

AGREGATION DU SOL, RUISSELLEMENT ET EROSION A L'ECHELLE PARCELLAIRE DANS TROIS REGIONS INTERTROPICALES (BENIN, CAMEROUN, MEXIQUE)

Bernard Barthès¹, Anastase Azontonde², Zachée Boli³, Christian Prat¹, Eric Roose¹

¹ IRD, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France ; ² CENAP, BP 988, Cotonou, Bénin ;
³ IRAD, BP 2123, Yaoundé, Cameroun

RÉSUMÉ

Des relations entre agrégation, ruissellement et pertes en terre ont souvent été établies sur microparcelles ($\approx 1 \text{ m}^2$) sous pluies simulées. Notre objectif est d'étudier ces relations en parcelles d'érosion (100 à 800 m^2), sous pluies naturelles. Ruissellement et érosion ont été mesurés pendant trois ans sur 14 parcelles au Bénin, Cameroun et Mexique. Toutes ces parcelles ont une pente de longueur et de déclivité modérées, et sont sous végétation herbacée, mais elles diffèrent par le climat (pluviosité de 400 à 1600 mm an^{-1}), le type de sol (ferrallitique, ferrugineux, régosol) et le mode de gestion (de la savane à la culture continue mécanisée). La stabilité des agrégats de l'horizon 0-10 cm a été déterminée par immersion puis tamisage dans l'eau d'échantillons préalablement séchés à l'air et tamisés à 2 mm.

Dans l'ensemble, le ruissellement et l'érosion annuels moyens augmentent, et le taux de macroagrégats ($>0.2 \text{ mm}$) stables diminue, avec l'ancienneté du défrichement, l'intensité du travail du sol et la dénudation du sol. Sur l'ensemble des parcelles, ruissellement et érosion annuels moyens sont étroitement corrélés avec la stabilité des agrégats ; les corrélations sont améliorées en considérant la pente et le climat en plus de l'agrégation. L'éclatement, principal mécanisme de désagrégation lors de l'immersion de sol sec dans l'eau, rend donc compte de l'érodibilité au champ. La stabilité des agrégats de l'horizon de surface semble ainsi un indicateur pertinent du ruissellement et de l'érosion à l'échelle de la parcelle et de l'année, pour des situations sous végétation herbacée avec une pente modérée.

MOTS-CLÉS : ruissellement, érosion, agrégation, parcelles d'érosion

ABSTRACT

The influence of aggregate stability on runoff and erosion has often been reported from experiments on microplots ($\approx 1 \text{ m}^2$) under simulated rain. Our objective was to compare the aggregate stability of topsoil (0-10 cm) with runoff and erosion from experiments on runoff plots (about 100 to 800 m^2) under natural rain. Runoff and soil losses were measured over three years on 14 plots in Benin, Cameroon and Mexico. All plots were under herbaceous vegetation and had moderate slope length and declivity, but differed in climate (400 to 1600 mm annual rainfall), soil type (sandy clay loam Nitosol, loamy sand Ferralsol, loamy Regosol), and management (from savanna to long-duration mouldboard ploughing). The stability of aggregates was determined by immersing and wet-sieving 2-mm sieved air-dried samples into water.

Mean annual runoff rate and soil losses generally increased, and the proportion of stable macroaggregates ($>0.2 \text{ mm}$) decreased, with increasing duration and intensity of tillage, and with decreasing cover on the soil surface. For all 14 plots, runoff and soil losses were closely correlated with aggregate stability; correlations were improved when slope gradient and rain

erosivity were considered in addition to aggregation. Slaking, the main mechanism of aggregate breakdown which occurs when dry soil is immersed, accounted well for runoff and erosion. The stability of topsoil aggregates seems therefore to be a valuable indicator of field-assessed runoff and erosion for plots on moderate slopes with herbaceous vegetation.

