par le relief ne peuvent être éliminées lors d'opérations de géocodage fondées uniquement sur les méthodes polynomiales (Itten and Meyer, 1993 ; Bannari *et al.*, 1995a ; Novak, 1992). Par conséquent, nous avons procédé à l'ortho-rectification de l'image en utilisant un MNA dont la résolution spatiale était la même que celle de l'image, soit 30 m (Burrough and McDonnell, 2000 ; Caloz *et al.,* 1993). Une carte topographique au 1 : 50 000 établie en 1974 par le Service de la cartographie et la géodésie marocain a été utilisée pour l'extraction des points de contrôle et la numérisation des courbes de niveau avec une équidistance de 20 m. Après leur acquisition,

ces dernières ont été nettoyées des erreurs de numérisation, transformées en un réseau de points par triangulation (*Triangular Irregular Network*) puis en une matrice d'altitude (MNA). La précision du MNA a été évaluée à l'aide des points cotés qui n'étaient pas utilisés lors de sa création. En considérant une vingtaine de points de vérification, nous avons obtenu une erreur quadratique moyenne d'environ 12 m. Cette précision cadre bien les limites de la tolérance pour un MNA extrait d'une carte topographique au 1 : 50 000 (Bannari *et al.*, 1997). Afin de conserver l'intégrité radiométrique de l'image, les corrections géométriques ont été combinées en une seule étape avec la correction des effets topographiques (Radeloff *et al.*, 1997).

## 3.3. Indices spectraux

### *3.3.1. Indices de formes et de coloration*

La signature spectrale des sols varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment la teneur en matière organique, le taux d'humidité et la composition minéralogique. Ces variables ont un impact majeur sur la couleur et la brillance d'un sol (Bannari *et al.*, 1996), qui sont reliées à ses propriétés physiques et chimiques (Mattikalli, 1997). Habituellement, le changement de couleur reflète les transformations induites par les processus naturels et anthropiques affectant le sol. Par exemple, la richesse en matière organique attribue au sol une couleur sombre, les oxydes de fer lui octroient une couleur rouge, alors que les carbonates lui donnent une couleur claire et brillante (Courault *et al.*, 1988). Bien entendu, les processus d'érosion peuvent soit détériorer l'horizon superficiel riche en matière organique, rendant ainsi le sol plus clair et plus brillant, soit détruire complètement le sol et faire affleurer en surface la roche mère, dont la couleur peut être totalement différente de celle du sol intact (Haboudane, 1999).

Par ailleurs, dans le domaine de la télédétection, plusieurs chercheurs ont montré la forte corrélation entre la couleur des sols et leur réflectance dans les bandes du visible (Escadafal *et al.*, 1989 ; Escadafal et Huete, 1991 ; Post *et al.*, 1994). D'après Liu et Moore (1990), l'expression de la couleur du sol en termes de réflectance permet de caractériser les composantes intrinsèques d'un sol. D'autres chercheurs ont identifié l'état de différentes catégories de sols en se fondant sur la forme de leurs signatures spectrales (Baumgardner *et al.*, 1985). En se fondant sur la forme et la pente de la signature spectrale d'un sol dans le visible et le proche infrarouge, Escadafal et Huete (1991) et Escadafal *et al.* (1994) ont mis au point les indices de forme et de coloration pour étudier et identifier les sols dégradés (équations 1 et 2), en se fondant sur :

$$IF = (2\,\rho_{ETM3} - \rho_{ETM2} - \rho_{ETM1}) / (\rho_{ETM2} - \rho_{ETM1}) \quad (1)$$

$$IC = (\rho_{ETM3} - \rho_{ETM1}) / \rho_{ETM3} \quad (2)$$

où :

$\rho_R$ est la réflectance dans le rouge ;

$\rho_V$ est la réflectance dans le vert ;

$\rho_B$ est la réflectance dans le bleu ;

$\rho_{ETM3}$ est la réflectance mesurée dans la bande rouge (ETM+3) ;

$\rho_{ETM7}$ est laréflectance mesurée dans la bande PIR (ETM+4) ;

$\rho_{ETM5}$ est la réflectance mesurée dans la bande MIR (ETM+5) ;

$\rho_{ETM7}$ est la réflectance mesurée dans la bande MIR (ETM+7).

Ces indices représentent des moyens simples et rapides pour caractériser l'état de dégradation des sols, notamment dans les milieux arides et semi-arides (Mathieu *et al.*, 1998).

L'indice de forme (IF) décrit la forme générale de la courbe de signatures spectrales et permet l'identification et la distinction des sols et des formations rocheuses en fonction de la lithologie (Liu and Moore, 1990 ; Mattikalli, 1997).

Quant à l'indice de coloration (IC), qui correspond au rapport normalisé des bandes dans le rouge et le bleu, il exprime la pente du spectre du sol étudié. La réflectance dans cette région du spectre est grandement affectée par le phénomène d'absorption causé par la présence d'oxydes de fer, d'hématite et de goethite (Madeira *et al.*, 1997). Haboudane *et al.* (2002) ont mis en évidence l'apport des bandes du moyen infrarouge pour la distinction des niveaux de dégradation des sols en intégrant ces dernières dans le calcul des indices de forme et de coloration. Ces deux derniers indices ont été considérés dans le cadre de cette recherche pour caractériser la relation entre la spectroradiométrie des sols du site d'étude et leur niveau de dégradation.

### *3.3.2. Indices de végétation vivante et sénescente*

Dans les milieux arides et semi-arides, le suivi de la dynamique de la végétation diffuse constitue un indicateur régional des processus de désertification et d'érosion hydrique. Les couverts végétaux jouent un rôle important dans le contrôle des phénomènes d'évapotranspiration, d'écoulement, d'infiltration et de l'enrichissement du sol en matière organique. Pour la quantification des couverts végétaux, plusieurs indices de végétation ont été développés (Bannari *et al.*, 1995b).

