Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion par simulations de pluies sur les principaux sols du bassin versant du Rheraya (Haut-Atlas occidental, Maroc)

A. Cheggour, Vincent Simonneaux, Asma Samia, Yéni Yaro, S. Errouane, Mohamed Sabir, Eric Roose

▶ **To cite this version:**

A. Cheggour, Vincent Simonneaux, Asma Samia, Yéni Yaro, S. Errouane, et al.. Recherche d'indicateurs de ruissellement et d'érosion par simulations de pluies sur les principaux sols du bassin versant du Rheraya (Haut-Atlas occidental, Maroc). Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science, 2008, 21 (3), pp.311-322. ird-00385648

HAL Id: ird-00385648
https://ird.hal.science/ird-00385648

Submitted on 26 May 2009

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.

RSE

RECHERCHE D'INDICATEURS DE RUISSELLEMENT ET DES RISQUES D'ÉROSION AU MOYEN DE TESTS D'INFILTROMÉTRIE DANS LE BASSIN VERSANT DU RHÉRAYA (HAUT-ATLAS OCCIDENTAL, MAROC)

Assessing indicators of runoff and erosion risks by infiltrometer tests in the Rheraya catchment (High Western Atlas, Morocco)

ÉPREUVE

Aouatif Cheggour[1]*, Vincent Simonneaux[2], Samia Asma[1], Yéni Yaro[1], Errouane Sadik[1], Mohamed Sabir[3], Eric Roose[4]

[1] Centre Geber, Faculté des sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc
[2] IRD-CESBIO, 18 avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9, France
[3] École nationale forestière d'ingénieurs, Salé, Maroc
[4] IRD, Laboratoire Most, 34000 Montpellier Cedex 5, France

Reçu le 27 mars 2006, accepté le 19 avril 2007

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est d'étudier les risques de ruissellement et d'érosion dans le bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas du Maroc) au moyen d'un irrigateur manuel à rampe sur 1 m^2. Nous recherchons des indicateurs faciles à déterminer directement sur le terrain (états de surface du sol) ou à partir des tests en laboratoire (stabilité des agrégats, texture, matière organique), qui soient bien corrélés avec l'infiltrabilité et la turbidité issues des tests d'infiltrométrie. Pour les différents sols affleurant dans le bassin, les résultats ont mis en évidence une grande variabilité de l'infiltrabilité (de 1 à 70 $mm.h^{-1}$) et de turbidité des eaux de ruissellement (de 1,5 à 325 $g.L^{-1}$). La turbidité a pu être mesurée correctement grâce à la mise au point d'un nouveau dispositif de collecte des eaux de ruissellement de l'irrigateur. Bien que l'infiltrabilité et le ruissellement soient la résultante d'interactions entre toutes les caractéristiques physiques du sol, certaines apparaissent dominantes dans notre contexte. Nous montrons ainsi que l'infiltrabilité est déterminée principalement par la texture et l'ouverture de la surface du sol et que la turbidité est due

*Auteur pour correspondance :
Téléphone: *212-44-43-16-26*
Télécopie : *212-44-43-16-26*
Courriel : *a.cheggour@ucam.ac.ma*

essentiellement à la surface de sol nu exposée au ruissellement. Ces indicateurs cartographiables offrent la possibilité d'une spatialisation des risques d'érosion au niveau du bassin versant.

Mots clés : irrigateur manuel à rampe, indicateurs des risques d'érosion, infiltrabilité, turbidité, spatialisation, Atlas marocain.

SUMMARY

The objective of this study is to investigate the risks of runoff and erosion of soils in the Rheraya catchment (High Atlas, Morocco) using infiltrometer tests on 1 m2 plots. We are looking for indicators that are easily obtained directly from field observations (ground surface features) or by laboratory tests (aggregate stability, soil texture and organic matter), and are well correlated with infiltrability and turbidity measurements from the infiltrometer tests.

For the various soils present in the study area, the results show a large variability of infiltrability (from 1 to 70 mm.h-1) and turbidity (from 1.5 to 325 g.L-1). The turbidity was correctly measured thanks to the development of a new runoff collector which doesn't disturb the soil. Although runoff and erosion are the result of interactions between many parameters, some of these appear to be dominant in our case. The measurements show that the infiltrability is correlated mainly with texture and soil surface opening, while turbidity is related to the surface of bare soil that is exposed to runoff. These indicators may be used to determine the spatialization of potential erosion in the Rheraya catchment.

Key words: manual line irrigator, erosion indicators, infiltrability, turbidity, spatialization, Moroccan Atlas.

1. INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un problème environnemental largement répandu dans les zones méditerranéennes, du fait de l'agressivité des pluies (KOSMAS *et al.*, 1997), de la dégradation souvent très forte du milieu due notamment au surpâturage (BOARDMAN *et al.*, 2003; MORGAN *et al.*, 1997) et à la coupe de bois qui dénudent les sols. Ce phénomène contribue non seulement à la réduction de la productivité des sols mais aussi à la pollution des eaux de surface et à l'envasement prématuré des infrastructures hydrauliques. Au Maroc, ce phénomène est intense avec des dégradations spécifiques dépassant 2 000 $t.km^{-2}.an^{-1}$ (soit plus de 0,8 $mm.an^{-1}$ du sol érodé) dans les versants du Rif au Nord et entre 500 et 1 000 $t.km^{-2}.an^{-1}$ (entre 0,2 et 0,4 $mm.an^{-1}$ de sol érodé) dans les Moyen et Haut Atlas (GHANAM, 2003). L'identification des zones à risque et l'estimation quantitative des risques d'érosion est donc un enjeu important pour les gestionnaires des retenues et pour les aménageurs dans une perspective de conservation des sols.

Ce travail concerne le bassin versant montagneux du Rhéraya, situé dans le Haut-Atlas occidental du Maroc. Il vise à estimer le risque d'érosion hydrique dans le bassin versant, en recherchant des indicateurs faciles d'accès permettant de prévoir ce risque. Divers travaux ont déjà été consacrés à ce type d'approche empirique visant à relier le risque d'érosion à des indicateurs divers, soit à partir de simulations de pluie (MARSTON et DOLAN, 1999; MORGAN *et al.*, 1997), soit en reliant les risques d'érosion à des indicateurs accessibles sur des cartes préexistantes (géologie, pédologie) (VEIHE, 2002), soit par l'étude, à partir d'une base de données de mesures, des relations statistiques entre des combinaisons d'état de surface et érosion mesurée (LE BISSONNAIS, 2005). Notre objectif à terme est de proposer une méthode transposable à d'autres bassins arides et semi-arides. Pour réaliser cette cartographie des risques, nous nous basons ici sur des estimations ponctuelles de l'infiltrabilité et de la détachabilité du sol, effectuées sur des sites représentatifs du bassin. L'hypothèse physique sous-jacente à cette approche est que l'infiltrabilité d'un sol conditionne le risque d'érosion par ruissellement et que la détachabilité du sol indique sa fragilité intrinsèque face à l'énergie hydrique.