KEY-WORDS : runoff, erosion, soil aggregation, erosion plots

INTRODUCTION

L'érosion des sols est la combinaison d'un détachement et d'un transport de particules, puis de leur sédimentation. Dans le cas de l'érosion hydrique, les principaux mécanismes de détachement sont la désagrégation, par éclatement, fissuration ou dispersion, et l'arrachement de particules par les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement ; les principaux agents de transport sont les gouttes de pluie, par rejaillissement (splash), et surtout les eaux de ruissellement. L'éclatement résulte de la pression de l'air piégé dans les agrégats humectés brutalement (Yoder, 1936 ; Hénin *et al.*, 1958) ; la fissuration résulte de leur gonflement différentiel, et la dispersion, de la réduction des forces de cohésion entre particules humectées (Le Bissonnais, 1996) ; en revanche, c'est principalement l'énergie cinétique des gouttes de pluie et des eaux de ruissellement qui explique l'arrachement et le transport (Roose, 1977 ; Casenave et Valentin, 1989).

On distingue érosion en nappe et érosion linéaire. Lorsque la longueur de pente est insuffisante pour permettre la concentration du ruissellement, celui-ci reste diffus, avec un potentiel d'arrachement et de transport limité ; c'est l'érosion en nappe. En revanche, lorsque la longueur de pente est suffisante pour permettre la concentration du ruissellement, celui-ci acquiert un potentiel d'arrachement et de transport important, et peut inciser la surface topographique ; c'est l'érosion linéaire (Roose, 1994). Le cas des glissements de terrain, plus étroitement lié à la lithologie, ne sera pas abordé.

Les quantités d'eau ruisselée et de terre érodée durant une pluie ou une séquence de pluies peuvent être évaluées à différentes échelles : bassin versant ($>10^4$ m²), parcelle (10 à 10^4 m²) ou microparcelle (≤ 1 m²) (Mutchler *et al.*, 1988 ; Hudson, 1993). Les mesures réalisées à l'exutoire de bassins versants sont des bilans, qui intègrent différents phénomènes, par exemple détachement puis dépôt, dont la distinction n'est pas toujours aisée (Le Bissonnais *et al.*, 1998). Sur microparcelles, le ruissellement reste diffus et avec une faible vitesse, ce qui conduit à une sous-estimation importante des pertes en terre (Le Bissonnais *et al.*, 1998). L'échelle intermédiaire, celle des parcelles d'érosion, permet une certaine concentration du ruissellement (érosion linéaire), et si la pente est régulière, la sédimentation peut être limitée ; par ailleurs, ces parcelles peuvent facilement être installées en milieu pédologique et végétal homogènes, ce qui permet d'en caractériser le comportement, et elles sont exposées aux pluies naturelles, rendant possibles des calculs de perte en terre à l'échelle de l'averse ou de l'année. Pour toutes ces raisons, les mesures en parcelle d'érosion connaissent un succès notable depuis plusieurs décennies (Mutchler *et al.*, 1988 ; Roose et Sarrailh, 1989 ; Hudson, 1993).

Par ailleurs, l'érodibilité du sol, définie comme sa sensibilité au ruissellement et à l'érosion, peut également être estimée à l'aide de différents tests de laboratoire, réalisés sur de petits échantillons (<100 g) (Bryan, 1968). Ces tests, de mise en œuvre souvent aisée, isolent un (ou quelques) mécanisme élémentaire caractérisant le phénomène étudié. La pertinence de ces tests est généralement évaluée en comparant leurs résultats avec les ruissellements et pertes en terre mesurés sous pluies simulées au laboratoire ou au champ. Plusieurs travaux rapportent ainsi des corrélations étroites entre (i) stabilité des agrégats d'horizons de surface testée après humectation rapide et (ii) mesures du ruissellement ou de l'érosion lors de pluies simulées sur sol sec au laboratoire (Bryan, 1968 ; Luk, 1977 ; Reichert et Norton, 1994 ;

Amézketa *et al.*, 1996 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997) ou, plus rarement, au champ (Roth *et al.*, 1987 ; Barthès *et al.*, 1998, 1999). Ces corrélations attestent que la stabilité des agrégats du sol superficiel est un indicateur pertinent de l'érodibilité mesurée sur microparcelle et sous pluie simulée.