Le plus populaire et le plus utilisé est l'indice de différence normalisé (*Normalized Difference Vegetation Index* ou NDVI), développé par Rouse *et al.* (1974). Quant à la végétation sénescente et les résidus de cultures, ils contribuent considérablement aussi dans la protection des sols contre l'érosion hydrique et éolienne (Bannari *et al.*, 2006). Certaines recherches effectuées en Ontario (Canada) ont démontré qu'un taux de couverture de 15 % de résidus de maïs laissé sur un sol peut réduire l'érosion de 75 % en comparaison à un sol nu (Ketcheson and Stonehouse, 1983). Pour la cartographie des résidus de cultures et de la végétation sénescente, plusieurs indices existent dans la littérature. Une étude comparative entre ces indices avait montré que le *Modified Soil Adjusted Corn Residue Index* (MSACRI) (Bannari *et al.*, 2000) permet de cartographier les résidus de cultures et de la végétation sénescente avec plus de précision (Bannari *et al.*, 2006). Dans cette recherche, le NDVI et le MSACRI ont été retenus pour la quantification spatiale de la végétation verte et sénescente, respectivement, de la façon suivante :

$$NDVI = (\rho_{ETM4} - \rho_{ETM3}) / (\rho_{ETM4} + \rho_{ETM3}) \quad (3)$$

$$MSACRI = C^{ste} [a (\rho_{ETM5} - a \rho_{ETM7} - b) / (a \rho_{ETM5} + \rho_{ETM7} - a b)] \quad (4)$$

où :

$\rho_{ETM3}$ est la réflectance mesurée dans la bande rouge (ETM+3) ;

$\rho_{ETM7}$ est la réflectance mesurée dans la bande PIR (ETM+4) ;

$\rho_{ETM5}$ est la réflectance mesurée dans la bande MIR (ETM+5) ;

$\rho_{ETM7}$ est la réflectance mesurée dans la bande MIR (ETM+7) ;

$C^{ste}$ est la constante multiplicative ayant une valeur de 5 ;

a est lapente de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM+5/ETM+7 ;

b est l'ordonnée à l'origine de la droite de sols nus dans l'espace spectral ETM+5/ETM+7.

### 3.4. Classification

Les mesures spectrales effectuées au sol, et dont nous avons une connaissance *a priori*, ont permis de bien caractériser la relation entre la spectroradiométrie des sols et leur niveau de dégradation (Parenteau *et al.*, 2003). Une fois établie, cette relation a permis d'interpréter correctement les indices de forme et de coloration calculés à partir de l'image, et de guider le choix des classes thématiques pour une meilleure distinction entre les différentes classes d'occupation des sols, notamment l'état de dégradation des sols. Ainsi, en plus des bandes spectrales de l'image, les indices de forme et de coloration, le NDVI et le MSACRI ont été intégrés dans un processus de classification non dirigée ISODATA (PCI Geomatics Inc., 2003). Après l'analyse des histogrammes de l'image (He et Wang, 1987) et plusieurs essais de classification, six classes spectralement homogènes et distinctes ont été retenues. Ces dernières correspondent à l'occupation du sol et aux conditions de surface de la région d'étude : eau, végétation, ombre, sols non dégradés (développés), sols moyennement dégradés et sols très dégradés.

### 3.5. Données géomorphométriques et l'indice d'énergie d'eau

L'identification des aires à risque d'érosion a été faite en partie grâce à une analyse quantitative à partir du MNA, qui permet de dériver des informations sur les processus physiques responsables de l'érosion des sols (Haboudane *et al.*, 2002 ; Mulders and Sorateyan, 1996 ; Paracchini *et al.*, 1998). À l'aide du logiciel ArcGIS, le MNA a été utilisé pour dériver les pentes, les orientations du terrain et l'indice d'énergie de l'eau. Ces variables géomorphométriques caractérisent la géomorphologie du terrain influençant grandement l'érosion. La pente est le taux de variation maximal de l'altitude alors que l'orientation est l'exposition par rapport au Nord des pentes du terrain étudié (Burrough, 1986). La carte des orientations donne une impression du relief et permet d'observer la géomorphologie du terrain. Selon Cavallo et Norese (1998), l'importance de l'orientation est faible dans les processus d'érosion et ne devait pas être considérée comme majeure. Par contre, l'indice de l'énergie de l'eau (IEE) mesure le potentiel érosif du ruissellement et constitue un indicateur des aires susceptibles de subir une forte érosion hydrique (Moore *et al.*, 1993 ; Dymond et Harmsworth, 1994 ; Haboudane *et al.*, 2002). Cet indice est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$IEE = \ln(AD * \tan(-\alpha)) \quad (5)$$

où AD est l'aire drainée par le point considéré (mètres carrés) et ($\alpha$) est la pente (degrés).

### 3.6. Intégration des données et analyses spatiales

L'environnement du SIG a permis l'intégration des différentes couches d'information provenant des différents traitements : la carte d'occupation du sol obtenue à l'aide de la classification ISODATA, les indices de forme et de coloration, l'indice de l'énergie de l'eau, les indices de végétation (NDVI et MSACRI) et les variables géomorphométriques (MNA, pentes et orientations).

Après l'étape d'intégration dans le SIG, la correction et la standardisation des données, nous avons procédé à des AMC pour l'élaboration de cartes identifiant les aires à haut risque de dégradation (Mulders and Sorateyan, 1996 ; Paracchini *et al.*, 1998). Pour bien mener les AMC, il est recommandé d'utiliser une méthode qui considère des fonctions de pondération afin de relativiser l'importance d'une donnée par rapport à une autre (Pereira and Duckstein, 1993). Évidemment, l'attribution d'un poids aux différentes variables qui entrent en jeux permet non seulement de hiérarchiser l'importance des phénomènes et des variables, mais aussi de prendre en compte l'étendue des valeurs du phénomène ou de la variable sujette à l'examen (Haboudane, 1999 ; Cavallo and Norese, 1998). Dans cette étude, la détermination du poids accordé à chacune des variables a été basée sur la connaissance *a priori* des caractéristiques des sols et de leur degré de sensibilité aux processus d'érosion. Cela a permis d'identifier les classes thématiques suivantes : eau, végétation, ombre, sols développés (dégradation nulle ou faible), sols moyennement dégradés, sols dégradés et sols très dégradés. Du fait que la carte d'occupation du sol établie à l'aide de la classification livre des informations très pertinentes sur la dégradation du sol, nous lui avons accordé un poids important. Sachant que la végétation, vivante et sénescente, joue un rôle important dans le processus de l'érosion, nous avons accordé aux indices NDVI et MSACRI un poids allant de nul à 100 %. Par ailleurs, nous avons attribué les mêmes poids aux indices de forme et de coloration à cause de leur contribution significative dans le processus de distinction des différents niveaux de dégradation. Quant aux variables géomorphométriques, leur poids a été accordé en fonction de leur importance dans le processus de dégradation des sols. Le poids accordé à l'orientation du relief varie de nul à peu élevé (20 %) étant donné la faible contribution de ce facteur dans le processus de l'érosion. Par contre, l'indice de l'énergie de l'eau se voit octroyé un poids relativement considérable du fait qu'il mesure le potentiel érosif du ruissellement et constitue un indicateur des aires susceptibles de subir une forte érosion hydrique. Après différents scénarios et l'AMC, les résultats obtenus ont été validés par des visites de comparaisons sur le site d'étude.