Les méthodes permettant d'étudier *in situ* le ruissellement et l'érosion sous pluies réelles (parcelles d'érosion) sont longues et coûteuses du fait de la rareté des évènements ruisselants constatée dans notre zone. Pour appréhender l'infiltrabilité et la détachabilité des sols, une alternative aux parcelles d'érosion est constituée par les simulations de pluis, nettement plus légères à mettre en œuvre sur le terrain (LÉONARD et ANDRIEUX, 1998; MARSTON et DOLAN, 1999; MORGAN *et al.* 1997). Toutefois, si ces simulations permettent de simuler de manière satisfaisante les pluies réelles en volume et en énergie cinétique, elles ne représentent pas correctement l'érosion du sol pour les échelles habituelles auxquelles celle-ci est généralement appréhendée, qui vont de la parcelle à la région. La nature multiéchelle des phénomènes d'érosion comprend des processus successifs de mobilisation et dépôt de sol, s'enchaînant sur des étendues nettement supérieures au mètre carré sur lesquelles les simulations sont réalisées. Deux échelles spatiales d'évaluation quantitative de l'érosion ont toutefois un intérêt pratique. Il s'agit d'une part de l'échelle parcellaire qui concerne l'agriculteur ou l'écologue soucieux de la préservation du sol en tant que support de la végétation, et d'autre part de l'échelle du bassin versant qui intéresse le gestionnaire en raison des conséquences de l'érosion sur l'envasement des retenues, phénomène extrêmement préoccupant au Maroc, où certaines retenues sont d'ores et déjà entièrement comblées (http://www.matee.gov.ma/onem/rapport_idd/environnement.pdf).

ÉPREUVE

Face à la difficulté logistique que représentent des mesures directes de l'érosion qui soient représentatives, la recherche d'indicateurs est une stratégie possible. Un indicateur est une variable simple à mesurer, informant sur l'état d'un système ou d'un phénomène complexe (OCDE, 1993). Nous proposons, ici, de rechercher des indicateurs du risque d'érosion au moyen de tests d'infiltrabilité et de détachabilité, réalisés au moyen d'un simple irrigateur à rampe appliqué sur une surface d'un mètre carré. Une première indication de la validité des tests réalisés a pu être obtenue grâce aux résultats de mesures d'érosion réalisées sur cinq parcelles pendant deux années. En outre, afin d'explorer les possibilités de spatialisation des risques d'érosion, nous recherchons des relations entre les résultats de ces tests et des caractéristiques facilement observables de la surface du sol comme les états de surface du sol ou des tests de laboratoire (*e.g.* : stabilité des agrégats, texture, matière organique). La mise en évidence de ces indicateurs, plus faciles à obtenir que les tests d'infiltrométrie, permettra d'améliorer la spatialisation des risques de pertes en sol au niveau du bassin versant du Rhéraya. Les indicateurs pertinents sont identifiés en étudiant les relations entre les résultats des tests d'irrigation et les caractéristiques du sol observées. L'étude de ces relations permet, en outre, d'avoir une idée des processus qui gouvernent l'érodabilité du sol dans le bassin versant.

2. ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant du Rhéraya, d'une superficie de 228 km², est localisé dans le Haut-Atlas occidental du Maroc, à une quarantaine de kilomètres au sud de Marrakech. Les altitudes varient de 925 m à 4 165 m (Jbel Toubkal, point culminant de l'Afrique du Nord). Du point de vue climatologique, ce bassin se caractérise par une très grande irrégularité des précipitations dans le temps et dans l'espace, qui varient en moyenne de 200 mm à 600 mm.an^{-1}, dont une partie sous forme de neige en altitude, avec une moyenne de 360 mm.an^{-1} à la station de Tahanaout. La grande variabilité temporelle est typique des régions arides, avec une forte proportion de pluies tombant sous forme d'évènements rares et violents. Des enregistrements d'intensité des précipitations ont été réalisés sur le bassin pendant une durée de trois ans grâce à deux pluviographes enregistreurs. Les dix évènements les plus importants pour une durée de 30 minutes ont donné des intensités comprises entre 12 et 48 mm.h^{-1} (moyenne 26 mm.h^{-1}). Pour une durée de cinq minutes, les dix évènements les plus intenses ont montré des intensités variant de 38 à 118 mm.h^{-1} (moyenne 65 mm.h^{-1}).

La pluie dominante est généralement de faible intensité et ne provoque pas de ruissellement de surface. Dans ce bassin affleurent des *substrata* très différents. La zone aval du bassin est constituée, notamment, par des formations rouges permotriasiques de texture dominante limono-argileuse, extrêmement érodibles lorsqu'elles sont nues, alors qu'environ les deux tiers supérieurs sont constitués par des formations volcaniques nettement plus stables, associées essentiellement à des lithosols et sols squelettiques de texture généralement sableuse, et des accumulations colluviales sur les bas de versants. La végétation naturelle, constituée essentiellement de boisements de thuya en basse altitude et de chaméphytes en haute altitude, est très dégradée suite à la déforestation et au surpâturage intense. Le taux de recouvrement de la végétation sur la zone est compris entre 1 et 40 %, pour une moyenne de 15 %.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 Choix et description des sites de tests d'infiltrométrie

Les sites choisis pour effectuer les tests d'infiltrométrie représentent les principaux types de sol affleurant dans le bassin versant du Rhéraya du point de vue des surfaces occupées ou du point de vue de la contribution à l'érosion. Nous avons effectué 22 tests répartis sur sept sites différents (Tableau 1). La surface de 1 m^2 des placettes est très faible par rapport à la forte variabilité naturelle des unités de paysage étudiées. Nous nous sommes efforcés de choisir, pour chaque site, entre deux et quatre placettes comportant des états de surface jugés représentatifs des variations observées. Ce choix a été réalisé empiriquement sans quantification précise de la surface représentative de chaque placette. Les mesures de laboratoire (granulométrie, matière organique, macroagrégats) ont été réalisées globalement pour chacun des sept sites. À chacune de ces valeurs moyennes correspondent entre deux et quatre tests d'irrigation, mais afin de ne pas surestimer la représentativité du test de Fisher, nous avons considéré seulement sept échantillons.