L'objectif de l'étude présentée est d'évaluer les relations entre (i) ruissellement et érosion sur parcelles d'érosion et sous pluies naturelles et (ii) stabilité des agrégats du sol superficiel sec après humectation rapide. L'étude porte sur trois situations différenciées, la première au Bénin sur sol sablo-argileux, la deuxième au Cameroun sur sol sableux et la troisième au Mexique sur matériau induré pulvérisé argilo-sableux d'origine volcanique. Dans les trois cas, les parcelles ont une longueur (<50 m) et une pente (<5%) modérées, et sont sous cultures annuelles ou savane.

MATERIELS ET METHODES

Parcelles d'érosion d'Agonkanmey, au Bénin (Azontonde, 1993 ; Azontonde *et al.*, 1998)

Agonkanmey (6°24'N, 2°20' E) est à quelques kilomètres de Cotonou, au sud-Bénin, à 20 m d'altitude environ. Le climat est de type soudano-guinéen, subéquatorial maritime à deux saisons des pluies, de mars à juillet puis de septembre à novembre ; la pluviosité annuelle moyenne est de 1000 à 1200 mm, avec un maximum mensuel en juin d'environ 270 mm en moyenne ; la température annuelle moyenne est de 27°C. Le paysage est dominé par des bas-plateaux, le site expérimental étant installé en bordure de plateau. Les sols sont ferrallitiques faiblement désaturés (Dystric Nitosols pour la FAO, Typic Tropudults pour l'USDA), sableux en surface et plus argileux en profondeur, développés sur sédiment argilo-sableux miopliocènes. La végétation naturelle est un fourré arbustif dense à tapis herbacé peu développé, mais l'essentiel des surfaces est occupé par les cultures vivrières (maïs, haricot, manioc, arachide) souvent associées au palmier à huile.

Le dispositif étudié comprend quatre parcelles longues de 30 m, larges de 8 m, sur une pente de 4% environ. Chaque parcelle est délimitée sur trois côtés par des tôles enfoncées dans le sol et à l'aval par un canal ; celui-ci draine les eaux de ruissellement et les sédiments érodés dans une première cuve, dont le trop-plein se déverse à travers un partiteur dans une deuxième cuve. Le volume des cuves est de 2 à 3 m³. L'essai actuel est installé depuis 1988, mais seules sont présentées ici les données sur le ruissellement et l'érosion de 1995 à 1997. Quatre traitements sont testés : culture traditionnelle pure de maïs, sans apport ; culture pure de maïs avec fertilisation minérale ; association maïs – *Mucuna pruriens* var. *utilis* (légumineuse de couverture) renouvelée chaque année, sans apport ; association maïs – mucuna la première année, maïs pur l'année suivante, sans apport. Le maïs est cultivé durant la première saison des pluies, avec travail du sol superficiel et sarclages manuels, à la houe. Le mucuna est semé dans les interrangs de maïs, un mois après le semis de maïs, et poursuit sa croissance pendant la seconde saison des pluies.

Une station météorologique complète, avec pluviographe, est installée à 2 km des parcelles. La pluviosité annuelle est respectivement de 1000, 1126 et 1558 mm en 1995, 1996 et 1997, soit deux années normales puis une année humide. L'indice d'érosivité des pluies, calculé en additionnant, sur une année, les produits de l'énergie de chaque pluie par son intensité maximale en 30 minutes (Wischmeier et Smith, 1978), atteint 8762, 9768 et 13516 MJ mm (ha h)⁻¹ respectivement pour les trois années considérées, soit une moyenne de 10688 MJ mm (ha h)⁻¹.

Parcelles d'érosion de Mbissiri, au Cameroun (Boli *et al.*, 1993 ; Boli, 1996)

Mbissiri (8°23'N, 14°33'E) est situé à 40 km de Tcholliré, à 250 km de Garoua, au Nord-Cameroun, à une altitude d'environ 370 m. Le climat est de type soudanien humide, la pluviosité annuelle moyenne de 1000 à 1500 mm, répartie d'avril à octobre avec un maximum

en juillet d'environ 300 mm en moyenne ; la température annuelle moyenne est de 26°C. Le dispositif expérimental est situé sur un long glacis (pente <3%), en contrebas d'une butte témoin cuirassée. Les sols, développés sur l'altérite d'un grès ferrugineux, sont ferrugineux tropicaux indurés peu lessivés et sableux (Orthic Ferralsols pour la FAO, Plinthic Haplorthox pour l'USDA) ; l'épaisseur du sol meuble au-dessus de la carapace varie de moins de 10 cm au sommet de la butte à plus de 100 cm. La végétation naturelle est une savane arborée. Les principales cultures sont le cotonnier et les plantes vivrières (sorgho, maïs, manioc, arachide, haricot).

