Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc)

Mohamed Sabir, Bernard Barthès, Eric Roose

▶ **To cite this version:**

Mohamed Sabir, Bernard Barthès, Eric Roose. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). Sécheresse, 2004, 15 (1), pp.105-110. ird-04102416

HAL Id: ird-04102416
https://ird.hal.science/ird-04102416

Submitted on 22 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SECHERESSE

Note de recherche
Sécheresse 2004 ; 15 (1) : 105-10

Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc)

Mohamed Sabir[1]
Bernard Barthes[2]
Éric Roose[2]

[1] École nationale forestière des ingénieurs (ENFI),
BP 511,
Salé,
Maroc
<sabirenfi@wanadoo.net.ma>
[2] Institut de recherche pour le développement (IRD),
Laboratoire MOST,
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France
<roose@mpl.ird.fr>
<barthes@mpl.ird.fr>

Résumé

Dans les montagnes méditerranéennes du Maroc, les problèmes d'érosion sont variés et importants : décapage des horizons humifères par érosion en nappe (1 à 5 t/ha/an), érosion en rigoles (10 à 100 t/ha/an) et érosion aratoire lors du travail du sol (1 à 60 t/ha/an), ravinement des versants (100 à 300 t/ha/an), mouvements en masse, dégradation des berges des oueds, envasements des barrages, coulées boueuses, etc. Sur les fortes pentes des montagnes méditerranéennes, l'érosion linéaire est nettement plus importante que l'érosion en nappe, car l'énergie du ruissellement est plus forte que celle des pluies. Pour évaluer les risques de ruissellement et d'érosion on a donc cherché des indicateurs de la capacité du sol à se désagréger et à produire du ruissellement. C'est pourquoi, un simulateur de pluies simplifié (irrigateur à rampe) a été mis au point pour mesurer sur le terrain (1 m^2), la pluie d'imbibition (Pi) et la vitesse d'infiltration finale (If) avec des pluies simulées de 50 mm de hauteur et des intensités de 80 mm/h. Soixante-quatre placettes, représentant les différents sols, pentes (15 à 40 %) et utilisations des terres (forêts, agroforêts, parcours, cultures) ont été testées. Des corrélations significatives (R = 0,95 à 0,70) ont été observées entre l'infiltration et i) certaines caractéristiques de l'horizon superficiel du sol (taux de matière organique, macro-agrégats stables à l'eau, cohésion, densité apparente) ; ii) les états de surface (surfaces couvertes et surfaces fermées par les croûtes, les cailloux et le tassement). Ces résultats permettent d'évaluer à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) le risque d'érosion en montagne en considérant les utilisations des terres, les sols, les pentes et certains indicateurs, tels que l'infiltration, la teneur en macro-agrégats stables, l'encroûtement et la compaction du sol en surface. Le surpâturage et la mise en culture des terres forestières réduisent la couverture végétale des terres ainsi que le taux de matière organique et compactent le sol. Les risques de ruissellement et d'érosion augmentent. Les reboisements restaurent la situation, mais soustraient une partie de leurs parcours aux paysans et sont peu acceptés. L'agroforesterie améliore les caractéristiques hydrodynamiques des sols et permet une agriculture de montagne durable et mieux acceptée.

Mots clés : Érosion hydrique ; Indicateurs ; Maroc.

Fonds Documentaire IRD
010033575

Summary

Assessing runoff and erosion risk indicators on the main soils of the Mediterranean mountains of the Western Rif area (Morocco)

