

Comparaison entre stabilité des agrégats ou des mottes et risques de ruissellement et d'érosion en nappe mesurés sur parcelles en zone soudanienne du Mali

Drissa Diallo¹
Bernard Barthès²
Didier Orange³
Éric Roose²

¹ Laboratoire d'agropédologie,
IPR de Katibougou,
BP 6,
Koulikoro,
Mali

<drdiallo@ird-ml.org>

² Laboratoire MOST,
IRD-Cirad,
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France

<barthes@mpl.ird.fr,
<roose@mpl.ird.fr>

³ Institut de recherche pour le développement
(IRD)

UR-ECU,
57, Tran Hung Dao,
Hanoi,
Vietnam
<d.orange@cgiar.org>

Résumé

En 1998 et 1999, le ruissellement et l'érosion ont été mesurés au Sud-Mali sur sept parcelles d'érosion standard (100 m²) sous pluies naturelles. Ces parcelles étaient installées sur sol ferrugineux tropical, sol brun vertique et sol peu évolué d'érosion, avec les modes d'occupation suivants : jachère arbustive, culture avec labour (maïs puis coton, en culture attelée), culture avec travail minimum (maïs puis coton, travail à la pioche sur le rang seulement). Des échantillons de sol ont été prélevés à 0-10 cm de profondeur, afin de déterminer notamment la teneur en carbone, la stabilité des agrégats (tamisage dans l'eau) et la stabilité des mottes (sous l'impact de gouttes d'eau). Les résultats montrent que lorsque le taux d'argile (et limons fins) est faible et les pratiques culturales intensives, la teneur en carbone du sol et la stabilité des agrégats et des mottes sont faibles également, tandis que le ruissellement et l'érosion sont élevés. De manière générale, le sol brun vertique (argileux) et les sols sous jachère sont donc moins sensibles au ruissellement et à l'érosion que le sol ferrugineux et les sols labourés. Les résultats sont plus complexes en cas de travail minimum (par rapport aux autres traitements, ruissellement et érosion sont importants en année humide mais faibles en année sèche) et sur sol peu évolué (ruissellement élevé mais érosion limitée, du fait de la richesse en éléments grossiers en surface). Les résultats montrent également que le ruissellement est lié à la stabilité des agrégats (elle-même liée à la teneur en argile et en carbone), et que l'érosion est fonction de la stabilité des mottes (elle-même fonction de la richesse en radicelles). Les pratiques qui garantissent une stabilité élevée de la couche de sol superficiel permettent donc de diminuer la sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion. Par ailleurs, ces résultats confirment et étendent la validité de tests d'érodibilité simples (stabilité des agrégats et des mottes) pour évaluer le ruissellement et l'érosion à l'échelle parcellaire. Le test de stabilité des mottes peut être long quand les mottes sont stables (de 10 s à 120 min). De plus, il exige une quantité de sol plus importante (120 g) que le test de stabilité des agrégats (20 g) et un transport précautionneux des mottes jusqu'au laboratoire. En revanche, il requiert très peu de matériel de laboratoire (pipette).

Mots clés : Érosion ; Ruissellement ; Mali.

Summary

Comparison between aggregate or clod stability and runoff and interrill erosion risks measured on runoff plots in the Sudanese zone of Mali

In 1998 and 1999, runoff and soil erosion were monitored on runoff plots in Southern Mali. Seven runoff plots were set up on three different soils (Alfisol, Vertisol, and Lithosol), with three land uses, *i.e.* old natural bush fallow, cropping with conventional tillage (maize then cotton), and cropping with minimum tillage on the seed line. Soil samples were collected at 0-10 cm in order to determine soil carbon contents, aggregate stability (to wet-sieving after fast wetting) and clod stability to waterdrops. The results indicate that small clay (and fine silt) contents and intensive tillage resulted in low soil carbon contents and weak aggregate and clod stability, and high runoff and erosion. Thus runoff and erosion tended to be lower on the (clayey) vertisol and under fallow than on the alfisol and under conventional tillage. The results were more complex with minimum tillage (as compared with other land uses, runoff and erosion were greater when annual rainfall was high, but the opposite occurred in rather dry years) and on the lithosol (high runoff but limited erosion due to the high topsoil contents in gravels). Runoff correlated with topsoil aggregate stability (which in turn correlated with clay and carbon contents), and erosion with clod stability (which in turn correlated with fine root contents). Thus land uses that promote the stability of the topsoil structure (e.g. organic return to the soil including root biomass, reduced tillage) decrease soil susceptibility to runoff and erosion. Furthermore, these results confirm and extend the validity of simple erodibility tests (aggregate and clod stability) for the assessment of runoff and interrill erosion at field scale. The clod stability test seems to better explain erosion risks than the aggregate stability test, as it takes the stabilizing action of the root into account. Additionally, the clod test requires few laboratory devices. However, it can take long when clods are stable (10 s to 120 min for each clod), and it requires larger soil samples that must be transported carefully.

Key words: Erosion; Runoff; Mali.

Dans les zones soudaniennes d'Afrique occidentale, les politiques modernes de développement rural visent, depuis le début des années 1970, l'intensification d'agrosystèmes reposant sur les cultures annuelles avec des rotations de type coton-céréales. Dans ces systèmes, les difficultés de maintien du potentiel productif des sols ont été notées depuis vingt ans [1]. Le labour, qui est largement vulgarisé au Mali, favorise la dégradation et l'érosion des sols [2, 3]. Les caractéristiques pédologiques le plus souvent invoquées dans la dégradation rapide des sols de ces écosystèmes sont les faibles teneurs en argile et/ou en matière organique des horizons de surface. L'argile et la matière organique jouent en effet un rôle capital dans le développement et le maintien d'une bonne structure du sol [4]. Les faibles teneurs en argile et matière organique de nombreux sols des savanes du Sud-Mali déterminent ainsi leur grande vulnérabilité [5]. Il est reconnu depuis longtemps qu'un bon état structural du sol garantit une bonne infiltration de l'eau des pluies et préserve le sol contre l'érosion.