Le dispositif étudié comprend cinq parcelles d'érosion longues de 20 m et larges de 5 m. L'équipement des parcelles pour la mesure du ruissellement et de l'érosion est comparable à celui installé au Bénin, le canal de collecte étant toutefois muni d'un bac de sédimentation. Les parcelles ont été installées en 1991, et cultivées en coton (1991, 1993) et maïs (1992, 1994) ; les résultats présentés portent sur les années 1992 à 1994. Parmi les cinq parcelles étudiées, deux sont établies sur une défriche vieille de 30 ans avec une pente de 2.5%, et sont labourées à la charrue à socs, sarclées et buttées dans le sens de la pente, avec fertilisation minérale ; les résidus de culture sont restitués avant labour sur l'une de ces deux parcelles, mais ne sont pas restitués sur l'autre. Deux autres parcelles sont installées sur un terrain défriché en 1990, avec une pente de 2% ; l'une de ces deux parcelles est cultivée comme les précédentes, sans restitution des résidus, tandis que l'autre est en semis direct, avec apport d'engrais et buttage dans le sens de la pente à la levée. La cinquième parcelle est une savane arborée, en jachère depuis 30 ans, avec une pente de 2% (elle est large de 10 m).

Le site est équipé d'un pluviographe et de trois pluviomètres. La pluviosité annuelle est respectivement de 1511, 1072 et 1353 mm en 1992, 1993 et 1994, soit une année humide, une année normale puis une année sèche. Pour ces trois années, l'indice d'érosivité des pluies atteint 13620, 8606 et 7513 MJ mm (ha h)⁻¹, respectivement pour les trois années considérées, soit une moyenne de 9907 MJ mm (ha h)⁻¹.

Parcelles d'érosion de San Miguel Tlaixpan, au Mexique (Quantin *et al.*, 1993 ; Quantin, 1997)

San Miguel Tlaixpan (19°30'N, 98°48'W) est situé près de Texcoco, dans l'Etat de Mexico, sur le haut-plateau central mexicain. Le climat est tempéré subhumide, avec une saison des pluies d'avril à octobre puis une saison sèche marquée ; la pluviosité annuelle moyenne est de 700 à 800 mm, le maximum mensuel atteignant 150 mm en moyenne, en août ; la température annuelle moyenne est de 13°C. Le dispositif expérimental est situé à 2600 m d'altitude, au pied de la Sierra Nevada, sur une pente naturelle de l'ordre de 10%. Les sols, d'origine volcanique (tuf), résultent du défonçage puis du pulvérisage mécaniques d'un horizon induré affleurant, à propriété de fragipan (dur à l'état sec, friable à l'état humide), appelé localement « tepetates » ; ce sont des régosols (Eutric Regosols pour la FAO, Lithic Ustorthents pour l'USDA). La végétation naturelle est une forêt mixte de chênes, pins et sapins. Les principales plantes cultivées sont le maïs, le haricot, mais également le blé, l'orge, l'avoine, la luzerne et la fève.

Le dispositif étudié comprend cinq parcelles initialement sur tepetate, longues de 40 m et larges de 20 m environ. L'équipement des parcelles pour la mesure du ruissellement et de l'érosion est similaire celui installé au Bénin. Ruissellement et érosion sont mesurés de 1993 à 1996, mais du fait de modifications de certains traitements en 1996, seuls les résultats de 1993 à 1995 sont présentés. La mise en culture, en 1993, comprend un défonçage par un bulldozer à deux dents, la formation de terrasses, un labour puis un pulvérisage. La parcelle témoin est caractérisée par un défonçage du tepetate jusqu'à 40 cm de profondeur, un affinage par deux passages de disques, un apport annuel modéré d'engrais minéral NP (70-60-0), la succession des associations orge-vesce (1993), maïs-fève-haricot (1994) puis maïs-fève (1995), les