The Mediterranean mountains of Morocco are faced with numerous erosion problems: topsoil scouring through sheet (1 to 5 t/ha/year), rill (10 to 100 t/ha/year) and tillage erosion (1 to 60 t/ha/year), gully erosion on hill slopes (100 to 300 t/ha/year), landslide and embankment degradation around wadies, floods and reservoir siltation. Linear erosion being more important than sheet erosion on steep slopes, runoff energy is more important on the mountains than rainfall energy. Therefore, a simple irrigator was used to measure the pre-pounding rainfall (Pi) and the stable infiltration rate (If) after a simulated rainfall of 50 mm and an intensity 80 mm/h on a 1-m^2 surface with 64 plots representative of various soils and land uses (forests, agroforests, grazing and cropping lands) on 15 to 40% hill slopes. Significant correlations (R=0.95 to 0.70) were observed between stable infiltration rate (If) and i) topsoil characteristics (organic matter percentage, stable macro-aggregates, cohesion, bulk density; and ii) with soil surface features (surface covered and surface closed by stones, compacted and crusted). These results emphasize the possibility to include data on land uses, soils, slopes, and indicators such as prepounding rainfall, infiltration, water-stable macro-aggregates, sealing crusts and compaction of the topsoil in a Geographic Information System (GIS) dealing with runoff and erosion risks in mountainous areas. Intensive human activities (over-cultivation and over-grazing) have reduced the soil organic matter contents and increased the soil surface compaction and the risk of runoff and erosion. Reforestation can reverse this situation, but it is not easily accepted by farmers, because their rangeland surface would be reduced. Agroforestry, by improving topsoil organic matter stock and hydrodynamics features, allows a sustainable and acceptable steep-land agriculture.

Key words: Water Erosion; Indicators; Morocco.

Des problèmes aigus d'érosion en montagne méditerranéenne sont connus depuis plus de 50 ans au Maghreb : à cause de la croissance démographique, le surpâturage et les défrichements entraînent la dégradation du couvert végétal et du sol et par la suite, l'augmentation du ruissellement, le ravinement, le sapement des berges des oueds, les glissements des collines environnantes et la sédimentation accélérée dans les barrages. Les phénomènes d'érosion sont variés et importants : érosion en nappe (1 à 5 t/ha/an), en rigoles (10 à 100 t/ha/an), ravinement (100 à 300 t/ha/an), mouvements en masse et érosion aratoire (1 à 60 t/ha/an). Une simple observation sur l'encaissement des vallées et les fortes pentes montre que l'érosion linéaire est plus importante que l'érosion en nappe car l'énergie du ruissellement est supérieure à celle des pluies sur les pentes de plus de 20 % [1-3].

Plusieurs travaux ont été consacrés à la compréhension et la prévision des processus d'érosion hydrique dans les montagnes méditerranéennes [1-7]. Au Maroc, l'administration des Eaux et Forêts a lancé un programme ambitieux de modélisation des pertes en terre au niveau de 14 bassins-versants à aménager, sur la base du modèle empirique américain RUSLE [8]. Plus d'une centaine de parcelles d'érosion (100 m^2) ont été installées dans tout le pays pour couvrir la diversité des facteurs principaux de l'érosion. Cependant, 16 ans après, les résultats ne sont toujours pas disponibles. Le dispositif est très lourd pour acquérir des résultats fiables. Enfin, au Maroc, les processus d'érosion sont surtout liés à l'énergie du ruissellement et donc aux facteurs responsables de sa génération [1, 5, 7]. Plusieurs chercheurs ont essayé des modèles plus simples, fondés sur la réalisation de systèmes d'information géographique (SIG) et sur l'évaluation d'indicateurs facilement mesurables, pour la qualification du comportement hydrologique et de l'érodibilité des sols. Les auteurs ont montré que la stabilité des macro-agrégats est fortement liée à la teneur en matière organique des sols et peut être utilisée comme indicateur de sa sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique [5, 9-12]. D'autres ont montré que la production de ruissellement d'un sol est fortement liée aux caractéristiques physiques de son état de surface et à sa couverture végétale [13, 14].

L'objectif de cette étude est de contribuer à la connaissance des processus de ruissellement sur pentes fortes et d'apporter des indicateurs, facilement mesurables sur le terrain ou même au laboratoire, pour la prévision des risques de ruissellement et d'érosion en montagnes méditerranéennes. Elle vise à déterminer les effets de diverses utilisations des terres sur la capacité du sol à infiltrer les eaux de pluies en fonction de leur état de surface et de leurs propriétés structurales.

