

Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens :

une revue bibliographique

R. Bou Kheir₍₁₎, M-CI. Girard₍₂₎, M. Khawlie₍₁₎ et C. Abadallah₍₁₎

(1) Centre National de Télédétection / Conseil National de la Recherche Scientifique, B. P. 11-8281, Beyrouth, Liban.

(2) Institut National Agronomique Paris Grignon, UFR Dynamique des Milieux et Organisations spatiales, 78850 Grignon

RÉSUMÉ

Cet article examine l'érosion hydrique des sols, processus majeur de dégradation des terrains en zone méditerranéenne, qui constitue une des clés de la désertification (UNEP, 1994). Il analyse les différents facteurs influençant l'érosion hydrique des sols dans la zone méditerranéenne et montre la nécessité de prendre en compte des variables telles que la pierrosité, les formes karstiques et les divers impacts de l'homme sur le milieu (carrières, serres, urbanisation, etc.).

Les modèles d'érosion hydrique les plus utilisés dans la région méditerranéenne font appel à de nombreuses variables qu'il est difficile d'obtenir quand on s'intéresse à un espace de type régional dépassant de loin l'échelon parcellaire. On présente des critères observés sur le terrain (pédicules, buttes de sol résiduel, etc...) qui peuvent servir d'indicateurs de divers degrés d'érosion, du ruissellement, des rigoles et des mouvements en masse pour les modèles spatialisés.

Enfin, on indique les possibilités d'utilisation de la télédétection pour une connaissance spatialisée des facteurs de différenciation de l'érosion : occupation du sol, couvert végétal, pente, matériaux et sol, et pour un suivi diachronique de l'érosion sur de grands champs spatiaux. Cependant, pour valider les modèles, il faut adjoindre à la télédétection des études de terrain.

Pour répondre aux questions des décideurs, les modèles doivent se contenter principalement des données existantes et être susceptibles de fournir des résultats spatialisés. L'intérêt de l'utilisation des SIG et de la télédétection tient aux possibilités de sortie des cartes et de mise à jour des données concernant l'érosion hydrique.

Mots clés

Erosion hydrique - Méditerranée - modélisation - sol - télédétection - SIG.

SUMMARY

SOIL-WATER EROSION IN MEDITERRANEAN ENVIRONMENTS : a bibliographic review

This article examines soil erosion by water, major process of land degradation in Mediterranean region, which constitutes one of the key of desertification (UNEP, 1994). It analyzes the different factors influencing soil-water erosion in Mediterranean zone and demonstrates the necessity to take into account variables such as stoniness, karstic forms and various human impacts on environment (quarries, greenhouses, urbanization, etc.).

The most used models of water erosion in the Mediterranean region take into account numerous variables that it is difficult to obtain if we are interested to a regional scale exceeding so far the field scale. We present criteria observed on the field (coarse elements, residual soil traces, etc...), which can serve as indicators of various erosion levels, of runoff, of rills and of mass movements for spatial models.

Finally, we indicate the possibilities of use of remote sensing for a spatial knowledge of differentiating factors of erosion: land cover, vegetal cover, slope, material and soil, and for a diachronic monitoring of erosion on large spatial fields. However, to validate models, it is necessary to appoint to the remote sensing field studies.

To answer the questions of decision-makers, the models must content principally of existing data and must be susceptible to supply spatial results. The interest of using GIS and remote sensing resides in the possibilities to obtain maps and to update the data concerning water erosion.

Key-words

Water erosion, Mediterranean zone, modeling, soil, remote sensing, GIS.

RESUMEN

EROSIÓN HÍDRICA DE LOS SUELOS EN LOS MEDIOS MEDITERRÁNEOS: una revista bibliográfica

Este artículo examina la erosión hídrica de los suelos, proceso mayor de degradación de los terrenos en zona mediterránea, que constituye una de las llaves de la desertificación (UNEP, 1994). Se analiza los diferentes factores que influyen la erosión hídrica de los suelos en la zona mediterránea y muestra la necesidad de tomar en cuenta variables como pedregosidad, formas kársticas y los diversos impactos del hombre sobre el medio (cantera, invernaderos, urbanización, etc.)

Los modelos de erosión hídrica los más usados en la región mediterránea necesitan numerosas variables que es difícil obtener cuando uno se interesa a un espacio de tipo regional mucho más amplio que el nivel de la parcela. Se presenta criterios observados en el terreno (loma de suelo residual, etc.) que pueden servir de indicadores de diversos grados de erosión, del escurimiento, de las cárcavas, y de los movimientos en masa para los modelos espacializados.

En fin, se indica las posibilidades de uso de la teledetección para un conocimiento espacializado de los factores de diferenciación de la erosión: uso del suelo, cubierta vegetal, pendiente, materiales y suelos, y para un seguimiento diacrónico de la erosión en grandes campos espaciales. El interés del uso de los SIG y de la teledetección tiene a las posibilidades de salida de mapas y de actualización de los datos que conciernen la erosión hídrica.

Palabras claves

Erosión hídrica, Mediterránea, suelo, teledetección, SIG.

Les études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques dans la région méditerranéenne indiquent une tendance à un accroissement de l'aridité qui accélère l'érosion hydrique (De Ploey *et al.*, 1991; Jofitic *et al.*, 1992; Shaban et Khawlie, 1998).

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays de la Méditerranée (figure 1), et qui continue à prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles, pentes raides et couvert végétal souvent dégradé), du surpâturage et de l'impact défavorable des activités humaines : déforestation, incendies, mauvaise conduite des travaux agricoles, urbanisme chaotique, exploitation des carrières, etc. Selon des études de la FAO (1990), la situation continue à se détériorer : ainsi, sont affectées par l'érosion hydrique : en Grèce 35 % des terres, au Maroc 40 % et en Turquie 50 % avec des pertes de terre de 500 à 600 millions de tonnes/an en Turquie (Celik *et al.*, 1996). En Tunisie, 45 % de la superficie du pays est menacée par l'érosion (Chevalier *et al.*, 1995; Boussema, 1996) et en Algérie, 45 % des zones telliennes, soit 12 millions d'hectares (Chebbani *et al.*, 1999). En Syrie, la carte des risques d'érosion hydrique des sols publiée par la FAO, l'UNEP et l'Unesco en 1980, indique des pertes en terre par érosion hydrique de 50 et 200 tonnes/ha/an dans de nombreuses régions du pays et dépassant 200 tonnes/ha/an dans les chaînes montagneuses côtières. Au Liban, des prévisions de la FAO de 1986 donnent les chiffres de 50 à 70 tonnes/ha/an dans les montagnes du Liban et de l'Anti-Liban.

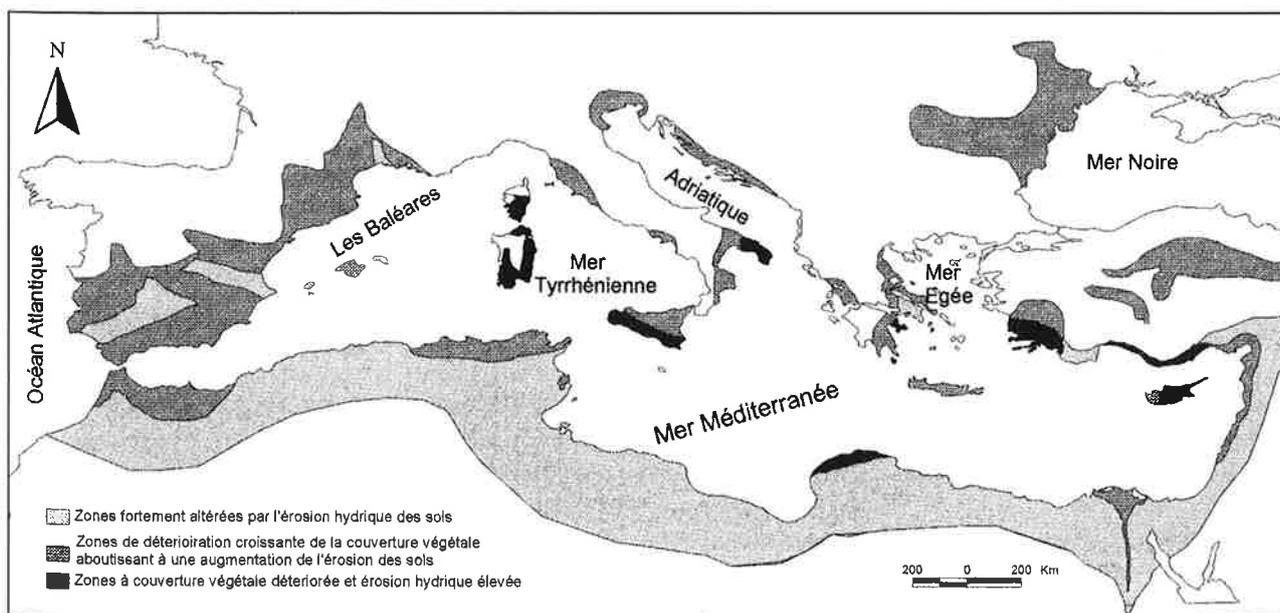
Ces chiffres dépassent ce que la pédogenèse peut produire dans les conditions climatiques actuelles. En effet, les seuils de tolérance de l'érosion sous un climat humide tempéré varient entre 2,5 tonnes/ha/an pour un sol superficiel et 12,5 tonnes/ha/an pour un sol profond, de texture équilibrée et moyennement perméable (USDA, 1951; Klingebiel et Montgomery, 1966). Mais cette tolérance doit être moindre dans les pays méditerranéens car : 1) la pédogenèse est beaucoup plus lente sous climat à aridité estivale accentuée et à saison sèche très longue, 2) les sols sont le plus souvent superficiels et les taux d'altération sont relativement bas, et 3) les terres cultivables sont peu étendues et diminuent chaque année étant urbanisées.

Les chiffres pré-cités des pertes de terre montrent qu'à un degré plus ou moins élevé, l'érosion hydrique affecte les terres du bassin méditerranéen. Le public en prend conscience, lors des orages exceptionnels, des coulées boueuses et des inondations.

Les dégâts observés se traduisent par une baisse des rendements des cultures (FAO, 1983; IGN, 1983; Dubucq, 1986; Jackowski, 1996), un atterrissement des sédiments érodés dans les zones urbaines (FAO, 1977; Ludwig *et al.*, 1996), une réduction de la superficie des sols agricoles (Merzouk *et al.*, 1994), une accélération du taux d'envasement des réservoirs réduisant ainsi la quantité et la qualité des eaux disponibles (Dhman, 1995; Sanders *et al.*, 1995; El Hadani, 1997; Damnati *et al.*, 1998), une aggravation des coulées boueuses qui mettent en péril les infrastructures humaines (Perez-Trejo, 1994) et une désertification du milieu naturel (FAO, 1980).