résidus de culture étant laissés sur le sol ; sa pente est de 4.4%. La deuxième parcelle diffère du témoin par un affinage poussé (quatre passages de disques) et une pente de 2.5%. La troisième parcelle diffère du témoin par la succession orge (1993), maïs (1994 et 1995) et une pente de 3.2%. La quatrième parcelle diffère du témoin par l'apport de fumier ($20 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), l'absence de fumure minérale et une pente de 3.4%. La cinquième parcelle diffère du témoin par un défonçage du tepetate jusqu'à 60 cm de profondeur au lieu de 40 et une pente de 4.7%.

Le site est équipé d'un pluviographe et de trois pluviomètres. Les pluviosités annuelles sont respectivement de 411, 736 et 768 mm en 1993, 1994 et 1995, soit une année sèche puis deux années normales. Pour ces trois années, l'indice d'érosivité des pluies atteint 954, 2151 and $1961 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1}$ respectivement, soit une moyenne de $1683 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1}$.

Mesures du ruissellement et de l'érosion

Pour chaque parcelle, le volume ruisselé est évalué après chaque épisode pluvieux en additionnant les volumes d'eau de chaque cuve (et du bac de sédimentation, à Mbissiri) pondérés par un coefficient multiplicateur dépendant des partiteurs d'alimentation. Ce volume ruisselé est rapporté à la surface de la parcelle pour calculer la hauteur de la lame ruisselée (mm). Le coefficient de ruissellement annuel est le rapport entre la lame ruisselée et la hauteur de pluie durant une année, le coefficient de ruissellement trisannuel est le rapport entre la lame ruisselée et la hauteur de pluie durant trois années (mm mm^{-1}).

Les sédiments grossiers sont recueillis au fond de la première cuve (Agonkanmey, San Miguel) ou du bac de sédimentation (Mbissiri). A Agonkanmey, ils sont pesés humides, et leur poids sec est déterminé après séchage d'échantillons à 105°C ; à Mbissiri, ils sont également pesés humides, mais leur poids sec est déduit de courbes d'étalonnage obtenues en pesant des quantités croissantes de sol sec dans un seau rempli d'eau ; à San Miguel, ils sont entièrement séchés à 105°C puis pesés ; ces trois types de détermination sont supposés donner des résultats équivalents. Le poids des sédiments en suspension est évalué après floculation éventuelle et séchage à 105°C d'aliquotes prélevées dans la première cuve (Mbissiri) ou dans toutes les cuves (Agonkanmey, San Miguel). La perte en terre annuelle est la somme sur une année des poids secs de sédiments grossiers et de sédiments en suspension ; pour les parcelles étudiées, la perte en terre annuelle moyenne est calculée sur trois ans ($\text{t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$).

Analyses de sol : stabilité des agrégats, analyse mécanique, teneur en carbone

Un échantillon composite de sol est réalisé sur chaque parcelle, à partir de trois (Agonkanmey) ou d'une dizaine (Mbissiri, San Miguel) de prélèvements élémentaires à la pelle à 0-10 cm de profondeur, régulièrement répartis sur la parcelle. Sur les parcelles d'Agonkanmey, le sol est prélevé au début de 1998, sur celles de Mbissiri, au début de 1995, et sur celles de San Miguel, au début de 1997. Les échantillons de sol sont séchés à l'air puis tamisés à 2 mm.

La stabilité de l'agrégation est étudiée au moyen d'un test dérivé de celui proposé par Kemper et Rosenau (1986). Ce test consiste à immerger 4 g d'échantillon dans l'eau déminéralisée pendant 2 h, puis à les tamiser à 0.2 mm dans cette eau. Ces opérations sont réalisées au moyens de tamis et d'un appareillage adaptés, réalisés d'après les plans de Kemper et Rosenau (1986). Les tamis sont des tubes cylindriques en acier inoxydable (hauteur 12.5 cm, diamètre 4.5 cm) ouverts au sommet et fermés à la base par une grille à maille carrée d'écartement 0.2 mm. L'appareil d'agitation comprend un plateau supérieur mobile percé d'orifices pour recevoir huit tamis, et d'un plateau inférieur fixe recevant un béccher sous chaque tamis ; un moteur permet d'animer le plateau supérieur (amplitude 1.3 cm, fréquence $35 \text{ cycles min}^{-1}$). L'immersion est réalisée en plaçant le plateau supérieur de l'appareil en position basse, ce qui plonge la base des tamis, donc les échantillons, dans l'eau des bécchers. Le tamisage est réalisé en mettant le moteur en marche pendant 6 min, ce