3.2 Tests d'infiltrométrie

L'outil choisi pour ce travail est un irrigateur manuel à rampe (ROOSE et SMOLIKOWSKI, 1997), version très simplifiée du minisimulateur de pluie fonctionnant sur 1 m^2 mis au point par ASSELINE et VALENTIN (1978). Le principal avantage de cet irrigateur est qu'il est plus portable, car il ne nécessite, pour fonctionner, qu'environ 60 litres d'eau par test, contrairement aux 400 litres de la version initiale. En contrepartie, l'énergie cinétique de l'arrosage effectué se différencie nettement d'une pluie réelle du fait d'une hauteur de chute d'environ 50 cm. Sa bonne portabilité le rend ainsi utilisable en terrain montagneux (pente forte, manque d'eau, accès difficile aux sites), là où il est difficile d'utiliser les simulateurs de pluie traditionnels. Il est constitué d'une rampe

ÉPREUVE

Tableau 1: Description des sites étudiés.
Table 1: Description of the studied sites.

Code du site	Substrat	% de surface du bassin	Sol	Occupation du sol	% de pente	Nombre de répétitions des tests	% Argile	% Limon	% Sable	% MO	MA stables
Argi_pin	argiles rouges	1	Colluvions argilo calcaires	Plantation de pin	44	3	7,5	56	36,5	10,3	45,3
Argi_parc	argiles rouges	12	Colluvions argilo calcaires	Parcours steppique	46	3	10	58	32	1,95	47,6
Argi_ravi	argiles rouges	1	Badlands	Sol nu	47	2	15,5	77,3	7,2	0,49	55,5
Volc_pin	volcano-sédimentaire	5	Lithosol colluvial	Pin	41	4	2,5	16,5	81	3,5	65
Volc_parc	volcano-sédimentaire	10	Lithosol colluvial	Parcours steppique	42	4	2,5	23.5	74	3,5	70
Gran_parc	granite altéré	36	Lithosol squelettique	Parcours steppique	50	3	2,5	21	76,5	3,08	64
Calc_parc	marno-calcaire	12	Colluvions calcaires	Parcours sur matorral arboré	41	3	2,5	41	56,5	10,8	48

MO : Matière organique - MA : Macroagrégats

d'arrosage de 50 cm de large, comportant une ligne de trous de 0,5 mm de diamètre distants de l cm, reliée par un tuyau souple d'environ cinq mètres de long à un bidon de 60 litres situé au dessus de la placette. L'intensité de l'eau est réglée par une vanne à la sortie du bidon (Figure 1).

Figure1: Dispositif du test d'infiltrométrie. On distingue en haut de la placette le bidon d'eau, au dessus de la placette la rampe d'arrosage, et en bas le collecteur de ruissellement.
System of the infiltrometer tests. The water tank can be seen above the top the plot, the irrigation ramp is above the plot, and the runoff collector at the bottom.

La placette allongée de 1 m² (60 cm x 163 cm) est délimitée latéralement par deux barres de fer cornières de 163 cm de long, simplement posées sur le sol de façon à matérialiser les cotés de la placette sans briser l'état de surface du sol. Des bourrelets de terre humide sont disposés sur l'extérieur des barres pour les stabiliser et assurer, le cas échéant, l'étanchéité de la bordure. Les portions des bourrelets qui peuvent affleurer localement le long des barres à l'intérieur de la placette, du fait d'une légère concavité du sol, sont recouvertes de petites pierres plates pour éviter une turbidité parasite. Toutefois, nous choisissons en général des sites ayant une très légère concavité pour éviter au maximum les circulations vers les bords. Dans le dispositif habituel de cet irrigateur manuel, le collecteur des eaux de ruissellement était constitué par une tôle fixée au sol dans sa partie amont par une cornière métallique enfoncée dans le sol barrant le bas de la placette, ce qui provoquait parfois une turbidité parasite. Nous avons mis au point un nouveau dispositif de collecte constitué d'un film plastique souple collé au sol. Le sol est préalablement nettoyé des particules et éléments non fixés, puis une couche de peinture cellulosique est répandue sur environ 4 cm de large. Cette peinture pénètre dans le sol et les fissures et permet d'obtenir une étanchéité et une bonne adhérence à la surface du sol. Après cinq minutes de séchage, la peinture est recouverte par une couche de joint silicone, sur laquelle le film plastique est collé en épousant la surface du sol. Ce film plastique est alors roulé pour diriger l'eau de ruissellement vers un bocal de collecte. On obtient ainsi une interception sans fuite du ruissellement et également

EPREUVE

sans infiltration parasite due à la fissuration de l'horizon de surface consécutive à l'enfoncement de la cornière dans la configuration initiale du simulateur. De plus, ce type de joint ne produit pas de sédiments parasites et permet d'obtenir des charges en sédiments représentatives du mètre carré étudié.

Le test consiste à arroser le plus régulièrement possible une placette de 1 m² par des mouvements de va-et-vient de la rampe d'arrosage dans le sens de la placette, avec des pluies d'environ 80 mm.h^{-1} d'intensité durant 30 minutes. Les eaux de ruissellement, mesurées toutes les deux minutes en bas de la placette, permettent de tracer une courbe de ruissellement en fonction du temps. L'analyse des eaux de ruissellement permet de calculer la charge solide globale pour les 30 minutes de l'expérience.

Avant chaque irrigation, les états de surface de la placette sont caractérisés par la méthode des points quadrats. On observe tous les deux centimètres le long des deux diagonales de la placette, le type de surface rencontré et le caractère ouvert ou fermé de la surface du point de vue de l'infiltration de l'eau. Les différentes surfaces distinguées sont : sol nu et surface couverte (cailloux, litière, végétation). Les surfaces ouvertes, favorisant l'infiltration des eaux de pluie, sont constituées par les fissures profondes, les sols nus meubles, les zones motteuses très perméables et les galeries de termites. Les surfaces fermées sont constituées par les cailloux inclus dans le sol, les sols nus tassés, les pellicules et les croûtes de battance dont l'influence sur le ruissellement et donc l'érosion est notoire (CASENAVE et VALENTIN, 1992). Nous avons choisi, en général pour chaque site, des placettes comportant des états de surface représentatifs de la moyenne des unités de paysage observées. Pour certains sites (Armed), la forte variabilité des états de surface nous a amené à choisir des placettes avec des états de surface contrastés afin de bien saisir la variabilité naturelle.

3.3 Analyses au laboratoire

Sur chaque site des échantillons de sols sont prélevés dans les cinq premiers centimètres pour analyses et tests physiques. La stabilité structurale du sol est évaluée en utilisant le test proposé par KEMPER et ROSENEAU (1986). Ces mesures de laboratoire ont été réalisées globalement pour chacun des sept sites, auxquels correspondent entre deux et quatre tests d'irrigation. Afin de ne pas surestimer la représentativité du test de Fisher, nous avons considéré seulement sept échantillons pour ces variables de laboratoire, ce qui sous-estime la signification réelle des tests. La granulométrie des sols pour chaque site est déterminée par la méthode internationale de sédimentation (Méthode de Robinson) sur sol séché à l'air, puis tamisé à 2 mm. Le taux de matière organique a été obtenu en multipliant par 1,72 le taux de carbone, déterminé par oxydation au dichromate de potassium par la méthode de WALKLEY et BLACK (1934).

