

Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban

RANIA BOU KHEIR ^{a*}, MICHEL-CLAUDE GIRARD ^b, AMIN SHABAN ^a,
MOHAMAD KHAWLIE ^a, GHALEB FAOUR ^a et TALAL DARWICH ^a

^a Centre national de télédétection / Conseil national de la recherche scientifique, B.P. 11 - 8281, Beyrouth, Liban. Téléphone : +961 4 409 845/6 ; télécopieur : +961 4 409 847; courriel : rteled@inco.com.lb

^b Institut National Agronomique Paris-Grignon, B.P. 1, 78 850 Grignon, France. Téléphone : +33 130 815 270 ; télécopieur : +33 130 815 270 ; courriel : girard@lacan.grignon.inra.fr

(soumis le 17 janvier 2000 ; révisé le 23 mars 2000 ; accepté le 6 juin 2000)

L'érosion hydrique des sols est un problème majeur dans les milieux semi-arides résultant de l'intensification agricole, de la dégradation des terres et de très fortes variations climatiques. Bien qu'affectant de larges zones, en particulier la région côtière, l'érosion n'a été que peu étudiée au Liban et des méthodes de contrôle de ce type d'érosion s'avèrent nécessaires afin d'assurer une gestion durable des sols.

L'objectif de cette étude est de développer une méthode, basée sur l'intégration des images satellitaires (TM de Landsat) et de données cartographiques dans un système d'information géographique (SIG) pour l'identification et la cartographie, à l'échelle de 1 : 100 000, des zones à risques d'érosion hydrique pour les sols de la région « Jbaïl - Qartaba ». L'approche consiste à utiliser des facteurs d'érosion telles que : l'érosivité de la pluie et des sols, l'intensité de la pente et surtout l'occupation des sols. La méthode prend aussi en compte l'infiltrabilité des roches reliée à la nature karstique et fracturée du terrain et, par conséquent, l'interaction superficielle avec la circulation de l'eau. L'image satellitaire TM de Landsat a été utilisée pour identifier les systèmes de fractures et principalement pour caractériser l'occupation des sols qui est un signe de l'interaction Homme-milieu vis-à-vis de l'érosion. Les quatre classes d'érosion choisies (nulle, faible, modérée et forte) ont été validées à partir d'observations de terrain. Les résultats ont été validés dans 69,2 % des cas.

Mots-clés : érosion hydrique ; télédétection ; karst ; système d'information géographique.

Contribution of remote sensing to the modeling of soil-water erosion on the coastal region of Lebanon

Soil-water erosion is a major problem in semi-arid environments arising from intensive agriculture, land degradation and very strong climatic variations. Although affecting large areas, in particular, the coastal region, the erosion has not been completely yet studied in Lebanon and methods of monitoring this type of erosion are necessary in order to secure sustainable soil management.

The aim of this study is to develop a methodology, based on the integration of satellite images (TM of Landsat) and the manipulated maps on a geographic information system (GIS) for identifying and mapping, at a scale of 1 : 100 000, zones of risks of soil-water erosion in the region « Jbaïl - Qartaba ». The approach consists to utilize the factors of erosion such as : the rainfall and the soil erosivity, the slope intensity and especially the land cover. The method also takes into account, the rock infiltrability related to the karstic and fractured nature of the terrain and, therefore, surficial interaction with water circulation. Satellite image TM of Landsat has been used to identify the fracturing systems and principally to characterize the land cover which is a sign of interaction Man-Environment against erosion. The selected four classes of erosion : no, low, moderate and high were validated from field observations. The results were validated in 69,2 % of cases.

Keywords : water erosion ; remote sensing ; karst ; geographic information system.

1. INTRODUCTION

L'érosion hydrique des sols, dans la région côtière du Liban, est due en particulier à l'action conjuguée de la déforestation des zones montagneuses, du surpâturage, de la mauvaise conduite des travaux agricoles et de l'urbanisme chaotique ainsi qu'à la nature torrentielle des précipitations. Les conséquences, nombreuses et néfastes, en sont une désertification du milieu

naturel, une dégradation des terres agricoles et une baisse des rendements des cultures (FAO, 1980 ; FAO, 1983).

Afin d'assurer la conservation des sols, un classement des terres a été élaboré en fonction de leur vulnérabilité à l'érosion (Girard *et al.*, 1996) en tenant compte, en particulier, des zones karstiques. En effet, ce travail se situe dans le cadre du projet pilote : « Jbaïl - Qartaba » qui fait partie du projet intitulé « Évaluation des

ressources naturelles dans la région côtière karstique du Liban » (Centre national de télédétection, 1999). On a utilisé la télédétection, associée à un système d'information géographique, pour caractériser l'incidence de l'action de l'Homme sur l'érosion et identifier les zones à risques (Bou Kheir, 1998), en mettant au point un modèle d'érosion régional qui sera validé par des observations de terrain.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

La région étudiée « Jbaïl – Qartaba » (200 km²), comprise entre les latitudes 34° 5' et 34° 10' et les longitudes 35° 38' et 35° 52' 30" (figure 1), est représentative des différents types de paysage de la région côtière libanaise tant par l'altitude (de 0 à 1900 m) que par les pentes (moyenne de 10 %), les précipitations annuelles (variant entre 900 et 1500 mm et concentrées sur 120 jours durant la période allant de novembre à avril), l'occupation du sol (région en majorité forestière, avec des terres cultivées en terrasses dans la montagne et cultures sous serre sur la côte) et l'utilisation des terres (espaces agricole et urbain).

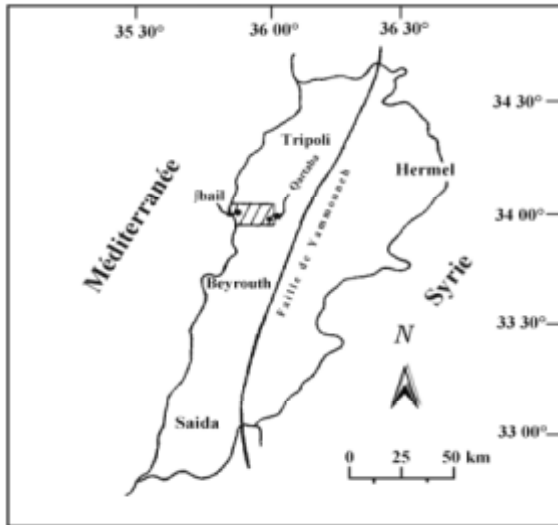


FIGURE 1 Localisation de la région d'étude. *Location of the study area.*

Cette zone, lithologiquement composée de tufs, d'argiles, de marnes, de dolomies mais avant tout de sables et de calcaire, présente une topographie en cuvettes fermées due à la présence d'un karst étendu. Elle correspond à une partie du massif du Liban allant de la côte jusqu'à la grande faille orientale du Liban : la faille de Yammouneh qui a entraîné un soulèvement des roches du Jurassique moyen. Les autres formations géologiques plongent de la flexure vers la mer en structure monoclinale simple et sont découpées par plusieurs failles plongeant aussi vers la mer.

Plusieurs ruisseaux et sources alimentent la région étudiée.

Les sols, identifiés à partir de la carte à l'échelle de 1 : 200 000 de Gèze (1956) sont les suivants : des sols noirs, des sols gris, des sols sableux, des sols jaunâtres de montagne, des sols bruns, des sols rouges (terra rosa), des sols des sables dolomitiques, des sols de mélange, des sables côtiers, des éboulis, des glissements de masse, des alluvions fluviales récentes et des accumulations d'origine humaine.

