

Influences du couvert végétal et des sols sur le stock de carbone du sol et les risques d'érosion et de ruissellement dans les montagnes méditerranéennes du Rif Occidental (Maroc).

SABIR Mohamed¹ & ROOSE Eric²

1. ENFI, BP 511 Salé, Maroc. Courriel : sabirenfi@wanadoo.net.ma

2. IRD, BP 64501, 34394 Montpellier, France. Courriel : roose@mpl.ird.fr

Résumé

Dans le Rif, montagnes jeunes aux pentes raides du fait du contraste des roches tendres et dures, se posent des problèmes graves d'érosion et de protection de l'environnement. La pression démographique a transformé les paysages forestiers (sylvo-pastoraux) en une mosaïque de parcelles céréalières imbriquées avec un matorral dégradé. La réduction du couvert végétal est quasi généralisée, aboutissant au déclenchement de phénomènes d'érosion spectaculaires. Les rôles environnementaux de la forêt ne sont plus assurés. L'eau produite est de mauvaise qualité et les barrages s'ensavent. Le paysage est devenu désolant et le stockage du carbone est réduit au minimum. Cette étude a porté sur l'influence de l'utilisation actuelle des terres (forêt, matorral, cultures de céréale et cannabis, agroforesterie et reboisement) sur la capacité du sol à stocker du carbone dans l'horizon humifère (Stock c t/ha) et sur les indicateurs des risques de ruissellement (infiltration finale If mm/h, pluie d'imbibition Pi mm) et d'érosion (stabilité des macroagrégats du sol MA %).

La zone d'étude, située dans le bassin versant d'oued Laou, a un climat sub-humide. La végétation, une suberaie, est très dégradée. Un matorral de cistes surpâturé existe encore avec des reboisements de pins (40 ans). Les pentes sont moyennes à fortes (15-60%). Les sols sont essentiellement peu évolués d'érosion, avec deux textures : sablonneux ou lithiques développés sur grès ou schistes et argileux vertiques sur marnes ou argilites. Un irrigateur a été utilisé pour simuler des pluies de 80 mm/h d'intensité et de 50 mm de hauteur sur 76 placettes (1m²) représentant des répétitions (>3) selon le type de sol (5) et l'utilisation des terres (5). L'état de surface du sol a été caractérisé selon la méthode des points quadrats : surface ouverte (SO %), surface couverte (couvert végétal au ras du sol CV %), résistance à la pénétration (PEN kg/cm²), densité apparente (da g/cm³) et humidité de surface (H %). Le stock de c du sol a été calculé pour les 30 premiers cm à l'aide de 5 mesures de da et d'une mesure du taux de matière organique (MO %) pour chacune des 76 placettes.

Le stock de c du sol sur les 30 premiers cm atteint 95 t/ha sous forêt, 70 t/ha sous matorral surpâturé (- 26%) et 53 t/ha sous culture (- 46%). Dans le cadre des tentatives de restauration des sols, l'association d'arbre fruitier à la céréaliculture (agroforesterie) ramène le stock de c à 71% et le reboisement des terres dégradées en pins à 93%. La réduction du stock de c par la mise en culture est plus importante dans les sols à texture sablonneuse (- 72%) qu'argileuse (- 48%). La corrélation entre le stock de c et le couvert végétal au ras du sol n'est pas significative. Les corrélations du stock de c avec les indicateurs d'infiltration (Pi et If) sont faiblement significatives, ceci est probablement dû à la richesse caillouteuse des sols. Le taux d'infiltration finale est lié positivement à la MO et à la surface ouverte du sol et négativement à la cohérence PEN et à la densité apparente du sol de surface. La pluie d'imbibition est positivement liée à la MO et à la surface ouverte du sol. La stabilité des macroagrégats est liée significativement à la MO, notamment pour les sols argileux.