4. RÉSULTATS DES TESTS D'INFILTROMÉTRIE

4.1 Tests d'infiltrométrie

Avant l'irrigation, les états de surface ont été caractérisés pour toutes les placettes (tableau 2). La quantité d'eau infiltrée est calculée toutes les deux minutes par soustraction du ruissellement de l'eau apportée. On observe en général en fin d'expérience une stabilisation de cette valeur que l'on nomme infiltrabilité finale (figure 2) et dont les valeurs observées sont très variables selon les sols (tableau 3). Les sols les plus infiltrants sont les sols volcaniques (de 30 à

ÉPREUVE

Tableau 2 : Caractéristiques des états de surface des différents sites (valeurs moyennes).
Table 2: Characteristics of the surface features of the different sites (average values).

Code	Nombre de répétitions	Cailloux (%)	Litière (%)	Adventices (%)	Surface couverte (%)	Sol nu (%)	Surface ouverte (%)
Argi_pin	3	10	77	4	91	9	13
Argi_parc	3	53	19	16	88	12	2
Argi_ravi	2	2	0	0	2	99	3
Gran_parc	3	64	3	16	82	19	19
Volc_pin	4	59	18	16	93	7	26
Volc_parc	4	57	9	18	84	16	54
Calc_parc	3	38	17	16	71	29	11

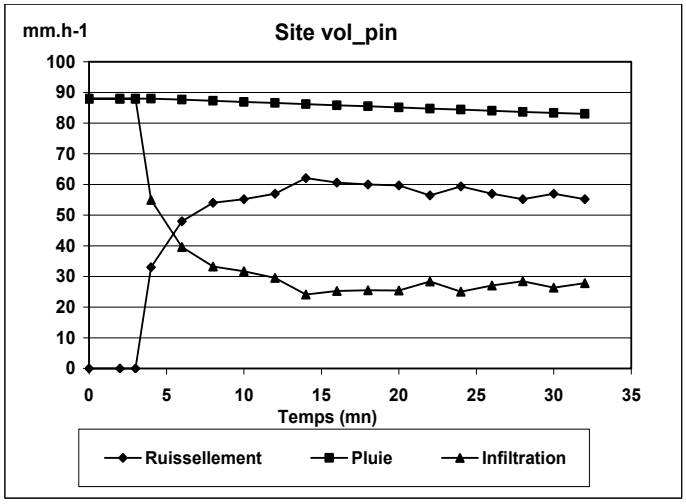


Figure 2 : Evolution du ruissellement et de l'infiltrabilité durant un test d'infiltrométrie.
Evolution of runoff and infiltrability during an infiltrometer test.

70 mm.h^{-1}) et les moins infiltrants sont les ravines sur argiles rouges (3 et 5 mm.h^{-1}). Pour les autres sols, l'infiltrabilité varie de 20 à 40 mm.h^{-1}. Globalement, ces valeurs sont très faibles à moyennes, mais sont en accord avec les mesures effectuées par AL KARKOURI *et al.* (2000) dans la vallée des Béni Boufrah dans le Rif central, au moyen du même type d'irrigateur. Des maximums atteignant 99 mm.h^{-1} sur terrain à couvert végétal continu ont été obtenus dans leur étude.

Tableau 3: Variation de l'infiltrabilité et de la turbidité en fonction des types de sol.
Table 3: ***Variation of infiltrability and turbidity according to soil types.***

Site	Répétition	Infiltrabilité (mm.h^{-1})	Turbidité (g.L^{-1})
Argi_ravi	1	3	255
	2	5	400
Argi_pin	1	26	0,4
	2	35	1,4
	3	21	6,1
Argi_parc	1	18	4,6
	2	21	3,5
	3	22	3,5
Gran_parc	1	40	1,3
	2	33	2,2
	3	32	70
Volc_pins	1	61	0,4
	2	28	6,6
	3	41	0,2
	4	26	3,4
Volc_parc	1	65	1,4
	2	70	3
	3	50	1,3
	4	60	0,5
Calc_parc	1	18	5
	2	40	0,9
	3	30	3,3

Les turbidités moyennes pour chaque type de sol, obtenues sur les 30 minutes du test d'infiltrométrie, varient de 1,5 g.L^{-1} au niveau des sols volcaniques sur parcours, à 325 g.L^{-1} sur les ravines des argiles rouges, avec une moyenne de 35 g.L^{-1} (tableau 3).

La forte hétérogénéité constatée pour certains types de sol provient de la variabilité naturelle des sols et également du fait que nous avons volontairement choisi pour chaque site des placettes sur des états de surface contrastés. Pour le site gran-parc particulièrement, une des placettes a été choisie sur un sol extrêmement dégradé (40 % de sol nu), mais qui ne représente que très peu de la surface totale de cette unité de paysage (borne supérieure estimée : 10 %). Cette parcelle fournit une turbidité très nettement supérieure aux deux autres placettes (70 g.L-1).

4.2 Relations entre infiltrabilité et caractéristiques du sol

Les relations observées entre les infiltrabilités mesurées et les caractéristiques du sol sont présentées au tableau 4 par les coefficients de détermination et leur probabilité associée. La figure 3 nous montre que les infiltrabilités observées sont bien corrélées avec l'ouverture du sol (R^2 = 0,77) et de manière significative (probabilité du test de Fisher < 0,01 %). Les valeurs les plus élevées d'infiltrabilité (maximum de 70 mm. h^{-1}) sont enregistrées au niveau des sols volcaniques présentant les plus fortes proportions de surfaces ouvertes (jusqu'à 70 %), tandis que les plus faibles infiltrabilités (3 et 5 mm. h^{-1}) caractérisent les sols des ravines sur argiles rouges avec des faibles proportions de surfaces ouvertes (0 à 5 %). Cette relation montre que l'ouverture telle que nous l'avons estimée visuellement est un paramètre hydrodynamique pertinent. La texture montre également des corrélations significatives avec l'infiltrabilité, par des relations exponentielles (figure 4). On observe, dans le tableau 4, une corrélation positive avec la proportion de sable (R^2 = 0,76; p < 0,01 %) et négative avec celle d'argile (R^2 = 0,84; p < 0,01 %) et de limon (R^2 = 0,73; p < 0,01 %). Ces relations significatives sont dues en partie au fait que les sols observés ont des textures très contrastées et que la corrélation n'est pas masquée par d'autres facteurs tels que la structuration, faible ici pour tous les sols. Le pourcentage de sol nu fournit également un coefficient de détermination correct pour une régression exponentielle (R^2 = 0,57), mais cette relation est totalement contrôlée par le site argile, sans lequel le coefficient de détermination deviendrait nul. Cette relation est donc considérée comme non fiable. Pour la matière organique et les macroagrégats, aucune corrélation nette avec l'infiltrabilité n'est observée (tableau 4).