3. PRÉSENTATION DU MODÈLE

De nombreux modèles existent pour évaluer les risques d'érosion (Wischmeier and Smith, 1958 ; Bonn *et al.*, 1994 ; Kirkby, 1995 ; Thornes *et al.*, 1996 ; De Jong and Riezebos, 1997 ; Quinton, 1997 ; Ozden and Ozden, 1958 ; *etc.* « voir site <http://www.lacan.grignon.inra.fr> »). Ils ont été examinés en ayant soin de prendre en compte, d'une part, l'existence des régions karstiques et, d'autre part, de mettre en valeur l'incidence de l'action de l'Homme sur l'érosion.

On s'est basé sur les facteurs classiques (Wischmeier and Smith, 1958) qui ont été adaptés aux conditions spécifiques de la région côtière libanaise pour laquelle on avait une connaissance approfondie et exhaustive. Il fallait, d'une part, intégrer les zones karstiques et, d'autre part, élaborer un modèle valable pour un champ d'étude très vaste et très diversifié, ce qui ne nous permettait pas d'utiliser directement des modèles du type USLE ou MUSLE.

Les facteurs influençant le processus d'érosion hydrique des sols que l'on a retenus pour la région d'étude sont les suivants : des facteurs intrinsèques au sol (infiltrabilité des roches, érosivité des sols) et des facteurs extrinsèques (pente, érosivité de la pluie, occupation des sols). La répartition spatiale du ruissellement, principal moteur de cette érosion, est contrôlée par celle des précipitations et par les caractéristiques de la surface des zones occupées par les roches et les sols. En fonction de la couverture des sols, la sensibilité à l'érosion hydrique varie d'une manière importante. En ce qui concerne la pente, dès qu'elle est suffisante pour permettre à l'eau de ruisseler, le terrain est vulnérable à l'érosion hydrique.

Il a fallu aussi adapter le modèle aux contraintes liées aux documents numérisés existants : carte des formes du relief (1 : 50 000 de 1998), géologique (1 : 50 000 de 1945 et 1951), pluviométrique (1 : 200 000 de 1971), image TM de Landsat acquise le 9 septembre 1997. Ces informations ne suffisant pas pour définir un modèle d'érosion dans la région étudiée, il a été décidé de faire appel à la télédétection pour

l'interprétation de l'occupation du sol ainsi que des failles et des linéaments. Les caractères relatifs aux karst et à la densité de drainage ont été établis à partir de la carte topographique.

3.1. Facteurs intrinsèques

3.1.1. Infiltrabilité des roches

L'infiltrabilité des roches affleurantes intervient dans l'érosion hydrique car une infiltration faible indique qu'une grande quantité d'eau peut potentiellement ruisseler, ce qui accroît la quantité de terre transportable. On a défini l'infiltrabilité des roches à partir de la lithologie, des failles et linéaments, du karst et de la densité de drainage.

a) La lithologie a été déterminée à partir des cartes géologiques de Jbail (Dubertret, 1945) et de Qartaba (Dubertret et Wetzel, 1951). En fonction de la perméabilité des différents types de roches, la classification établie s'est basée sur plusieurs travaux (Davis and Deweist, 1966 ; Beydoun, 1977), mais avec une adaptation aux conditions locales de la région étudiée.

b) Les failles et les linéaments sont associées généralement à un taux d'infiltration élevé et à une érosion hydrique légère dans les zones où ils se trouvent (Khawlie, 1994). Les failles et les linéaments ont été interprétés visuellement sur les images satellitales (TM de Landsat). Ensuite, une classification a été réalisée en considérant, pour les failles, leur longueur cumulée L en cm (sur la carte) dans une fenêtre de 2 km x 2 km et, pour les linéaments, leur nombre N dans une fenêtre de même taille. On a défini trois classes de plus ou moins grande probabilité d'infiltration : 1) faible ($L \leq 6$ cm ; $N \leq 2$), 2) moyenne ($6 < L \leq 10$ cm ; $2 < N \leq 4$) et 3) élevée ($L > 10$ cm ; $4 < N \leq 6$).

c) Le karst est très développé au Liban. Dans la région étudiée, les roches calcaires sont ciselées et sculptées en cuvettes par les eaux de pluie et de ruissellement, mais leur perméabilité tend à absorber ces eaux, ce qui a pour effet de réduire les risques d'érosion hydrique. Les cartes topographiques font ressortir toutes les cuvettes présentes dans cette région et leur nombre (moins de 10, 10 à 20 et plus de 20) dans une fenêtre de 2 km x 2 km, a permis de distinguer trois classes d'infiltrabilité (basse, moyenne et élevée).

d) La densité de drainage (définie comme le nombre de confluences présentes sur une certaine longueur des ruisseaux principaux) donne une certaine indication de l'infiltrabilité des roches. En effet, plus l'érosion hydrique est sévère, plus le ruissellement est fort et plus la densité de

drainage est élevée. On a numérisé toutes les rivières permanentes et saisonnières présentes dans la région étudiée à partir des cartes topographiques. Après une restitution cartographique à l'échelle de 1 : 50 000, on a compté, sur cette carte, pour une longueur de 5 cm, le nombre de confluences des cours d'eau principaux. En fonction du nombre de confluences, quatre classes principales de densité de drainage ont été distinguées : infiltrabilité basse, moyenne, élevée, et très élevée.

3.1.2. L'érosivité des sols

On a retenu les caractéristiques suivantes du sol : la texture, la teneur en matière organique et la profondeur du sol. En effet, les horizons de surface ayant une texture fine sont sensibles à l'érosion hydrique ainsi que les sols relativement pauvres en matière organique (Finke *et al.*, 1998). La résistance à l'érosion hydrique est plus faible pour les sols superficiels que pour les sols profonds (Ryan, 1982). Ainsi, lorsque les sols superficiels sont saturés par la pluie, la terre s'écoule vers le bas de la pente, même si celle-ci est très faible. La texture et la teneur en matière organique ont été déterminées à la suite de prélèvements et d'analyses d'échantillons de sols en des sites choisis en lien avec les cartes des sols (Gèze, 1956) et des pentes.

En se basant sur les travaux de Fanning et Fanning (1989) et de Finke *et al.* (1998) pour la texture, de Gèze (1956), de Lamouroux (1972) et de Darwich et Zurayk (1997) pour la teneur en matière organique ainsi que de la FAO (1990) et de la FAO (1996) pour la profondeur du sol, les textures, les teneurs en matière organique et les profondeurs ont été regroupées chacune en quatre classes permettant de déterminer les principales propriétés du sol. Après des études de terrain, ces critères ont été adaptés aux conditions du Liban.

3.2. Facteurs extrinsèques

3.2.1. La pente

À partir de cartes de forme de relief dressées par le centre national de télédétection avec la méthodologie SOTER (Van Engelen and Wen, 1995), cinq classes principales de pentes ont été distinguées. Dans les zones où le karst est dominant, la détermination de ce pourcentage de pente a été très difficile en raison de la complexité de relief. La longueur de la pente n'a pas pu être prise en compte, la carte de forme du relief ne l'indiquant pas. Selon Gay (1996) et la FAO (1983), cela n'aurait pas une importance primordiale dans les régions méditerranéennes.