Matériel et méthode

La zone d'étude est située entre Tétouan et Chaouen, dans le Rif occidental, région située au nord du Maroc. Le climat est méditerranéen subhumide (600 mm/an en saison froide). Des événements pluvieux rares peuvent atteindre 120 mm/24 h. L'été est chaud et très sec. La végétation naturelle est une ancienne suberaie *(Quercus suber)* évoluant en matorral surpâturé à cistes. La céréaliculture est dominante. La progression des champs de cannabis *(Cannabis sativa)* est la cause principale de la régression de la forêt sur substrats siliceux. Des reboisements de *Pinus radiata* ou *halepensis* et d'*Eucalyptus* protègent localement les pentes fortes. Le relief est montagneux et les pentes sont moyennes à fortes (15 à 60 %). Les sols sont essentiellement superficiels, caillouteux, décapés par l'érosion et peu évolués. Les paysans distinguent cinq types de sols :

Tableau I. Effets de l'utilisation des terres (UT) sur l'état de surface et les caractéristiques des sols (0-10 cm) dans les montagnes méditerranéennes du Rif occidental, Maroc.

UT	MO %	s	MA %	s	SO %	s	CV %	s	PEN	s	If mm/h	s	Pi mm	s
Forêt	4,7d	0,5	–	–	84,7a	17,9	82,8a	7,1	1,2ab	0,1	63,7c	4,8	4,3bc	0,6
Matorral	2,9ab	0,3	37,1bc	3,6	32,7c	12,2	59,8	9,6	2,0c	0,4	31,1a	3,3	2,4a	0,4
Céréales	2,3a	0,4	22,7a	2,9	63,7ab	9,1	57,7b	7,5	1,4ab	0,4	41,6b	2,5	3,2ab	0,3
Cannabis	2,1a	0,3	27,7ab	5,5	53,0b	11,3	32,7c	9,3	1,5b	0,2	32,7a	3,0	3,8bc	0,4
Agroforesterie	3,2bc	0,3	23,7a	4,8	72,7a	12,4	66,3ab	5,8	1,1a	0,1	53,5c	3,3	4,3c	0,4
Reboisement	4,4cd	0,5	48,5c	5,5	80,0a	17,3	78,8a	5,7	1,2ab	0,1	56,5c	4,8	4,3bc	0,6

MO = matière organique du sol (de 0 à 10 cm) ; MA = % de macro-aggrégats stables à l'eau ; SO % = surface ouverte (aggrégats, fissures, trous biologiques) ; CV % = surface du sol couverte par les cailloux, la litière et les adventices ; PEN = résistance (kg/cm²) à la pénétration de la surface du sol sec depuis plus de 5 jours ; If = infiltration finale stabilisée (mm/h) ; Pi = pluie d'imbibition (mm) ; s = erreur standard.
Pour chaque variable, les lettres minuscules signolent les différences significatives entre traitements ($p < 0,05$)

« ferrich », sols peu évolués d'érosion, dominants ; « ahmer », sols rouges sablo-argileux à tendance fersialitique ; « toiresse », sols noirs, peu évolués, à caractères vertiques ; « rmel », sols bruns fersialitiques sableux ; et « adouka », sols argileux bruns vertiques.

L'étude a été réalisée au niveau de terroirs villageois et comprend deux phases : une enquête rapide avec les paysans pour définir les systèmes de production et les problèmes d'érosion qui y sont liés, et ensuite des simulations de pluies (trois répétitions) sur chaque type de sols et les principaux usages du sol (forêt de chêne liège, plantation de pins, matorral pâturés, système agroforestier, céréale, cannabis) et des analyses de laboratoire des horizons 0-10 cm.