Figure 1 - Régions affectées par la dégradation des terres dans le bassin méditerranéen.

Figure 1 - Regions affected by land degradation in the Mediterranean basin.



Cette étude tente, à partir de multiples sources de présenter les facteurs influençant l'érosion hydrique, les modèles d'évaluation de pertes en terre en milieu méditerranéen et l'apport de la télé-détection. La lutte contre l'érosion hydrique n'a pas été abordée dans cette étude.

FACTEURS DE L'ÉROSION HYDRIQUE

L'érosion hydrique qui affecte les sols méditerranéens est fonction de multiples facteurs qui, selon Morgan (1986), semblent être les mêmes partout dans le monde.

Le climat

En zone méditerranéenne, plus les précipitations sont faibles, plus elles sont variables (Le Houérou, 1986 cité par FAO, 1990). Elles tombent entre novembre et mars, période durant laquelle les sols cultivés sont nus. En Algérie, sur des parcelles peu couvertes, pendant les orages d'automne, le ruissellement journalier maximal a dépassé 19 à 32 % et jusqu'à 70-85 % des averses importantes en hiver, sur des sols détremés (Arabi et Roose, 1989). Durant le reste de l'année sévit une période sèche. Ces pluies ont des intensités fortes (Obbed et Tourasse, 1994; IGN, 1995) qui peuvent varier de 130 mm/24 heures au Liban (Tayara, 1998), 298 mm en Grèce (Groove, 1996), 400 mm en Italie (Giordano, 1986), 790 mm en Espagne (Lopez-Bermudez et Romero-Diaz, 1993) et même exceptionnellement 1 000 mm en France (Benech, 1994). Ces intensités sont cependant moindres que dans les régions tropicales humides.

Ces averses de fréquence rare tombant sur des sols déjà saturés et de faible épaisseur sont à l'origine de la formation des ravines, de l'apparition des mouvements de masse et d'inondations (Allée, 1984; Gallart et Clotet-Perarnau, 1988; Garcia-Ruiz *et al.*, 1996; Wainwright, 1996; Roose et De Noni, 1998). Lors d'averses exceptionnelles, le ruissellement de sols limoneux encroûtés en permanence peut augmenter de 15 % à 60-90 %. Les ravines acquièrent des tailles de l'ordre du mètre lors des événements exceptionnels (Castro *et al.*, 2000). Les mouvements de masse sont importants lorsque les roches argileuses affleurent; ils se produisent fréquemment dans les zones caractérisées par les tremblements de terre, failles ou surélévements très répandus dans le bassin méditerranéen (Almeida-Teixera *et al.*, 1991; Khawlie, 2000). Les inondations sont fréquentes durant ces dernières années au Liban entre 1971 et 1998 (Shaban et Khawlie, 1998). D'autres pays méditerranéens ont connu des événements semblables en Italie et en Espagne (Garcia-Ruiz *et al.*, 1996). Ces inondations sont caractérisées par des charges de sédiments qui peuvent atteindre 40 % du volume du ruissellement (Conesa-Garcia, 1990).

La végétation

L'érosion des sols est fortement contrôlée par la couverture végétale dont dépend la production de la biomasse. La produc-

tion de matière organique est limitée dans les milieux méditerranéens arides, ce qui rend les terres très susceptibles à l'érosion hydrique (Thornes, 1995). De grosses averses tombant sur un sol humide entraînent un ruissellement de 40-55 % en Tunisie (Delhoume, 1987). Par contre, sous un couvert végétal naturel dépassant 40 % et sur fortes pentes, les pertes de terre peuvent être très réduites (Roose *et al.*, 1993; Roose et Arabi, 1994; Garcia-Ruiz *et al.*, 1996).

Dans les régions méditerranéennes semi-arides, les sols sous forêts bien entretenues sont considérés comme non sensibles à l'érosion hydrique (Clauzon et Vaudour, 1969; Martin, 1975; Delhoume, 1981) car la litière et les végétations basses favorisent l'infiltration (Roose, 1994). Ainsi, beaucoup de ravines apparaissent sous pins d'Alep de 20 ans dont le recouvrement est inférieur à 40 % et sous *Quercus infectoria decídua*.

On observe l'apparition de nombreuses ravines qui proviennent des eaux de ruissellement non retenues par les forêts sur-pâturées. En effet, le sol soumis au pâturage intensif se tasse, devient plus compact, sa perméabilité diminue et le ruissellement de l'eau s'accroît ce qui entraîne des pertes de terre considérables. Ce fort ruissellement aboutit à la formation de profondes ravines lorsqu'il atteint des terres cultivées (Laouina *et al.*, 2000).

L'utilisation des terres

L'intensité de l'érosion hydrique des sols méditerranéens est affectée significativement par les activités humaines qui augmentent ou diminuent les pertes en terre.

Les incendies répétés et le déboisement illégal détériorent les forêts existantes. Ceci favorise fortement le ruissellement et aboutit à une forte érosion par la suite (Benchaabane, 1997). Mais après les incendies, la colonisation par les plantes réduit l'érosion des sols qui devient inférieure à celle existant avant le feu (Garcia-Ruiz *et al.*, 1996).

La mise en culture d'un sol le rend sensible à l'érosion car la probabilité s'accroît d'avoir un sol nu lors des fortes précipitations: cela dépend de la nature de la plante cultivée et des techniques culturales. Sous verger, l'érosion est intense, comme sur un sol nu (Roose *et al.*, 1993); sous maïs planté en terrasses, elle est moindre que s'il est planté en lignes dans le sens de la plus grande pente (Nahal, 1984); et pour des cultures peu denses, elle est plus intense que pour des cultures denses (Browning, 1948 cité par Nahal, 1975). L'alternance cultures-légumineuses atténue l'érosion du sol d'une manière spectaculaire (FAO, 1983; Gallien *et al.*, 1995; Smolikowski *et al.*, 1998); ainsi, en Algérie, en associant du blé à des fèves, la perte en terre diminue de 1,5 tonne/ha (sur sol nu travaillé) à 0,3 tonne/ha (Arabi et Roose, 1989).

Les semis très battus ou chantiers de récolte très roulés (rugosité nulle) accroissent les risques d'érosion, au contraire, du déchaumage avec résidus abondants ou labour (rugosité forte) (Roose et Cavalie, 1988).

Le facteur couvert végétal de Wischmeier (1976) varie avec le travail du sol. Masson propose (1971) : 0,84 pour le labour, 0,50 pour le déchaumage, 0,12 pour le mulch et 0,10 pour le témoin « chaume en place non travaillé ». Mais le binage brisant la croûte de battance, restitue une certaine capacité d'infiltration au sol. Par contre, le travail du sol expose le sol nu à l'agressivité des pluies, réduit sa cohésion et accroît par la suite fortement le risque d'érosion et les glissements de terrain sur les versants instables (Brown *et al.*, 1989; Roose, 1994).

Les résidus de récolte jouent le rôle d'éponge et créent une rugosité qui divise, ralentit et étale les écoulements dans le temps (FAO, 1996a; Lafen et Colvin, 1981; Bernard *et al.*, 1998). Des recouvrements de 15 à 25 % de résidus de récolte diminuent l'érosion de 60 à 75 % par rapport aux sols nus (Lattanzi *et al.*, 1974; Ketcheson et Stonehouse, 1983). Le paillage est pratiquement inexistant dans la plupart des pays méditerranéens car toute la biomasse disponible est utilisée par le bétail. Par le développement d'une couverture végétale permanente, l'abandon des terres cultivées aboutit, à réduire les taux d'érosion en rigoles mais par contre l'érosion par ravinement peut devenir très importante quand les terres sont pâturées régulièrement (Quine *et al.*, 1994; Poesen *et al.*, 1998a).

L'extension des cultures sous serre dans les régions côtières de la Méditerranée et les travaux de préparation du sol nécessaires pour leur construction provoquent des taux de dénudation locaux importants et soumettent les sols à l'érosion. Une fois installées, les serres peuvent concentrer le ruissellement d'une manière spectaculaire (Bou Kheir, 1998).

L'urbanisation stocke le ruissellement ou au contraire favorise son cheminement. Cela peut accroître par conséquent sensiblement les risques d'érosion : le CEMAGREF (1986) donne des valeurs moyennes des coefficients de ruissellement attribuées aux différentes catégories d'utilisation du sol : 0,05 pour les espaces boisés; 0,10 pour les terres cultivées; 0,35 pour les habitations individuelles denses; 0,50 pour les habitations collectives; et 0,60 pour les zones industrielles. Ainsi, les différents états de surface et leur aptitude au ruissellement dépendent sur un territoire, de la nature de l'occupation du sol (Collinet et Valentin, 1979; Courault, 1989; Boardman, 1990).

Dans les régions montagneuses des pays méditerranéens, l'homme construit des terrasses antiérosives (Bou Kheir *et al.*, 2000; Bou Kheir *et al.*, 2001a), dont les caractéristiques dépendent de la pente (Verheye et Osman, 1974; Saccardy, 1950; Lefay, 1986). Les terrasses ne protègent le sol contre l'érosion que si elles sont bien entretenues : en Algérie, entre 1945 et 1985, plus de 50 % d'entre elles ont été dégradées par manque d'entretien (Roose et De Noni, 1998; Roose *et al.*, 1998). Sur marnes, les terrasses sont remplacées par des « banquettes » (Gèze, 1956).

La topographie

Sur les pentes fortes, l'eau de pluie ruisselle vite et cause une érosion grave. Dans les milieux semi-arides et arides, le gra-

dient de la pente est corrélé positivement avec le recouvrement de la surface du sol par des fragments de roches qui agissent en diminuant le ruissellement et la perte des sols (Abrahamas et Parsons, 1991; Cooke *et al.*, 1993; Simanton et Toy, 1994). Les ruissellements moyen et maximal diminuent lorsque la pente augmente (en Algérie: Arabi et Roose, 1992; Mazour, 1992; Roose *et al.*, 1993) ainsi qu'au Maroc sur vertisol (Heusch, 1970). Ces auteurs indiquent que la position morphologique est parfois plus importante que la pente.