La forte pression démographique, se manifestant par une mise en culture et un surpâturage des terres forestières, entraîne une chute de moitié du stock de c et un tassement de la surface du sol. Les risques de ruissellement et d'érosion augmentent avec la dégradation du couvert végétal. La reforestation permet de restaurer la situation, mais elle est rarement acceptée par les paysans dont on soustrait une partie de leur parcours. L'agroforesterie, en améliorant le stock de c et les caractéristiques hydrodynamiques des sols, permet une agriculture de montagne durable et mieux acceptée.

Mots-clés : Maroc, Rif occidental, Sols, Utilisations des terres, Stock de carbone du sol, Indicateurs, Infiltration finale, Pluie d'imbibition, Macro-agrégation, Simulation de pluie.

Effects of soil types and vegetal cover on soil carbon stock and runoff / erosion risks in the western Rif's mediterranean mountains (Morocco).

SABIR Mohamed¹ & ROOSE Eric²

1. ENFI, BP 511 Salé, Maroc. Courriel : sabirenfi@wanadoo.net.ma

2. IRD, BP 64501, F 34394 Montpellier, France. Courriel : roose@mpl.ird.fr

Abstract:

In the Rif, a young mountain with steep slopes due to the contrast of soft and hard rocks formation, serious problems of soil erosion and environment protection take place. The demographic pressure has transformed the forest landscapes in a mosaïc of agricultural plots, mixed with a degraded bushland (matorral). Forest environment roles are no more played. Runoff water has bad quality and dam's reservoirs are silting up. The landscape becomes depressing and soil's carbon stock is reduced to its minimum. This study focussed on the influences of the land use (forest, matorral, cereal crops, cannabis, agroforestry and reforestation) on soils capability to store carbon in the upper horizons and on runoff (stabilized infiltration I_f , pounding rain P_i) and erosion risk indicators (macro-aggregates stability MA %).

The study area, located in oued Laou watershed, in Northern mountains of Morocco, has a sub-humid climate. Vegetation is constituted by a degraded forest of cork oak, an overgrazed matorral and some pine plantations (40 years old). The slopes are medium and steep (15-60%). Soils are mainly superficial lithosoils, with two textures : sandy or gravels developed on sandstone or schist and clay vertic on marl or argilites. A rainfall simulator was used to produce events with rate of 80 mm/h and 50 mm height on 76 plots (1 m²) representing replications (>3) with soils (5) and landuse (5) types. The soil surface features were characterised with a point-quadrat method : open surface (SO %), covered surface (CV %), resistance to penetration (PEN kg/cm²), bulk density (da g/cm³) and soil surface moisture (H %). Soil's carbon stock was calculated for the first 30 cm by 5 measures of bulk density and one measure of organic mater (MO %) for each 76 plots.

The soil stock of c in the first 30 cm (SOC) reached 95 t/ha under forest, 70 t/ha under the overgrazed matorral (- 26 %), and 53 t/ha under cereal crop (- 46 %). In the objective of soils rehabilitation, fruit trees associated with cereal crops (agroforestry) bring back the SOC to 71 % and the reforestation of degraded lands with pines to 93 %. Reduction of SOC by cropping cereals is much more important for sandy soils (-72 %) than for clay soils (-48 %). The correlation between SOC and vegetal cover at the soil surface is not significant. Correlations of SOC with infiltration indicators (I_f , P_i) are lightly significant, probably due to the great soil stone content. Final infiltration rate is correlated positively to organic mater (MO) and to the open surface and negatively to the coherence (PEN) and to bulk density of the soil surface. The pounding rainfall is positively correlated to MO and SO. Aggregate stability is significantly correlated to the MO, mainly for clay soils.

Intensive human activities in forms of over-cultivation and over-grazing had let to a 50% reduction in the carbon stock and compaction of the soil surface. The risk of runoff and erosion increased with degradation in green-cover. Reforestation can reverse this situation, but it's not accepted by peasants, because their range land surface is reduced. Agroforestry, by improving carbon's stock and the hydrodynamics features of soils, allows a sustainable agriculture more easily accepted by farmers on steep landscapes.

Key words: Morocco, Western Rif, Soils, Land uses, Carbon's stock of soil, Indicators, Final infiltration, Pounding rainfall, Macro-aggregate, Rainfall simulation.