3.2.2. L'érosivité de la pluie

Elle dépend surtout de l'intensité de la pluie (Le Bissonnais et Papy, 1997), malheureusement il n'y a pas de stations climatologiques dans la région. Nous avons distingué, à partir de la carte pluviométrique, trois classes de pluies annuelles, équidistantes de 200 mm, soit 900-1100 mm, 1100-1300 mm et 1300-1500 mm. Ce choix, très arbitraire, pourra être revu quand on disposera d'autres éléments pour affiner l'érosivité de la pluie.

3.2.3. L'occupation du sol

La carte d'occupation du sol a été établie à partir de l'image TM par classification du maximum de vraisemblance (logiciel Erdas imagine). Neuf classes ont été distinguées : 1) habitat dense, 2) roches nues, 3) habitat lâche, 4) zones pâturées, 5) forêts à base de feuillus principalement de chênes, 6) bananiers / cultures sous serre, 7) arbres fruitiers, 8) forêts dégradées et 9) sols nus. Il est à remarquer qu'il n'existe pas de sols de grande culture dans cette région-là.

La classification des différents modes d'occupation des sols (tableau 1) en fonction de leur sensibilité à l'érosion hydrique a été établie à la suite des observations de terrain et de la consultation de plusieurs études bibliographiques (FAO, 1990, 1996 ; Garcia-Ruiz *et al.*, 1996 ; Poesen and Hooke, 1997).

TABLEAU 1 Les classes d'occupation des sols. *Classes of land cover*

Classes	Mode d'occupation des terres	Sensibilité à l'érosion hydrique
1	habitat dense, roches nues	Nulle
2	habitat lâche, zones pâturées, forêts	Actuellement nulle
3	bananiers / cultures sous serre, arbres fruitiers	Faible
4	forêts dégradées	Forte
5	sols nus	Très forte

Les risques d'érosion hydrique sont nuls dans les zones urbaines denses (sol présent en petite quantité ou absent) et sur les roches nues résistantes lorsqu'elles sont dominantes en surface. Mais, dans les deux cas, le transport des eaux et donc l'atterrissement en aval sont favorisés.

Les forêts bien entretenues sont considérées comme non sensibles à l'érosion hydrique. En effet, la permanence de la végétation, feuilles et branches des arbres, amortit l'impact des gouttes de pluie. Le système racinaire maintient la cohésion du sol et la litière, qui améliore la structure des horizons de surface du sol, les rend plus perméables à l'eau.

Les habitants des zones urbaines lâches (habitat lâche) cultivent souvent un « jardin potager » et amendent ces terres, ce qui maintient la cohésion du sol. En conséquence, actuellement, la sensibilité à l'érosion est nulle, mais cela pourrait changer très rapidement avec des modifications de l'occupation du sol. Les serres et les bananeraies se situent dans les mêmes zones. La litière des bananiers confèrent une certaine protection contre l'érosion hydrique des sols dénudés par les travaux de construction de serres. Les plantations d'arbres fruitiers, après l'aménagement des terrasses, ont pour effet de rendre les sols peu sensibles à l'érosion hydrique. Les incendies répétés et le déboisement illégal dégradent la forêt, ce qui engendre une forte sensibilité à l'érosion hydrique. De même, le surpâturage provoque, à la longue, la dégradation de la forêt et favorise l'érosion. L'érosion hydrique atteint son maximum pour les sols nus, sans protection contre l'eau.

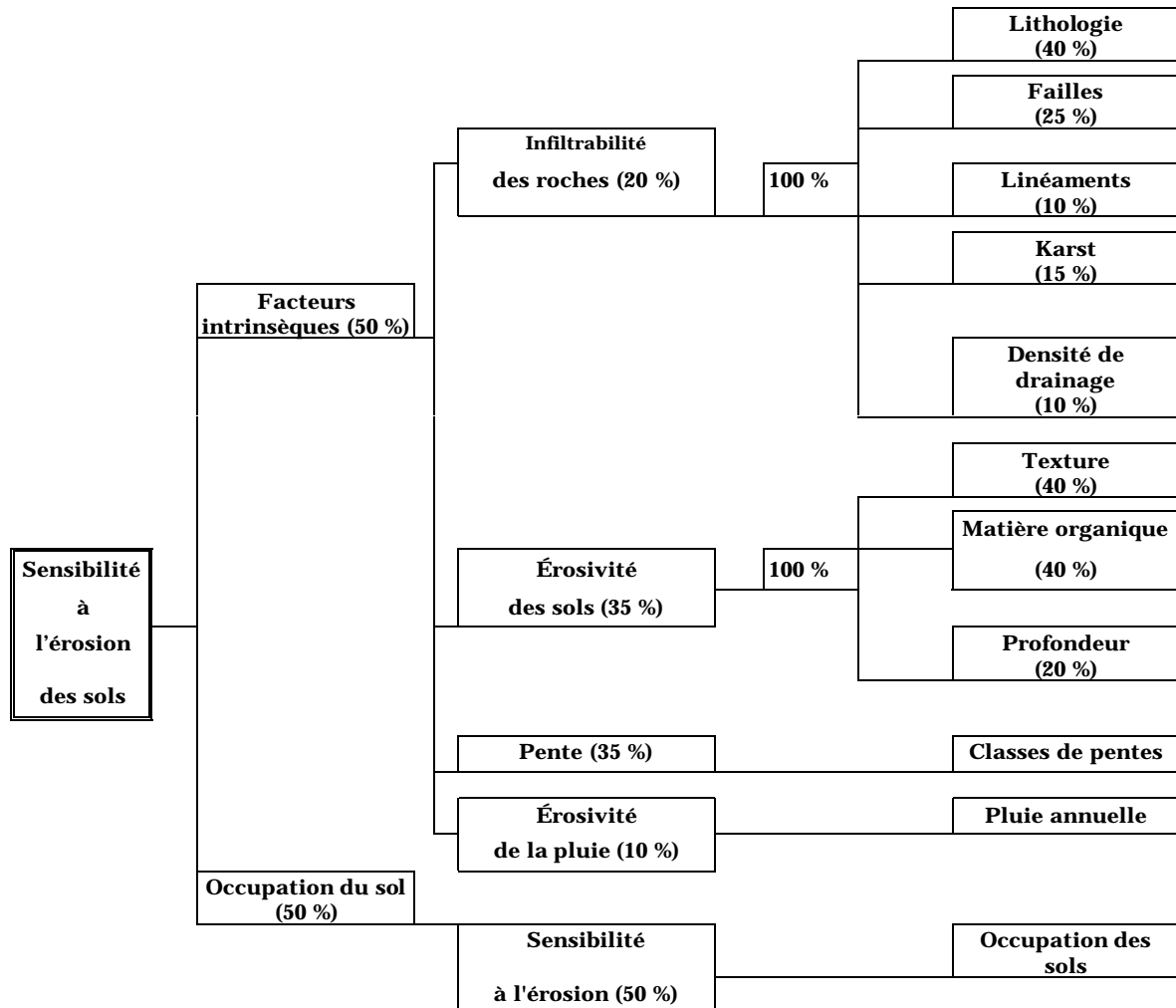
3.3. Le modèle utilisé

Un des principaux problèmes que pose les modèles qui se basent sur des facteurs d'érosion est d'estimer les pondérations. Pour ce faire, on s'est référé aux travaux de Lenthe et Krone (1981), de Morgan (1986) et de Luken et Krone (1989), ainsi qu'aux experts travaillant au Liban, en Turquie et à Malte pour le projet dans lequel s'inscrit ce travail. Ensuite, on a défini, pour chaque facteur, un nombre de modalités compris entre 3 et 5 sauf pour la lithologie qui en a 7 (tableau 2). Enfin, on a procédé au paramétrage régional en deux temps : 1) paramétrage de l'infiltrabilité des roches puis de l'érosivité des sols et 2) paramétrage de l'ensemble des critères : infiltrabilité des roches, érosivité des sols, pentes, érosivité de la pluie et sensibilité à l'érosion (occupation du sol).