Les caractéristiques du sol observées sont la densité apparente (da, g/cm^3) mesurée avec un cylindre de 500 cm^3, la résistance à la pénétration (PEN, kg/cm^2) par un pénétromètre de poche, la résistance au cisaillement (SS, kg/cm^2) par un cissomètre *(vane shear tester)*, la teneur en matière organique (MO %) et la texture (argile, limons et sables %). La stabilité des agrégats au tamisage sous l'eau (MA %) a été déterminée par une méthode IRD [12] similaire à celle de Kemper et Rosenau [15]. Les états de surface ont été caractérisés par la méthode des points quadrats : sur 1 m^2, on observe tous les 2 centimètres, le long d'un décamètre, le pourcentage des surfaces couvertes au ras du sol (CV % = adventices + litière + cailloux) et le pourcentage des surfaces ouvertes (SO % = agrégats + fissures + trous faune) ou fermées (SF % = pellicule, croûtes, zones tassées et cailloux inclus dans la masse du sol) [16].

Un simple irrigateur [16] a été utilisé pour mesurer, sur des placettes de 1 m^2, la pluie d'imbibition (Pi, mm) et l'infiltration à l'équilibre, dite infiltration finale (If, mm/h), avec des pluies simulées de 50 mm de hauteur et des intensités de 80 mm/h (à 10 % près). Il s'agit d'une rampe d'arrosage de 50 cm de large reliée par un tuyau souple à une citerne de 60 litres située 1 m au-dessus du sommet de la parcelle. Un observateur arrose une parcelle (à l'état naturel) de 60 × 166 cm (1 m^2) le plus régulièrement possible à la hauteur de 80 cm. Un autre observateur mesure le ruissellement au bas de la parcelle délimitée par deux petites digues de terre protégées par des fers cornières de 45 mm pour ne pas perturber l'état naturel de la surface. L'intensité de la pluie (variable de 50 à 150 mm/h) est réglée par une vanne à la sortie de la citerne. Ce simulateur simplifié apporte peu d'énergie mais distribue régulièrement les gouttes (diamètre 3 mm) et permet de mesurer la dynamique de l'infiltration sur un sol non remanié et des pentes très fortes (jusqu'à 70 %). Soixante-quatre placettes, représentant les différents sols et utilisations, sur des pentes de 15 à 40 %, ont été étudiées. Les utilisations des terres testées sont la forêt naturelle (état de référence), le matorral pâturé, la céréaliculture (labour avec araire), la cannabiculture (labour + fumure organique et minérale), les terres agroforestières (terrasses couvertes d'arbres fruitiers et de cultures intensives) et le reboisement (*Pinus radiata* de 40 ans).

Résultats

Effets des utilisations des terres (UT) sur les caractéristiques des sols

Les résultats de cette expérimentation sont présentés dans le *tableau I* et les *figures 1 et 2*. On constate d'une manière générale que le mode d'utilisation des terres a un

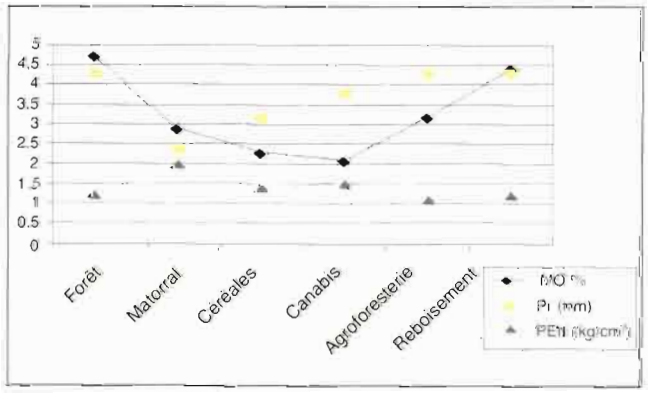

Figure 1. *Effets de l'utilisation des terres sur la matière organique, la résistance à la pénétration et la pluie d'imbibition des sols (Rif, Maroc).*