Estimer l'effet du type de sol et du mode d'occupation sur le ruissellement et l'érosion est souvent difficile, car les mesures au

champ du ruissellement et de l'érosion sont fastidieuses. La sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion peut toutefois être évaluée en caractérisant quantitativement la stabilité de la structure du sol en laboratoire. Barthès *et al.* [6] ont montré, en zone tropicale (pluviosité annuelle de 400 à 1 600 mm), que le ruissellement et l'érosion annuels moyens augmentent et que le taux de macroagrégats (supérieurs à 0,2 mm) stables diminue avec l'ancienneté du défrichement, l'intensité du travail et la dénudation du sol. La mise en évidence d'une relation entre les indicateurs de risque d'érosion hydrique (comme le taux de macroagrégats stables) et l'érosion mesurée au champ peut contribuer à l'amélioration des démarches cartographiques sur les risques d'érosion. En effet l'acquisition de données fiables en quantité suffisante pour la cartographie est plus facilement envisageable avec des indicateurs d'érodibilité mesurés en laboratoire que sur la base de mesures de terrain, longues et coûteuses.

Notre travail, dans la zone soudanienne du Mali, a porté sur trois types de sols (sol ferrugineux tropical lessivé, sol brun vertique, sol gravillonnaire peu évolué d'érosion sur cuirasse) sous trois types de modes d'occupation (jachère arbustive,

culture de plus de cinq ans avec labour conventionnel, culture avec travail du sol réduit à la ligne de plantation). L'objectif est de caractériser l'effet du type de sol et du mode d'occupation sur le comportement des sols évalué au champ (ruissellement et érosion mesurés en parcelle d'érosion) et en laboratoire (stabilité des macroagrégats à l'immersion dans l'eau et stabilité des mottes aux gouttes d'eau).

Matériel et méthode

Site d'étude

L'étude a été réalisée dans le bassin-versant de Djitiko (12°03' à 11' N et 8°22' à 27' O), dans le haut bassin du fleuve Niger, au Mali. La pluviosité moyenne interannuelle (1939-1995) mesurée à la station climatique de référence (Kangaba, à 20 km) est de 1 076 mm. Pour les deux années étudiées, 1998 et 1999, les pluviosités annuelles sont respectivement de 995 et 1 355 mm, à l'emplacement des parcelles [2]. Les intensités pluviiales partielles peuvent atteindre plus de 100 mm.h⁻¹ durant 30 minutes et l'indice d'agressivité pluviiale (R_{USA}) pour l'année, varie de 400 à plus de

800 unités américaines, soit 7 000 à 14 000 MJ.mm.(ha.h)⁻¹.

Trois types de sols sont retenus pour cette étude : un sol ferrugineux tropical lessivé rouge, un sol brun vertique et un sol peu évolué d'érosion ; les deux premiers sont épais, alors que le troisième est peu épais (25 à 40 cm sur cuirasse) et gravillonnaire dès la surface. Les modes d'occupation étudiés sont les suivants :

- sur sol ferrugineux : jachère, labour et travail minimum ;
- sur sol brun vertique : jachère, labour et travail minimum ;
- sur sol peu évolué d'érosion : jachère.

Les jachères arbustives ont au moins vingt ans avant les essais, et ont été régulièrement brûlées et pâturées. Les parcelles cultivées, travaillées de manière conventionnelle (labour) pendant au moins cinq ans avant l'expérimentation, sont sous maïs en 1998 et sous coton en 1999 ; les résidus de culture sont pâturés. Les labours, profonds de 12 à 15 cm, sont réalisés en traction bovine. Le travail minimum (à partir de 1998) est réalisé à la pioche jusqu'à 12-15 cm de profondeur, uniquement sur le rang de culture (tous les 80 cm) ; il est accompagné d'un désherbage chimique. Les sept parcelles d'étude couvrent chacune 100 m² (20 m x 5 m) et ont des pentes comprises entre 1,5 et 2 %. Sur chaque parcelle, trois prélèvements de sol réalisés à 0-10 cm de profondeur sont réunis pour former un échantillon composite par parcelle, qui est ensuite séché à l'air.

Détermination de la granulométrie, de la teneur en carbone et azote, du pH, et de la capacité d'échange cationique (CEC)

Granulométrie, teneurs en carbone et azote et pH sont déterminés sur sol séché à l'air, puis tamisé à 2 mm. La granulométrie est déterminée après destruction de la matière organique (eau oxygénée) et dispersion totale (hexamétaphosphate de sodium), par tamisage à sec pour les fractions grossières, puis sédimentation (pipette Robinson) pour les fractions fines. Les teneurs en carbone et azote sont déterminées sur sol broyé à 0,2 mm, par combustion sèche dans un analyseur élémentaire (CHN). Le pH est déterminé avec un rapport sol/solution de 2,5. La CEC est déterminée au pH du sol, avec extraction au chlorure de cobaltihexamine [7] et dosage par spectrométrie d'émission de plasma à couplage inductif (ICP).