Le facteur le plus nouveau pour le projet concerne l'infiltrabilité des roches. On a considéré que l'influence de la lithologie était essentielle pour l'ensemble de la région étudiée. On lui a donc donné un poids majoritaire, soit 40 %. La géologie structurale est importante dans la région et en particulier les failles (qui ont pour effet d'accroître l'infiltration), aussi leur a-t-on affecté un poids de 35 %, dont 25 % aux failles et 10 % aux linéaments. Ensuite les 25 % restant ont été affectés pour 15 % aux effets du karst et 10 % à ceux de la densité de drainage.

L'érosivité des sols, a été décomposée en trois éléments : texture (40 %), matière organique (40 %) et profondeur du sol (20 %). En effet, la stabilité de la structure, qui conditionne la résistance des sols à l'érosion hydrique, dépend surtout de la texture et de la quantité de matière organique.

TABLEAU 2 Organigramme du modèle, indiquant les pondérations utilisées (entre parenthèses). *Flowchart of model, indicating the used weighting (between parenthesis)*



Pour chacune des principales unités de la carte des formes de relief, ces deux paramètres ont été mesurés sur 40 échantillons prélevés, sur l'horizon A ou sur 30 cm d'épaisseur. La profondeur des sols a été définie à partir des descriptions de fosses pédologiques observées sur le terrain.

On a désiré porter l'attention sur l'impact que l'Homme peut avoir sur la sensibilité à l'érosion d'un milieu. En conséquence, on a affecté ce facteur d'un poids (50 % - 50 %) équivalent à l'ensemble des autres. Pour ces derniers, on a pris comme facteurs prédominants, et à égalité, l'érosivité des sols (35 %) et les pentes (35 %). L'érosivité de la pluie a été pondérée faiblement (10 %) car on ne dispose pas des intensités des pluies, mais seulement des moyennes annuelles.

Enfin, l'infiltrabilité des roches, facteur nouveau, a été pondérée à 20 %.

4. RÉSULTATS

L'intégration des différents facteurs dans un système d'information géographique (logiciel ArcInfo) a permis de produire les diverses cartes thématiques correspondant aux divers facteurs : infiltrabilité des roches (figure 2), érosivité des sols (figure 3), pentes (figure 4), sensibilité à l'érosion hydrique estimée à partir de la carte d'occupation des sols. On a obtenu la carte des risques d'érosion hydrique des sols (figure 5) à partir de la combinaison des cartes thématiques précédentes. Comme il s'agissait d'une approche méthodologique, on n'a pas discuté du nombre de classes : on a choisi de prendre quatre classes.

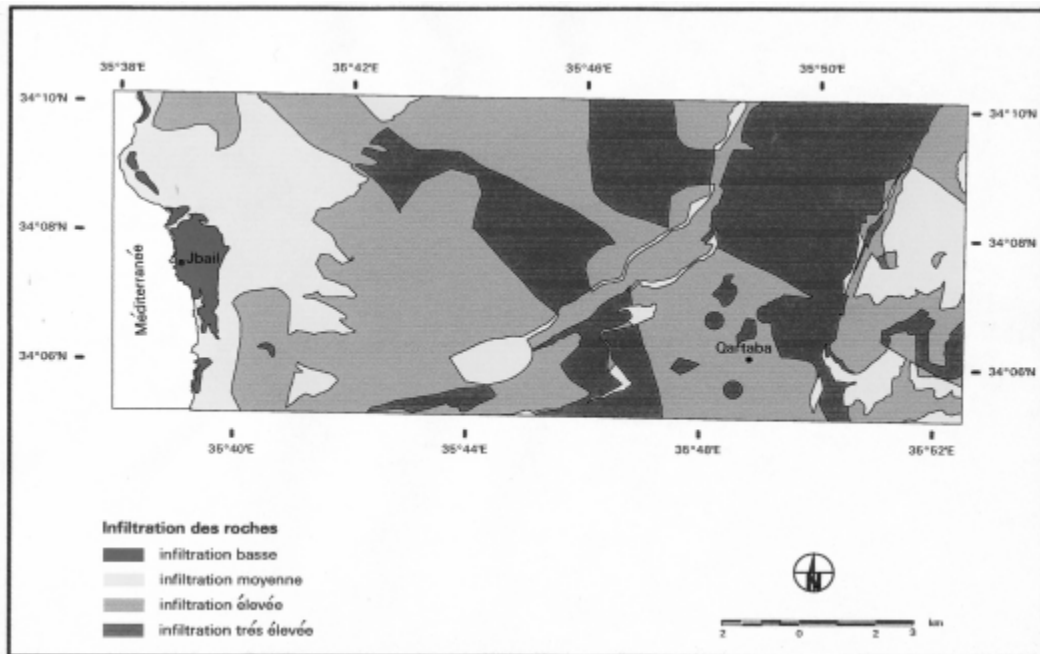


FIGURE 2 Carte d'infiltrabilité des roches- Jbail / Qartaba. *Rock infiltrability map - Jbail / Qartaba.* (voir image couleur I à la fin de la revue)

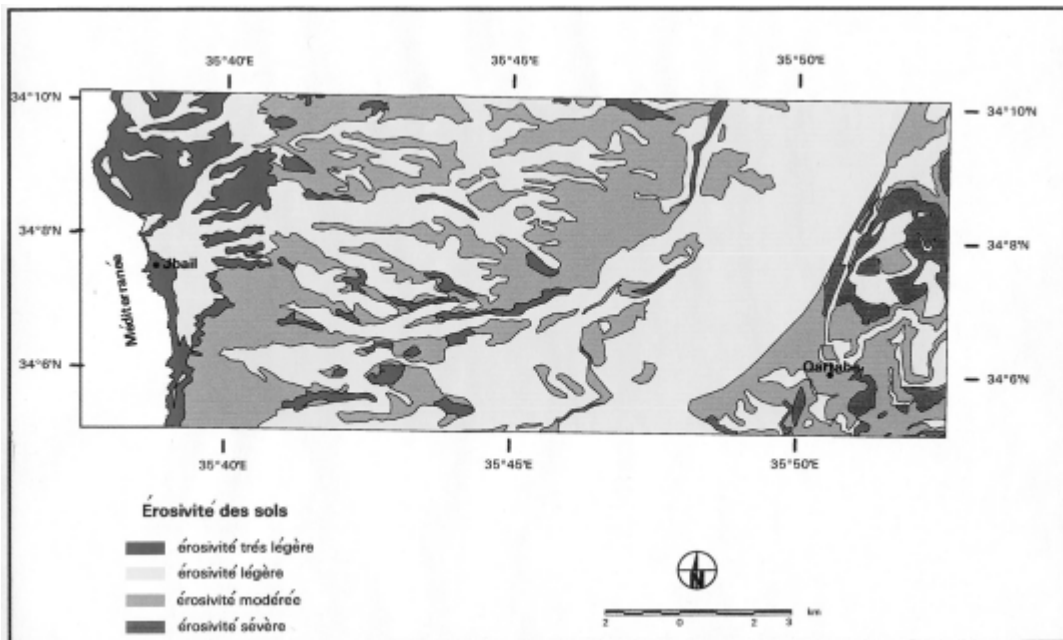


FIGURE 3 Carte d'érosivité des sols - Jbail / Qartaba. *Soil erosivity map - Jbail / Qartaba.* (voir image couleur II à la fin de la revue)