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Après la réalisation de toutes les étapes de prétraitements, nous avons comparé les réflectances moyennes de l'image avant corrections avec celles de l'ortho-image englobant toutes les corrections. Les résultats montrent un apport significatif à la radiométrie de l'image qui se traduit par une diminution des réflectances dans le visible, notamment dans le bleu et le vert, et une augmentation des réflectances, particulièrement dans le moyen infrarouge (figure 5). Ces constations témoignent des corrections de la radiométrie de l'image des effets de la diffusion dans le visible et de l'absorption dans l'infrarouge.

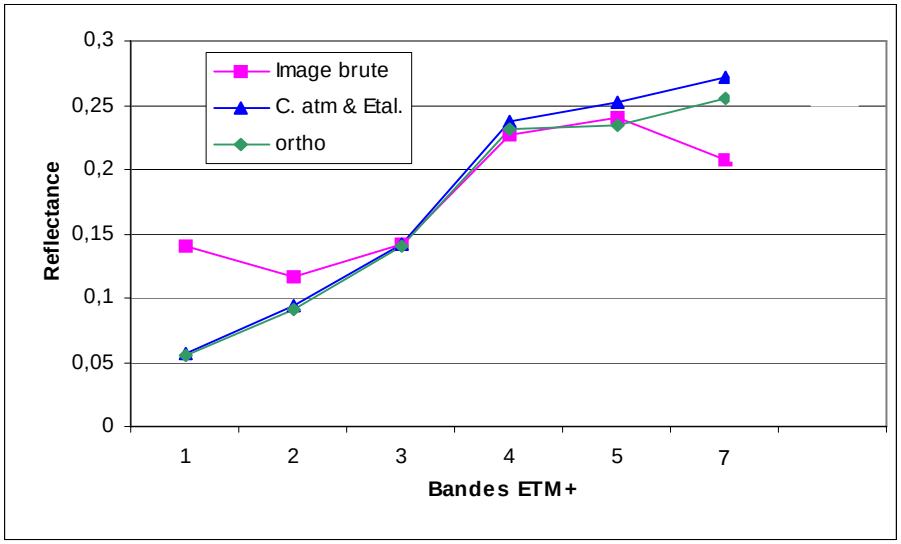



**Figure 5** : Moyenne des réflectances de l'image au sol dans les bandes du capteur EMT+ corrigées des effets atmosphériques et topographiques combinés à l'étalonnage radiométrique du capteur. *Mean image reflectances at ground level in the ETM+ spectral bands corrected from atmospheric and topographic effects combined with the sensor radiometric calibration.*

Par ailleurs, avant la transformation des bandes de l'image en indices de forme (IF) et de coloration (IC), nous avons exploité la spectroradiométrie des différents échantillons de sols (dérivés des roches mères suivantes : grès, calcaire, argile et vase) considérés, dont nous avons une connaissance *a priori* des différents niveaux de dégradation. Dans une première étape, l'analyse des indices dans l'espace spectral bidimensionnel IC(3-1) versus IF(3-2-1), en considérant uniquement les bandes du visible et du proche infrarouge comme préconisé par Escadafal *et al.* (1994), n'avait pas donné de résultats concluant en termes de distinction entre les sols dégradés et développés. Toutefois, l'intégration des bandes du proche et moyen infrarouge avec celles du visible (bleu et rouge) ont permis de bien distinguer les différents niveaux de dégradation des sols, ce qui concorde avec les travaux de Price (1990) et d'Haboudane (1999). Dans l'espace spectral IC (5-1) versus IF(5-4-1), les points caractérisant les sols très dégradés (calcaire) se distinguent par de

fortes valeurs des indices de forme et de coloration, et se trouvent très loin de l'origine. Par contre, les points désignant les sols développés ou faiblement dégradés sont associés aux faibles valeurs de l'indice de forme et des valeurs moyennement faibles se trouvent proche de l'origine. Quant aux points définissant les sols moyennement dégradés, ils se situent dans une position intermédiaire (Parenteau *et al.*, 2003).

À la lumière de ces résultats, nous avons dérivé ces indices à partir de l'image ETM+ et nous les avons analysés dans les mêmes espaces spectraux qui avaient été considérés auparavant, à savoir : IC(3-1) versus IF(3-2-1), IC(4-1) versus IF(7-4-1), et IC(5-1) versus IF(5-4-1) (figure 6). En se basant sur la connaissance *a priori* du terrain et sur le repérage par GPS lors des travaux sur le terrain, nous avons considéré les signatures spectrales de plusieurs sols représentant des niveaux de dégradation presque identique à ceux considérés au sol. Les résultats obtenus suivent les mêmes tendances que les mesures spectroradiométriques au sol. Sur la figure 6a, on montre le potentiel limité des bandes du visible [IC(3-1) versus IF(3-2-1)] pour distinguer les différents niveaux de dégradation. Bien que l'intégration des bandes 4 et 7 améliore relativement le pouvoir de distinction de ces indices (figure 6b), la combinaison intégrant les bandes du proche et moyen infrarouge [IC(5-1) versus IF(5-4-1)] permet une meilleure distinction des nuages de points représentant les différents niveaux de dégradation (figure 6c). C'est cette dernière combinaison qui a été retenue dans notre étude afin de caractériser les différents niveaux d'érosion.