qui provoque émergences et immersions alternatives de la base des tamis dans l'eau des béchers. Les tamis sont ensuite portés à l'étuve (105°C) puis pesés, afin de déterminer le poids de la fraction >0.2 mm. La teneur en sables grossiers (>0.2 mm) est déterminée avec le même appareillage, en tamisant la fraction >0.2 mm dans une solution dispersante (NaOH 0.05M), le poids des débris végétaux grossiers étant négligé. La teneur en macroagrégats stables (>0.2 mm), notée Macroagr1, est définie comme suit :

Macroagr1 = fraction >0.2 mm – sables grossiers.

La teneur en particules <0.02 mm recueillies dans les béchers après tamisage dans l'eau, notée Microagr1 (elle comprend des microagrégats vrais, des limons fins et des argiles), est déterminée par sédimentation (méthode de la pipette Robinson). La teneur en éléments de taille 0.02-0.2 mm, notée Mésoagr1 (mésoagrégats vrais, limons grossiers et sables fins), est aussi calculée par différence :

Mésoagr1 = 1000 – sables grossiers – Macroagr1 – Microagr1.

Les fractions >0.2 mm, sables grossiers, Macroagr1, Mésoagr1 et Microagr1 sont exprimés en g.kg⁻¹ de sol dispersé <2 mm. Les différentes fractions sont également exprimées en proportion du sol sans sables grossiers :

Macroagr2 = 1000 Macroagr1 / (1000 – sables grossiers)

Mésoagr2 = 1000 Mésoagr1 / (1000 – sables grossiers)

Microagr2 = 1000 Microagr1 / (1000 – sables grossiers)

avec Macroagr2 + Mésoagr2 + Microagr2 = 1000 g kg⁻¹ de sol dispersé <0.2 mm. Quatre répétitions sont réalisées pour chaque échantillon.

L'analyse mécanique en cinq classes (argile <0.002 mm, limons fins 0.002-0.02 mm, limons grossiers 0.02-0.05 mm, sables fins 0.05-0.2 mm et sables grossiers 0.2-2 mm) est réalisée par la méthode de la pipette Robinson, après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium (Rouiller *et al.*, 1994). Le carbone et l'azote totaux sont extraits par combustion sous courant d'oxygène et dosés par cellule infrarouge, avec un microanalyseur CHN Leco 600. Le pH est déterminé dans l'eau, avec un rapport sol : solution de 1 : 2.5.

Traitements statistiques

Les différences de taux de ruissellement trisannuel ou de perte en terre moyenne annuelle entre parcelles sont évaluées par un test *t* apparié de Student. Les différences entre taux d'agrégats moyens entre parcelles sont évaluées par un test *t* non apparié de Student. Dans les deux cas, il n'y a pas d'hypothèse sur la normalité des distributions. Les moyennes étant calculées à partir du même nombre d'années (ruissellement-érosion) ou de répétitions (agrégation), il n'y a pas non plus d'hypothèse sur l'égalité des variances (Dagnélie, 1975).

Résultats

Les principales caractéristiques de l'horizon 0-10 cm des parcelles étudiées sont présentées dans le Tableau 1.