1. Introduction

Au Maroc, l'érosion des sols entrave le développement d'une agriculture durable. Selon le plan national d'aménagement des bassins versants (MCEF, 1999) l'érosion touche une grande partie du territoire : sur une superficie totale des grands bassins proche de 20 millions d'ha, les surfaces à grand risque d'érosion représentent 75%. L'envasement annuel des barrages est estimé à 75 millions de m³. Les dégradations spécifiques en montagne Rifaine sont parmi les plus élevées du monde : elles dépasseraient 10 000 t/km²/an dans le bassin du Ouergha dans le Rif occidental. Potentiellement, le risque d'érosion dans le Rif est très élevé car les roches sont tendres (marnes, schistes, flychs, argilites), les pluies agressives et les pentes fortes (jusqu'à plus de 60%). En outre, depuis le début du 19 ième siècle et avec la colonisation espagnole qui a exploité abusivement les ressources ligneuses du Rif, le couvert forestier a été sévèrement dégradé. Sous la pression démographique, les paysages forestiers ont été surpâturés et transformés en une mosaïque de parcelles céréalières imbriquées dans un matorral dégradé. Les rôles environnementaux de la forêt ne sont plus assurés. Le stockage du carbone dans les sols est réduit de moitié et la stabilité structurale se dégrade entraînant des phénomènes de ruissellement et d'érosion souvent spectaculaires. L'eau des montagnes se charge de suspensions qui envasent rapidement les barrages.

Les relations entre les couvertures végétales, l'utilisation des terres et le comportement hydrologique des bassins versants ont été étudiées par plusieurs auteurs dans diverses situations. Un couvert végétal est d'autant plus efficace pour réduire l'érosion qu'il dissipe l'énergie des gouttes de pluie, qu'il recouvre une forte proportion du sol durant les périodes où les pluies sont les plus agressives, qu'il ralentit l'écoulement du ruissellement et maintient une bonne porosité à la surface du sol (Roose, 1980, 1994). Le surpâturage, par la réduction du couvert végétal et le tassement de la surface du sol, réduit l'infiltration de la pluie et augmente les risques de ruissellement et de ravinement. La mise en culture et le labour des terres réduit plus encore le couvert végétal pendant le début de la saison des pluies, modifie la structure, la perméabilité et la résistance des sols à l'érosivité des pluies. Si le labour améliore temporairement l'infiltration, il accélère la minéralisation des MOS et affaiblit la résistance des agrégats à l'énergie des pluies. La plantation d'arbres (reboisement ou agroforesterie), par le développement de la couverture du sol, le développement des racines et l'apport de litières, permet une restructuration du sol et par conséquent une amélioration de leurs propriétés hydriques (Masson, 1971; Tao, 1975; Hsia, 1983; Alvera et Del Barrio, 1991; Roose, 1994; Sabir et al., 1996 ; Morsli et al., 2004).

Plusieurs travaux ont été consacrés à la compréhension et la prévision des processus d'érosion hydrique dans les montagnes méditerranéennes (Heusch, 1970 ; Merzouk, 1985 ; Roose et al, 1993 ; Laouina, 1998 ; Al Karkouri et al., 2000 ; Moufaddal, 2002 ; Naimi et al., 2002). 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 (Renard et al., 1997). Plus d'une centaine de parcelles d'érosion (100 m²) ont été installées dans tout le pays pour couvrir la diversité des facteurs principaux de l'érosion en nappe. Cependant, 16 ans après, les résultats ne sont toujours pas disponibles. Le dispositif est trop 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 (Heusch, 1970 ; Arabi et Roose, 1989 ; Al Karkouri, 2000 ; Naimi, 2002). Plusieurs chercheurs ont essayé des modèles plus simples, basés sur la réalisation de systèmes d'information géographique (SIG) et l'évaluation d'indicateurs facilement mesurables, pour la qualification du comportement hydrologique et de l'érodibilité des sols (Sabir, Barthès, Roose, 2004). 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 susceptibilité à la battance et à l'érosion hydrique (Tysdall, Oades,

1982 ; Quirk, Murray, 1991 ; Le Bissonnais, 1996 ; Barthès et al., 1999 ; Al Karkouri et al., 2000). 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 (Barnett & Rogers, 1966 ; Sabir et al., 1994 ; Sabir, Barthès et Roose, 2004).