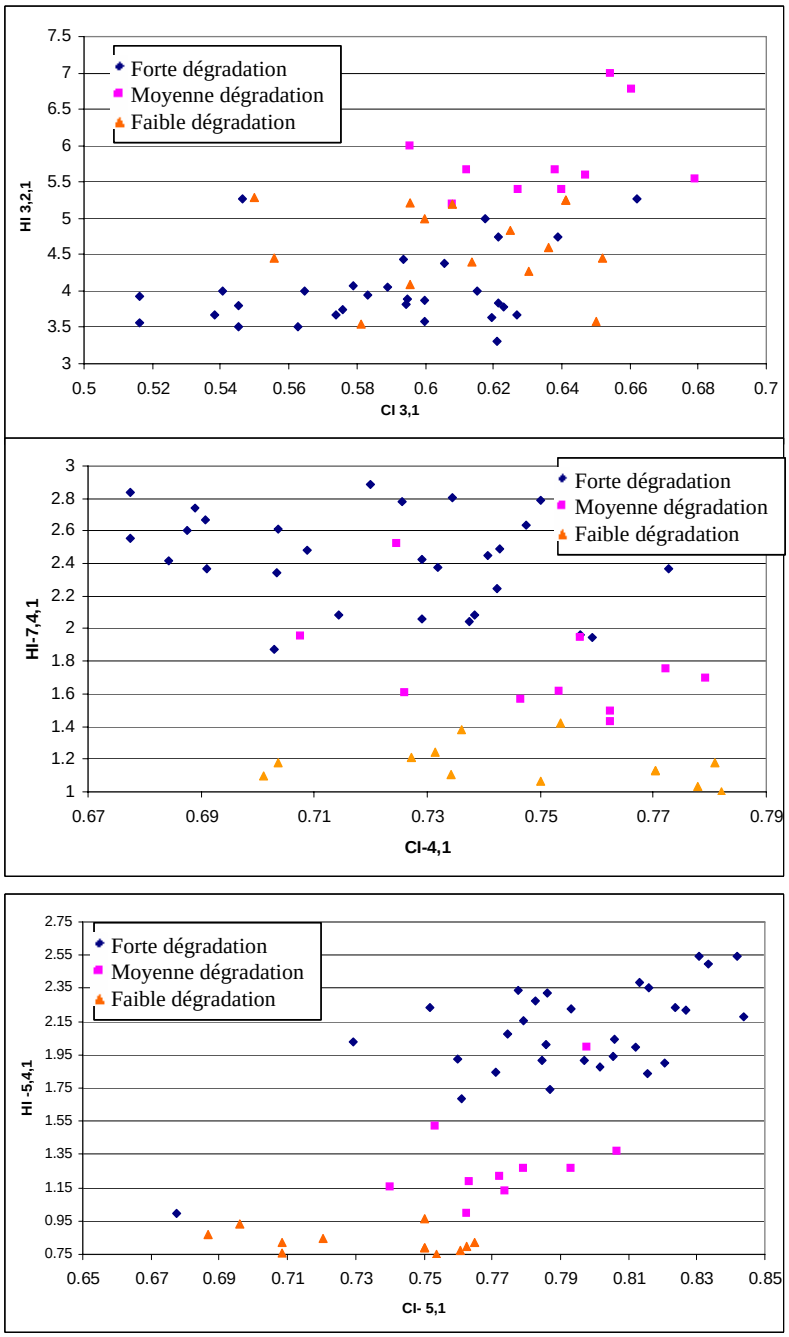



**Figure 6** : Indices de forme et de coloration dérivés à partir de l'image ETM+. *Hue and coloration indices derived from Landsat-ETM+*.

Pour cartographier l'occupation du sol, et particulièrement les différents niveaux de dégradation, nous avons intégré dans un processus de classification non dirigée ISODATA les indices de forme [IF(5-4-1)) et de coloration (IC(5-1)], le NDVI et l'indice de végétation sénescente MSACRI. La figure 7 illustre, en fonction des courbes de niveau (variations topographiques), la carte de dégradation des sols en considérant six classes thématiques : eau, végétation, ombre, sols faiblement dégradés (développés), sols moyennement dégradés et sols très dégradés. Lors de la validation de cette carte par rapport à la réalité de terrain, nous avons constaté une bonne répartition tant du phénomène de dégradation du sol que des autres classes thématiques. Les sols très dégradés ainsi que moyennement et faiblement dégradés sont associés, respectivement, au calcaire, au grès et aux argiles. Les classes représentants les couverts végétaux et l'eau sont cartographiées avec précision. Par contre, malgré l'exploitation du MNA pour la correction des effets topographiques, l'ombre demeure omniprésente, notamment le long des cours d'eau qui sont étroits et profonds. Il aurait donc fallu utiliser un MNA avec une résolution spatiale plus fine que celle de notre image pour une correction adéquate de l'effet de l'ombre (Caloz *et al.*, 1993).