L'exposition des pentes peut avoir une importance, car sur celles exposées au sud qui ont une faible couverture végétale, l'érosion est très élevée (en Espagne: Poesen *et al.*, 1998b).

Sur les pentes concaves, l'érosion est la moins intense (D'Souza et Morgan, 1976; FAO, 1976) et sur pentes convexes, la perte en terre est plus grande que sur les pentes rectilignes (Roose, 1999).

La longueur de la pente est moins importante que son gradient et sa forme (Roose, 1994; FAO, 1983), mais à précipitation égale, il s'accumule sur une pente plus longue un plus grand volume d'eau (Mutcher et Greer, 1980; Lal, 1982) et le temps d'absorption par le sol de l'eau de ruissellement est plus grand sur les parcelles longues que sur les parcelles courtes (Duley et Ackerman, 1934). Au laboratoire, Poesen et Bryan (1989) montrent que les segments de pente où des rigoles et des têtes de rigoles se développent, ont une vitesse d'infiltration et de percolation assez importante, alors que lorsqu'ils sont couverts entièrement de pellicules de battance, la vitesse d'infiltration et de percolation est moins élevée.

Les sols

Les principales caractéristiques des sols qui permettent de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique sont les suivantes : la profondeur, la pierrosité, la granulométrie, la teneur en matière organique (Roose *et al.*, 1993; FAO, 1996b), la nature minéralogique des argiles (Auzet, 1987; Le Bissonnais *et al.*, 1995), l'infiltrabilité (Papy *et al.*, 1995) et la cohésion (Mériaux, 1961).

Les sols de la région méditerranéenne sont souvent peu profonds sauf ceux se situant sur des formes géomorphologiques d'accumulation ou des sables. Or la résistance à l'érosion hydrique est plus faible pour les sols superficiels que pour les sols profonds (Ryan, 1982) car dès que le sol peu épais est saturé par la pluie, il y a glissement de terrain, même sur pente très faible. Au Liban, les « rendzines blanches » sont très érodées et les roches calcaires friables sous-jacentes apparaissent (Gèze, 1956; Lamouroux, 1968; Sayegh et Saliba, 1969; Tarzi et Paeth, 1974).

Plus de 60 % des sols méditerranéens comportent des fragments de roches dans l'horizon superficiel (Poesen, 1990). Ces fragments réduisent l'érodibilité : protection contre l'impact des gouttes de pluie et diminution de la vitesse du ruissellement réduisant sa capacité de détachement et de transport (Poesen *et*

al., 1994). La suppression de cette couverture caillouteuse peut augmenter l'érosion de 1/3 (Evenari *et al.*, 1982) à trois (Nyssen *et al.*, 1999). Mais une fois le ruissellement déclenché, ils causent une turbulence et accroissent la perte en terre. Ils augmentent le cisaillement du ruissellement et les pertes de terre si le sol est encroûté (Roose, 1994). Les sols contenant des fragments de roches dont la taille est supérieure à 40 mm sont plus sensibles à l'érosion que les sols graveleux contenant des fragments de roches de 2 à 40 mm (Poesen *et al.*, 1994) car, dans les sols, les graviers et cailloux sont habituellement plus altérés et plus poreux que les pierres (Childs et Flint, 1990; Moustakas *et al.*, 1995). La position, la taille et le taux de couverture des éléments grossiers augmentent le volume total d'infiltration (Poesen, 1986; Poesen et Ingelmo-Sanchez, 1992).

Les sols méditerranéens limoneux ou limono-sableux sont très sensibles à l'érosion hydrique (Osborn *et al.*, 1976; Poesen, 1983). Les sols à texture plus grossière sont moins sensibles au détachement par la pluie, mais les horizons sableux pauvres en matière organique se tassent et le ruissellement devient aussi fort que sur les sols argileux (Roose *et al.*, 1993). Les sols à texture plus fine sont moins sensibles que les sols limoneux car leurs agrégats sont plus stables, mais cela varie suivant le type d'érosion. L'érosion par ravinement est plus importante dans les sols de texture lourde que pour les sols limoneux ou sableux, pour lesquels l'érosion en rigoles devient plus importante (Poesen *et al.*, 1996a).

De même, les conditions climatiques engendrent une teneur en matière organique relativement faible dans les sols méditerranéens qui sont donc très sensibles au processus d'érosion hydrique (Nahal, 1975; Ryan, 1982; FAO, 1983; Ozden et Sonmez, 1998). La matière organique réduit les risques d'érosion à court terme : maintenue en surface, elle protège le sol de l'énergie des pluies et du ruissellement (Roose, 1994; Barthès *et al.*, 1998), mais enfouie, elle ne réduit nettement ni le ruissellement ni l'érosion (Roose *et al.*, 1997). Les modifications de la mouillabilité des constituants organiques interviennent sur l'état et l'histoire hydrique (Boiffin, 1976).

La stabilité des agrégats dépend du type d'argile minéralogique présent et de sa saturation en calcium : ainsi la montmorillonite forme des agrégats plus stables que la kaolinite (Morgan, 1986). En région méditerranéenne, les sols riches en argiles saturées en calcium sont résistants à la battance mais sensibles au ravinement (Mazour, 1992; Roose *et al.*, 1993; Morsli, 1995). La stabilité du sol augmente si le sol reste faiblement humide pendant plusieurs jours et inversement diminue lorsqu'il reste proche de la saturation. Ainsi, en zone méditerranéenne, l'érosion ne débute que lorsque le sol est gorgé d'eau et sa surface fermée. Selon Heusch (1970), l'érosion n'est proportionnelle ni à la hauteur des pluies, ni à leur énergie cinétique, mais est fonction de la somme des énergies érosives dont l'énergie des eaux ruisselantes est la principale composante.

D'autre part, les croûtes qui se forment fréquemment à la surface du sol dans les régions semi-arides méditerranéennes peu-

vent être une des causes principales du faible taux d'infiltration (Stone *et al.*, 1996) et de l'augmentation de l'érosion par ruissellement (Mougenot et Cailleau, 1995; Aubert et Fauck, 1997).

Une faible cohésion provoquant une forte susceptibilité au détachement et au mouvement de masse peut être la cause d'une forte érodibilité (Govers *et al.*, 1987; Poesen et Govers, 1990). Les systèmes radicaux des végétaux peuvent maintenir fortement la cohésion des sols.

La lithologie

Les divers types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par les roches et par les sols et en conséquence sur la quantité de sol susceptible d'être érodée (Krynine et Judd, 1957; FAO, 1980; Demmak, 1982). Une faible infiltration des roches affleurantes indique qu'une grande quantité d'eau ruisselle, par conséquent, une forte quantité de terre peut être emportée. Les sols marneux lorsqu'ils sont secs, restent non érodibles mais, dès qu'ils atteignent une certaine humidité, leur sensibilité à la détachabilité et au ruissellement augmente (Chebbani *et al.*, 1999). Les argilites, les marnes, les schistes, les basaltes et les gneiss sont très vulnérables au ravinement (Roose, 1994).

Plusieurs paramètres déterminent la capacité d'infiltration : la lithologie, les failles, les linéaments, le karst (« lapiez » dans les assises jurassiques et « dolines » dans celles du Crétacé ralentissent la vitesse de l'eau) et la densité de drainage ont été pris en compte pour définir la capacité d'infiltration des roches dans la région côtière du Liban (Bou Kheir, 1998). En Algérie, Demmak (1982, 1984) a montré que les transports solides d'un bassin versant dépendaient de sa surface en roches de différents types (argileuses, marneuses, schisteuses, etc.).

Sensibilité des différents facteurs de l'érosion hydrique

Les différents facteurs qui commandent l'érosion hydrique des sols ne sont pas d'égale importance vis-à-vis de la détermination de la quantité de terre érodée (Lenthe et Krone, 1981; Luken et Krone, 1989; Morgan, 1986).

Dans l'équation universelle de perte en terre, Wischmeier et Smith (1978) ont attribué une grande importance à l'indice topographique LS qui varie de 0,1 à plus que 20, tandis que les autres facteurs K (érodibilité du sol), C (occupation et utilisation des terres) et P (pratiques de conservation) apparaissent de moindre importance : chacun variant chacun de 0 à 1. Pour Roose *et al.* (1993), la pente n'est pas le facteur essentiel du risque érosif : les risques d'érosion en nappe sont très faibles malgré des versants très raides (10-45 %) et le ruissellement diminue lorsque la pente augmente car les pellicules de battance sont incisées par l'eau ce qui facilite son infiltration. Ils indiquent que les pentes en région méditerranéenne sont liées à la lithologie et au type du sol ; sur les roches dures (grès, calcaires durs) et pentes fortes, les sols

résistent à l'érosion et les transports solides sont faibles tandis que sur les roches tendres (argiles, marnes) sur pentes plus douces, les sols sont fragiles. En Espagne, la pente (forme et position) est le principal facteur qui contrôle l'érosion des sols (Garcia-Ruiz *et al.*, 1996). Au Liban, le modèle établi par Bou Kheir *et al.* (2001b) donne le même poids à la couverture du sol et à l'ensemble des autres facteurs. La pente a donc un impact très variable selon la région où on se situe.

Selon Poesen *et al.* (1996b), c'est la stabilité des agrégats des sols qui a le plus grand impact sur l'érodibilité des sols au niveau du millimètre ou du mètre, tandis que c'est le développement des croûtes qui a le poids le plus grand au niveau du mètre ou de la centaine de mètres.

Conclusion

Tout cela nous conduit à penser que la détermination exacte des pondérations des différents facteurs de l'érosion hydrique des sols dans la région méditerranéenne est encore un objet de discussion qui varie suivant la taille du site étudié (parcelles expérimentales, bassins versants ou vastes champs spatiaux), selon le nombre de facteurs retenus et selon le type du processus d'érosion hydrique considéré. Il sera nécessaire de tester l'importance de chacun des facteurs par des expérimentations sur le terrain. D'un autre côté, il est intéressant de localiser sur les images satellitales ou sur les photographies aériennes les zones plus ou moins touchées par l'érosion, définies par un modèle donné. On en déduit l'intensité de chacun des facteurs utilisés dans le modèle considéré. Il faut surtout se concentrer sur les facteurs influençant le ravinement car c'est lui qui provoque les dégâts les plus importants pour la population.

EVALUATION DE L'EROSION HYDRIQUE PAR MODELISATION

Expérimentation en parcelle

L'érosion est estimée suivant des modèles empiriques qui tiennent compte de l'incidence de la majorité des facteurs. Ces modèles sont mis au point à partir de données acquises expérimentalement sur le terrain ou de données de télédétection gérées par un système d'informations géographiques.