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA MODÉLISATION

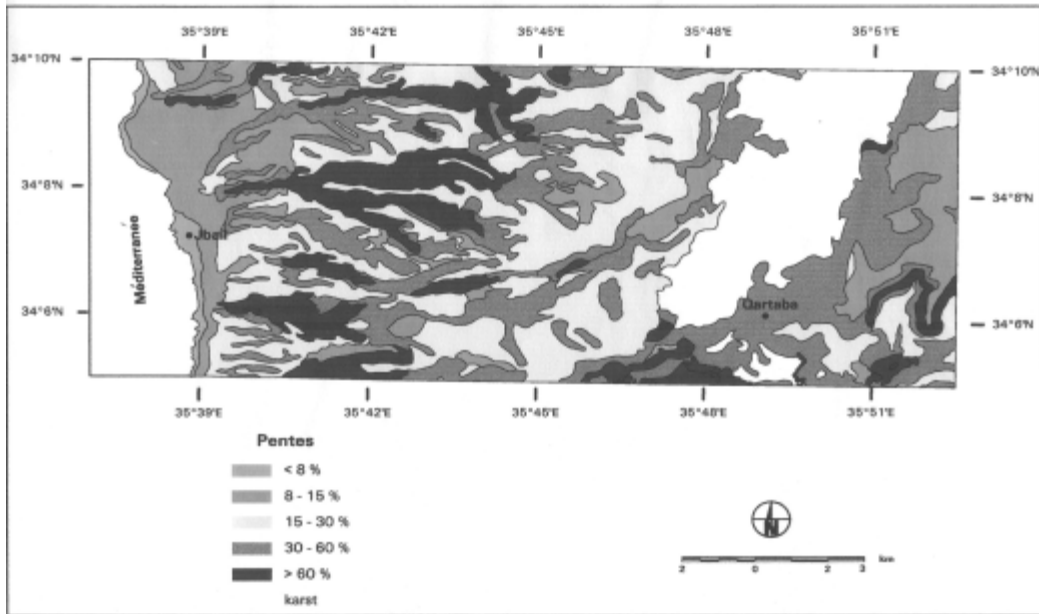


FIGURE 4 Carte des pentes- Jbail / Qartaba. *Slope map - Jbail / Qartaba.* (voir image couleur III à la fin de la revue)

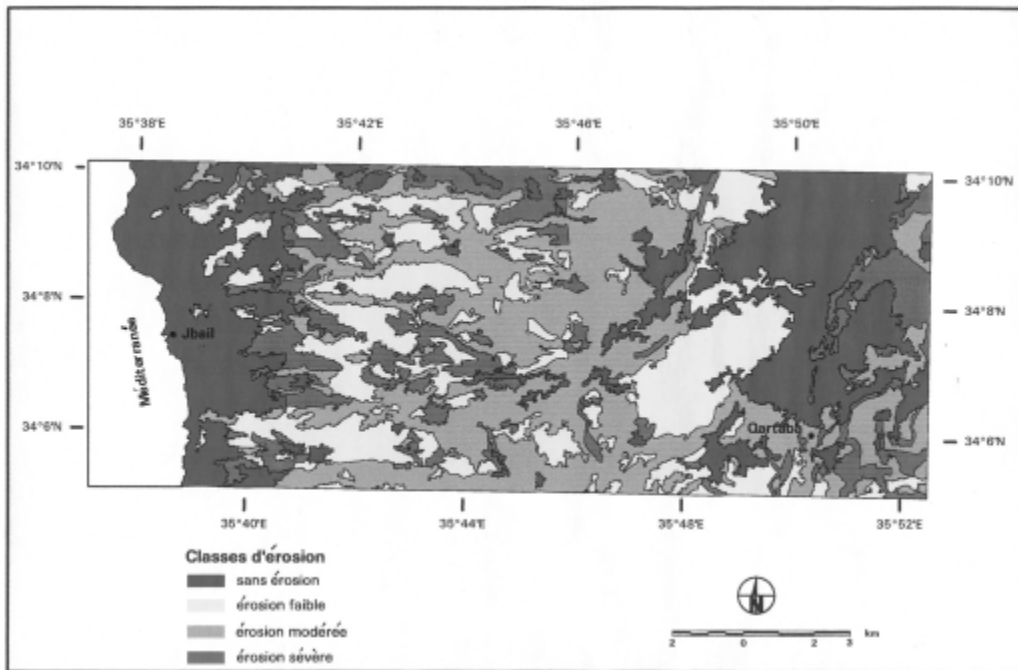


FIGURE 5 Carte des risques d'érosion hydrique des sols dans la région Jbail / Qartaba. *Soil-water erosion risk map in the region of Jbail / Qartaba.* (voir image couleur IV à la fin de la revue)

5. VALIDATION

Comme l'objectif était d'étudier l'impact des activités de l'Homme sur l'érosion, la validation des résultats a porté d'abord sur l'occupation du sol, puis sur la carte des risques d'érosion.

5.1. Validation de l'occupation du sol

Pour valider la carte d'occupation du sol, 106 sites définis par échantillonnage stratifié sur l'ensemble de la zone étudiée ont été observés et décrits sur le terrain. Sur le tableau 3, on présente la matrice de confusion obtenue. L'exactitude de la classification correspond à la somme des sites dénommés de la même façon, sur

le terrain et à partir de la classification de l'image (tableau 4). Ces sites, qui se trouvent sur la diagonale du tableau 3, sont au nombre de 93, soit 87,7 %. Ce résultat est tout à fait satisfaisant. Les confusions méritant la peine d'être relevées concernent les 4 sites d'« habitat dense » classés en « bananiers / cultures sous serres », ainsi que les 3 sites d'« arbres fruitiers » classés en « roches nues ». Les autres thèmes sont très bien identifiés par la classification du maximum de vraisemblance à partir de l'image satellitale. En conséquence, l'occupation du sol, dont le poids est fort dans la détermination des classes de risque d'érosion, est validée.