Test de stabilité des agrégats

Ce test, qui dérive de la méthode proposée par Kemper et Rosenau [8], est réalisé sur des échantillons tamisés à 2 mm (pas

seulement sur les agrégats). La stabilité des agrégats est évaluée en plongeant des échantillons secs de 4 g dans des béchers d'eau déminéralisée, puis en les tamisant à 0,2 mm au moyen de 60 agitations verticales dans cette même eau. La fraction retenue sur le tamis comprend des macro-agrégats stables (supérieurs à 0,2 mm), des sables grossiers, ainsi que des matières organiques grossières dont le poids est négligé. La teneur en sables grossiers (SG) est déterminée par dispersion de la fraction supérieure à 0,2 mm dans la soude diluée. La teneur en macroagréats stables (MA) est calculée par différence entre la fraction supérieure à 0,2 mm et SG. Le test est réalisé avec quatre répétitions par échantillon, et les résultats sont exprimés en g.kg⁻¹ de sol séché à 105 °C. La méthode est décrite en détail par Barthès et Roose [9].

Test de stabilité des mottes

Le test de stabilité des mottes, pratiqué depuis longtemps, est un bon indicateur de la stabilité de la structure [10]. Ce test est réalisé sur des mottes d'environ 4 g obtenues en taillant au couteau des mottes naturelles, provenant d'échantillons non tamisés, ramenés précautionneusement au laboratoire (transport en boîte rigide avec emballage dans du coton). Il n'a pas été réalisé sur le sol gravillonnaire, qui ne contient pas de mottes de taille suffisante. Le test consiste à soumettre chaque motte à un flux de gouttes d'eau de 3 mm de diamètre, qui tombent d'une burette placée à 1 m au-dessus de la motte. Celle-ci est posée sur une petite nacelle au-dessus d'un entonnoir, qui débouche sur un tamis de 0,2 mm placé au-dessus d'un bécher. Les matériaux issus de la désagrégation de la motte tombent ainsi dans l'entonnoir puis sur le tamis, qui retient les particules grossières (macroagréats, sables grossiers, radicelles) tandis que les particules plus fines sont recueillies dans le bécher. Le volume d'eau nécessaire pour désagréger complètement la motte est lu directement sur la burette. Les radicelles sont prélevées sur le tamis, séchées et pesées. En général, 30 mottes sont étudiées par parcelle, mais dans le cas des mottes les plus stables, dont la désagrégation est très longue, 15 mottes seulement ont été étudiées.

Mesure du ruissellement et de l'érosion

Les parcelles expérimentales (100 m²) sont délimitées sur trois côtés par des tôles enfoncées dans le sol et, à l'aval, par un canal qui draine les eaux de ruissellement et les sédiments vers trois cuves en béton reliées par un partiteur permettant d'éva-

luer le ruissellement (jusqu'à 150 mm de pluie). Les volumes d'eau ruisselés et les quantités de terre érodées sont mesurés après chaque événement pluvieux. Ces mesures permettent de déterminer le coefficient de ruissellement (rapport entre la hauteur de la lame ruisselée et celle de la pluie) et l'érosion (matières en suspension et terres de fond) pour chaque événement pluvieux, puis de calculer les valeurs annuelles de ces paramètres. Durant les deux années considérées, 1998 et 1999, 66 événements pluvieux ont occasionné du ruissellement.

Traitement statistique des données

Les relations entre paramètres (ruissellement, érosion, teneurs en carbone, en argile et limons fins, en macroagréats stables, volume d'eau pour désagréger une motte, poids de radicelles dans une motte) sont évaluées au moyen de corrélations linéaires simples (coefficient r) ou multiples (coefficient R).

Résultats

Caractéristiques générales des sols étudiés (couche 0-10 cm)

Les principales caractéristiques des échantillons étudiés sont présentées dans le *tableau 1*. Le sol peu évolué est riche en éléments grossiers, constitués d'éléments de cuirasse démantelée (supérieurs à 2 mm), alors que les deux autres sols n'en contiennent pas en surface. La texture de l'horizon de surface est argileuse dans le sol brun vertique, argilo-sableuse dans le sol ferrugineux et le sol peu évolué. Sur sol ferrugineux, la parcelle sous jachère a une teneur en éléments fins sensiblement plus élevée que les parcelles cultivées ; cette différence semble résulter du mode d'occupation des sols plus que de variations d'ordre géologique, car les teneurs en limons grossiers sont similaires sur les trois parcelles.

La teneur en carbone est plus élevée sur le sol brun vertique que sur les autres sols. Cette teneur est très étroitement corrélée à la teneur en argile et limons fins ($r = 0,952$, $p < 0,001$) (*figure 1*). Elle décroît avec l'intensité croissante du travail du sol sur sol ferrugineux ; sur sol brun vertique, la teneur en carbone est maximale sous travail minimum, et similaire sous jachère et labour. La teneur en azote est plus élevée sur le sol brun vertique que sur le sol ferrugineux, et intermédiaire sur le sol peu évolué.

Le pH eau est de l'ordre de 6,5 sur sols ferrugineux et peu évolué, et de 7 sur sol brun vertique. La CEC élevée sur sol brun vertique témoigne de la présence d'argiles

Tableau I. Caractéristiques de l'horizon superficiel (0-10 cm) des parcelles expérimentales.

Type de sol	Mode d'occupation	EG ^a (%)	A + LF ^b (%)	LG ^c (%)	Sables (%)	C (%)	N (%)	C/N	pH eau	CEC ^d cmol(+).kg ⁻¹
Sol ferrugineux	Jachère	0	40	37	24	1,10	0,07	14,9	6,6	6,7
	Labour	0	26	42	31	0,69	0,05	14,5	6,2	4,2
	Travail minimum	0	26	44	30	0,87	0,06	13,9	6,6	4,5
Sol brun vertique	Jachère	0	62	27	11	3,84	0,25	15,6	6,7	26,4
	Labour	0	56	26	18	3,81	0,23	16,5	7,0	35,0
	Travail minimum	0	64	26	10	5,38	0,36	14,8	7,1	31,3
Sol peu évolué	Jachère	89	34	21	45	1,53	0,10	14,7	6,7	10,0

^aEG : éléments grossiers (> 2 mm) ; ^bA + LF : argile et limons fins (< 0,02 mm) ; ^cLG : limons grossiers (0,02-0,05 mm) ; ^dCEC : capacité d'échange cationique.

de type 2:1 (smectite), responsables des propriétés vertiques. En revanche, la CEC du sol ferrugineux est très faible, en relation avec la présence majoritaire d'argiles de type 1:1 (kaolinite). Le sol peu évolué d'érosion a une CEC intermédiaire, compte tenu de la nature probablement composite des matériaux qui le constituent.