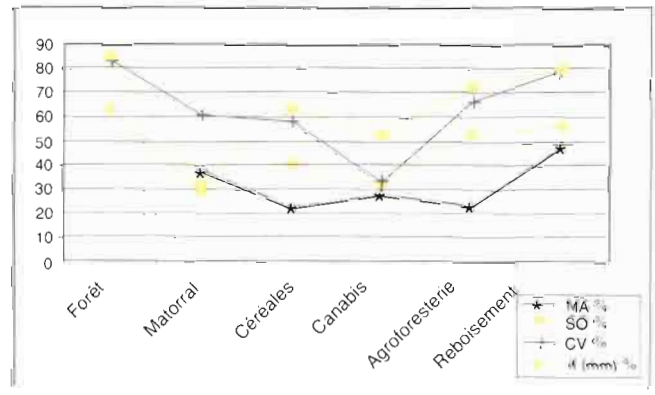

Figure 2. *Effets de l'utilisation des terres sur l'état de surface du sol, la stabilité des macro-agrégats et l'infiltrabilité.*

effet net sur la teneur en matière organique (MO %) du sol. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sous les couverts forestiers(> 4 %) et les valeurs faibles (< 2,4 %) dans les sols remaniés par le labour et plantés en céréales ou en cannabis. Les différences sont statistiquement significatives. Les sols sous forêts et agroforesterie présentent la plus forte proportion de surfaces ouvertes (> 70 %), ceux sous matorral la plus faible proportion (33 %), avec des valeurs intermédiaires sous cultures (50 à 60 %). Le matorral surpâturé présente des valeurs élevées de résistance à la pénétration (PEN = 2 kg/cm^2) : les surfaces sont tassées et la densité apparente de la couche superficielle est importante (le piétinement animal provoque le tassement du sol). Ce résultat est conforme à ceux trouvés dans les parcours du Moyen-Atlas [14]. Les terres cultivées sont moins denses, mais elles se couvrent rapidement de pellicules de battance, de croûtes d'érosion et de sédimentation, d'où des ruissellements plus élevés en fin de pluie. Étant moins cohérentes, elles sont plus érodibles.

Ces modifications dans les états de surface au niveau du matorral et des terres de culture ont provoqué un changement dans les comportements hydrologiques des sols. Les capacités d'infiltration finales (If) les plus élevées ont été observées sous forêt et dans les parcelles agroforestières. Les pluies d'imbibition (Pi) sont plus importantes sous forêt, plantations forestières et agroforêts que sous terres mises en culture. Les surfaces qui produisent le plus rapidement et le plus abondamment le ruissellement sont le matorral surpâturé (tassé) et les terres de culture (appauvries en matières organiques et instables en surface).

Tableau II. Relations entre l'infiltration et les caractéristiques des horizons superficiels des quatre principaux sols.

Sol peu évolué d'érosion « Ferriche »		Sol peu évolué à tendonce fersialitique « Ahmer »	
If = – 8,47 + 0,86 SO	R = 0,97	If = – 0,83 + 0,73 SO	R = 0,. 77
If = – 16,61 + 0,98 CV	R = 0,95	If = 177,17 – 102,68 da	R = – 0,92
If = 144,78 – 78,10 da	R = – 0,73	If = 90,49 – 32,50 PEN	R = – 0,75
If = 124,40 – 62,90 PEN	R = – 0,84	MA = 17,26 + 5,87 MO	R = 0,77
Sol peu évolué argileux à coractère vertique « Toiresse »		Sol brun fersialitique « Rmel »	
If = – 1,23 + 0,76 SO	R = 0,96	If = 57,22 – 8,01 PEN	R = – 0,66
If = 179,27 – 97,21 PEN	R = – 0,96	If = 30,58 + 4,51 MO	R = 0,69
Pi = – 1,27 + 0,08 SO	R = 0,85	Pi = 1,72 + 0,57 MO	R = 0,69
Pi = 16,74 – 9,62 PEN	R = – 0,82	MA = 8,13 + 12,52 MO	R = 0,72
Pi = – 1,39 + 1,35 MO	R = 0,81		

Ces résultats montrent aussi que les parcelles forestières ont une bonne couverture du sol, un taux de MO élevé, une bonne stabilité des agrégats et une capacité d'infiltration élevée. Sous culture, les labours successifs réduisent la teneur en matière organique des horizons superficiels des sols, leur stabilité structurale et leur capacité d'infiltration. La conversion des terres forestières en cultures entraîne donc généralement une augmentation des risques de ruissellement et, sur ces pentes raides, des risques de ravinement.