Les travaux d'expérimentation locaux et précis n'ont pas été menés dans tous les pays méditerranéens. En effet, les difficultés liées à l'utilisation des parcelles de ruissellement sont : 1) les coûts d'installation et d'entretien élevés, 2) la main d'œuvre nombreuse et disponible tout le temps, 3) le suivi pendant une longue durée pour saisir les événements exceptionnels responsables des plus grandes pertes en terre, 4) la collecte et la récupération d'échantillons de terre et 5) la nécessité d'un grand nombre de répétitions pour tester les risques de ruissellement sous divers états de surface, etc.

L'extrapolation spatiale ne peut pas se baser uniquement sur des études locales. En effet, Poesen *et al.* (1994) ont démontré que les données expérimentales relatives aux effets de la couverture de fragments de roches sur l'érosion hydrique, ne peuvent pas être utilisées pour en prévoir l'impact sur les taux d'érosion à des niveaux plus vastes.

Avantages et inconvénients de la modélisation des pertes de terre

Les modèles s'avèrent nécessaires si l'on veut : 1) avoir une évaluation rapide du rythme de l'érosion dans une région, 2) établir une échelle d'intensité des processus afin de donner la priorité aux interventions anti-érosives ou 3) mettre à jour la sensibilité des sols à l'érosion. Ces modèles sont plus ou moins efficaces, établis par des chercheurs différents, selon des concepts différents, aboutissent à des cartes d'érosion différentes pour une même région.

Il faut surveiller, lors de la modélisation, la cohérence et la précision de l'ensemble des données de départ qui proviennent d'informations ponctuelles ou spatialisées (d'origine cartographique ou dérivées de télédétection). Il faut s'assurer que toutes les couches d'information ont des précisions et des marges d'erreur comparables, car les équations de type multiplicatif, répercutent les erreurs les plus fortes à l'étape de la modélisation.

Quelques modèles d'érosion fonctionnant dans la région méditerranéenne

Le modèle le plus utilisé est basé sur l'équation universelle de perte en terre (USLE, Universal Soil Loss Equation) établi par Wischmeier et Smith (1958, 1978), pour des prédictions à long terme (> 20 ans) concernant l'érosion en nappe et en rigoles dans des parcelles agricoles. La moyenne annuelle de pertes de terre par hectare (A) est déterminée à partir de 6 facteurs : l'érosivité des pluies (R), l'érodibilité du sol (K), la longueur de pente (L), le pourcentage de la pente (S), l'occupation et l'utilisation des terres (C) et les pratiques de conservation (P).

Des modèles plus récents intègrent les nouvelles données acquises sur les processus de l'érosion. Ainsi, le facteur P n'est pas pris en compte et le facteur K est déterminé à partir de modèles hydrologiques pour le modèle européen d'érosion des sols EUROSEM (Quinton, 1997). Un modèle adapté à la région côtière libanaise (Bou kheir *et al.*, 2001b) ne prend pas en compte le facteur (L) mais introduit le facteur capacité d'infiltration des roches. Au Maroc, Bonn *et al.* (1994) modifient le facteur d'érosivité de la pluie (R) pour tenir compte de l'intensité du ruissellement de surface. Dans l'USLE, l'érodibilité du sol est évaluée en tenant compte de la texture, de la teneur en matière organique, de la structure et de la perméabilité, alors que dans l'EUROSEM, c'est la cohésion du sol et sa détachabilité par la pluie qui sont utilisées. SEMMED « Soil Erosion Model for Mediterranean Areas » (De Jong et

Riezebos, 1997) sépare le processus d'érosion en deux phases : eau/sédiment.

Les modèles comme USLE, EUROSEM, TURTEM « Turkey Soil Erosion Estimation Model » (Ozden et Ozden, 1998), WEPP « Water Erosion Prediction Project » (Laflen *et al.*, 1991), ARSEM « Ardeche Soil Erosion Model » et SAGATELE « Système d'aide à la gestion et à l'aménagement du territoire pour la lutte contre l'érosion » (Pouliot *et al.*, 1994 ; Boussema et Chairat Ben Abdallah, 1995) donnent en sortie les pertes en terre alors que les modèles MEDALUS « Mediterranean Desertification and Land Use » (Kirkby, 1995) et MEDRUSH (Thornes *et al.*, 1996) déterminent la sédimentation au cours des inondations catastrophiques. Par contre, SEMMED permet d'identifier les zones vulnérables à l'érosion.

L'USLE, mise au point pour des conditions de milieu existant aux Etats Unis, n'est pas applicable telle quelle (Wischmeier, 1976) dans le bassin méditerranéen (Cormary et Masson, 1964) où l'érosion par ravinement est très répandue. Ainsi, chaque pays ou région doit-il mettre au point son propre modèle prévisionnel, adapté à ses conditions spécifiques, et s'appuyant sur sa propre base de données. SEMMED constitue un des premiers exemples des modèles adaptés aux conditions méditerranéennes. Celles-ci présentent une grande difficulté : l'absence de relation entre le ruissellement préalable à l'événement (parfois nul) et l'état hydrique initial du bassin versant. En effet, les pluies provoquant le ruissellement sont sporadiques, intenses et rares ce qui rend difficile la prédiction de leurs effets et rend nécessaire l'accroissement des approches traditionnelles de mesure et de modélisation. Les modèles qui considèrent les événements pluvieux reflètent donc mieux la réalité que ceux basés sur des données mensuelles ou annuelles. Mais ils nécessitent beaucoup de données et des mesures continues de l'intensité et du volume des pluies durant tout le temps de l'événement. C'est le cas des modèles ARSEM (Ardeche Soil Erosion Model) consacré aux événements pluvieux catastrophiques (Van Deursen et Wesseling, 1993) et WEPP qui fournit des données journalières de perte de terre.

Le besoin d'une grande quantité de données d'entrée nécessaires à la description de l'hétérogénéité des systèmes naturels : variabilité temporelle et spatiale des caractéristiques paysagères, utilisation des sols, topographie, sol et climat, rend impossible l'application de ces modèles (USLE, TURTEM, ARSEM, WEPP, etc.) à un échelon régional (1/100 000). D'autre part, la complexité de la manipulation de toutes les données spatiales et sémantiques rend difficile l'application de ces modèles à de grands bassins versants.

Il est très difficile d'extrapoler au niveau d'un bassin versant ou d'une région des modèles d'érosion développés sur des parcelles expérimentales (comme l'USLE) et avec des simulateurs de pluie (Tim et Tolly, 1994 ; Srinvasan *et al.*, 1994).

Dans la région méditerranéenne, au niveau d'une étude régio-

nale, SEMMED est complètement incorporé dans un système d'informations géographiques contrairement aux autres modèles décrits plus hauts. Il élabore divers produits intermédiaires comme la carte du ruissellement, la carte de la capacité de transport et la carte du détachement dont la précision peut être évaluée avant la carte finale d'érosion. Malgré les performances de ce modèle, les résultats sont fonction de la précision des cartes des sols qui est souvent insuffisante (Burrough et Heuvelink, 1992 ; Riezebos, 1989) ; de plus, l'encroûtement de la surface du sol n'est pas pris en considération. Il est donc préférable de n'utiliser les résultats du modèle qu'au niveau qualitatif bien qu'on obtienne comme pour la plupart des modèles, des estimations quantitatives qui ne sont pas validées jusqu'à présent.

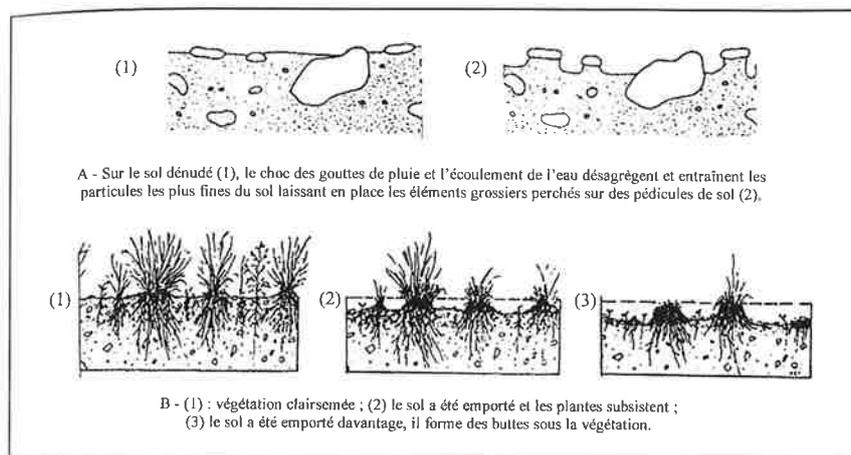
Problème de validation

La variabilité spatiale due aux changements environnementaux fréquents pour les terrains méditerranéens, mais aussi les mesures des pertes de sols dans toutes les situations possibles rendent difficiles la validation sur de grandes étendues pour des raisons de coût et de durée d'expérimentation. En conséquence, la validité et la précision des cartes sont souvent mises en question. Pour valider l'approche par SIG et télédétection qui a conduit à l'élaboration des modèles de perte de sols, Ait Fora (1995) au Maroc, a utilisé trois méthodes : mesure de l'accumulation de sédiments dans une retenue, mesure par traceurs radio-actifs et susceptibilité magnétique des sédiments. Cependant, pour chacun des facteurs nécessaires à l'établissement des équations de pertes en terre, il y a des erreurs spatiales qui s'additionnent lors de l'élaboration des cartes (Bonn, 1998).

La gravité de l'érosion hydrique peut être évaluée sur le terrain par divers critères visuels tel que 1) l'exposition des racines d'arbres et les radicales d'arbustes (cela a été remarqué au Liban pour différents types d'arbres), 2) les pédicules d'érosion (petites colonnes de terre protégée par des pierres, alors qu'elle a été balayée tout autour par l'érosion (*figure 2*), 3) les buttes de sol résiduel (*figure 2*), 4) les glissements et les mouvements des sols et 5) les ravines de toute taille (Morgan, 1986 ; FAO, 1986). Ces indices visuels, qui servent d'indicateurs, ont déjà permis de valider la carte des risques d'érosion hydrique des sols (en quatre classes) dans la région côtière montagneuse du Liban (Bou kheir *et al.*, 2001b). Ils s'avèrent très utiles lorsque les données expérimentales manquent, mais ils ne remplacent pas les enquêtes de terrain plus précises et pour le long terme, les relevés d'atterrissement dans les retenues des barrages, les études de surveillance des débits solides dans les écoulements ou leur évaluation au moyen de parcelles expérimentales.