TABLEAU 3 Matrice de confusion des sites observés sur la carte d'occupation des sols obtenue par classification à partir d'une image satellitale. *Error matrix of observed sites on land cover map obtained by classification from a satellite image.*

CLASSIFICATION										
TERRAIN	Habitat dense	Roches nues	Habitat lâche	Zones pâturées	Forêts	Bananiers / Serre	Arbres fruitiers	Forêts dégradées	Sols nus	TOTAL
Habitat dense	8	0	0	0	0	1	0	0	0	9
Roches nues	0	9	1	0	0	0	0	0	0	10
Habitat lâche	0	0	7	0	0	0	0	0	0	7
Zones pâturées	0	0	0	18	0	0	0	0	0	18
Forêts	0	0	1	0	15	0	0	0	0	16
Bananiers / Serre	4	0	0	0	0	6	0	0	0	10
Arbres fruitiers	0	3	0	0	0	0	7	1	0	11
Forêts dégradées	0	0	0	0	0	0	0	15	0	15
Sols nus	0	0	1	0	0	1	0	0	8	10
TOTAL	12	12	10	18	15	8	7	16	8	106

TABLEAU 4 Matrice de confusion de la carte de synthèse de l'érosion. *Error matrix of erosion synthesis map*

CLASSIFICATION							
TERRAIN	Sans érosion	Érosion faible	Érosion modérée	Érosion forte	TOTAL	Précision réalisateur %	Erreur de déficit %
Sans érosion	29	0	1	1	31	93,5	6,5
Érosion faible	1	10	1	3	15	66,6	33,4
Érosion modérée	10	2	16	3	31	51,6	48,4
Érosion forte	2	2	2	8	14	57,1	42,9
TOTAL	45	14	20	15	91		
Précision utilisateur %	69,0	71,4	80,0	53,3			
Erreur d'excédent %	31,0	28,6	20,0	46,7			

5.2. Validation de la carte des risques d'érosion

5.2.1. Paramètres de terrain

La validation est faite à partir de 91 sites observés sur le terrain, définis par échantillonnage stratifié. Sur le terrain, le repérage des sites s'est effectué à l'aide de la carte établie, de cartes topographiques et d'un système de positionnement par satellite (GPS). Ils ont été décrits par 14 variables : 1) la pente, 2) la lithologie, 3) la matière organique du sol, 4) la compaction du sol, 5) l'épaisseur du sol, 6) le type de végétation, 7) la densité de végétation, 8) l'utilisation des sols, 9) l'exposition des racines à l'air, 10) les pédicules d'érosion, 11) les glissements de sols, 12) les mouvements de sols, 13) les ravines et 14) les buttes de sol résiduel (figure 6).

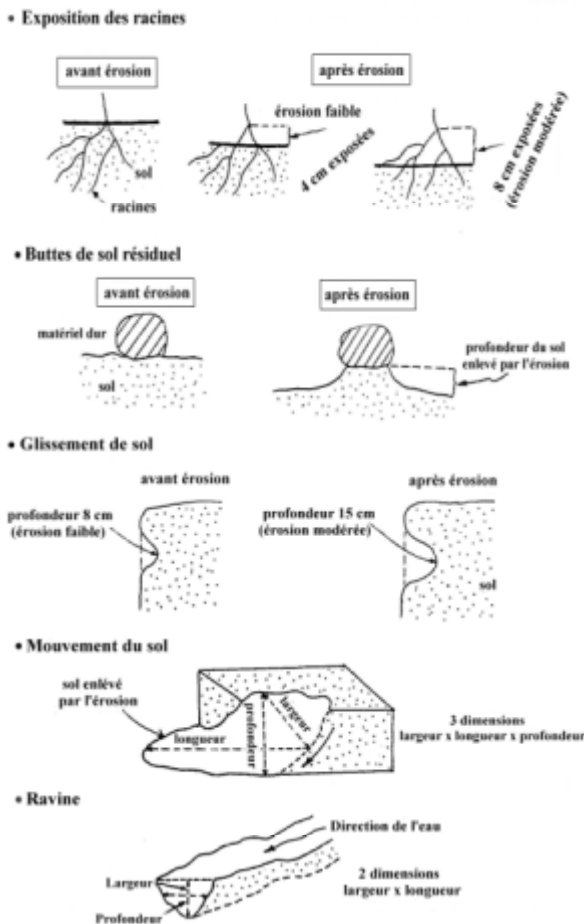


FIGURE 6 Les variables de terrain permettant d'apprécier l'érosion hydrique des sols. *Field variables allowing to appreciate soil-water erosion.*

À partir de ces variables, on définit les quatre classes d'érosion de la manière suivante.

La **classe d'érosion forte** est caractérisée par des racines d'arbres et d'arbustes exposées à l'air sur plus de 20 cm, des pédicules d'érosion de plus de 20 cm, des buttes de sol résiduel de plus de 20 cm, des glissements de sols de plus de 25 cm de profondeur, des mouvements des sols d'un volume de plus de 1 m³ et des ravines d'une surface de plus de 0,16 m².

La **classe d'érosion modérée** est caractérisée par des racines d'arbres et d'arbustes exposées à l'air sur 5 à 20 cm, des pédicules d'érosion de 10 à 20 cm, des buttes de sol résiduel de 15 à 20 cm, des glissements de sols de 10 à 25 cm de profondeur, des mouvements des sols d'un volume de 0,125 à 1 m³ et des ravines d'une surface de 0,01 à 0,16 m².

La **classe d'érosion faible** est caractérisée par des racines d'arbres et d'arbustes exposées à l'air sur moins de 5 cm, des pédicules d'érosion de moins de 10 cm, des buttes de sol résiduel de moins de 15 cm, des glissements de sols de moins de 10 cm de profondeur, des mouvements des sols d'un volume de moins de 0,125 m³ et des ravines d'une surface de moins de 0,01 m².

La **classe « sans érosion »** a été réservée pour les zones urbaines et dans les endroits dominés par les roches nues.

5.2.2. Validation statistique

On évalue la précision totale par l'estimateur Kappa (Congalton, 1991) qui varie de 0 à 1. Il tient compte des erreurs en lignes et en colonnes. Il permet une évaluation globale mais aussi au niveau de chaque classe ; il rend compte de deux types de précision : pour l'utilisateur et pour le réalisateur.

La précision totale, soit le nombre d'individus bien classés (63) divisé par le nombre total d'individus (91), est de 69,2 % ce qui n'est pas très élevé (Girard et Girard, 1999).

La précision pour l'utilisateur est le pourcentage d'individus d'un groupe issu de la classification, correctement classés vis-à-vis de la référence de terrain. Cette précision est faible pour l'érosion forte (53,3%). La précision pour le réalisateur est le pourcentage d'individus d'un groupe de référence correctement classés par la classification de l'image de télédétection. Cette précision est faible pour l'érosion modérée (51,6%) et l'érosion forte (57,1%).

La classification surévalue l'absence d'érosion (42 sites au lieu de 31). Les fortes érosions sont assez mal classées car elles se répartissent dans les autres classes. La classification n'est pas tout à fait appropriée pour la classe « érosion forte », puisqu'elle ne signale que 8 cas d'érosion forte alors qu'on en observe 14 sur le terrain, et qu'elle donne 15 cas d'érosion forte alors qu'on n'en

perçoit que 8 d'entre eux sur le terrain. Elle sous-évalue donc les sites à érosion modérée et forte.

D'après la figure 5, on remarque que le pourcentage des terres fortement érodées (14 %) est faible par rapport aux autres catégories de terrains. Mais il est alarmant de constater que la plupart des terrains de la région étudiée se trouvent dans la classe d'érosion modérée, car cette dernière peut s'accroître très rapidement si la couverture végétale disparaît. Il en ressort l'importance de la protection et du maintien de cette couverture, d'autant que les zones les plus touchées sont des forêts dégradées, des zones pâturées et des endroits où l'action anthropique est sévère (carrières, urbanisme) ainsi que les pentes sont très fortes (> 60 %). Pour assurer une conservation durable des sols, il sera donc nécessaire de protéger les forêts restantes contre les incendies, les abattages abusifs. Les pâturages, ainsi que de contrôler les travaux anarchiques de l'Homme.

6. DISCUSSION

Le modèle proposé ne constitue donc qu'une première approche et quatre questions se posent à l'issue de ce travail.

1° Comment peut-on définir le nombre de classes d'érosion ?

Il serait peut-être intéressant de définir plus de quatre classes d'érosion afin de subdiviser la classe « risque d'érosion modérée ». Se pose alors la question de savoir comment justifier le nombre de classes que l'on a choisi.