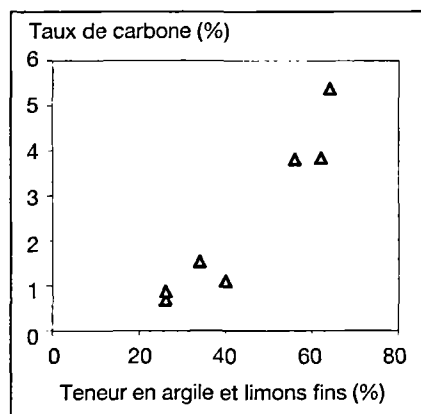


Figure 1. Relation entre teneur en argile et limons fins et teneur en carbone dans la couche de sols 0-10 cm.

Stabilité des agrégats

Le tableau II présente les résultats concernant la teneur en macroagrégats stables (MA) de l'horizon de surface (0-10 cm) des parcelles étudiées. Sur sols ferrugineux et brun vertique, MA est plus faible sous labour que sous jachère et travail minimum, la différence entre ces deux derniers étant variable. Les différences entre modes d'occupation sont fortes sur sol ferrugineux, le travail du sol s'accompagnant en particulier d'une forte diminution de la stabilité structurale ; en revanche, les différences entre traitements sont moins marquées sur sol brun vertique (où MA est plus élevé sous travail minimum que sous jachère).

La comparaison entre sols montre que MA est toujours plus faible sur sol ferrugineux que sur sol vertique, et encore plus faible sur sol peu évolué (jachère). Le sol brun vertique a donc une stabilité élevée, qui diminue peu (ou lentement) sous l'effet du labour, à la différence du sol ferrugineux, où la stabilité est plus faible et diminue fortement sous culture ; la stabilité est très faible dans le sol peu évolué.

MA est fortement corrélé avec la teneur en argile et limons fins ($r = 0,950$, $p < 0,01$), mais moins nettement avec la teneur en

carbone ($r = 0,869$, $p < 0,05$) (figure 2). La corrélation multiple entre MA, d'une part, teneur en carbone et teneur en argile et limons fins, d'autre part, n'est pas meilleure ($R = 0,958$) que celle avec argile et limons fins seuls.

Stabilité des mottes

La quantité d'eau nécessaire pour désagréger une motte d'environ 4 g permet d'évaluer la stabilité des mottes (tableau II). Le temps de désagrégation est faible pour les mottes sableuses (10 à 30 secondes) mais il peut atteindre 2 heures pour les mottes argileuses du vertisol.

La comparaison entre modes d'occupation indique que la stabilité des mottes est beaucoup plus élevée sous jachère que sous culture (volume d'eau nécessaire à la désagrégation au moins sept fois plus élevé sous jachère). Les mottes du sol brun vertique sont plus stables sous travail minimum que sous labour (volume d'eau deux fois plus élevé sous travail minimum), mais la différence entre les deux sols ferrugineux cultivés est très faible. L'effet de deux années de travail minimum après cinq années au moins de labour est donc sensible sur sol vertique, mais non sur sol ferrugineux.

Tableau II. Ruissellement, érosion et stabilité des macroagrégats (> 0,2 mm) et des mottes (environ 4 g) dans la couche de sol 0-10 cm.

Type de sol	Mode d'occupation	Ruissellement annuel (%)			Érosion annuelle (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)			Macroagrégats stables (g.kg ⁻¹ de sol)	Volume d'eau pour désagréger une motte (mL.motte ⁻¹)	Poids de radicelles dans les mottes (g.kg ⁻¹ motte)
		1998	1999	Moy.	1998	1999	Moy.			
Sol ferrugineux	Jachère	26,1	17,7	21,9	4,0	5,6	4,8	518	48,4	3,3
	Labour	40,1	50,2	45,2	15,8	21,0	18,4	160	7,1	3,2
	Travail minimum	26,3	23,2	24,8	2,7	12,0	7,4	289	7,6	2,0
Sol brun vertique	Jachère	16,4	26,8	21,6	2,4	1,0	1,7	709	258,8	7,0
	Labour	21,4	33,3	27,4	10,0	18,2	14,1	584	8,7	2,0
	Travail minimum	12,9	39,8	26,4	2,3	9,7	6,0	748	19,4	5,0
Sol peu évolué	Jachère	28,2	54,1	41,2	2,6	5,3	4,0	225	ND	ND

ND : non déterminé.