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 aussi à déterminer les effets de diverses utilisations des terres sur la capacité du sol à stocker du carbone et à infiltrer les eaux de pluies en fonction de leur état de surface et de leurs propriétés structurales.

2. Matériel et méthode

La zone d'étude est située entre Tétouan et Chaouen, dans le Rif occidental, région montagneuse située au Nord du Maroc. Le climat est méditerranéen subhumide (600 mm/an en saison froide). Des événements pluvieux rares peuvent atteindre 120 mm/24h. L'été est chaud et très sec, mais pas à l'abri d'orages localisés torrentiels. 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 : « Ferrich », sols peu évolués d'érosion, dominants, « Ahmer » sols rouges sablo-argileux à tendance fersialitique, « Toïresse » 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 (3 répétitions) sur chaque type de sols (5) et les principaux usages du sol (forêt de chêne liège, plantation de pins âgés de 40 ans, matorral pâturés, système agroforestier, céréale, cannabis) et des analyses de laboratoire des horizons 0-10 cm et 15-30 cm pour estimer les stocks de carbone.

Les caractéristiques du sol observées sont la densité apparente (d_a , g/cm³) mesurée avec un cylindre de 500 cm³, la résistance à la pénétration (PEN, kg/cm²) par un pénétromètre de poche, la résistance au cisaillement (SS, kg/cm²) 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 %, y compris les sables grossiers) a été déterminée par une méthode IRD (Barthès et al., 1999) similaire à celle de Kemper et Rosenau (1986). Les états de surface ont été caractérisés par la méthode des points quadrats : sur un m² : on observe tous les deux cm le long d'un décimètre le % des surfaces couvertes au ras du sol (CV % = adventices + litière + cailloux) et le % des surfaces ouvertes (SO% = agrégats + fissures + trous faune) ou fermées (SF% = pellicule, croûtes, zones tassées et cailloux inclus dans la masse du sol) (Roose, 1996).

Un simple irrigateur (Roose, 1996) a été utilisé pour mesurer, sur des placettes d'un m², la pluie d'imbibition (Pi en mm) et l'infiltration à l'équilibre appelée 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 de 6 m 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 x 166 cm (1m²) le plus régulièrement possible à la hauteur de 50 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).

3. Résultats

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

Les résultats de cette expérimentation sont présentés dans le tableau 1 et les figures 1 et 2. On constate d'une manière générale que le mode d'utilisation des terres a un effet net sur la teneur en matière organique (MO %) du sol. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sous les couverts forestiers (MO > 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 de résistance à la pénétration élevées (PEN= 2 kg/cm²) : 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 (Sabir et al., 1994). L'horizon labouré des terres cultivées est moins dense, mais se couvre rapidement de pellicules de battance, de croûtes d'érosion et de sédimentation : d'où des ruissellements plus élevés en fin de pluie. Etant moins cohérentes, les terres cultivées sont plus érodibles.

Ces modifications dans les états de surface au niveau du matorral et des terres de cultures ont provoqué un changement dans le comportement hydrologique 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 cultures (appauvries en matières organiques et instables en surface).