Figure 2 - Deux critères de validation de l'érosion hydrique observables sur le terrain.
A- Pédicules, B - Buttes de sol résiduel.

Figure 2 - Two validation criteria of water erosion observed on the field.
A- Earth pillar, B-Residual soil traces.



APPORTS DE LA TELEDETECTION

Avantages et limites de la télédétection

La télédétection et les systèmes d'informations géographiques présentent des avantages importants par rapport aux travaux expérimentaux, mais aussi des limites d'utilisation.

La télédétection, par sa capacité à fournir des images multispectrales et multidates, ainsi que les systèmes d'informations géographiques, outil de traitement et d'exploitation des données multidisciplinaires, constituent des moyens permettant 1/ de donner une vue d'ensemble, mise à jour régulièrement, au moyen des unités de paysage sur de vastes territoires (ce qui prend tout son intérêt quand les accès sont difficiles), 2/ de minimiser le coût des investigations de terrain (meilleur choix des sites à observer, réduction du nombre de campagnes de sondage au sol, gain en temps et en moyens, etc.), 3/ de s'affranchir du problème de disponibilité et d'homogénéité de l'information et 4/ d'élaborer des cartes délimitant les zones vulnérables et touchées par l'érosion.

La télédétection permet d'évaluer les facteurs nécessaires au fonctionnement des modèles tels que la longueur des pentes (L) et la pente (S) à l'aide des photographies aériennes et des images satellitales. Actuellement, elles sont exploitées pour estimer le facteur d'occupation et d'utilisation des terres (C) qui évolue rapidement et si nécessaire les pratiques de conservation (P) avec les images à haute résolution spatiale. Notons que la végétation n'est perceptible sur une image satellitale que si elle couvre au moins 30 % de la surface du pixel (Girard et Isavwa, 1990). Lorsque le recouvrement végétal est inférieur à 30 %, ce sont les caractéristiques spectrales du sol qui prédominent (Girard et Girard, 1975; Courault et Girard, 1988). Ce seuil de 30 % peut être utilisé en matière d'érosion si l'on considère qu'en-dessous de lui les sols sont plus érodibles et qu'au-dessus la végétation a un effet protecteur.

Les images satellitales servent aussi à produire la cartographie du réseau hydrographique, de diverses caractéristiques géomorphologiques de terrain ainsi que la cartographie géologique et son analyse structurale (inventaire et interprétation des failles et linéaments).

Les images satellitales permettent d'obtenir aussi des informations pédologiques telles

que la couleur, les teneurs en matière organique et calcaire, la pierrosité de surface, la rugosité, la profondeur et la texture du sol (Girard et Girard, 1999). Le niveau d'appréhension de la couverture pédologique qui est obtenu à partir des images satellitales permet de saisir les relations paysagiques que le pédologue, sur le terrain, ne perçoit qu'avec difficulté (Girard, 1990). L'inconvénient des images satellitales réside en ce qu'elles ne donnent des informations que sur la partie la plus superficielle de la couverture pédologique (Girard et Girard, 1975, Escadafal *et al.*, 1988; Courault, 1989) et, étant instantanées, les images ne fournissent que des informations sur les objets existants au moment de la saisie. Donc, à chaque date de prise de données correspondra une nomenclature dépendant des cycles naturels et des façons culturales.

Dans presque tous les cas de détermination de l'érosion hydrique au niveau régional, on associe les images satellitales et les photographies aériennes (Stephens et Cihlar, 1981; Breyer, 1982; Dosso *et al.*, 1983) avec des relevés de terrain. En effet, ces deux sources d'informations se complètent actuellement puisqu'elles ont des résolutions différentes respectivement de 1 km à 1 m et de 1 m à 1 cm. En dehors des images SPOT, la stéréoscopie n'est pas utilisable sur les autres images satellitales : les photographies stéréoscopiques sont alors un bon complément. Les photographies aériennes à des échelles de 1/20 000 au 1/5 000 permettent d'identifier les rigoles de taille relativement petite si la date de prise de vues permet de ne pas faire de confusion avec, par exemple, des rigoles couvertes par la végétation.

Si la résolution au sol des images satellitales actuelles (80 m à 10 m) s'est montrée insuffisante vis-à-vis des phénomènes à détecter jusqu'à présent, d'autant qu'un milieu dégradé n'est distingué que s'il couvre plusieurs pixels, les nouveaux satellites permettront peut-être de détecter les ravines, comme cela a été

fait par des photographies aériennes à des échelles variant entre 1/15 000 et 1/21 000 (Poesen *et al.*, 1998a).

Les images satellitales ont des avantages importants par rapport aux photographies aériennes : la rapidité et l'objectivité de l'analyse statistique d'image par ordinateur qui rend possible une cartographie de larges zones d'une manière répétitive et le coût très faible par unité de surface.

Ainsi, les images satellitales peuvent être importantes pour une évaluation rapide de l'étendue des terres érodées et ne se posent pas en concurrentes des photographies aériennes et des méthodes « traditionnelles » d'acquisition des données mais en complément, permettant de faciliter voir d'améliorer la saisie des données au niveau régional.

Cartographie à différentes échelles

L'interprétation de l'érosion à partir des images satellitales peut être représentée à diverses échelles cartographiques. Pour des études à des échelles variant entre 1/100 000 et 1/5 000 000, la FAO a développé en 1979 une méthodologie qui permet d'identifier quatre classes d'érosion (nulle à faible, modérée, élevée et très élevée) et d'obtenir des cartes qui couvrent plusieurs pays dont pour la région méditerranéenne : la Jordanie, la Syrie et l'Irak (Mitchell *et al.*, 1978) et le Maroc (Pachecho, 1977). À une échelle de l'ordre de 1/100 000, la méthodologie CORINE Land Cover adoptée par l'Union européenne conduit à élaborer des cartes des risques d'érosion du sol qui couvrent 17 pays européens et 2 pays d'Afrique du Nord (Girard et Girard, 1999). Cependant, ces cartes n'ont pas été validées et il n'y a pas d'information actuelle sur la précision du résultat final. Dans un contexte de zone semi-aride méditerranéenne (région de Settat au Maroc), Anys *et al.* (1992) ont démontré que la télédétection, liée à d'autres sources de données, procure des renseignements remarquables et uniques pour la détermination de l'érosion du sol et de la susceptibilité à l'érosion à des échelles variant entre 1/50 000 et 1/200 000. En Tunisie, à partir d'une approche méthodologique intégrant des données (SPOT) et produits dérivés, Ben Amor *et al.* (1992) ont réalisé sur la région de Béja une cartographie des zones les plus sensibles à l'érosion permettant de sélectionner des sites potentiels favorables à l'implantation des retenues collinaires.

CONCLUSION

En matière de modélisation spatiale de l'érosion hydrique, les apports de la télédétection spatiale aérienne permettent de déterminer : 1) les pentes (valeur et longueur), 2) la protection des sols par les végétaux couvrant le sol à plus de 40 %, 3) l'occupation des sols, 4) les forêts incendiées, 5) la structure géologique (karst, linéaments et failles), 6) la structure hydrologique (chevelu des cours d'eau, organisation hydrologique, etc.), 7) les teneurs en matière organique, calcaire, humidité des sols, leur pierrosité et leur état de surface (battance), etc.

La télédétection autorise aussi une mise à jour régulière ; la précision variable, est fonction de la résolution qui va, actuellement, du mètre au kilomètre. Par contre, elle ne permet pas de déterminer l'infiltrabilité, la cohésion des sols et la minéralogie des argiles ou la stabilité structurale. Pragmatiquement, il n'est pas facile d'obtenir les images et les photographies aériennes à chaque événement climatique important pour l'érosion. Dans tous les cas, il est indispensable d'y associer des études de terrain pour l'initialisation des modèles et leur validation.

Les modèles diffèrent selon les facteurs sur lesquels ils sont construits et sur les types des résultats qu'on obtient. On propose de distinguer trois cas.

1 - Les entrées du modèle sont des facteurs stables (ou évoluant sur une période longue) : sol, morphologie, géologie, hydrographie, normales climatiques. La sortie est une carte de vulnérabilité définie par des classes explicitant les principaux facteurs causant la vulnérabilité du milieu.

2 - On intègre au cas précédent des données événementielles comme l'intensité des précipitations, ou saisonnières comme l'évolution de la couverture végétale ou les états de surface des sols. La sortie est le plus souvent exprimée en perte de terre et dans certains cas, quand il y a soit spatialisation soit extrapolation d'études ponctuelles, on peut obtenir une carte des risques d'érosion.

3 - On intègre au modèle les interventions de l'homme concernant l'aggravation de l'érosion (incendies de forêts, urbanisation, travaux culturels inadaptés aux conditions climatiques ou morphopédologiques) ou la conservation des sols (terrasses, planches, cycle cultural adapté, reforestation). La sortie correspond alors à une base de données permettant une consultation, ponctuelle ou spatialisée, relative à un système d'aide à la gestion territoriale de l'érosion.

Les modèles à construire devraient donner des réponses non seulement parcellaires mais aussi régionalisées. Ceci devient plus aisé avec la télédétection, les MNT et l'emploi des SIG et du GPS. Ils devraient intégrer différents pas de temps : de l'averse, à la saison, à la décennie. Mais dans la pratique, ils doivent être basés sur les données existantes et être adaptés aux conditions du milieu : sol, morphologie, climat, occupation du sol et impact de l'homme. C'est ainsi qu'en région méditerranéenne, il faut porter une attention spécifique au karst (Bou Kheir *et al.*, 1999), à la pierrosité et à la capacité d'infiltration des roches. Ceci ne rend pas aisé la construction d'un modèle universel ou même régional. Une voie serait peut-être de s'orienter vers des modèles adaptés aux données déjà acquises en ce qui concerne les facteurs de l'érosion en visant divers types d'érosion : en nappe, par rigole, par mouvement de masse et par ruissellement. Spatialement, on devrait intégrer au niveau des plages cartographiques les notions de position amont et aval pour mieux

décèler les régions dans lesquelles les arrivées des produits de l'érosion risquent de causer de gros dégâts.