Afin de tenir compte des interactions possibles entre les caractéristiques des sols, des régressions linéaires multiples ont été testées pour estimer l'infiltrabilité (MARSTON et DOLAN, 1999). La combinaison d'indicateurs la plus efficace est celle

ÉPREUVE

Tableau 4 : Signification des relations entre l'infiltrabilité et les caractéristiques des sols.
Table 4: Signification of the relations between infiltrability and soils' characteristics.

Infiltrabilité mm.h^{-1}	R^2	Coefficient de corrélation	Nombre d'observations	Probabilité du test de Fisher
% Ouverture du sol	0,77	+ 0,88	22	0
% Sable	0,76	+ 0,87	7	0,010
% Matière organique	0,28	+ 0,53	7	0,223
% Cailloux	0,31	+ 0,56	22	0,007
% Magroagrégats stables	0,29	+ 0,54	20	0,014
% Sol Nu	0,57	- 0,75	22	0
% Limon	0,73	- 0,85	7	0,014
% Argile	0,84	- 0,92	7	0,004

qui ne prend en compte que l'ouverture et la texture du sol représentée par le taux d'argile, c'est-à-dire les deux indicateurs les mieux corrélés indépendamment. Le coefficient R^2 ajusté est de 0,83 pour cette combinaison au lieu de 0,77 pour la variable ouverture seule et n'augmente plus ensuite avec l'ajout d'autres variables. La synergie des variables n'apporte donc pas beaucoup d'information supplémentaire pour la détermination de l'infiltrabilité. L'équation trouvée est :

Infiltrabilité (mm.h^{-1}) = 28,257 + 0,62 * (% surfaces ouvertes) - 1,323 * (% Argile)

La relation est bien significative (P << 1 %).

4.3 Relations entre turbidité et caractéristiques du sol

Les relations observées entre les turbidités mesurées et les caractéristiques du sol sont présentées au tableau 5 avec leurs coefficients de détermination et probabilités associées. Nous observons une corrélation positive significative entre la turbidité et le ruissellement (R^2 = 0,43, p = 0,1 %), mais la faiblesse de la relation indique l'influence des états de surface. Concernant les caractéristiques du sol, la meilleure relation est observée avec le pourcentage de sols nus (R^2 = 0,68, p < 0,01%) pour une relation de type exponentiel (figure 5). On remarque toutefois une distribution relativement déséquilibrée des points, les deux tests du site argile se détachant nettement. Malgré cela,

ÉPREUVE

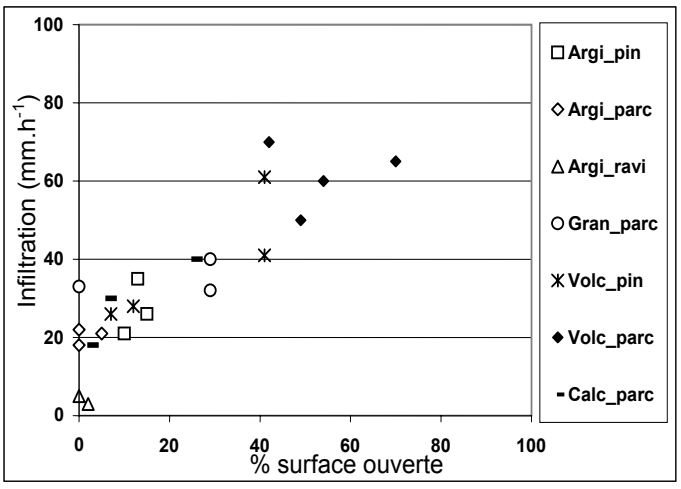


Figure 3: Relation entre l'infiltrabilité et la surface ouverte du sol.
Relation between the infiltrability and the soil surface opening.

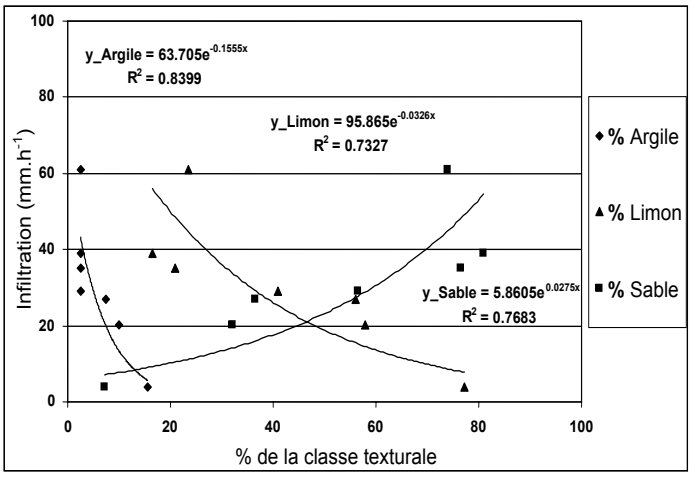


Figure 4: Relation entre l'infiltrabilité et la texture du sol.
Relation between the infiltrability and the texture.

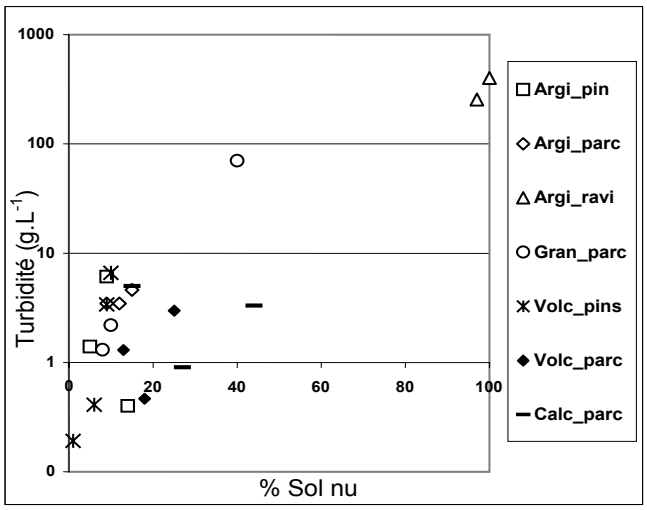


Figure 5 : Relation entre la turbidité et le taux de sol nu.
Relation between the turbidity and the bare soil rate.

la régression obtenue en supprimant ces deux points montre une équation quasi identique, avec seulement une chute du coefficient de détermination (R^2 = 0,22). La matière organique fournit également un bon coefficient de détermination pour une régression exponentielle (R^2 = 0,70), mais la relation est totalement contrôlée par le site argile, sans lequel elle devient nulle. La situation est semblable pour la texture, des coefficients de détermination corrects apparaissent ($0,57 < R^2 < 0,73$) mais ceux-ci sont entièrement dépendants du site argile, ce qui rend ces relations non fiables. Pour les facteurs restant (fermeture, macroagrégats) aucune relation intéressante n'est observée (tableau 5).