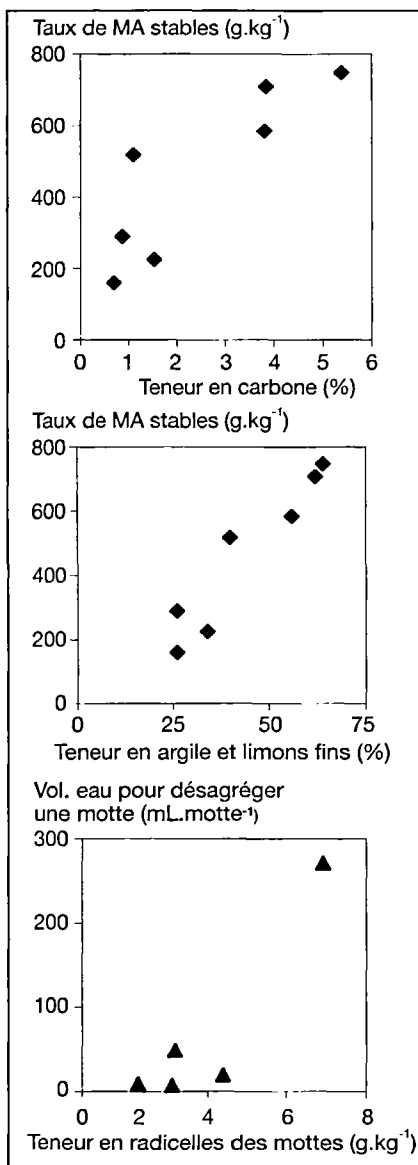


Figure 2. Relations entre taux de macroagrégats (MA) stables (>0,2 mm) et teneurs en argile + limons fins ou en carbone, et entre teneur en radicelles et stabilité des mottes (volume d'eau pour désagréger une motte de 4 g) à 0-10 cm de profondeur.

La comparaison entre sols montre que la stabilité des mottes est plus élevée sur sol brun vertique que sur sol ferrugineux. La différence est importante sous jachère et sous travail minimum (volume d'eau désagrégeant environ cinq et trois fois plus important sur sol vertique, respectivement), mais reste faible sous labour. Le volume d'eau nécessaire pour désagréger une motte est corrélé au poids de radicelles dans la motte ($r = 0,842$, $p < 0,05$) (figure 2) ; la corrélation n'est

pas améliorée en considérant la teneur en macroagrégats stables en plus du poids de radicelles ($R = 0,843$, $p > 0,05$ car il y a une variable explicative en plus et un degré de liberté en moins que précédemment).

Ruissellement et érosion

Les coefficients de ruissellement annuels et les pertes en terre annuelles en 1998 et 1999 sur les sept parcelles étudiées sont reportés dans le tableau II.

La comparaison entre modes d'occupation montre que pour un sol donné (ferrugineux ou brun vertique), ruissellement et érosion sont plus importants sous labour que sous jachère. Sous travail minimum, les résultats sont intermédiaires en moyenne, et varient notamment avec la pluviosité : en année pluvieuse (1999), ruissellement et érosion sont plus importants sous travail minimum que sous jachère, tandis qu'en année sèche (1998), ils sont du même ordre, donc faibles. De plus, l'effet du mode d'occupation sur l'érosion est relativement marqué : son effet sur le ruissellement reste marqué sur sol ferrugineux (ruissellement plus important sous labour), mais est moins net sur sol brun vertique.

La comparaison entre sols ferrugineux et brun vertique montre que, sous labour, ruissellement et érosion sont plus importants sur sol ferrugineux, mais la différence entre sols est peu nette sous travail minimum. Sous jachère, le sol peu évolué est caractérisé par un très fort ruissellement, deux fois plus important en moyenne que sur sols ferrugineux et brun vertique ; en revanche, l'érosion reste modérée sur sol peu évolué, du même ordre que sur sol ferrugineux, mais deux fois plus forte en moyenne que sur sol brun vertique.

Les ruissellements annuels moyens sont donc élevés sur sol peu évolué (jachère) et sur sol ferrugineux labouré (40-45 %), et plus faibles ailleurs (20 à 30 %). L'érosion est importante sous labour et, lors des années pluvieuses, sous travail minimum (10 à 20 t.ha⁻¹an⁻¹) ; elle est plus faible sous jachère et, lors des années peu pluvieuses, sous travail minimum (1 à 6 t.ha⁻¹an⁻¹).

Pour identifier de possibles déterminants du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles étudiées, des corrélations ont été recherchées entre ces paramètres et certaines caractéristiques de la couche de sol 0-10 cm : teneurs en carbone (C), en argile et limons fins (A + LF), en macroagrégats stables (MA), volume d'eau pour désagréger une motte (MOT), poids de radicelle d'une motte (RAD). Tous ces paramètres sont déterminés sur sept parcelles, sauf MOT et RAD, déterminés sur six parcelles seulement (pas de motte dans les sols gravillonnaires).

Le coefficient de ruissellement annuel moyen est corrélé négativement à MA ($r = -0,757$; $p < 0,05$; pour une variable explicative et cinq degrés de liberté, ddl) (figure 3) ; la prise en compte additionnelle de C améliore un peu la relation ($R = 0,902$ pour deux variables explicatives et quatre ddl ; $p < 0,05$). C'est surtout en 1998 (année sèche) que le ruissellement est corrélé à MA ($r = -0,910$; $p < 0,01$), la prise en compte additionnelle de C s'accompagnant d'une corrélation moins significative pour cette année-là ($R = 0,922$; $p < 0,05$ pour deux variables explicatives et quatre ddl). En 1998, le ruissellement est également corrélé négativement, mais moins étroitement, avec A + LF ($r = -0,879$; $p < 0,01$), avec C ($r = -0,864$; $p < 0,05$), et il est aussi corrélé avec les paires de variables MA - MOT ($R = 0,942$; $p < 0,05$), et MA - RAD ($R = 0,941$). En 1999 (année humide), le ruissellement est corrélé avec la paire de variables MA - C ($R = 0,898$; $p < 0,05$). Le ruissellement est donc lié négativement à la stabilité structurale de la couche de sol superficiel, surtout en année sèche ; en année humide, l'agrégation seule ne suffit pas à expliquer (statistiquement) le ruissellement, et le taux de carbone de surface doit également être pris en considération.