REMERCIEMENTS

Cette étude se fait dans le cadre d'une thèse doctorale financée par le Conseil National de la Recherche Scientifique libanais (CNRS) ainsi que par l'Agence francophone AUPELF-UREF (Beyrouth). À cet effet, nous présentons tous nos remerciements à tous les responsables du CNRS, en particulier au Secrétaire Général Monsieur Mouin Hamzé ainsi qu'à ceux de l'AUPELF-UREF. Nous remercions tous les auteurs qui nous ont envoyé leurs publications portant sur le thème recherché ainsi que Madame C. King et MM. E. Roose et J.W.A. Poesen pour leurs conseils et la relecture du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Abrahams A-D., Parsons A-J., 1991 - Relation between sediment yield and gradient on debris-covered hillslope, Walnut Gulch, Arizona. *Geol. Soc. Am. Bull.* 103: 1109-1113.
- 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 radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments. Thèse de Ph.D. en télédétection, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 251 p.
- Allée P., 1984 - La dynamique des versants dans le Haut-Vallespir: processus, héritages, actions anthropiques. Thèse 3^e cycle, Université de Paris I, 196 p.
- Almeida-Teixeira M.E., Fantechi R., Oliveira R., Gomes-Coelho A., 1991 - Prevention and control of landslides and other mass movements. Commission of the European Communities report EUR 12918.
- *Anys H., Bonn, F., Merzouk A., 1992 - Cartographie et calcul de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et du SIG, cas du bassin versant d'oued Sricha (Settat, Maroc). *Géobioscience* 2: 37-51.
- Arabi M., Roose E., 1989 - Influence de quatre systèmes de production méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bulletin Réseau Erosion* 9: 39-51
- Arabi M., Roose E., 1992 - Water and soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algerian mountains. In: 7th ISCO Conference Pro., 3 (3): 341-347.
- Aubert G., Fauck R., 1997 - Ressources en terres et contraintes hydriques dans les milieux semi-arides en Afrique et en Amérique du Sud. *Compte Rendu de l'Académie d'Agriculture de France*, 83 (2): 67-75.
- Auzet A-V., 1987 - L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques. *Min Env/Min Agr, CEREG-URA 95, CNRS Strasbourg*, 60 p.
- Barthès B., De Noni G., Roose E., Asseline J., Albrecht A., Viennot M., 1998 - Influences du travail du sol et des apports sur le ruissellement et l'érosion: le cas des Rougiers de Camarès dans le Sud-Aveyron. *Orstom actualités, spécial érosion*, 56: 31.
- Ben Amor S., Dutartre P., Makhlof A., 1992 - Recherche des sites favorables à l'implantation des retenues collinaires à l'aide de la télédétection, région du Béja (Tunisie). *Actes du Symposium MARISY' 92, Rabat, Maroc, 7-8 octobre 1992, numéro spécial Géobioscience*, 119-122.
- Benech C., 1994 - Les récentes crues dans les Pyrénées-Orientales, Comparaison à l'aiguade de 1940. In: Lavabre J., editor. Les événements hydropluviométriques intenses récemment observés sur le Sud-Est de la France. *Actes de la journée scientifique du 2 juin 1994, Aix-en-Provence, CEMAGREF, 72-90.*
- Benchaabane A., 1997 - Impact de l'exploitation du prélèvement du bois de feu sur l'érosion du sol en haute montagne (cas du haut Atlas de Marrakech, Maroc). *Sécheresse*, 8(4): 265-269.
- Bernard S., Roose E., Lopez J-M., Querbes M., Querido A., Barby O., 1998 - Utilisation du paillage léger et de la haie vive dans la lutte contre l'érosion en zone semi-aride de montagne (Cap-Vert). *Sécheresse*, 9(1): 13-21.
- Boardman J., 1990 - Soil erosion on the South Downs: a review. In: Boardman J., Foster I-D-L., Dearing J-A., editors. *Soil erosion on agricultural land*, Wiley and Sons, 87-105.
- Boiffin J., 1976 - Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Annales agronomiques*, 27(4): 447-463.
- Bonn F., 1998 - La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*, 9(3): 185-192.
- Bonn F., Cyr L., Anys H., Chakroun H., 1994 - Une modélisation spatiale des pertes de sol liées à l'érosion hydrique. In: Bonn, F., éditeur. *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone, ACCT/PUQ*, 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: Jbaïl - Qartaba. 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.
- Bou kheir R., Shaban A., Khawlie M., Girard M-C., Abdallah C., 1999 - L'érosion hydrique des sols est-elle effective dans les régions karstiques? Le cas de la région Ajaltoun-Kfardebian, Liban. *Association Libanaise pour l'Avancement des Sciences (LAAS)*, Beyrouth, Liban, 2-4 octobre 1999, 115.
- Bou Kheir R., Shaban A., Khawlie M., Girard M-C., 2000 - Human practices influencing hydric erosion in Mount Lebanon. *Regional workshop on "degradation and rehabilitation of marginal lands in the Arab region"*, CEDARE, Cairo, Egypt, 2-4 July 2000, 8 p.
- Bou Kheir R., Shaban A., Girard M-C., Khawlie M., 2001a - Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. *Sécheresse*, 12(3).
- Bou Kheir R., Girard M-C., Shaban A., Khawlie M., Faour G., Darwich T., 2001b - Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, 2(1): 1-22.
- Boussema H-R., 1996 - Système d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles. *Colloque international sur le rôle des technologies de télécommunications et de l'information en matière de protection de l'environnement, Tunis, Tunisie, 17-19 Avril 1996*, 112-116.
- Boussema M-R., Chairat Ben Abdallah S., 1995 - Modélisation hydrologique et de l'érosion à l'aide d'un SIG. *Systèmes d'information géographique utilisant les données de télédétection. Actes du colloque scientifique international, Hammamet, Tunisie, 1-2 novembre 1994*, 64-70.
- Breyer J., 1982 - Reconnaissance geomorphological terrain classification, Lower Boteti region, Northern Botswana. *ITC journal*, 3: 317-323.
- Brown L-C., Foster G-R., Beasley D-B., 1989 - Rill erosion as affected by incorporated crop residue and seasonal consolidation. *Trans. A. Soc. Agric. Engrs*, 32: 1967-1978.
- Burrough P.A., Heuvelink G.B.M., 1992 - The sensitivity of boolean and continuous (Fuzzy) logical modelling to uncertain data. *Proc. 3rd European Conference on GIS (EGIS'92)*, Muich 23-27 March, 1032-1041.
- Castro N., Auzet AV., Chevalier P., Leprun J.-C., 2000 - Influence of extreme rainfall events (El Nino) on a gully system typical of the basaltic plateau of Southern Brazil. *Int Symp. "Gully erosion under global chang"*, Leuven, Belgium, abstract 44.

- Celik I., Aydin M., Yazici U., 1996 - A review of the erosion control studies during the republic period in Turkey. In: Kapur S., Akça E., Eswaran H., Kelling G., Vita-Finzi, Mermut A-R., Ocal A-D., editors. 1st International Conference on land degradation, Adana, Turkey, 10-14 June 1996, 175-180.
- CEMAGREF 1986 - Ruissellement, érosion, inondation dans le bassin du Croult (Val-d'Oise): recherches sur les causes d'aggravation. Rapport CEMAGREF, Université Paris VII, Conseil Général du Val-d'Oise, Min. Env., 180 p.
- Chebani R., Djilli K., Roose E., 1999 - Etude des risques d'érosion dans le bassin versant de l'isser, Algérie. Bulletin Réseau Erosion 19: 85-95.
- Chevalier J.-J., Pouliot J., Thomson K., Boussema M.-R., 1995 - Systèmes d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Systèmes d'information géographique utilisant les données de télédétection. Actes du colloque scientifique international, Hammamet, Tunisie, 1-2 novembre 1994, 4-12.
- Childs S-W., Flint A-L., 1990 - Physical properties of forest soils containing rock fragments. In: Gessel S-P., Lacate D-S., Weetman G-F., Powers R-F., editors. Sustained productivity of forest soils, University of British Columbia, Faculty of Forestry Publ., Vancouver, 95-121.
- Clauzon G., Vaudour J., 1969 - Observations sur les effets de la pluie en Provence. Annales de Géographie, 13(4) : 390-405.
- Collinet J., Valentin C., 1979 - Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Cahiers Orstom, série Pédologie, 17(4) : 238-328.
- Conesa-Garcia C., 1990 - Soil erosion and fluvial sedimentation in the ramblas of south-east Spain. Méditerranée 71 : 63-74.
- Cooke R-U., Warren A., Goudie A-S., 1993 - Desert Geomorphology. UCL Press, London, 300 p.
- Cormary Y., Masson J., 1964 - Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherche du Génie Rural de Tunisie. Application à un projet type de la formule de perte de sols de Wischmeier. Cahiers Orstom, série Pédologie, 2(3) : 3-26.
- Courault D., 1989 - Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection: analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Thèse de doctorat, Paris, 239 p.
- Courault D., Girard M-C., 1988 - Relationships between the composition of the soils and their spectral signatures. 5th Symposium ISSS of working group of Remote Sensing, Budapest, 178-185.
- Dammati B., Bouhlassa S., Bouraja A., Leveque F., Mohsine Y., 1998 - Identification des sources de l'érosion et du colmatage du barrage Sidi Mohamed Ben Abdallah: Etude du bassin pilote de Mezguida (Sud du Plateau central marocain). L'observation spatiale: un outil pour l'étude du bassin méditerranéen, Tunis, 23-27 Novembre 1998.
- De Jong S-M., Riezebos H-T., 1997 - SEMMED: a distributed approach to soil erosion modeling. Remote Sensing '96, Spiteri (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54 10 855 X, 199-204.
- Delhoume J-P., 1981 - Etudes en milieu méditerranéen semi-aride: ruissellement et érosion en zone montagneuse de Tunisie centrale (Djebel Semmama). Campagnes 1975 à 1979. Tunis, Orstom/DRE, 187 p.
- Delhoume J-P., 1987 - Ruissellement et érosion en bioclimat méditerranéen semi-aride de Tunisie Centrale. In: CNRS, éditeur. Processus et mesures de l'érosion, 487-507.
- Demmak A., 1982 - Recherche d'une relation empirique entre les apports solides et les paramètres physico-climatiques des bassins. AISH 144: 403-414.
- Demmak A., 1984 - Recherche d'une relation empirique entre les apports solides spécifiques et les paramètres physico-climatiques des bassins: cas algérien. In. AISH Public 144: 403-414.
- De Ploey J., Imeson A., Oldeman L-R., 1991 - Soil erosion, soil degradation and climatic change. In: Brouwer F-M., Thomas A-J., Chadwick M-J., editors. Land use changes in Europe, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 275-292.
- Dhman H., 1995 - Utilisation du SIG et de la télédétection dans l'étude de l'érosion hydrique: application au bassin versant de Telata. Mémoire de fin d'études, ENFI, Salé (Maroc), 90 p.
- Dosso M., Killian J., Savary G., 1983 - Campagne de simulation des données Spot Burkina: Région de Bagre. In: Expériences de simulation du satellite Spot en Afrique de l'Ouest, 73-96.
- D'Souza V-P-C., Morgan R-P-C., 1976 - A laboratory study of the effect of slope steepness and curvature on soil erosion. Journal agric. Engineering Research 21 : 21-30.
- Dubucq M., 1986 - Télédétection spatiale et érosion des sols: Etude bibliographique. Cahiers Orstom, série Pédologie, 22(2) : 247-258.
- Duley F., Ackerman F., 1934 - Run off and erosion from plots of different lengths. Journal of agricultural research 48 : 505-510.
- El Hadani D., 1997 - Télédétection et système d'informations géographiques pour la gestion et la recherche de l'eau. Géobioscience, les rapports thématiques 1, 28 p.
- Escadafal R., Girard M-C., Courault D., 1988 - La couleur des sols: appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. Agronomie, 8(2) : 147-154.
- Evenari M., Shanan L., Tadmor N., 1982 - The Negev-The Challenge of a Desert. Harvard University Press, Massachusetts, 437 p.
- FAO 1976 - La conservation des sols dans les pays de développement. Bulletin pédologique 30: 92 p.
- FAO 1977 - Assessing soil degradation. Soils Bulletin 34: 83 p.
- FAO 1979 - A provisional methodology for soil degradation assessment, 84 p.
- FAO 1980 - Conservation des ressources naturelles en zones arides et semi-arides. Cahiers FAO: conservation des sols 3: 135 p.
- FAO 1983 - Garder la terre en vie: L'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. Bulletin pédologique 50: 62 p.
- FAO 1986 - La conservation et l'aménagement des sols dans les pays en développement. Bulletin pédologique 33: 98 p.
- FAO 1990 - Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Bulletin pédologique 57: 182 p.
- FAO 1996a - Choyez la terre: Aménagement des sols pour une agriculture durable et la protection de l'environnement sous les tropiques, 33 p.
- FAO 1996b - Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface. Bulletin pédologique 68: 153 p.
- FAO-UNEP-UNESCO 1980 - Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols, 30 p.
- Gallart F., Clotet-Perarnau N., 1988 - Some aspects of the geomorphic processes triggered by an extreme rainfall event: the November 1982 flood in the eastern Pyrenees. Catena Suppl. 13: 79-95.
- Gallien E., Le Bissonnais Y., Eimberck M., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J-F., Martin P., 1995 - Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. Cahiers Agricultures 4: 171-183.
- Garcia-Ruiz J., Lasanta T., Ruiz-Flano P., Ortiza L., White S., Gonzalez C., Marti C., 1996 - Land use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. Landscape Ecology 11(5) : 267-277.
- Gèze B., 1956 - Carte de reconnaissance des sols du Liban au 1/200 000. République Libanaise, Ministère de l'Agriculture, Direction de l'Enseignement et la Vulgarisation, Station Agronomique Libano-Française. Notice explicative, 52 p.
- Girard M-C., 1990 - Images de la terre: un monde à découvrir, une approche dialectique. 115 Congr. Nat. Soc. Savantes, L'image et la Science, Avignon 1990, 67-77.