Des régressions linéaires multiples ont également été testées, elles montrent que la combinaison la plus efficace est celle qui estime le logarithme de la turbidité à partir du pourcentage de sol nu et du ruissellement, avec un R^2 ajusté de 0,76, bien significatif ($P << 1$ %). On note cependant, comme pour l'infiltrabilité, que l'amélioration de la détermination est assez limitée par rapport à la variable sol nu seule. L'équation pour l'ensemble des sites est :

$$\log10 (\text{turbidité g.L}^{-1}) = - 0,843 + 0,02 * (\% \text{ sol nu}) + 0,022 * (\text{Ruissellement mm.h}^{-1})$$

Nous avons également comparé la quantité totale de sédiments exportés pour chaque test avec les caractéristiques du sol. Comme pour la turbidité, la seule liaison intéressante concerne la surface de sol nu (R^2 = 0,64; $p < 0,01$ %), avec une relation exponentielle. Ce résultat s'explique par le fait que l'exportation totale est très liée à la turbidité (R^2 = 0,95; $p < 0,01$ %), d'une part car les variations des volumes de ruissellement sont faibles en regard des variations de turbidité, et d'autre part car il existe une corrélation positive entre ruissellement et turbidité, même si elle n'est pas très forte (R^2 = 0,43; p = 0,1 %).

4.4 Discussion sur les relations entre les résultats des tests d'infiltrométrie et les caractéristiques du sol

Nos résultats montrent que l'infiltrabilité est déterminée principalement par l'ouverture de la surface du sol et la texture. L'influence de l'ouverture concorde bien avec les résultats de plusieurs auteurs obtenus à partir du même test (AL KARKOURI *et al.*, 2000) ou des simulations de pluie (CASENAVE et VALENTIN, 1992). L'infiltrabilité mesurée est également liée à la texture du sol, qui détermine correctement la perméabilité du profil en l'absence d'intervention déterminante de la structure du sol, ce qui concorde avec les résultats de MARSTON et DOLAN (1999) obtenus à partir de simulations

ÉPREUVE

Tableau 5 : Signification des relations entre la turbidité et les caractéristiques des sols.
Table 5: Signification of the relations between turbidity and soils' characteristics.

Turbidité g.L^{-1}	R^2	Coefficient de corrélation	Nombre d'observations	Probabilité du test de Fisher
Ruissellement mm.h^{-1}	0,43	+ 0,66	22	0,001
% Matière organique	0,70	- 0,84	7	0,019
% Végétation	0,24	- 0,49	22	0
% Sable	0,51	- 0,71	7	0,070
% Cailloux	0,27	- 0,52	22	0,012
% Sol Nu	0,68	+ 0,82	22	0
% Limon	0,47	+ 0,69	7	0,089
% Argile	0,65	+ 0,81	7	0,028

de pluie. En revanche, aucune relation significative n'a été observée par SABIR *et al.* (2004) qui ont réalisé les mêmes tests d'infiltrabilité sur des sols peu évolués du Rif central au Maroc. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les textures y étaient peu variables et leur effet potentiellement masqué par d'autres facteurs.

Inversement, nos résultats ne mettent pas en évidence de relation nette avec la couverture du sol, contrairement à ce qui est signalé par plusieurs auteurs (AL KARKOURI *et al.*, 2000; SABIR *et al.*, 2004). La plupart de nos sites ont des taux de couverture situés au dessus de 70 %, les variations ne sont plus suffisantes pour être déterminantes par rapport aux autres facteurs qui gouvernent l'infiltrabilité.

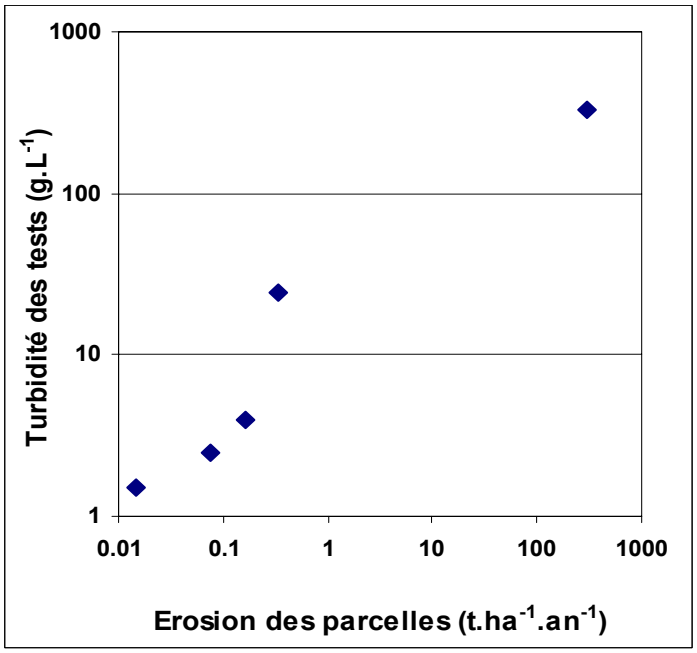
Nous remarquons, tout d'abord, que la turbidité et l'exportation totales sont peu liées à l'intensité du ruissellement, ce qui concorde avec les résultats de BOARDMAN *et al.* (2003) obtenus par des simulations de pluie sur des parcours en zone semi-aride. Malgré la différence sensible de méthodologie, cette concordance s'explique assez facilement par l'influence importante des états de surface du terrain. Nous observons ainsi une bonne relation entre la turbidité et l'exponentielle du pourcentage de sol nu, comme l'ont montré d'autres auteurs (MORGAN *et al.,* 1997) à partir des simulations de pluie. Ainsi, bien que les sols étudiés soient très différents et aient donc a priori des détachabilités très différentes, celles-ci semblent peu déterminantes en regard de la surface de sol nu exposée au ruissellement, qui entraîne avec lui les particules indifféremment du type de sol. Une explication possible est liée au fait que les sols étudiés sont des assemblages peu cohérents et peu agrégés de particules; la détachabilité est relativement uniforme quelle que soit leur texture. Dans un autre contexte, MORGAN *et al.* (1997) ont, au contraire, noté l'importance des variations de l'état de surface des zones de sol nu sur l'érosion, ce qui ne semble pas être le cas ici. Une autre explication possible est que les tests d'infiltrométrie ayant été réalisés en saison sèche, la surface des sols était couverte d'une pellicule de sol à l'état de « poussière » plus ou moins homogène quel que soit le sol, et que la turbidité observée correspond au lavage de cette pellicule. Des mesures réalisées en fonction du temps auraient donc peut-être fait apparaître une baisse sensible de la turbidité après une phase de « rinçage » de la surface, phénomène ayant déjà été mis en évidence par d'autres auteurs (LÉONARD et ANDRIEUX, 1998; MARSTON et DOLAN, 1999).