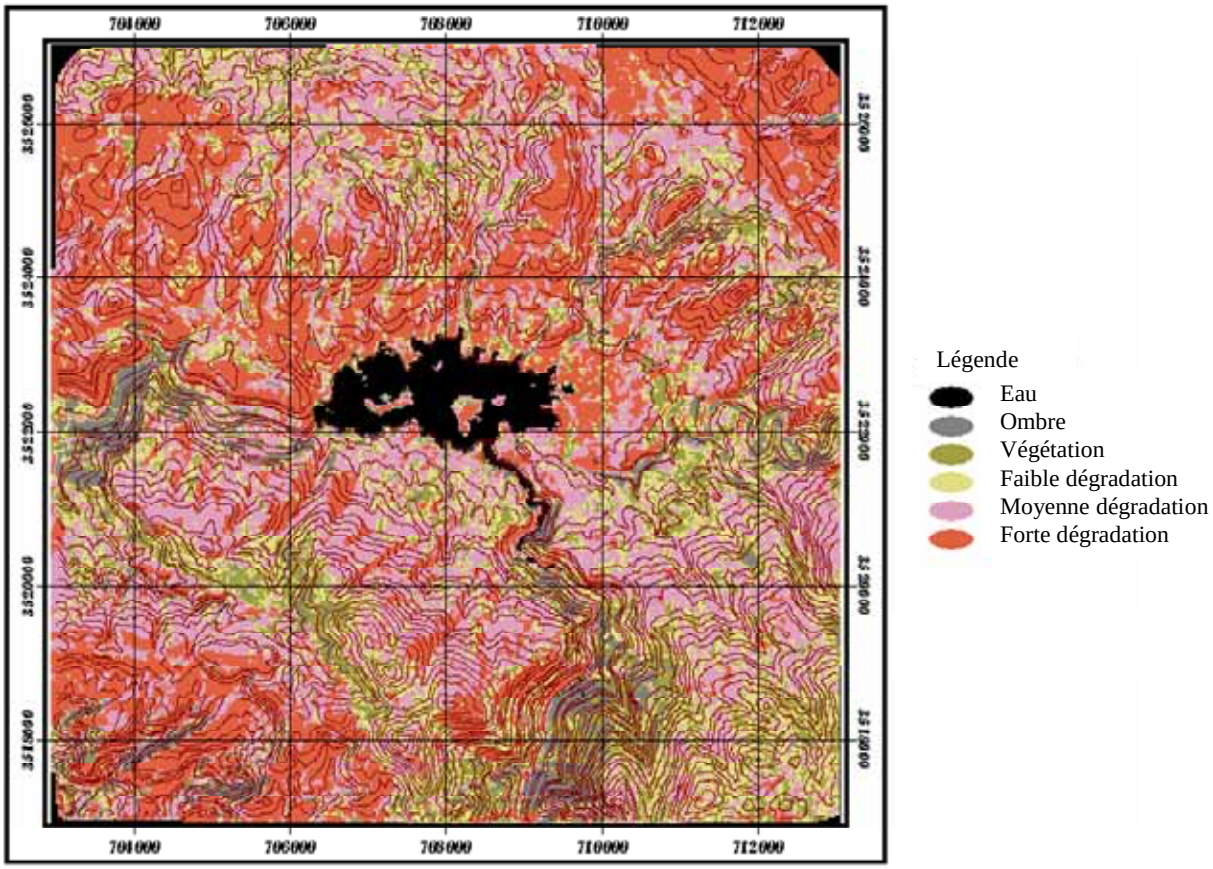



**Figure 7** : Carte de l'état dégradation du sol en fonction du relief. *Map of soil degradation with contour lines.*

Les variables géomorphométriques et l'indice de l'énergie de l'eau qui ont été dérivés nous ont informé sur les processus physiques responsables de l'érosion des sols. L'indice d'énergie d'eau mesure le potentiel érosif du ruissellement et constitue un indicateur des secteurs sensibles à l'érosion hydrique, alors que la pente et l'orientation ont bien caractérisé la géomorphologie du terrain, influençant grandement l'érosion. La synergie entre ces trois variables a permis de mieux rehausser les aires sujettes à une forte agressivité de ruissellement. Toutefois, l'intégration des variables spectrales et de la carte d'occupation du sol (établie indépendamment de la topographie et de l'IEE) permettra de dé-corréler l'effet de ces deux variables lors des AMC. Par conséquent, les résultats seront plus représentatifs de la répartition des différents niveaux de risque d'érosion.

Finalement, une fois l'intégration complétée dans le SIG, nous avons procédé à des AMC, en considérant plusieurs scénarios et en accordant différents poids aux variables considérées pour la dérivation des cartes de différents niveaux de risque d'érosion. En fonction des poids accordés ainsi que des différents scénarios et de l'AMC considérés, les résultats obtenus montrent des valeurs nulles pour une absence d'érosion et une valeur d'environ 100 % lorsque le risque d'érosion est trop élevé. Sur la figure 8, on montre en 3D les résultats des AMC en considérant différents niveaux de risque d'érosion : nul, faible, moyen, élevé et très élevé.