- Giordano A., 1986 - A first approximation of soil erosion risk assessment in the southern countries of the European Community. In: Morgan R.P.C., Rickson R.J., editors. Erosion assessment and modeling. Commission of the European Communities Report EUR 10860, 3-24.
- Girard C-M., Girard M-C., 1975 - Applications de la télédétection à l'étude de la biosphère, Masson, 186 p.
- Girard M-C., Girard, C-M., 1999 - Traitement des données de télédétection, Dunod, ISBN 2100041851, 529 p.
- Girard M-C., Isavwa A., 1990 - L'état de l'art en télédétection sur les zones arides et semi-arides. *Natural & Resources*, 26(1) : 3-9.
- Govers G., Everaert W., Poesen J., Rauws G., De Ploey J., 1987 - Susceptibilité d'un sol limoneux à l'érosion par rigoles: essai dans le grand canal de Caen. *Bull. 33 CNRS. Centre de Géomorphologie de Caen*, Décembre 1987.
- Groove A.T., 1996 - Physical, biological and human aspects of environmental change. MEDALUS II Report, 39-64.
- Heusch B., 1970 - L'érosion du Pré-Rif, *Annales rech. Forestière, Maroc* 12, 1-176.
- IGN 1983 - Erosion des terres agricoles d'après photographies aériennes. Liges court (somme), 23 p.
- IGN 1995 - Atlas Nacional de Espana. Tomo I. Madrid: Instituto Geografico Nacional. Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Jackowski W-F., 1996 - Assessment of soil erosion risk in Poland. In: Dallemand, J.F. and Perdigao, V., editors. Phare-multi country environment programme Mars and environmental related applications (Mera) project. Proceedings (1994-1996 results conference), 67-77.
- Joftic L., Milliman J., Sestini G., 1992 - Climate change and the Mediterranean. UNEP-E. Arnold Pub. NY.
- Ketcheson J-W., Stonehouse D-P., 1983 - Conservation tillage in Ontario. *Journal Soil Water Conservation* 38: 4-253.
- Khawlie M., 2000 - L'environnement du Liban: une ressource perdue (en arabe). Menrikh publisher, 372 p.
- Kirkby M., 1995 - Modeling the links between vegetation and landforms. *Geomorphology* 13 : 35-319.
- Klingebiel A.A., Montgomery P.H., 1966 - Land capability and classification. *Agricultural Handbook* 210, Soil Conservation Services, USDA.
- Krynine D., Judd W., 1957 - Principles of engineering geology and geotechnics. McGraw Hill book company Inc., 730 p.
- Lal R., 1982 - Effects of slope length and terracing on runoff and erosion on a tropical soil, *IAHS Publ.* 137: 23-31.
- Lamouroux M., 1968 - Compte-rendu des journées pédologiques libanaises (5-11 Juin et 29 Octobre-4 novembre 1967). *Bulletin BBG. Pédologique* 17 : 7-67.
- Lafren J.M., Colvin T.S., 1981 - Effect of crop residue on soil loss from continuous row cropping. *Transactions of the American society of agricultural engineers* 24: 605-609.
- Lafren J-M., Leonard J-L., Foster, G-R., 1991 - A new generation of erosion predicting technology. *Journal Soil Water Conservation*, no 46, pp 8-34.
- Lattanzi A-R., Meyer L-D., Baumgardener M-F., 1974 - Influences of mulch rate and slope steepness on interrill erosion. *Soil Science Society Proc.* 38: 946-950.
- Laouina A., Nafaa R., Chaker M., 2000 - Gestion des eaux et des terres et dégradation dans les collines de ksar el Kebir, Maroc, *Bull. Réseau Erosion* 19, 18 p.
- Le Bissonnais Y., Renaux B., Debouche H., 1995 - Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena* 2 : 1-14.
- Lefay O., 1986 - Etude de l'efficacité des travaux de DRS en Algérie. Mémoire stage, Cnearc/Orstom/INRF, 50 p.
- Lenthe H.R., Krone F., 1981 - Soil erosion losses on various geological deposits ecological land survey in key areas of Cyprus. *Pedology, Part C*, 40 p.
- Luken H., Krone F., 1989 - Calcareous soils of Cyprus: five years erosion measurements (1981-1996). *Pedology, hydrochemistry and non metallic mineral resources* 5 : 17 p.
- Lopez-Bermudez F., Romero-Diaz M.A., 1993 - Genesis y consecuencias erosivas de las llluvias de alta intensidad en la region mediterranean. In: Cuadernos I, Logrono: Geografica, 7-28.
- Ludwig B., Auzet A-V., Boiffin J., Papy F., King D., Chadoeuf J., 1996 - Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés au Nord de la France. *Etude et Gestion des sols*, 3(10) : 53-70.
- Martin C., 1975 - L'érosion des sols sur roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal. *Rev. Géomorphologie Dynamique* 24 : 49-63.
- Masson J-M., 1971 - L'érosion par l'eau en climat méditerranéen. Méthode expérimentale de mesure à l'échelle du champ. Thèse docteur ingénieur, Montpellier, 213 p.
- Mazour M., 1992 - Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'oued Isser: Tlemcen, Algérie. *Bulletin Réseau Erosion* 12: 300-313.
- Mériaux S., 1961 - Action du chaulage sur les composantes de la structure et sur l'état de saturation du sol. *Compte rendu à l'Académie d'Agriculture*, 322-325.
- Merzouk A., 1985 - Relative erodibility of nine selected Moroccan soils at related to their physical, chemical and mineralogical properties. Ph.D. Thesis, University of Minnesota, USA, 110 p.
- Merzouk A., Rayan J., Kacemi M., 1994 - A perspective on soil erosion in Morocco's dry land semi-arid zone. *Actes du colloque International des Sciences du Sol: « Sciences du sol au développement », Rabat, Maroc*, 6-8 Avril 1993, 12 p.
- Mitchell C-W., Pacheco R., Howard, J-A., 1978 - The application of Landsat imagery to the soil degradation mapping of Jordan, Syria and Iraq at 1/5 000 000, FAO-Rome.
- Morgan A., 1986 - Soil erosion & conservation. In: D-A. Davidson, editor, John Wiley and Sons Inc., 253 p.
- Morsli M., 1995 - Les sols de montagne et leur susceptibilité à l'érosion. Cas des monts de Beni-Chougrane. Thèse de magistère, Ina, Alger, 170 p.
- Moustakas N.C., Kosmas C.S., Danalatos N.G., Yassoglou N., 1995 - Rock fragments. I: their effect on runoff, erosion and soil properties under field conditions. *Soil use and management*, 11(3) : 115-120.
- Mougenot B., Cailleau D., 1995 - Identification par télédétection des sols dégradés d'un domaine sahélien au Niger. In: Escadafal R., Thiombiano L., Mulders M-A., éditeurs. *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et système d'informations géographiques*, Ouagadougou, 6-10 Février 1995, 429-443.
- Mutcher C., Greer J., 1980 - Effect of slope length on erosion from low slopes. *Trans. ASAE* 23, 866-869.
- Nahal I., 1975 - Principes de conservation du sol, Masson et Cie, 140 p.
- Nahal I., 1984 - Classement provisoire des terrains et remèdes pour la lutte contre la désertification en Syrie. In: *Sols, INA Paris-Grignon* 14 : 39-70.
- Nyssen J., Haile M., Poesen J., Deckers J., Moeyersons J., 1999 - Les effets du ramassage des pierres sur la perte du sol et les récoltes en dogua tembien, Tigré, Ethiopie. *Bulletin Réseau Erosion* 19: 427-440.
- Obbed C., Tourasse P., 1994 - Uncertainty in flood forecasting: a french case study. In Rossi G., Harmancioglu N., Yevjevich V., editors. *Coping with floods, Proceedings of the NATO advanced study institute on coping with floods*, Erice, Italy, 3-15 November 1992. Dordrecht, Kluwer Academic, 473-502.
- Osborn H-B., Simanton J-R., Renard K-G., 1976 - Use of the universal soil loss equation in the semiarid southwest. *Soil erosion: prediction and control, special publication no 21, the proceedings of a National Conference on Soil Erosion*, 24-26 May 1976, 41-49.