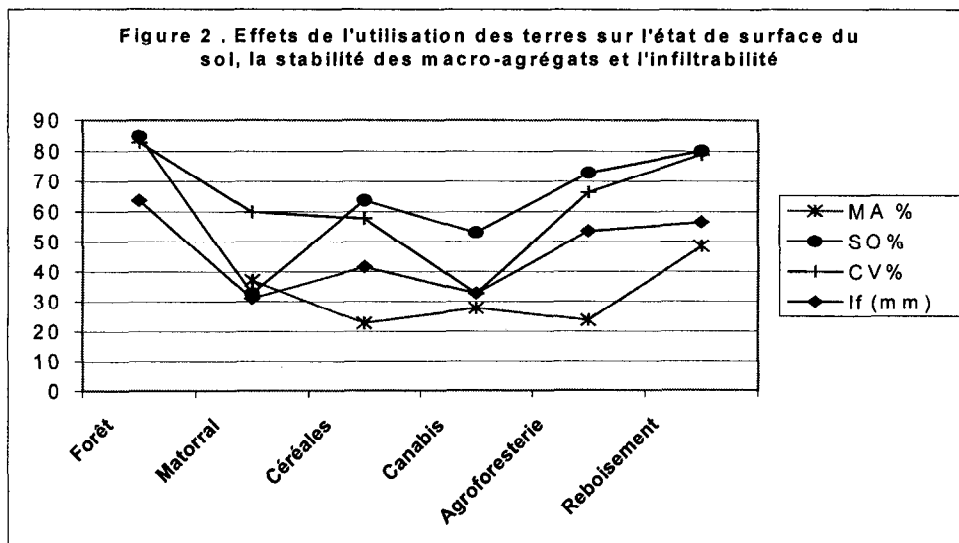
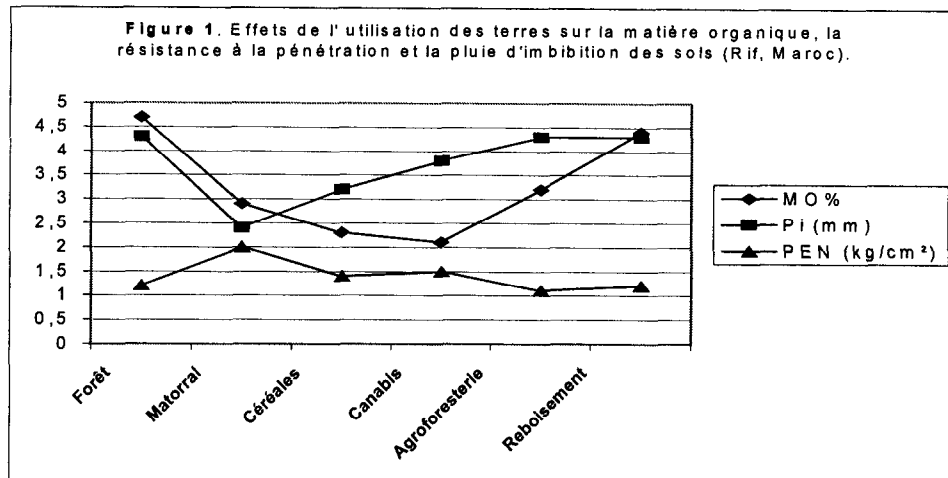
Ces résultats montrent aussi que les parcelles forestières ont une bonne couverture du sol, un taux de MO élevé, une bonne stabilité des agrégats et une capacité d'infiltration élevée. Sous culture, les labours successifs réduisent la teneur en matière organique des horizons superficiels des sols, leur 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 : ceci confirme les observations de Laouina et al. (2004).

Tableau 1. 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	Ifmm/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/cm^2) 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 signalent les différences significatives entre traitements ($p < 0.05$)



3.2. 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 d_a , 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 2). 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. Par contre nous n'avons pas trouvé de corrélations significatives entre le taux d'infiltration finale et la texture de surface (sable, argile, argile plus limon) (Mrabet et al., 2002), 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.

Tableau 2. Relations entre l'infiltration et les caractéristiques des horizons superficiels des quatre principaux sols.

Sol peu évolué d'érosion « Ferriche »	Sol peu évolué à tendance 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 caractère vertique « Toïresse »:	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	

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 (Le Bissonnais, 1996 ;Barthès et al., 1999 ;Mrabet et al ., 2002) ; 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 (Poesen, Ingelmo, 1992 ;Blavet et al., 2004).