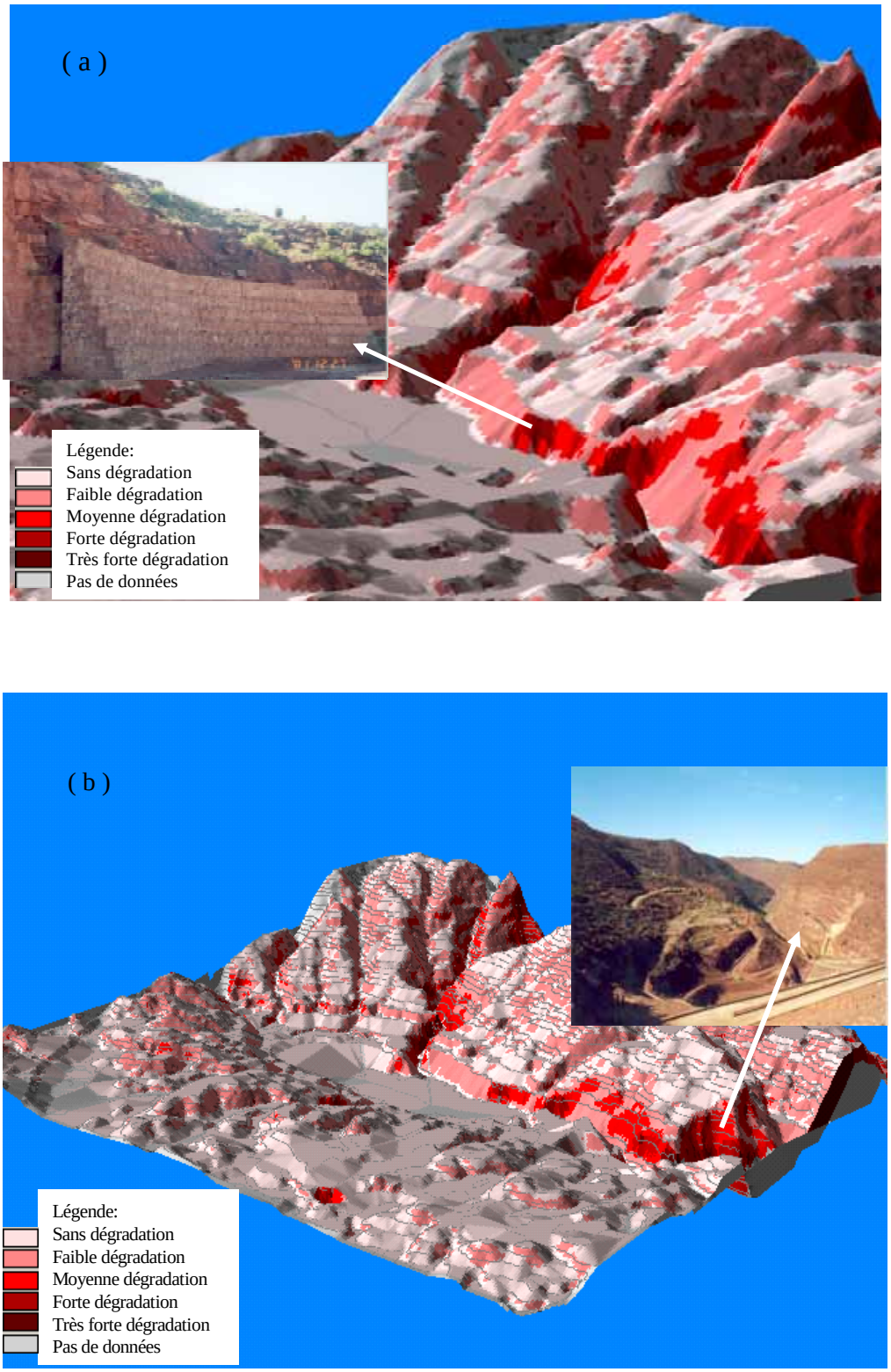



**Figure 8** : Carte des risques d'érosion en 3D qui résulte des analyses multicritères. *Erosion risk map in 3D resulting from the multi-criteria analyses.*

Globalement, nous constatons que la classe de faible risque d'érosion est associée aux classes de sols développés sur pentes douces ou dans des endroits plats, mais aussi aux classes à couvert végétal dense et à la surface d'eau du lac de barrage. Notons que les aires ombragées ont aussi été associées à la classe de faible risque à cause du manque d'information dans ces aires. La classe montrant un risque moyen est associée aux aires de pentes moyennes à fortes, mais avec une bonne couverture de végétation vivante et sénescente. Quant à la classe de haut risque, elle est associée aux aires plus accidentées, dépourvues de couverture végétale et présentant une valeur élevée des indices de forme et de coloration.

La validation de ces résultats par rapport à la réalité de terrain montre, qu'en général, les cartes obtenues à l'aide des AMC concordent avec la réalité observée. Par exemple, sur le terrain, nous avons trouvé un mur érigé aux abords du barrage pour des raisons de sécurité (figure 8a), ce qui a été identifié par les AMC comme une zone à très haut risque d'érosion. Aussi, les aires caractérisées par un risque d'érosion très élevé sont les canyons situés en aval du barrage (figure 8b).

## 5. CONCLUSION

Cette étude montre l'apport significatif de l'intégration dans un SIG des variables spectrales et géomorphométriques dérivées, respectivement, des données de télédétection et d'un MNA pour la cartographie des aires exposées à l'érosion dans les versants de la région d'Azilal, au Maroc. Grâce aux propriétés optiques des sols, les indices de forme et de coloration intégrant le proche et le moyen infrarouge (SWIR) permettent une excellente distinction entre les différentes classes de dégradation du sol. L'intégration de ces indices avec ceux de la végétation vivante et sénescente dans la classification non dirigée ISODATA a permis de cartographier la répartition du phénomène de la dégradation du sol. Les variables géomorphométriques caractérisant la géomorphologie du terrain et l'indice de l'énergie de l'eau, mesurant le potentiel érosif du ruissellement, constituent des bons indicateurs des aires susceptibles à l'érosion hydrique. En considérant la base de données créée, les AMC ont permis d'identifier les aires à différents risques d'érosion : nul, faible, moyen, élevé et très élevé. La validation des résultats obtenus par rapport à la réalité de terrain met en évidence la contribution de l'approche proposée pour l'élaboration d'un système d'aide à la décision. Celui-ci permettra de prendre des mesures d'intervention qui s'imposent pour la protection des secteurs à risque et aussi pour préserver le patrimoine du sol et de la végétation pour un développement durable.

### Remerciements

Cet article est un hommage posthume à notre professeur Ferdinand Bonn, décédé tragiquement en août 2006 au Maroc. Le Dr Bonn est l'un des premiers canadiens-français à faire rayonner nos techniques et méthodes au-delà de nos frontières. Il m'avait invité au CARTEL comme étudiant pour me spécialiser dans cette technologie à laquelle il croyait fermement. Grâce à son support, j'ai reçu une bourse d'excellence du Gouvernement du Québec comme étudiant au doctorat pour deux stages. Le premier au JPL de la NASA en Californie et le second à l'Université d'Arizona, à Tucson. En guise de reconnaissance pour ce grand homme, je l'avais proposé en 2001 pour la Médaille d'or de la Société canadienne de télédétection. Ce Prix est décerné aux pionniers et aux talentueux. Bien entendu, Dr F. Bonn le méritait amplement pour sa distinction professionnelle et pour ses qualités humaines exceptionnelles.

Les auteurs remercient le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada, l'OTAN et la Faculté des arts de l'Université d'Ottawa pour leur support financier. Nous remercions aussi la Faculté des sciences et techniques de Béni-Mellal et la Direction provinciale de l'agriculture d'Azilal pour le support logistique sur le terrain. Entre autres, ils remercient les évaluateurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions pour l'amélioration du contenu scientifique de cette publication.

### Références

Agoumi, A. et Debbarh, A. (2006) Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2005). http://www.rdh50.ma/fr/pdf/contributions/GT8-1.pdf, 62 p.

Ait Fora, A. (1995) Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin versant du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radio-actifs et la susceptibilité magnétique des sédiments. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 250 p.

Anys, H. (1991) Utilisation des données de télédétection dans un système d'information géographique pour l'étude de l'érosion hydrique du bassin versant de l'Oued-Aricha (Settat, Maroc). Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 83 p.

ASD (Analytical Spectral Devices, Inc.) (1999) http://www.asdi.com/products-spectroradiometers.asp.

Baban, S.M.J. and Yusof, K.W. (2001) Modelling soil erosion in tropical environments using remote sensing and geographical information systems. Hydrological Sciences, vol. 46, p. 191-198.

Bannari, A., Morin, D., Bénié, G.B. and Bonn, J.F. (1995a) A theoretical review of different mathematical models of geometric corrections applied to remote sensing images. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 27-47.

Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D. and Bonn, F. (1995b) A Review of Vegetation Indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 95-120.

Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D. et Zagolski, F. (1996) Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 10, p. 1885-1906.

Bannari, A., Gibson, J.R. and Morin, D. (1997) The Necessity of Exterior Orientation Parameters for the Rigorous Geometric Correction of MEIS-II Airborne Digital Image. Remote Sensing Reviews, vol. 16, p. 135-156.

Bannari, A., Teillet, P.M. et Richardson, G. (1999) Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des données de télédétection. Journal canadien de télédétection, vol. 25, n° 1, p. 45-59.

Bannari, A., Haboudane, D. et Bonn, J.F. (2000) Intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de cultures. Journal canadien de télédétection, vol. 26, n° 5, p. 384-393.

Bannari, A., Teillet, P.M. et Landry, R. (2004) Comparaison des réflectances des surfaces naturelles dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM de Landsat-5 et TME+ de Landsat-7. Télédétection, vol. 4, n° 3, p. 263-275.

Bannari, A., A. Pacheco, K. Staenz; H. McNairn and K. Omari (2006) Estimating and Mapping Crop Residue Cover in Agricultural Lands Using Hyperspectral and IKONOS data. Remote Sensing of Environment, vol. 104, p. 447-459.

Baumgardner, M.F., Sylva, L.F., Biehl, L.L. and Stoner, E.R. (1985) Reflectance properties of soil. Advances in Agronomy, vol. 38, p. 1-44.

Ben-Souda, M. (1997) La lutte contre la désertification au Maroc : une constante dans les plans de développement économique et social du Royaume. Ministère de l'Agriculture, Rabat, Maroc, 9 pages.

Burrough, P.A. (1986) Principles of geographical informations systems for land resources assessment. Clarendon Press, Oxford, 194 p.

Burrough, P.A. and McDonnell, R.A. (2000) Principles of Geographical Information Systems; Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press, Oxford, 333 p.

Caloz, R., Blaser, T.J. et Willemin, G. (1993) Création d'ortho-image à l'aide d'un modèle numérique d'altitude - Influences des modes de rééchantillonnage radiométrique. P. 17-30, *in* Dubois, J.-M.M., Cavayas, F. et Lafrance, P. (réd.) Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Actes des 4e journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF, Montréal, 21-23 octobre 1991, Presses de l'Université du Québec et AUPELF, Sainte-Foy et Montréal, 366 p.

Calzolari, C., Ongaro, L., Sarfatti, P. and Magazzini, P. (1996) Use of Landsat TM and DEM data in producing reconnaissance scale soil maps. P. 325-340, *in* Escadafal, R., Mulders, M.A. et Tihombiano, L. (réd.) Actes du symposium international : Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographique. Ouagadougou, Burkina-Faso, 6-10 février 2005. Publications des scientifiques de l'Institut de recherche pour le développement, Paris, 619 p.

Cavallo, A. and Norese, M.F. (1998) GIS and multicriteria analysis to evaluate and map erosion and landslide hazards. Informatica, vol. 12, p. 25-44.

Courault, D., Girard, M.C. et Escadafal, R. (1988) Modélisation de la couleur des sols par télédétection. P. 357-362, *in* Guyenne T.D. et Hunt J.J. (réd.) Actes du 4e Symposium international « Mesures physiques et signatures en télédétection », Aussois (France), 18-22 janvier 1988, Publication ESA SP-287, European Space Agency, Noordwijk.

Deschamps, P.Y., Herman, M. et Tanré, D. (1981) Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres, Modélisation et possibilités de correction. P. 543-558, *in* Actes du 1er colloque international sur les signatures spectrales d'objets en télédétection. Avignon, 8-11 septembre 1981, Société internationale de photogrammétrie et télédétection, Versailles, 674 p.

Dymond, J.R. and Harmsworth, G.R. (1994) Towards automated land resource mapping using digital models. International Institute for Geo-Information Science and Earth Information Journal, vol. 2, p. 129-138.

Escadafal, R. et Huete, A.R. (1991) Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série 312, p. 1385-1391.

Escadafal, R., Girard, M.C. and Courault, D. (1989) Munsell soil color and reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and MT data. Remote Sensing of Environment, n° 27, p. 37-46.

Escadafal, R., Belghit, A. et Ben-Moussa, A. (1994) Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride. P. 253-259, *in* G. Guyot (réd.) Actes du 6e Symposium international sur les mesures physiques et signatures en télédétection, Val d'Isère (France), 17-24 janvier 1994, ISPRS-CNES.

Haboudane, D. (1999) Intégration des données spectrales et géomorphométriques pour la caractérisation de la dégradation des sols et l'identification des zones de susceptibilité à l'érosion hydrique. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 174 p.

Haboudane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S. and Mehl, W. (2002) Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally-based information and digital geomorphometric attributes. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, p. 3795-3820.

He, D.-C. et Wang, L. (1987) Introduction des centres initiaux pour l'algorithme d'agrégation autour de centres mobiles. International Journal of Remote Sensing, vol. 8, n° 2, p. 237-242.

Hill, J. (2000) Assessment of semi-arid lands: monitoring dryland ecosystems through remote sensing. P. 8769-8794, *in* Meyers, R.A. (réd.) Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation. John Wiley & Sons, Chichester, 14344 p.

Itten, K.I. and Meyer, P. (1993) Geometric and radiometric correction of TM data of mountainous forested areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, p. 764-770.

Jackson, R.D, Pinter, P.J., Paul, J., Reginato, R.J., Robet, J. and Idso, S.B. (1980) Hand-held radiometry. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration, Phoenix (Arizona), Agricultural Reviews and Manuals, ARM-W-19, 66 p.

Kaufman, Y.J. (1988) Atmospheric effects on spectral signature measurements and corrections. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, n° 4, p. 441-450.

Ketcheson, J.W. and Stonehouse, D.P. (1983) Conservation tillage in Ontario. Journal of Soils and Water Conservation, vol. 38, p. 253-254.

Koch, M. (2000) Geological controls of land degradation as detected by remote sensing: a case study in Los Monegros, north-east Spain. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, p. 457-473.