Sur l'ensemble des auteurs ayant étudié l'infiltrabilité et la turbidité en relation avec les caractéristiques du sol, on note que les relations prépondérantes ne sont pas toujours les mêmes. Ces différences peuvent s'expliquer en partie par le fait que ces expériences n'ont pas toujours été faites avec les mêmes dispositifs, et donc avec un possible effet de mode opératoire. Toutefois, ces variations dans les relations observées sont aussi dues aux différences entre les milieux étudiés; chaque contexte étant l'objet de processus dont l'importance relative varie, les processus dominants masquant les autres dans leur relation aux indicateurs mesurés.

5. COMPARAISON DES TESTS D'INFILTROMÉTRIE AVEC L'ÉROSION MESURÉE SUR PARCELLES D'ÉROSION

Une validation préliminaire des tests d'infiltrométrie comme indicateurs du risque réel d'érosion a pu être réalisée grâce à des mesures d'érosion réalisées sur cinq parcelles d'érosion de 120 m² sous pluies naturelles. Ces parcelles ont été mises en place et observées pendant deux années sur les principaux sols du bassin versant de Rhéraya (SIMONNEAUX *et al.*, 2006), sur cinq des sites d'infiltrométrie (argi_parc, argi_ravi, argi_pin, gran_parc, volc_parc), afin de permettre la comparaison des deux types de mesure. La figure 6 montre la relation entre la turbidité issue des tests d'infiltrométrie et l'érosion mesurée sur les parcelles. Les deux séries de valeurs sont transformées en logarithme pour tenir compte de leur forte variabilité. Malgré le faible nombre de points (cinq sites), on observe une relation significative entre les mesures comparées (R2 = 0,93; p = 0,8 %). Le point du site gran_parc est le plus écarté de la tendance générale, avec une turbidité

Figure 6: Relation entre turbidité des tests d'infiltrométrie et érosion mesurée sur parcelles d'érosion (2 années).
Relation between turbidity of the infiltrometer tests and erosion measured on erosion plots (2 years).



ÉPREUVE

observée supérieure à la tendance. Or, nous savons que cette valeur est très certainement surestimée du fait de la présence déjà évoquée d'une placette sur sol très dégradé parmi les trois réalisées. Nous n'avons toutefois pas appliqué de pondération pour minorer l'importance de cette placette, faute de valeur précise disponible, mais elle permettrait d'améliorer encore la qualité de la relation.

Ainsi, malgré les grandes différences de protocole de mesure, au niveau de l'échelle spatiale et des processus physiques mis en jeu, les tests d'infiltrométrie montrent des résultats proportionnels à l'érosion en condition naturelle à l'échelle parcellaire. Tout se passe comme si deux années de mesure suffisaient pour intégrer la grande variabilité des évènements érosifs constatés entre les parcelles, qui n'ont en général pas eu lieu simultanément. Ainsi, avec toutes les réserves qu'impose le fait de ne disposer de mesures d'érosion que sur deux années, ces résultats sont encourageants quant à la possibilité d'utiliser le test d'irrigation proposé comme indicateur du risque d'érosion.

6. PERSPECTIVES DE SPATIALISATION

Les indicateurs issus de l'usage de l'irrigateur manuel sont potentiellement utiles, soit en tant qu'indicateurs du risque d'érosion comme cela apparaît ici pour la turbidité, soit pour la caractérisation du comportement hydrodynamique des sols à partir de l'infiltrabilité mesurée. Un indicateur d'infiltrabilité classique, le test de Beerkan (BRAUD *et al.*, 2003), est basé sur ce principe puisqu'il met en relation des mesures réalisées *via* un dispositif artificiel – un anneau enfoncé dans le sol et rempli d'eau – avec les caractéristiques hydrodynamiques du sol. Toutefois, nous n'avons pas été, ici, jusqu'à l'établissement de relations entre l'infiltrabilité estimée par notre test et les propriétés hydrodynamiques du sol.

En règle générale, les indicateurs obtenus issus de tests seront d'autant plus intéressants que les tests sont faciles à mettre en œuvre, mais également dans la mesure où ces indicateurs sont aisément spatialisables. La recherche de relations entre les résultats des tests et les variables facilement observables des sols – et cartographiables – répond à cet objectif de spatialisation.
Différents modèles d'estimation du risque d'érosion s'appuient sur une estimation préalable des ruissellements, identifiés comme un des déterminants majeurs de l'érosion (BLANCHARD *et al.*, 1999). Au ruissellement peut s'ajouter une composante d'érodibilité (DE JONG *et al.*, 1999) ou une composante topographie pour prendre en compte les risques de concentration de ruissellement (OUATTARA *et al.*, 2003). Le découplage de l'évaluation du ruissellement et de la turbidité est donc intéressant dans une optique de modélisation. Les indicateurs, issus de l'usage de l'irrigateur manuel à rampe, permettent ainsi d'envisager leur utilisation dans la cartographie du risque d'érosion. L'infiltrabilité estimée fournit un indicateur potentiel de ruissellement basé sur la texture ou sur le taux d'ouverture des surfaces. La texture est une variable assez facile à estimer qualitativement lors de visites de terrain mais qui nécessite des analyses plus contraignantes pour être déterminée précisément. Toutefois, elle possède l'avantage d'être relativement facile à spatialiser en se basant sur la connaissance de la pédologie ou de la géologie. Inversement, l'ouverture nécessite pour être estimée des observations de terrain relativement simples (transect), mais a l'inconvénient d'être plus difficile à spatialiser, sa relation avec les autres facteurs du milieu étant a priori assez indirecte.

La turbidité du ruissellement peut être estimée à partir des surfaces en sol nu. De plus, nous avons montré que, dans notre contexte, cette turbidité est un indicateur possible du risque d'érosion. Le pourcentage de sol nu est relativement facile à estimer sur le terrain, au moyen de transects si l'on souhaite être précis, mais là encore sa spatialisation est délicate car ce facteur est lié de manière indirecte à la pédologie et à la géologie où à l'occupation du sol. On a vu, en effet, que les recouvrements globaux des sols sont assez forts, même dans le cas ou la végétation est rare, car les cailloux sont en général abondants sur ces sols. Or, si la végétation est une variable que l'on peut estimer de manière correcte à partir de documents aérospatiaux, ce n'est pas le cas pour le taux de recouvrement des cailloux et des litières.