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

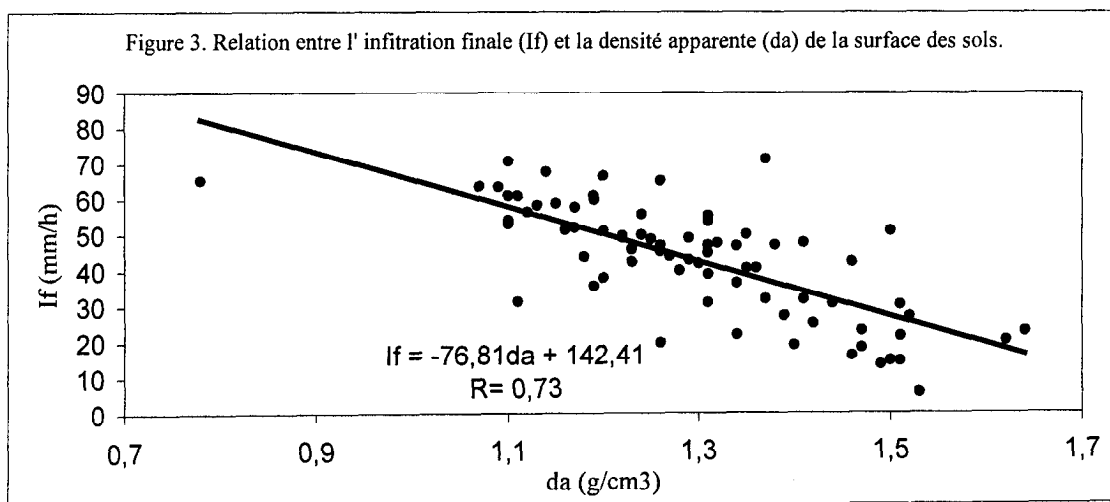
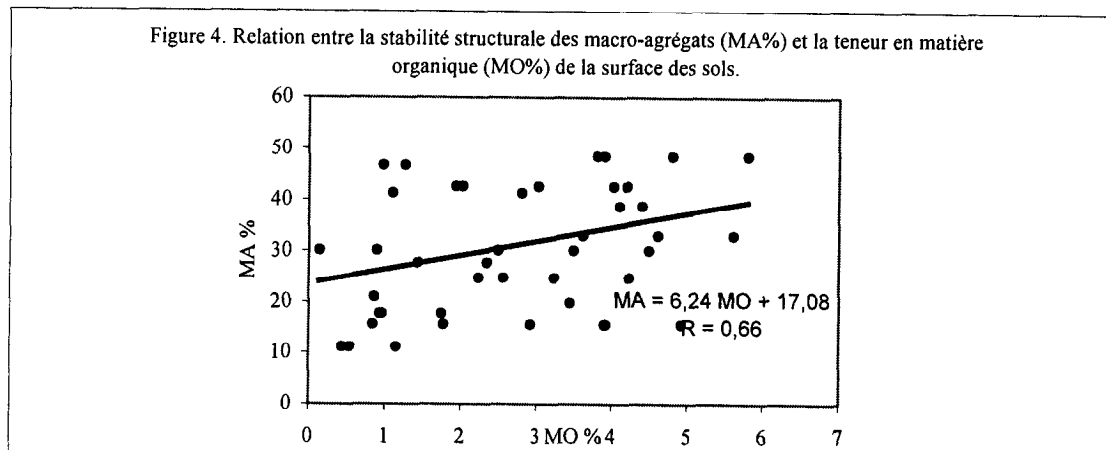


Figure 4. Relation entre la stabilité des macro-agrégats (MA%, y compris les sables grossiers) et la teneur en matières organiques (MO%) de la surface des sols (0-10 cm).



3.3. Influence de l'utilisation des terres sur le stock de carbone du sol.

En chaque point de simulation de pluies, on a prélevé après la pluie cinq cylindres de 500 cm³ sur 0 à 10 cm et trois cylindres sur 15 à 25 cm pour déterminer la densité apparente et le stock de carbone sur 30 cm. Au tableau 3 sont indiqués les stocks de carbone sur 30 cm (en t/ha) et l'écart type (s) en fonction de l'utilisation des terres (6) et du type de sol (5).