Liu, J.G. and Moore, J.M. (1990) Hue image RGB composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. International Journal of Remote Sensing, vol. 11, p. 1521-1530.

Leone, A.P., Wright, G.G. and Corves, C. (1995) The application of satellite remote sensing for soil studies in upland areas of southern Italy. International Journal of Remote Sensing, vol. 16, p. 1087-1105.

Madeira, J., Bédidi, A. Cervelle, B., Pouget, M. and Flay, N. (1997) Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils : the application of a Thematic Mapper image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, p. 2835-2852.

MAEF (Ministère de l'agriculture, du développement rural et des eaux et forêts) (2001) Programme d'action national de lutte contre la désertification. Royaume du Maroc, Rabat, 93 p.

Mathieu, R., Pouget, M., Cervelle, B. and Escadafal, R. (1998) Relationships between satellite based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment. Remote Sensing of Environment, n° 66, p. 17-28.

Mattikalli, N.M. (1997) Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of Landsat sensors using laboratory spectral signature. Remote Sensing of the Environment, vol. 59, p. 14- 28.

Melià, J., Gilabert, M.A., Younis, M.T., Garcia, J., Sommer, S., Mergier, J., Mehl, W., Hirscheider, A., Ferrara, A., Taberner, M., De Natale, F., Bellotti, A. and Mancino, G. (2000) Remote sensing vegetation assessment in Mediterranean semiarid landscapes. P. 597-606, *in* Balabanis, P., Peter, D., Grazi, A. and Tsogas, A. (réd.) Mediterranean desertification research results and policy implications. Proceedings of the International Conference on Mediterranean Desertification, Crête, 29 octobre-1er novembre 1996, European Union Publication 19303, vol. 2.

Millward, A.A. and Mersey, J.E. (1999) Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. Catena, vol. 38, p. 109-129.

Monbaron, M., Russell, D.A. and Taquet, P. (1999) *Atlasarus imelakei* n.g., n.sp. a brachiosaurid-like sauropod from the Middle Jurassic of Morocco. Sciences de la terre et des planètes. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, Paris, vol. 329, p. 519-526.

Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielson, G.A. and Peterson, G.A. (1993) Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Science Society of America Journal, vol. 57, n° 2, p. 443-452.

MPEP (Ministère de la prévision économique et du plan) (2000) Royaume du Maroc, Direction de la statistique, Rabat, www.statistic.gov.ma.

Mulders, M.A. and Sorateyan, S. (1996) GIS and remote sensing for mapping soils and erosion hazard in the Kaya region. P. 63-77, *in* Escadafal, R., Mulders, M.A. and Thomibiano, L. (réd.) Actes du symposium international « Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographique », Ouagadougou (Burkina-Faso), 6-10 février 2005, Publications des scientifiques de l'Institut de recherche pour le développement, Paris, 619 p.

Novak, K. (1992) Rectification of Digital Imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 58, n° 3, p. 339-344.

Paracchini, M.L., Bertolo, F., Folving, S. and Mégier, J. (1998) Remote sensing and GIS for land degradation assessment. P. 235-241, *in* P. Gudmandsen (réd.) Future trends in Remote Sensing : Proceedings of the 17th EARSEL Symposium on Future Trends in

Remote Sensing, Lyngby (Danemark), 17-19 juin 1997, A.A. Balkema, Rotterdam-Brookfield, 496 p.

Parenteau, M.P., Bannari, A., El-Harti, A., Bachaoui, M. and EL-Ghmari, A. (2003) Characterization of the State of Soil Degradation by Erosion Using the Hue and Coloration Indices. P. 2284-2286, *in* Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2003). Toulouse (France), 21-25 juillet 2003. InControl Production, Monterey (California,), vol. 4, p. 2284-2286.

PCI Geomatics Inc. (2003) Geomatica-9 Software Solution. http://www.pcigeomatics.com.

Pereira, J.M.C. and Duckstein, L. (1993) A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. International Journal of Geographic Information Systems, vol. 7, p. 407-424.

Post, D.F., Horvath, E.H., Lucas, W.M., White, S.A., Ehasz, M.J. and Batchily, A.K. (1994) Relation between soil color and Landsat reflectance on semiarid rangelands. Soil Science Society of America Journal, vol. 58, n° 6, p. 1809-1816.

Price, J.C. (1990) On the information content of soil reflectance spectra. Remote Sensing of Environment, n° 33, p. 113-121.

Price, J.C. (1987) Calibration of satellite radiometers and comparison of vegetation indices. Remote Sensing of Environment, n° 21, p. 15-27.

Radeloff, V., Hill, J. and Mehl, W. (1997) Forest mapping from space: enhanced satellite data processing by spectral mixture analysis and topographic corrections. Space Applications Institute, Environmental Mapping and Modeling Unit, European Commission, Ispra (Italie), 88 p.

Reusing, M., Schneider, T. and Ammer, U. (2000) Modelling soil loss rates in the Ethiopian highlands by integration of high resolution MOMS-02/D2-stereo-data in a GIS. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, p. 1885-1896.

Richards, J.A. (1993) Remote Sensing Digital Image Analysis. 2e édition), Springer-Verlag, New York, 340 p.Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C. (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center), Type-III Final Report, Greenbelt (Maryland), 164 p.

Schwartz, P. et Randall, D. (2003) Le scénario d'un brusque changement de climat et ses implications pour la sécurité nationale des Etats-Unis. http://paxhumana.info/article.php3?id_article=427.

Tanré, D. (1982) Interaction rayonnement-aérosols: applications à la télédétection et au calcul du bilan radiatif. Thèse de doctorat, Université des sciences et techniques de Lille, Lille (France), 258 p.

Teillet, P. M. (1992) An Algorithm for the Radiometric and Atmospheric Correction of AVHRR Data in the Solar Reflective Channels. Remote Sensing of Environment, n° 41, p. 185-195.

Teillet, P. M. (1994) Vegetation Index Monitoring: Radiometric Considerations. Remote Sensing in Canada, vol. 22, n° 1, p. 8-9.

Teillet, P.M. and Santer, R.P. (1991) Terrain elevation and sensor altitude dependence in semi-analytical atmospheric code. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 1, p. 36-44.

UNESCO (2006) Changement climatique. Patrimoine Mondial, No. 42.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., Agriculture Handbook n° 537, 58 p.