La cartographie de ces indicateurs est concrètement possible à partir d'une stratification de la zone étudiée en unités physiques les plus homogènes possibles, que l'on pourra générer par la combinaison de toute information thématique pertinente comme le type de sol, la géologie, la végétation et les états de surface en général, la position morphologique, et de toute autre variable jugée déterminante pour les indicateurs considérés. Les documents aérospatiaux, photographies aériennes ou images satellitaires haute résolution sont potentiellement d'un grand secours pour réaliser cette stratification car ils fournissent directement des unités de paysage qui représentent déjà une synthèse entre plusieurs caractéristiques physiques du milieu. Chaque strate identifiée est ensuite visitée sur le terrain pour en caractériser la texture et les états de surface, notamment le taux d'ouverture et de surface nue, en faisant l'hypothèse que ces caractéristiques sont relativement homogènes dans chaque unité considérée.

7. CONCLUSION

Compte tenu de la relative simplicité du dispositif expérimental que représente l'irrigateur manuel à rampe proposé par ROOSE et SMOLIKOWSKI (1997), les résultats obtenus

ÉPREUVE

concernant l'infiltrabilité et la turbidité peuvent être d'un grand secours pour l'étude des risques de ruissellement et de pertes des sols dans les zones montagneuses semi-arides caractérisées par la rareté des phénomènes érosifs et la difficulté d'accès au terrain. Ces résultats sont d'autant plus intéressants que l'on a pu recueillir correctement les matières en suspension exportées grâce à une amélioration du récepteur de ruissellement de l'irrigateur initial. Des relations significatives ont été mises en évidence entre les résultats des tests (infiltrabilité et turbidité), et certaines caractéristiques du sol cartographiables (ouverture, texture, fraction de sol nu). Ces relations permettent une première analyse des processus dominants de l'érosion et une hiérarchisation des facteurs dans un contexte de montagnes semi-arides dégradées et pourront être utiles pour l'utilisation et la calibration de modèles physiques de l'érosion. Par ailleurs, les indicateurs simples mis en évidence constituent des informations utiles dans la perspective d'une spatialisation des risques d'érosion au niveau d'un bassin versant, en gardant à l'esprit qu'un travail d'analyse est à poursuivre pour relier de manière fiable ces indicateurs aux processus réels d'érosion.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et le projet SudMed dans le cadre duquel cette étude est réalisée. Nos remerciements vont également au Programme de Recherche Agronomique pour le Développement (PRAD) 2004-2006 pour son soutien financier et à la Direction Régionale des Eaux et Forêts du Haut Atlas (DREF) pour son soutien logistique. Nous remercions aussi le Comité mixte interuniversitaire franco-marocain (CMFM) pour son soutien financier (PAI06-148, 2006-2009).

ÉPREUVE

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Al KARKOURI J., A. LAOUINA, E. ROOSE et M. SABIR, (2000). Capacité d'infiltration et risques d'érosion des sols dans la vallée des Beni boufrah- Rif central (Maroc). *Reseau Erosion Bull*. Montpellier: IRD, 20: 342-356.

ASSELINE, J. et C. VALENTIN (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM* XV 4, 321–349.

BLANCHARD E., C. KING, Y. LE BISSONNAIS, A. BOURGUIGNON, V. SOUCHÈRE, J.-F. DESPRATS et P. MAURIZOT (1999). Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des systèmes d'information géographique. *EGS* 6, 3: 181-199.

BOARDMAN J., A.J. PARSONS, R. HOLLAND, P.J. HOLMES et R. WASHINGTON (2003). Development of badlands and gullies Sneeuberg, Great Karoo, South Africa. *CATENA*, 50: 165-184.

BRAUD I., R. HAVERKAMP, J.L. ARRUE et M.V. LOPEZ (2003). Spatial variability of soil surface properties and consequences on the annual and monthly water balance of a semi-arid environment (EFEDA experiment). *J. Hydrometeorol.*, 4, 121-137.

CASENAVE A. et C. VALENTIN (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *J Hydrol.*, 130: 23 l-249.

DE JONG S.M., M.L. PARACCHINI, F. BERTOLO, S. FOLVING, J. MEGIER et A.P.J. DE ROO (1999). Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed Data. *CATENA*, 37: 291-308.

GHANAM M. (2003). La désertification au Maroc - Quelle stratégie de lutte? *2nd FIG Regional Conference Marrakech*, Morocco, December 2-5, 2003.

KEMPER W.D. et R.C. ROSENEAU (1986). *Aggregate stability and size distribution*. Dans : Klute, A. (ÉDITEURS), Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America, Madison, pp. 425 - 442.

KOSMAS C., N. DANALATOS, L.H. CAMMERAAT, et al. (1997). The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *CATENA*, 29: 45-59.

LE BISSONNAIS Y., O. CERDAN, V. LECOMTE, H. BENKHADRA, V. SOUCHE et P. MARTIN (2005). Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *CATENA*, 62 (2-3): 111-124.

LÉONARD J. et P. ANDRIEUX, 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. Catena, 32: 209-223.

MARSTON R.A. et L.S. DOLAN (1999). Effectiveness of sediment control structures relative to spatial patterns of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorph.*, 31: 313–323.

MORGAN R.P.C., K. MCINTYRE, A.W. VICKERS, J.N. QUINTON et R.J. RICKSON (1997). A rainfall

simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Technol.*, 11: 291-299.

OCDE 1993. Jeu de base d'indicateurs de l'OCDE pour l'étude de performance environnementale. *OECD Environment Monographs,* 83. OCDE Paris.

OUATTARA T., J-M. DUBOIS et J. HUGH (2003). MEH-SAFER : un nouveau modèle d'érosion hydrique pour les milieux semi-arides de forte énergie à partir d'images multisources et de données auxiliaires. *Télédétection*, 2-3-4, p. 151-163.

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 de montagnes. *Reseau Erosion Bull*. Montpellier : ORSTOM, 16: 87-97.

ROOSE E. et B. SMOLIKOWSKI (1997). Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert. *Reseau Erosion Bull*.. Montpellier : ORSTOM, 17: 282-296.

SABIR M., B. BARTHÈS et E. ROOSE (2004). Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15, 105-110.

SIMONNEAUX V., A. CHEGGOUR, M. SABIR, et E. ROOSE, (2006). Bilan de l'érosion dans le bassin versant de la Rheraya (Haut Atlas, Maroc). Comparaison de mesures sur parcelles et d'exportation à l'exutoire du bassin. *14th International Soil Conservation Organisation Conference* (ISCO 06), 14-19 May 2006, Marrakech, Maroc.

VEIHE A. (2002). The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. *Geoderma*, 106, 101-120.

WALKEY A. et I.A. BLACK (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed chromic titration method. *Soil Sci,* 37, 29-38.

http://www.matee.gov.ma/onem/rapport_idd/environnement.pdf.

ÉPREUVE