L'érosion annuelle moyenne est corrélée positivement avec l'instabilité des mottes ($r = 0,832$; $p < 0,05$) (figure 3), qui est l'inverse du volume d'eau nécessaire pour désagréger une motte (1/MOT), et représente la contribution d'un mL de goutte à la désagrégation d'une motte (en motte.mL⁻¹). L'érosion en 1998 est corrélée avec 1/MOT uniquement en excluant la parcelle en travail minimum sur sol ferrugineux ($r = 0,926$; $p < 0,05$). L'érosion en 1999 est corrélée avec 1/MOT ($r = 0,909$; $p < 0,05$). L'érosion moyenne est également corrélée significativement avec la paire de variables Ruissellement moyen (RUI_m) - RAD ($R = 0,954$; $p < 0,05$ pour deux variables explicatives et trois ddl), alors que les corrélations simples avec RUI_m ($r = 0,545$) et RAD ($r = -0,606$) sont médiocres. En résumé, l'instabilité des mottes apparaît comme un déterminant important de l'érosion ; bien qu'elle ne soit pas corrélée significativement au ruissellement seul, l'érosion est également corrélée avec des paires de variables associant le ruissellement à certaines caractéristiques de la couche de sol 0-10 cm : richesse en radicelles (1999 et moyenne 1998-99), teneur en C ou en A + LF (1998). En revanche, aucune corrélation significative n'a été observée entre l'érosion annuelle et le taux de macroagrégats stables.

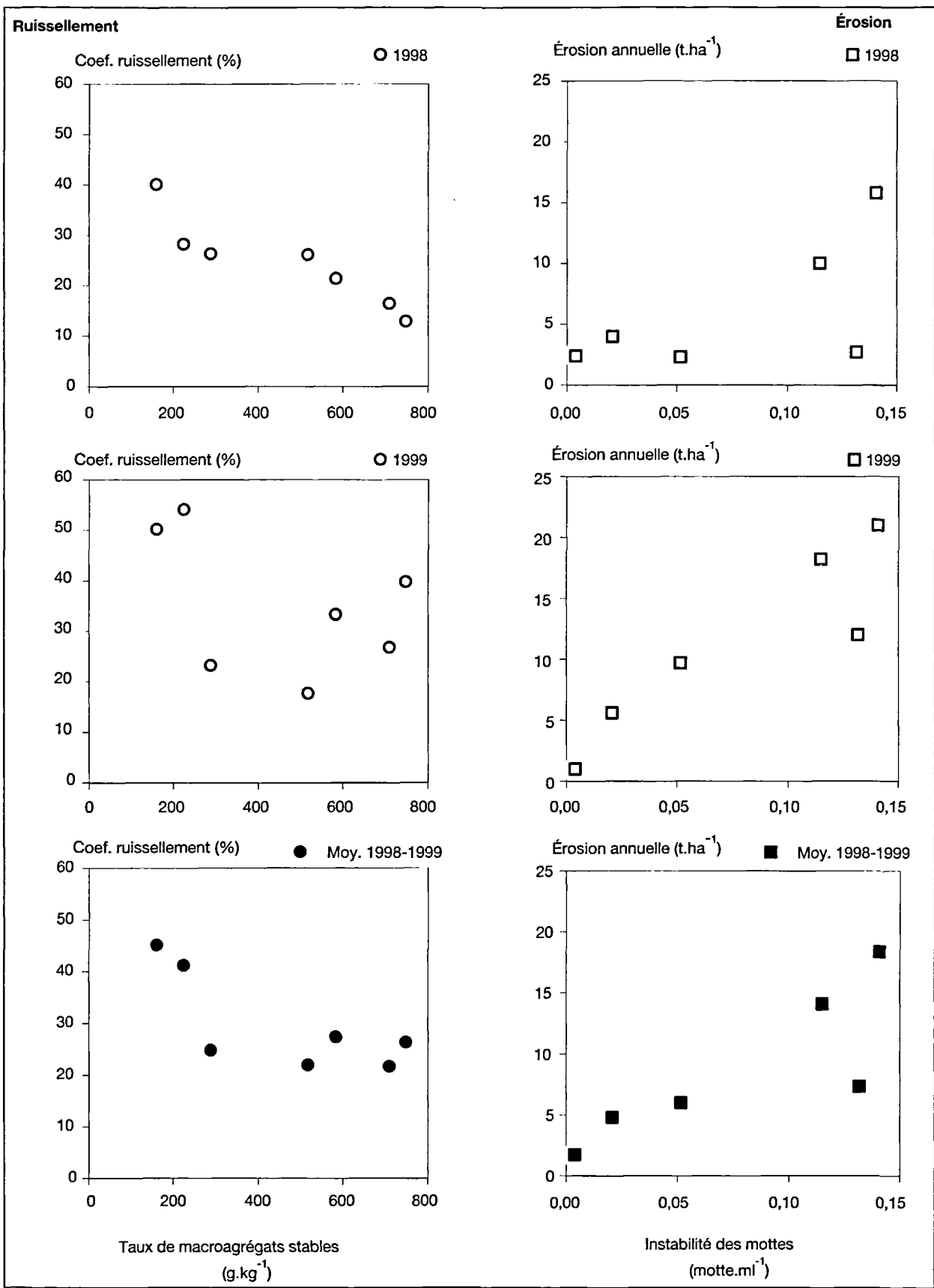


Figure 3. Relations entre stabilité des macroagrégats (> 0,2 mm) à 0-10 cm et ruissellement annuel, et entre instabilité des mottes à 0-10 cm et érosion annuelle (l'instabilité des mottes est caractérisée par la proportion d'une motte de 4 g désagrégée par un mL d'eau).