Relations entre les caractéristiques des sols et leurs propriétés hydrodynamiques

Les études de corrélation entre les propriétés hydrologiques des sols (infiltration finale If, pluie d'imbibition Pi) et la stabilité des macro-agrégats (MA), d'une part, et les variables explicatives relatives à l'état de surface (densité apparente da, résistance à la pénétration PEN, résistance au cisaillement SS, surface ouverte SO, surface couverte CV, teneur en matière organique MO, humidité du sol H), d'autre part, ont montré que le comportement hydrologique du sol est déterminé par son état de surface *(tableau II)*. Le taux d'infiltration finale If est généralement corrélé aux caractéristiques des états de surface et à la teneur en matière organique de l'horizon superficiel. En revanche, nous n'avons pas trouvé de corrélations significatives entre le taux d'infiltration finale et la texture de surface (sable, argile, argile plus limon) [17], l'humidité initiale et la résistance au cisaillement, probablement parce que les variations sont trop faibles dans les cas étudiés. La pluie d'imbibition est liée aux états de surface (tassement) et à la teneur en matière organique. La stabilité des macro-agrégats est liée à la teneur en matière organique du sol.

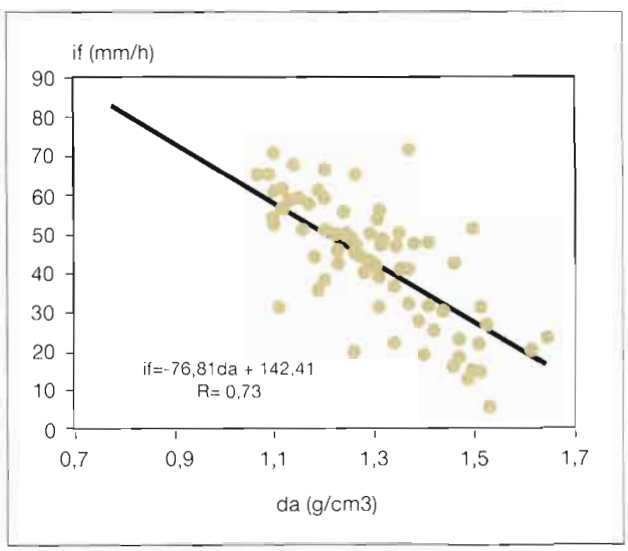

Figure 3. *Relation entre l'infiltrabilité finale (If) et la densité apparente (da) de l'horizon superficiel du sol (0-10 cm).*

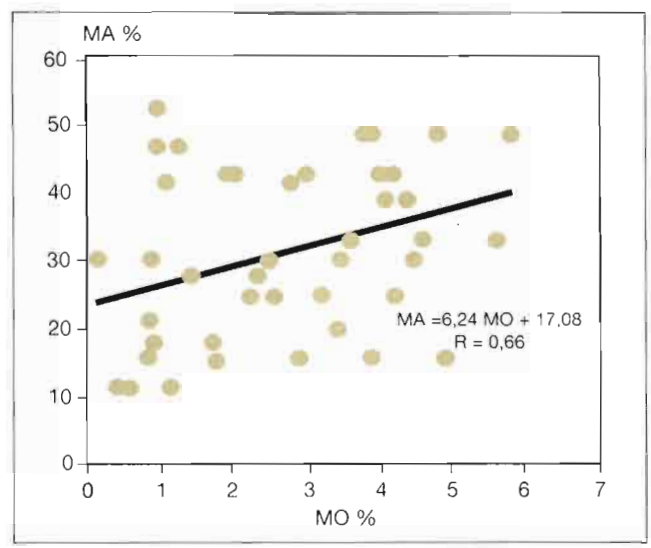

Figure 4. *Relation entre la stabilité des macro-agrégats (MA %, y compris les sables grossiers) et la teneur en matières organiques (MO %) de la surface des sols (0-10 cm).*