Le nombre de classes finales peut être choisi par le gestionnaire ou le commanditaire. Mais la difficulté réside en ce qu'il n'est pas facile de lier chacune des classes requises avec les éléments dont on dispose pour élaborer le modèle : le gestionnaire pensant plutôt en terme d'action alors que le réalisateur de la carte pense plutôt en terme de modélisation à partir des données existantes.

En matière d'érosion, il y a toujours deux risques qui sont en cause. D'une part, il y a perte de terre, ce qui constitue une perte d'épaisseur de la couverture pédologique : ceci constitue un risque si l'Homme utilise la ressource en sol à des fins de productions (cultures, forêts, *etc.*) ou de réserve (rétention de l'eau, épandage de boues, de déchets divers, *etc.*). D'autre part, les risques dus à l'érosion peuvent être conçus comme atterrissement de terre, dans divers endroits où cela est indésirable (zones urbaines, serres, réseaux routiers, ferrés ou cours d'eau, *etc.*). Dans le premier cas, les risques se situent principalement en amont, dans le second ils se trouvent en aval. Il faut donc introduire ces

notions de « amont / aval » en lien avec les risques de « perte de terre / atterrissement » lorsqu'on aborde de grands champs d'étude.

2° Comment estimer la robustesse du modèle ?

Il faudra faire varier les pondérations et le nombre de modalités des divers facteurs pour étudier la robustesse du modèle. Cette robustesse peut être caractérisée par la stabilité des résultats quand l'un ou l'autre des facteurs intervient plus ou moins.

3° Comment valider les résultats ?

On peut penser à tester chacune des classes retenues par des expérimentations. Mais la difficulté réside dans le choix des facteurs qui peuvent être expérimentés : on ne peut pas tester tous les cas possibles pour des raisons de coût et de durée d'expérimentation. D'autre part, la réaction d'un ensemble de facteurs ne peut pas être évaluée par une simple fonction des divers facteurs, ne serait-ce que pour évaluer et intégrer les relations « amont / aval ».

On a choisi de valider les résultats globaux obtenus en faisant des observations basées sur les résultats de l'érosion, que l'on peut nommer « indice d'érosion » : dépôts de terre au niveau des racines ou des éléments grossiers, ravines, éboulements, *etc.* L'étude montre qu'il y a 69 % de chance pour que la liaison entre les facteurs d'érosion et ces paramètres globaux ne soit pas due au hasard.

Remarquons que les critères définissant les classes sur le terrain sont très éloignés de ceux servant à la modélisation. Il y a là matière à réflexion : les critères de terrain relèvent de l'ordre de grandeur du décimètre, alors que ceux utilisés pour la modélisation relèvent de l'ordre de grandeur du kilomètre. Il se pose donc un problème de transfert d'échelle : quels critères prendre pour valider sur le terrain une approche qui est faite sur plusieurs kilomètres carrés ?

Il faudrait mener des expérimentations pour déterminer les relations entre facteurs d'érosion et indices d'érosion. Si ces indices sont considérés comme pertinents, il y aura lieu de les développer car leur observation, qui est rapide, permet d'effectuer un grand nombre de validation.

4° Comment passer de connaissances locales à une connaissance globale nécessaire à la caractérisation de l'érosion sur de vastes ensembles géographiques ?

Le modèle proposé a pour objectif de traiter de vastes champs spatiaux. L'approche globale envisagée peut se nourrir des nombreuses expérimentations locales existantes, mais elle pose d'autres questions relatives à l'extrapolation spatiale. Cette dernière ne peut pas se baser uniquement sur des études locales. Elle doit tenir compte des multiples situations géographiques

locales et en présenter une synthèse. Il faut tenir compte des agencements des situations locales et de leur organisation spatiale. Par exemple, une zone d'érosion se situant en amont d'une zone sans érosion n'a pas les mêmes conséquences, quand on se situe dans l'approche géographique globale, qu'une zone d'érosion se situant en aval d'une zone sans érosion. La méthode d'analyse paysagique basée sur des lois chorologiques peut être tentée (Girard et Girard, 1999).

C'est dans ce cadre-là que la télédétection prend toute son importance. En effet, les données de télédétection présentent une image à un instant donné d'un vaste champ spatial. Les divers facteurs de l'érosion n'y sont pas identifiables un par un, mais l'occupation du sol exprime d'une manière synthétique la réaction du milieu à l'érosion. Il faut donc lire à travers l'image, et avec une vision verticale, les divers milieux exprimés en matière de risque d'érosion. C'est ce qui a été tenté en retenant les 9 classes proposées. Il semble que l'étude diachronique d'images satellitales pourra améliorer sensiblement cette approche. La télédétection pourrait constituer par une description globale des milieux, une segmentation des milieux permettant dans chacun d'eux d'adapter les paramètres d'un modèle général tel qu'il est exposé ci-dessus. Cela permet aussi d'effectuer un échantillonnage stratifié pour la validation ainsi que pour des études locales ultérieures. Il est évident qu'un tel modèle, basé sur les données de télédétection, présenterait l'avantage de pouvoir être assorti d'un suivi régulier en mettant à jour régulièrement la partie du modèle provenant de la télédétection. La partie stable du modèle serait constituée par les facteurs intrinsèques tels que lithologie, pédologie, failles, karst, densité de drainage, etc. Pour cette raison, on a donné une grande importance au facteur occupation du sol.

7. CONCLUSION

Pour la gestion durable des ressources en sol, le recours aux images satellitales nécessite de mettre au point une modélisation complètement différente, car globale, des méthodes basées sur des expérimentations de terrain locales. Les images satellitales, permettent de donner une vue d'ensemble actualisée, faisant ressortir, sur de vastes territoires, les grandes unités de paysage, que l'on peut lire en matière de risque d'érosion. De plus, l'utilisation du SIG permet l'intégration à tout moment de nouvelles données spatialisées et autorise l'élaboration des schémas directeurs de gestions à petite échelle qui suffit pour estimer les zones vulnérables à l'érosion hydrique en vue d'une politique globale de protection de ces zones.

Dans la mise en place de la méthode, les difficultés apparues concernent essentiellement l'acquisition de données nécessaires pour alimenter le modèle, en particulier, la détermination du gradient dominant de la pente dans la région karstique et les données de l'intensité de la pluie. Ainsi, dans le futur, il sera nécessaire de déterminer le gradient de pente dans le karst par des observations de terrain car il est très difficile de le calculer sur les cartes disponibles. Pour ce qui est du climat, il faudrait obtenir des données sur l'intensité et la durée des averses ainsi que la fréquence des pluies violentes.

Pour mieux comprendre les risques d'érosion et, par conséquent, les possibilités d'aménagement, il est nécessaire d'améliorer la typologie des unités géomorphologiques pour mieux valoriser l'apport des images satellitales.

Les cartes des facteurs intrinsèques et l'image satellitale constituent un outil de base utile pour les décideurs et les aménageurs dans l'optique de la mise en valeur des ressources naturelles et plus particulièrement des ressources en sols. Elles permettent de localiser les sites sur lesquels il serait intéressant d'installer des parcelles expérimentales permettant la quantification de l'érosion hydrique par un suivi de terrain.

L'utilisation de la télédétection présente aussi un intérêt particulier quand l'accès est difficile. Le coût est minimisé puisque la démarche utilisée permet de réduire les délais d'investigation des travaux de prospection, ce qui se traduit par une baisse du coût.