Tableau 3. Stocks de carbone sur 30 cm de profondeur(en t/ha) en fonction de cinq types de sols et de six modes d'utilisation des terres.

Utilisation	SPEE	s	SPEF	s	SPEV	s	SBV	s	SBF	s	MOY
Forêt	103.8	5.2	-	-	-	-	-	-	85.3	2.5	94.6±11
Matorral	90.0	25.0	58.5	43.7	-	-	87.0	27.3	39.6	26.0	69.4±36
Agroforêt	22.1	2.7	16.8	-	76.2	17.6	70.3	3.9	105.0	29.3	68.6±34
Céréale	29.4	4.6	45.8	21.9	88.9	19.2	65.8	19.6	44.7	35.5	52.8±30
Canabis	45.7	26.4	37.6	2.7	72.9	24.9	38.1	1.2	51.9	2.9	49.2±19
Pins, 40ans	-	-	76.7	4.1	-	-	-	-	98.19	24.5	87.5±20
Moyenne	58.7	36.3	51.5	28.9	79.9	19.5	65.3	23.3	68.4	35.0	63.7±31

Le stock de carbone du sol sur les 30 premiers cm, les plus riches et les plus variables, atteint 95 t/ha sous forêts de chêne liège, 70 sous matorrals et agroforêts (-26%) et 50 t/ha sous cultures de céréales ou de cannabis (-46%). Dans le cadre des tentatives de restauration des sols, l'association d'arbres fruitiers à la céréaliculture (agroforesterie) ramène le stock à 69 tC /ha et le reboisement en Pins (depuis 40 ans) de terres dégradées à 87.5 t/ha soit 93% du stock d'origine. La variabilité des valeurs de stock de carbone est grande (19 à 36). La variabilité en fonction des types de sols est encore plus impressionnante (2 à 36) : le coefficient de variation peut donc atteindre 50% en particulier dans les sols caillouteux. Il ne faut donc y voir que les tendances.

Les stocks de carbone du sol sont plus élevés sur les sols argileux que sur les sols sableux et caillouteux. Cependant le mode d'utilisation des terres permet de modifier sérieusement le stock de carbone quelque soit le sol.

4. 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 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 ont lieu au cours des gros orages d'intersaison (Laouina, 1998). 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 des animaux (pression de l'ordre de 3 kg/cm², autant que les pneus des tracteurs), donne beaucoup de ruissellement, mais peu de charge solide ;
- * les terres de cultures sont mal couvertes, rapidement appauvries en MO et deviennent instables, d'autant plus vite que les sols sont sableux : vu leur instabilité, elles se couvrent de croûtes diverses (Barthès et al., 1999 ; Mrabet « t al., 2002) 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 forêts : 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 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 (Poesen, Ingelmo, 1992 ; Blavet et al., 2004).

La forêt primitive de chêne liège peu dégradée stocke environ 100 t C/ha sur 30 cm . Le pâturage aboutit à une perte de 26% et la culture annuelle que ce soit de céréale ou de cannabis entraîne une perte de l'ordre de 50% (en quelques années), ce qui a des conséquences importantes sur l'encroûtement du sol, le ruissellement et l'érosion. Si la variabilité des stocks de carbone est grande d'un sol à l'autre c'est probablement dû à la présence d'un taux de cailloux très important qui réduit le volume de sol où le carbone peut s'accumuler et rend les mesures de densité apparente peu précises.

5. 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 jusqu'à l'observation d'un taux de ruissellement constant.

La comparaison entre différentes utilisations des terres montre que les terres forestières et agroforestières infiltrent mieux que le matorral pâturé (tassé entre les buissons) 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 suivie par leur mise en culture, entraîne une réduction importante du couvert végétal, de la matière organique, de la macro-agrégation 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 dont 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.