Discussion

Texture et teneur en carbone

La décroissance du taux de carbone du sol avec l'intensité culturale, notamment l'intensité du travail du sol, observée ici sur sol ferrugineux, est bien établie [11]. Elle est notamment expliquée par la minéralisation consécutive à l'aération du sol par les opérations culturales, mais également par les restitutions organiques (notamment racinaires) souvent plus faibles et l'érosion plus forte sous culture que sous jachère arbustive. En revanche, sur sol brun vertique, la teneur en carbone nettement plus élevée sous travail minimum que sous jachère est surprenante, de même que les teneurs similaires sous jachère et labour ; ces résultats pourraient être liés à l'hétérogénéité du sol sous végétation naturelle, suite aux dépôts successifs de sédiments provenant de la colline située en amont.

La relation étroite entre teneur en carbone et teneur en argile et limons fins a été rapportée par d'autres auteurs, surtout pour les sols à argile 1:1 [11] ; mais contrairement à ces publications, nos résultats ne montrent pas de différence entre sols à argiles 1:1 et 2:1, qui tendent à s'aligner sur la même droite. La corrélation entre teneur en carbone et texture résulte des liaisons étroites qui s'établissent entre colloïdes minéraux et organiques, et assurent une protection du carbone contre la minéralisation.

Stabilité des agrégats et des mottes

L'influence des teneurs en argile et en matière organique sur la stabilité structurale a été rapportée par différents auteurs [12, 13] ; toutefois, contrairement à nos résultats, l'influence de la matière organique sur l'agrégation est souvent jugée plus importante que celle de la texture. Cet effet des colloïdes organiques et minéraux résulte des liaisons qu'ils constituent entre particules, et qui contribuent à la stabilité de l'agrégation [14]. La richesse en argile 2:1 et en carbone du sol brun vertique explique donc sa forte stabilité structurale, et la faible variation de cette stabilité sous l'effet de la mise en culture. En revanche, la stabilité structurale du sol ferrugineux, plus faible sous jachère, est nettement affectée par le travail du sol, et devient très faible sous labour. Cette diminution de la stabilité structurale avec l'intensité croissante des pratiques culturales est rapportée par plusieurs auteurs [6, 15, 16] ; elle s'explique par la destruction des agrégats et la minéralisation accrue de la matière organique causées par le travail du sol, ainsi que par les restitutions organiques souvent faibles sous culture (nos parcelles d'étude sous jachère ou après récolte étant

pâturées et brûlées, les restitutions organiques, hormis les cendres et les fèces des troupeaux, y sont principalement souterraines).

De la même manière, la stabilité des mottes, plus élevée sur sol brun vertique ou sous jachère que sur sol ferrugineux ou sous culture, peut être mise en relation avec les modes d'occupation ou avec les teneurs en argile et en matière organique. Toutefois, c'est surtout le poids de radicales qui apparaît comme un déterminant important de la stabilité des mottes. Si l'influence des constituants du sol sur la stabilité est importante à l'échelle des agrégats, l'importance des racines dans la stabilité de la structure aux échelles plus grossières est signalée par plusieurs auteurs [14, 17]. Nos résultats le confirment nettement.

Ruissellement et érosion

L'augmentation du ruissellement et de l'érosion avec l'intensité croissante des pratiques culturales est rapportée par différents auteurs, à partir de travaux sous pluies simulées [16, 18] ou sur parcelles d'érosion [19, 20]. Cela est mis en relation avec l'effet du mode d'occupation sur la teneur en matière organique et la stabilité structurale du sol, compte tenu de l'influence de ces paramètres sur la résistance du sol au ruissellement et à l'érosion. Nos résultats mettent également en évidence la relation qui lie le ruissellement avec la stabilité de l'agrégation et le taux de carbone de la couche de sol 0-10 cm, relation également signalée par d'autres auteurs [6, 21]. Nos résultats montrent que le ruissellement est étroitement lié à l'agrégation en année sèche, mais qu'en année humide, il faut également prendre le taux de carbone en considération. Tout cela peut être rapproché de résultats obtenus sous pluies simulées montrant que, lorsque la durée de la pluie augmente, le ruissellement devient moins dépendant de l'agrégation et est plus lié à la teneur en carbone [21] ; on peut supposer que les pluviosités élevées dégradent fortement la structure du sol superficiel, dont l'influence sur le ruissellement et l'érosion devient moins importante, tandis que l'influence des constituants (matière organique) s'exprime encore, ainsi que nous le constatons en 1999.

Nos données ne mettent pas en évidence de relation entre stabilité de l'agrégation et érosion, relation pourtant signalée par d'autres auteurs [6]. En revanche, pour la gamme de situations étudiées, la stabilité des mottes apparaît comme un déterminant important de l'érosion. Ce type de résultat reste relativement peu documenté dans la littérature, mais paraît pertinent. Nos données indiquent également que la

richesse des mottes en radicales, considérée en plus du ruissellement, est susceptible d'améliorer l'explication de l'érosion. Il est probable que la richesse en radicales reflète l'importance du couvert végétal, dont l'influence sur l'érosion est bien connue [22].

Les résultats de cette expérimentation montrent clairement l'intérêt complémentaire des deux tests simples de laboratoire pour évaluer les risques de ruissellement et d'érosion. Ils permettent aussi d'envisager la spatialisation des résultats acquis sur parcelles d'érosion à l'ensemble d'un bassin-versant représentatif de cette zone, en intégrant dans un système d'information géographique (SIG) des données relatives au type de sol, au mode d'occupation, au taux de matière organique, à la stabilité des agrégats et des mottes. De plus, les deux tests de stabilité sont réalisés sur de faibles quantités d'échantillons (4 x 4 g pour les agrégats, 15 à 30 x 4 g pour les mottes), et peuvent facilement s'intégrer dans les méthodes de routine d'un laboratoire d'analyses de sol, car ils nécessitent peu de matériel sophistiqué. Ils exigent un certain temps de travail au laboratoire, qui reste toutefois négligeable par rapport au temps nécessaire pour acquérir des données fiables sur parcelles d'érosion (trois à cinq années, en général).