Remerciements

Ce travail a pu être mené grâce à l'appui financier du conseil national de la recherche scientifique libanais (CNRSL) par l'octroi d'une bourse de thèse doctorale. À cet effet, nous présentons tous nos remerciements aux responsables du CNRSL.

Les auteurs remercient également MM. Jean-Marie Dubois et M. Anys Hassan et Mme Christine King pour leurs conseils et leur relecture du manuscrit, ainsi que M. Chadi Abdallah du CNRSL pour sa collaboration technique (traitement d'image) très appréciée.

Références

- Beydoun, Z. (1977) *The Levantine countries : the geology of Syria and Lebanon (Maritime regions)*. In E. Nairn (éd.). *The Ocean Basins and Margins*, Plenum Co., vol. 4, p. 319-353.
- Bonn, F., Cyr, L., Anys, H. et Chakroun, H. (1994) Une modélisation spatiale des pertes de sol liées à l'érosion hydrique. *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone*, Sainte-Foy, ACCT/PUQ, p. 75-97.
- Bou Kheir, R. (1998) *Apports de la télédétection et du SIG pour la gestion de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban ; Projet pilote : Jbail - Qartaba*. Mémoire de

- DEA, AUPELF-UREF en collaboration avec les Universités Libanaise, Saint-Joseph, Saint-Esprit (Liban) et en partenariat avec l'INA PG et l'INRA (France), 85 p.
- Centre national de télédétection (1999) *Évaluation des ressources naturelles dans la région côtière karstique du Liban*. Commission Européenne DG XII, ERBIC18CT970151, Progress Report for Period 2, 1st September 1998 – 31 August 1999, Beyrouth, Liban, 151 p.
- Congalton, R.G. (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, n° 37, p. 35-46.
- Davis, S. and Deweist, R. (1966) *Hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York, 463 p.
- Darwich, T. and Zurayk, R. (1997) Distribution and nature of Red Mediterranean soils in Lebanon along an altitudinal sequence. *Catena*, vol. 28, p. 191-202.
- De Jong, S.M. and Riezebos, H.T. (1997) SEMMED : a distributed approach to soil erosion modelling. *Remote Sensing '96*, Spiteri (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54 10 855 X, p. 199-204.
- Dubertret, L. (1945) *Carte géologique du Liban. Feuille de Jbaïl*. République Libanaise, Ministère des travaux publics, 1 : 50 000, Notice explicative, 34 p.
- Dubertret, L. et Wetzel, R. (1951) *Carte géologique du Liban. Feuille de Qartaba*. République Libanaise, Ministère des travaux publics, 1 h 50 000, Notice explicative, 56 p.
- Fanning, D. and Fanning, M.C. (1989) *Soil morphology, genesis and classification*. John Wiley and Sons, New York, 395 p.
- FAO (1980) *Conservation des ressources naturelles en zones arides et semi-arides*. Cahiers FAO : conservation des sols, vol. 3, 135 p.
- FAO (1983) *Garder la terre en vie : L'érosion des sols, ses causes et ses remèdes*. Bulletin pédologique, vol. 50, 62 p.
- FAO (1990) *Erosion mapping using high resolution satellite data and geographic information system. Pilot study in the state of Parana, Brasil*, Remote Sensing Center, FAO, Rome, 147 p.
- FAO (1996) *Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface*. Bulletin pédologique, vol. 68, 153 p.
- Finke, P., Hartwich, R., Dudal, R., Ibanez, J., Jamagne, M., King, D., Montanarella, L. and Yassoglou, N. (1998) *Georeferenced soil database for Europe*. Manual of procedures, European Soil Bureau, Version 1.0, Eur 18092 EN, Italy, 170 p.
- Garcia-Ruiz, J., Lasanta, T., Ruiz-Flano, P., Ortiza, L., White, S., Gonzalez, C. and Marti, C. (1996) *Land use changes and sustainable development in mountain areas : a case study in the Spanish Pyrenees*. Landscape Ecology, vol. 11, n° 5, p. 267-277.
- Gay, M. (1996) *Gestion régionale des sols et sensibilité à l'érosion. Laboratoire de télédétection et de cartographie numérique*, École Supérieure de Purpan, Toulouse, p. 1-8.
- Gèze, B. (1956) *Carte de Reconnaissance des sols du Liban. République Libanaise*, Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Enseignement et de la Vulgarisation, Station Agronomique Libano-Française, 1 : 200 000, Notice explicative, 52 p.
- Girard, M.C., Girard, C.M., Bertrand, P., Orth, D. et Gilliot, J-M. (1996) *Analyse de la structure des paysages ruraux par la télédétection*. Compte rendu de l'Académie d'Agriculture de France, vol. 82, n° 4, p. 11-25.
- Girard, M.C. et Girard, C.M. (1999) *Traitement des données de télédétection*, DUNOD, Paris, 529 p.
- Khawlie, M. (1994) *Fault - controlled Eastern Mediterranean Coast, Lebanon : geological contribution to coastal management*. Coastal management, vol. 23, p. 41-55.
- Kirkby (1995) *Modelling the links between vegetation and landforms*. Geomorphology, n° 13, p. 35-39.
- Lamouroux, M. (1972) *Étude des sols formés sur roches carbonatées : Pédogenèse fersialitique au Liban*. Mémoires Orstom, vol. 56, 132 p.
- Le Bissonnais, Y. et Papy, F. (1997) *Les effets du ruissellement et de l'érosion sur les matières en suspension dans l'eau. L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau*. Universités Francophones, AUPELF-UREF, INRA éditions, Paris, 411 p.
- Lenthe, H.R. and Krone, F. (1981). *Groundwater exploration and soil resources.. Pedology, Part C : Ecological land survey in key areas of Cyprus. Soil erosion losses on various geological deposits, case study*. Bundesanstalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe, Technical cooperation, project n° 75 20 190, Hannover, 40 p.
- Luken, H. and Krone, F. (1989) *Calcareous soils of Cyprus : five years erosion measurements (1981-1986)*. Pedology, hydrochemistry and non metallic mineral resources, vol. 5, 17 p.
- Morgan, R. (1986) *Soil erosion & conservation*. John Wiley and Sons, New York, 253 p.
- Ozden, S. and Ozden, D.M. (1998) Turkey erosion estimation model-Turtem. *International symposium on arid region soils : share our experiences to conserve the land*, Izmir, Turkey, 21-24 September 1998, p. 154-159.
- Poesen, J. and Hooke, J. (1997) Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of Southern Europe. *Progress in Physical Geography*, vol. 21, n° 2, p. 157-199.
- Quinton, J. (1997) Reducing predictive uncertainty in model simulations : a comparison of two methods using the European Soil Erosion Model (EUROSEM). *Catena*, vol. 30, p. 101-117.
- Ryan, J. (1982) *A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon*. Publication n° 69, American University of Beirut, p. 15-38.
- Thornes, J.B., Shao, J.X., Diaz, E., Roldan, A., McMahon, M. and Hawkes, J.C. (1996) Testing the MEDALUS hillslope model. *Catena*, n° 26, p. 60-137.
- Van Engelen, V.W.P. and Wen, T.T. (1995) *Global and national soils and terrain digital database (SOTER)*. Procedures manual (revised manual), UNEP-ISRIC-FAO, 125 p.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1958) Rainfall energy and its relation ship to soil loss. *Transactions of American Geophysical Union*, n° 39, p. 285-291.