Pour l'ensemble de ces sols, la densité apparente est le paramètre de surface le plus lié à la capacité d'infiltration finale If *(figure 3)*. La corrélation entre la densité apparente et l'infiltration est significative (R = 0,73) et la densité apparente peut être utilisée comme indicateur de l'infiltrabilité des sols, mais c'est une mesure difficile à faire sur le terrain, surtout en présence de cailloux.
La stabilité des agrégats est aussi liée à la teneur en matière organique des sols (R = 0,66) *(figure 4)*, comme l'ont trouvé divers auteurs [11, 12, 17], mais d'autres facteurs (les cailloux) masquent ici l'impact des MO et de la stabilité des agrégats sur l'infiltrabilité et l'érodibilité des sols de montagne [18, 19].

Discussion

La mesure de l'érosion sur parcelles d'érosion et sur ravines, bien que coûteuse en temps (5 ans minimum) et main-d'œuvre, reste une référence incontournable, ne fût-ce que pour étudier les processus et valider les modèles. Mais en l'absence de ces mesures, les auteurs ont cherché à estimer les risques potentiels d'érosion à l'échelle de terroirs villageois montagnards en soumettant les divers sols et modes d'usage à une averse de fréquence 1/5 ans tombant sur un sol relativement sec (plus de 5 jours sans pluie, situation fréquente en zone semi-aride) : vu les pentes fortes des versants de ces montagnes, le taux d'infiltration finale nous a paru un bon indicateur du risque de ruissellement et de l'érosion linéaire qui domine. En effet, l'essentiel des transports solides a lieu au cours des gros orages d'intersaison [3]. Pour expliquer cet indicateur, on a eu recours à la mesure sur le terrain des états de surface (surface couverte et surface ouverte) et à l'analyse des caractères liés à l'hydrodynamique du sol de surface (da, MO, MA, PEN, texture, etc).
Il en ressort que cette approche de terrain avec un simulateur de pluies simplifié fournit des indications pertinentes sur les risques de ruissellement et d'érosion en fonction des modes d'utilisation des terres :
– les forêts naturelles ou plantées couvrent bien le sol, l'enrichissent en MO, améliorent l'agrégation et assurent une excellente infiltration, y compris lors des gros orages dévastateurs de fin d'été et de printemps ;
– le matorral surpâturé couvre beaucoup moins bien le sol qui, tassé par les sabots (pression de l'ordre de 3 kg/cm^2, autant que les pneus des tracteurs), donne beaucoup de ruissellement, mais peu de charge solide ;
– les terres de culture sont mal couvertes, rapidement appauvries en MO et deviennent d'autant plus vite instables que les sols sont sableux : vu leur instabilité, elles se couvrent de croûtes diverses [12, 17] et perdent rapidement leur capacité d'infiltration. Une fois dégradées, les terres exigent un travail du sol renouvelé : leur manque de cohésion favorise l'érosion ;
– les systèmes agroforestiers sont intermédiaires, plus riches en MO que les cultures en *openfield*, mais moins cohérentes que les sols sous forêt : leur infiltration est donc intermédiaire et fonction de la couverture du sol et des techniques de gestion des résidus organiques.
L'infiltration finale est liée aux états de surface, en particulier à la surface couverte (au ras du sol) et à la surface fermée par les croûtes et les zones compactées.
Elle est également liée à la stabilité des agrégats, elle-même fonction du taux de MO de l'horizon superficiel. Cependant, en montagne, le taux de cailloux, très important dans les lithosols, interfère avec l'agrégation pour déterminer l'érodibilité du sol face à l'agressivité des pluies et du ruissellement [18, 19].