- Ozden S., 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.
- Ozden S., Sonmez K., 1998 - Erodibility of some great soil groups in eastern Anatolia. International symposium on arid region soils: share our experiences to conserve the land, Izmir, Turkey, 21-24 September 1998, 154-159.
- Pachecho A., 1977 - The use of Landsat imagery for assessing soil degradation in Morocco. 1er Colloque Pédologie-Télétection, 29 août-7 septembre 1977, 109-117.
- Papy F., Le Bissonnais Y., Guérif J., 1995 - Valorisation et protection de la ressource en eau. Projet: recherches sur les processus physiques et la maîtrise de l'érosion hydrique à l'échelle d'un territoire agricole. Le programme valorisation et protection des ressources en eau 1992-1995. Protection des ressources en eau, INRA éditions, 27 p.
- Perez-Trejo F., 1994 - Desertification and land degradation in the European Mediterranean. EUR 14850 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Poesen J., 1983 - An improved splash transport model. Zeitschrift für Geomorphologie, 29 (2): 373-382.
- Poesen J., 1986 - Surface sealing influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments. Earth surface processes and landforms 11 : 1-10.
- Poesen J., 1990 - Erosion process research in relation to soil erodibility and some implications for improving soil quality. In: Albaladejo J., Stocking M.-A., Diaz E., editors. Soil degradation and rehabilitation in Mediterranean environmental conditions, C.S.I.C., Murcia, pp 159-170.
- Poesen J., Bryan R.B., 1989 - Influence de la longueur de pente sur le ruissellement: rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation. Cahiers Orstom, série Pédologie, 71-80.
- Poesen J., Govers G., 1990 - Gully erosion in the loam belt of Belgium: typology and control measures. In: Boardman J., Foster I.-D.-L., Dearing J.-A., editors. Soil erosion on agricultural land, 513-530.
- Poesen J., Ingelmo-Sanchez F., 1992 - Interrill runoff and sediment yield from topsoils with different structure as affected by rock fragment cover and position. Catena 19: 451-474.
- Poesen J.-W., Torri D., Bunte K., 1994 - Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scale: a review. Catena 23: 141-166.
- Poesen J.-W., Vandaele K., van Wesemael B., 1996a - Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. Erosion and sediment yield: global and regional perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996), IAHS Publ. 236: 251-266.
- Poesen J.-W., Boardman J., Wilcox B., Valentin C., 1996b - Water erosion monitoring and experimentation for global changes studies. Journal of soil and water conservation, September-October 1996, 386-390.
- Poesen J.-W., Vandaele K., van Wesemael B., 1998a - Gully erosion: importance and model implications. In: Boardman J., Favis-Mortlock D., editors. Modeling soil erosion by water, NATO ASI series I, vol. 55, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 285-311.
- Poesen J.-W., van Wesemael B., Bunte K., Solé Benet A., 1998b - Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: a case study from southeast Spain. Geomorphology 23: 323-335.
- Pouliot J., Thomson K.-P.-B., Chevallier J.-J., Boussemma R.-M., 1994 - Integrated application of geomatic techniques in the context of agricultural anti-erosion management. Canadian Journal of Remote Sensing, 20(4): 419-425.
- Quine T.-A., Navas A., Walling D.-E., Machin J., 1994 - Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Las Bardenas in the Central Ebro River basin, Spain. Land degradation and rehabilitation 5 : 41-55.
- Quinton J., 1997 - Reducing predictive uncertainty in model simulations: a comparison of two methods using the European Soil Erosion Model (EUROSEM). Catena 30: 101-117.
- Riezebos H. Th., 1989 - Application of nested analysis of variance in mapping procedures for land evaluation. Soil use and management 5 : 25-30.
- Roose E., 1994 - Introduction à la GCES. Bulletin pédologique FAO 70, 420 p.
- Roose E., 1999 - Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive. Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols: (GCES). Bulletin Réseau Erosion 19 : 11-25.
- Roose E., Arabi M., 1994 - Intensification de l'agriculture sans dégradation en montagne méditerranéenne. Bulletin Pédologique FAO 70 : 363-370.
- Roose E., Cavalie J., 1988 - New strategy of water management and soil conservation. Applications in developed and developing countries. Proceeding of ISCO 5 "Land conservation for the future generation", Bangkok, 913-920.
- Roose E., De Noni G., 1998 - Apport de la Recherche à la lutte antiérosive: Bilan mitigé et nouvelle approche. Etude et Gestion des sols, 5(3) : 181-194.
- Roose E., Assogba F., Guillerm C., 1997 - Influence de la fumure organique sur la réhabilitation d'un sol superficiel en vue de la production d'une céréale fourragère dans les Rougiers de Camarès (S.O. France). Bulletin Erosion 17: 134-144.
- Roose E., Arabi M., Chebbani R., Mazour M., Morsli B., 1998 - Les montagnes méditerranéennes d'Algérie. Orstom actualités, spécial érosion 56 : 26-27.
- Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M., Morsli B., 1993 - Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification sur la production agricole par la GCES: synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 28(2) : 289-308.
- Ryan J., 1982 - A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon. Publication 69, American University of Beirut, 15-38.
- Saccardy L., 1950 - Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. Terres et Eaux 11 : 3-19.
- Sanders J.-H., Southgate D.-D., Lee J.-G., 1995 - The Economics of soil degradation: technological change and policy alternatives, SMSS technical monograph no. 22, Department of Agricultural Economic, Purdue University, 74 p.
- Sayegh A.H., Saliba A.T., 1969. Some physical and chemical properties of soils in the Beqaa's plain, Lebanon. Journal Soil Science 20: 168-175.
- Shaban A., Khawlie M., 1998 - Geoenvironmental assessment of riparian zones under extreme climatic events: a case study of representative rivers in Lebanon. Mediterranean rivers and riparian zones-processes and management symposium, Zaragoza, Spain, 21 September-2 October 1998, 25 p.
- Smolikowski B., Roose E., Lopez J.-M., Querbes M., Querido A., Barry O., 1998 - Utilisation du paillage léger et de la haie vive dans la lutte contre l'érosion en zone semi-aride de montagne (Cap-Vert). Sécheresse, 9(1) : 13-21.
- Simanton J.-R., Toy T.-J., 1994 - The relation between surface rock fragment cover and semiarid hillslope profile morphology. Catena 23: 213-225.
- Srinivasan, R., Engel B.-A., Wright J.-R., Lee J.-G., Jones D.-D., 1994 - The impact of GIS-derived topographic attributes on the simulation of erosion using AGNPS. Applied engineering in Agriculture 10: 561-566.
- Stephens P.R., Cihlar J., 1981 - The potential of remote sensing to monitor soil erosion on cropland. Proceedings of the 15th International Symposium on remote sensing of Environment, Ann. Arbor, Mich. USA, 985-995.
- Stone J., Renard K.-G., Lane L.-J., 1996 - Runoff estimation on agricultural fields. Soil erosion conservation and rehabilitation, éditions Menachem Agassi, 203-238.
- Tarzi J.G., Paeth R.C., 1974 - Genesis of a Mediterranean red and a white rendzina soil from Lebanon. Soil science, 120(4) : 272-276.
- Tayara Z., 1998 - Etude hydro-pluviométrique comparative des bassins versants de la région côtière intermédiaire du Liban (le Damour, l'Awali-Bisri, Le Sainiq et le Zahrani). Publications de l'Université Libanaise, Section des études géographiques 1 : 225 p.
- Thornes J.-B., 1995 - Mediterranean desertification and the vegetation cover. In:

- Fantechi R., Peter D., Balabanis P., Rubio J-L., editors. Desertification in a European context: physical and socioeconomic aspects. European Commission Report EUR 15415, 169-194.
- Thornes J-B., Shao J-X., Diaz E., Roldan A., McMahon M., Hawkes J-C., 1996 - Testing the MEDALUS hillslope model. *Catena* 26: 60-137.
- Tim U-S., Tolly R., 1994 - Evaluating agricultural non-point source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model. *Journal of Environment quality* 23: 25-35.
- UNEP 1994 - United Nations conservation to combat desertification. Geneva: United Nations Environmental Program.
- USDA 1951 - Soil survey manual. United States Department of Agriculture, Handbook, Washington 18.
- Van Deursen W.P.A., Wesseling C.G., 1993 - The PC-Raster Package. Department of Physical Geography, Utrecht University.
- Verhey W., Osman A., 1974 - Observations sur la lithologie du Liban Sud et son influence sur le développement des sols et le façonnement du paysage. Institut des Recherches Agronomiques Liban. Publication no. 55, série scientifique, Septembre 1974, 38 p.
- Wainwright J., 1996 - Hillslope response to extreme storm events: the example of the Vaison-La-Romaine event. In: Anderson M-C., Brooks S-M., editors. *Advances in hillslope processes*, Chichester, Wiley, 997-1026.
- Wischmeier W-H., 1976 - Use and misuse of the universal soil loss equation. *Journal of soil and water conservation* 31: 5-9.
- Wischmeier W-H., Smith D-D., 1958 - Rainfall energy and its relation ship to soil loss. *Trans. Am. Geophy., Union* 39: 285-291.
- Wischmeier W-H., Smith D-D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning, Washington, USDA 537: 58 p.