Conclusion

Les travaux présentés s'intéressent à l'effet du type de sol (ferrugineux, brun vertique, peu évolué) et du mode d'occupation (jachère, labour, travail minimum) sur les propriétés de l'horizon superficiel (0-10 cm), le ruissellement et l'érosion en nappe, au Sud-Mali.

Nos résultats confirment d'abord que la teneur en matière organique et la stabilité des agrégats et des mottes tendent à diminuer avec la teneur en argile (et limons fins) et l'intensification du travail du sol. De même, appauvrissement en argile et intensification des pratiques s'accompagnent généralement d'une augmentation du ruissellement et de l'érosion.

Nos données mettent également en évidence des corrélations négatives entre stabilité des agrégats et ruissellement, d'une part, et entre stabilité des mottes et érosion, d'autre part. Ces résultats sont importants à deux titres. D'abord, ils confirment que les pratiques qui préservent ou améliorent la stabilité structurale de l'horizon de surface (restitutions organiques, notamment par les racines, travail du sol réduit) permettent de limiter le ruissellement et l'érosion ; cela contribue à étendre à de nouveaux milieux la validité des recommandations concernant les prati-

ques de conservation des eaux et des sols. Ensuite, ces résultats démontrent l'intérêt d'indicateurs d'érodibilité aisément mesurables en laboratoire (stabilité des agrégats et des mottes) pour évaluer le ruissellement et l'érosion, dont la mesure sur le terrain est souvent longue et coûteuse. Le test de stabilité des mottes, dont l'usage reste peu répandu, semble aussi intéressant que le test de stabilité des macroagrégats pour prévoir les risques d'érosion hydrique en milieu soudanien : l'étude des mottes est plus longue et requiert un poids d'échantillons plus important, mais exige peu de matériel de laboratoire.

Remerciements

Jacques Gigou est vivement remercié pour sa relecture attentive d'une version antérieure de cet article et pour ses propositions d'amendement.

Références

1. Pieri C. *Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara*. Paris : Ministère de la Coopération ; Cirad-Irat, 1989, 444 p.
2. Diallo D. *Érosion des sols en zone soudanienne du Mali. Transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger)*. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier de Grenoble, 2000, 202 p.
3. Ogunwale JO, Raji BA, Adeoti AA, Adeoye KB, Ogunlela VB. Effect of tillage on surface soil conditions and yield of late sown cotton in northern Nigeria. *African Soils* 1999 ; 29 : 25-32.
4. Morel R. *Les sols cultivés*. Paris : Lavoisier, 1989 ; 373 p.
5. Diallo D, Keita D. Étude de l'état structural de l'horizon superficiel du sol de bas glacis de la zone de savane du Sud Mali. *Revue Malienne de Science et Technologie* 2001 ; 5 : 4-16.
6. Barthès B, Azontonde A, Boli Z, Prat C, Roose E. Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *Eur J Soil Sci* 2000 ; 51 : 485-95.
7. Rouiller J, Souchier B, Bruckert S, Feller C, Toutain F, Védry JC. Méthodes d'analyses des sols. In : Bonneau M, Souchier B, eds. *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol*. Paris : Masson, 1994 : 619-52.
8. Kemper WD, Rosenau RC. Aggregate stability and size distribution. In : Klute A, éd. *Methods of soil analysis, Part 1, Agronomy Monograph*. Madison (Wisconsin) : Am Soc Agron - Soil Sci Soc Am 1986 ; 9 : 425-42.
9. Barthès B, Roose E. La stabilité de l'agrégation, un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion : validation à plusieurs échelles. *Cah Agric* 2001 ; 10 : 185-93.
10. Mc Calla TM. Waterdrop method for determining stability of soil structure. *Soil Sci* 1945 ; 58 : 117-23.
11. Feller C, Beare MH. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 1997 ; 79 : 69-116.
12. Le Bissonnais Y. Soil characteristics and aggregate stability. In : Agassi M, éd. *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New York : Dekker, 1996 : 41-60.
13. Amézketa E. Soil aggregate stability : A review. *J Sustainable Agric* 1999 ; 14 : 83-151.
14. Baldock JA. Interactions of organic materials and microorganisms with minerals in the stabilization of soil structure. In : Huang PM, Bollag JM, Senesi N, eds. *Interactions between soil particles and microorganisms : Impact on the terrestrial ecosystem*. Chichester (GB) : Wiley & Sons, 2002 : 85-131.
15. Quantin P, Combeau A. Relation entre érosion et stabilité structurale du sol. *CR Acad Sci Paris* 1962 ; 254 : 1855-7.
16. West LT, Miller WP, Langdale GW, Bruce RR, Laffen JM, Thomas AW. Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia piedmont. *Soil Sci Soc Am J* 1991 ; 55 : 460-6.
17. Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J Soil Sci* 1982 ; 33 : 141-63.
18. Bradford JM, Huang CH. Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Till Res* 1994 ; 31 : 353-61.
19. Roose E. Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale. *Cah Orstom Sér Pédol* 1983 ; 20 : 327-39.
20. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. *FAO Soils Bull* 1994 ; 70 : 420 p.
21. Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion ; validation at several levels. *Catena* 2002 ; 47 : 133-49.
22. Wischmeier WH, Smith DD. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to erosion planning*. USDA Agriculture Handbook, 537. Washington (DC) : USDA, 1978, 58 p.