6. Bibliographie

- Al Karkouri J., Roose E., Laouina A. & Sabir M., 2000.** Etat de surface, infiltration et risque d'érosion dans la vallée de Beni Boufrah. *Bull Réseau Erosion* ; 20 : 342-356.
- Arabi M., Roose E., 1989.** Influence des systèmes de production et du sol sur l'érosion et le ruissellement en nappe en Algérie. *Bull. Réseau Erosion n°9* : 39-51.
- Barnett A.P. and Rogers, J.S., 1966.** Soil physical properties related to runoff and erosion from artificial rainfall. *Trans ASAE*, 9 : 123-128.
- Barthès, B., Albrecht A., Asseline J., Denoni G. and Roose E., 1999.** Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). *Comm. Soil Sci Plant Anal*; 30 (13 & 14) : 1928-1938.
- Blavet D. De Noni G., Roose E., Maillo L., Laurent JY., Asseline J., 2004.** Effet des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne en Ardèche (France). *Sécheresse*, 15, 1 : 111-120.
- Heusch B., 1970.** L'érosion du Pré-Rif. *Ann Rech Forestière au Maroc* ; tome 12 :9-176.
- Kemper W. D., Rosenau R. C., 1986.** *Aggregate stability and size distribution*. In : Klute (Ed.) *Methods of soil analysis, part 1*. Agronomy monograph n°9, A.S.A. Madison, 1986 : 425-442.
- Laouina A., 1998.** Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull Réseau Erosion*, 18 : 33-53.
- Le Bissonnais, Y., 1996.** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*; 47: 425-437.

- MCEF, 1999.** Plan d'aménagement des bassins versants du Maroc. Min Agri, Dept Forêts, Rabat, 225 p.
- Merzouk A., 1985.** *Erodibility of nine moroccan soils*. Thesis. Dept. Soil Sc. Univ. Minnesota; 185 p.
- Morsli B., Mazour M., Mededjel N., Hamoudi A., Roose E. 2004.** Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du NO de l'Algérie. *Sécheresse*, 15, 1 : 96-104.
- Moufaddal K., 2002.** Résultats des parcelles d'érosion dans le bassin versant de l'oued Nakhla, Maroc. *Bull Réseau Erosion*, 21 : 244-254.
- Mrabet R., Lahoul S., Le Bissonnais Y., Duval O. 2004.** Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influence des techniques culturales simplifiées. In « Land use, erosion & carbon sequestration. Abstracts » Intern. Colloquium Montpellier 23-28 /11/2002. IRD Montpellier , p.113 . *Bull. Réseau Erosion* 23.
- Naimi M., Tayaa M., Ouzizi S., Choukr-Llah R., Kerby M., 2002.** Ravinement dans le BV du Nakhla, Rif occidental, Maroc. *Bull Réseau Erosion*, 21 : 232-243.
- Poesen J, Ingelmo-Sanchez F., 1992.** Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment, cover and position. *Catena*, 19 :451-474.
- Quirk, J.P. & Murray, R.S., 1991.** Towards a model for soil structural behavior. *Australian Journal of Soil Research*; 29: 829-867.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K. and Yoder D.C., 1997.** *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. ; Agricultural handbook number 703, USDA, 125 p.
- Roose E. 1980.** Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétation naturelles ou cultivées. Thèse Doc. ès-Sciences, Univ Orléans, ORSTOM Paris, série Travaux et Documents 130, 569 p
- 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 de la production agricole par la GCES. *Cah ORSTOM Pédol* , 28, 2 : 289-308.
- Roose E., 1994.** Introduction à la GCES. *Bull.pédol FAO*, 70 : 420 p.
- Roose E., 1996.** Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bull Réseau Erosion*, 16: 87-97.
- Sabir M., Merzouk A., Berkat O.& Roose E., 1994.** Effets du pâturage sur l'état de surface, l'infiltrabilité et la détachabilité du sol dans un milieu pastoral aride (Aarid, Haute Moulouya, Maroc). XIII^{ème} Congrès International du Génie Rural, 2-6 février 1998, ANAFID, Rabat. *Bull Réseau Erosion*, 14 : 444-462.
- Sabir M., Barthès B., Roose E., 2004.** Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15, 1 : 105-110.
- Tisdall, J.M. and Oades J.M., 1982.** Organic matter and water stable aggregation in soils. *J Soil Science.*; 33: 141-163.