Conclusions

En montagne, c'est le ruissellement concentré qui cause le plus de dégâts sur les versants raides. Les risques de ruissellement et d'érosion peuvent donc s'estimer en fonction de l'infiltrabilité des sols : celle-ci peut être mesurée sur le terrain par un simple irrigateur simulant des pluies de 50 mm de hauteur et de 80 mm/h d'intensité (averses de fréquence 1/5).
La comparaison entre différentes utilisations des terres montre que les terres forestières et agroforestières infiltrent mieux que le matorral pâturé (tassé) et les terres de culture (instables) : on pourrait donc utiliser ces indicateurs dans le cadre d'un SIG.
L'infiltration finale est liée aux surfaces ouvertes, à la couverture de la surface, à la cohésion de la surface et à la stabilité des agrégats de l'horizon superficiel, elle-même généralement liée à sa teneur en matière organique. La densité apparente (porosité) et la teneur en matière organique peuvent être utilisées comme indicateurs secondaires des risques de ruissellement et d'érodibilité du sol, mais doivent être corrigés par la teneur en cailloux.
La forte pression démographique se manifestant par le surpâturage des terres forestières et leur mise en culture, entraîne une réduction importante du couvert végétal, de la matière organique, de la macroagrégation et une augmentation du tassement de la surface du sol et des risques de ruissellement et d'érosion. Le reboisement permet de restaurer la situation, mais il est rarement accepté par les paysans à qui on soustrait une partie de leur surface de parcours. L'agroforesterie, en améliorant convenablement la teneur en matière organique et les caractéristiques hydrodynamiques des sols, permet une agriculture de montagne durable plus acceptable par les paysans.

Références

1. Heusch B. L'érosion du Pré-Rif. *Ann Rech Forestière ou Maroc* 1970 ; 12 : 9-176.

2. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES. *Cah Orstom Sér Pédol* 1993 ; 28 : 289-308.

3. Laouina A. Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull Réseau Erosion* 1998 ; 18 : 33-53.

4. Merzouk A. *Erodibility of nine Moroccon soils*. Thesis Dept. Soil Sc, Univ. Minnesota, 1985, 185 p.

5. Al Karkouri J, Roose E, Laouina A, Sabir M. État de surface, infiltration et risque d'érosion dans la vallée de Beni Boufrah. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 342-56.

6. Moufaddal K. Résultats des parcelles d'érosion dans le bassin-versant de l'oued Nakhla, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 244-54.

7. Naimi M, Tayaa M, Ouzizi S, Choukr-Llah R, Kerby M. Ravinement dans le BV du Nakhla, Rif occidental, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 232-43.

8. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK,Yoder DC. *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agricultural handbook, 703. Washington (DC) : USDA, 1997 ; 125 p.

9. Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water stable aggregation in soils. *J Soil Sci* 1982 ; 33 : 141-63.

10. Quirk JP, Murray RS. Towards a model for soil structural behavior. *Australian J Soil Res* 1991 ; 29 : 829-67.

11. Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European J Soil Sci* 1996 ; 47 : 425-37.

12. Barthès B, Albrecht A, Asseline J, Denoni G, Raose E. Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). Comm. *Soil Sci Plant Anal* 1999 ; 30 : 1928-38.

13. Barnett AP, Rogers JS. Soil physical properties related to runoff and erosion from artificial rainfall. *Trans ASAE* 1966 ; 9 : 123-8.

14. Sabir M, Merzouk A, Berkat O, Roose E. Effet du pâturage sur l'état de surface, l'infiltrabilité et la détachabilité du sol dans un milieu pastaral aride (Aarid, Haute Moulouya, Maroc). XIII^e Congrès international du génie rural, 2-6 février 1998, ANAFID, Rabat. *Bull Réseau Erosion* 1994 ; 14 : 444-62.

15. Kemper WD, Rosenau RC. Aggregate stability and size distribution. In : Black CA, ed. *Methods of soil analysis, port 1.* Agronomy monograph n° 9. Madison (Wisconsin) : American Society of Agronomy (ASA), 1986 : 425-42.

16. Roose E. Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 87-97.

17. Mrabet R, Lahoul S, Le Bissonnais Y, Duval O. *Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influence des techniques culturales simplifiées.* In : « Land use, erosion & carbon sequestration. Abstracts ». International Colloquium, Montpellier 23-28 novembre 2002, IRD, Montpellier : 113.

18. Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment, cover and position. *Catena* 1992 ; 19 : 451-74.

19. Blavet D, De Noni G, Roose E, Maillo L, Laurent JY, Asseline J. Effet des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse* 2004 ; 15 : 111-20.