Ruissellement et érosion

A Agonkanmey (Bénin), Mbissiri (Cameroun) et San Miguel Tlaxpan (Mexique), le taux de ruissellement annuel maximal atteint 0.40, 0.45 et 0.25 mm mm⁻¹, et la perte en terre annuelle maximale, 46, 44 et 16 t ha⁻¹ an⁻¹. A Agonkanmey, le taux de ruissellement trisannuel est 1.5, 2.1 et 3.6 fois plus élevé avec engrais minéral, mucuna bisannuel et sans engrais ni mucuna, respectivement, qu'avec mucuna annuel ; la perte en terre annuelle moyenne est environ 3 fois plus importante avec engrais minéral et mucuna bisannuel, et 10 fois plus importante sans apport ni mucuna, qu'avec mucuna annuel. A Mbissiri, en comparaison de celui mesuré sur semis direct (défriche récente), le taux de ruissellement

trisannuel est environ 8 fois plus important sur labour récent, 12-13 fois plus important sur labour ancien, mais environ 16 fois plus faible sur savane ; la perte en terre annuelle moyenne est 3 et 8-10 fois plus importante sur les parcelles récemment et anciennement labourées, respectivement, et 4 fois plus faible sur savane, que sur semis direct (défriche récente). A San Miguel, par rapport à ce qui est mesuré sur la parcelle témoin, le taux de ruissellement trisannuel et la perte en terre annuelle moyenne sont respectivement 1.1 et 1.2 fois plus importants avec quadruple passage de disques, 1.9 et 2.3 fois plus importants avec apport de fumier (sans engrais), 4.5 et 6.3 fois plus importants en culture pure, et 4.4 et 10.8 fois plus importants avec sous-solage profond.

Tableau 1. Principales caractéristiques des parcelles expérimentales (0-10 cm)

Pays et traitement	Argile		Sables		C	N	pH eau	Pente (%)
	Limons	fins (g 100 g ⁻¹)	fins	grossiers				
Bénin								
Mucuna chaque année	14	8	22	55	12.3	1.01	5.0	4.0
Mucuna un an sur deux	18	5	22	53	9.3	0.80	5.2	4.0
Traditionnel (sans apport)	22	8	19	50	6.3	0.57	5.1	4.0
Avec engrais minéral	13	4	21	60	7.8	0.67	5.2	4.0
Cameroun								
Savane	8	10	22	60	8.1	0.40	6.6	1.0
Défriche récente, semis direct	6	5	23	67	3.9	0.22	-	2.0
Défriche récente, labour	7	10	21	63	3.7	0.19	-	2.0
Défriche ancienne, avec résidus	10	10	25	56	2.8	0.20	5.9	2.5
Défriche ancienne, sans résidus	-	-	-	-	2.6	0.17	6.0	2.5
Mexique								
Sous-solage profond	26	43	18	11	3.3	0.24	6.9	4.7
Culture pure	24	40	20	14	3.0	0.21	7.4	3.2
Apport de fumier	25	33	17	22	4.8	0.28	7.9	3.4
Quadruple passage de disques	30	36	19	12	2.8	0.16	7.6	2.5
Témoin	24	37	21	15	3.7	0.22	7.4	4.4

Stabilité des agrégats (Figure 1)

La teneur en sables grossiers à 0-10 cm est plus élevée à Agonkanmey (Bénin) et Mbissiri (Cameroun) qu'à San Miguel (Mexique) : 450-650 contre 100-150 g kg⁻¹. A Agonkanmey, Macroagr2, Mésoagr2 et Microagr2 sont de l'ordre de 400-700, 300-550 et 30-50 g kg⁻¹ sol <0.2 mm, respectivement ; à Mbissiri, ils sont de l'ordre de 200-500, 450-650 et 70-150 g kg⁻¹ sol <0.2 mm, et à San Miguel, de l'ordre de 350-500, 450-550 et 70-100 g kg⁻¹ sol <0.2 mm, respectivement. A Agonkanmey, Mbissiri et San Miguel, Microagr2 est environ 9-21, 1.5-7 et 3-7 fois moins élevé que Macroagr2, et environ 8-12, 4-6 et 5-6 fois moins important que Mésoagr2, respectivement.

A Agonkanmey, le taux de macroagrégats stables sur les parcelles avec engrais minéral et sans apport ni mucuna est respectivement 0.9 et 0.6-0.7 fois celui mesuré sous mucuna annuel ; en revanche, le taux de microagrégats stables est respectivement 1.1 et 1.4-1.6 fois plus grand sur ces parcelles que sous mucuna annuel. A Mbissiri, le taux de macroagrégats stables sous savane, sous labour récent et ancien est respectivement 1.1, 0.8 et 0.5-0.7 celui

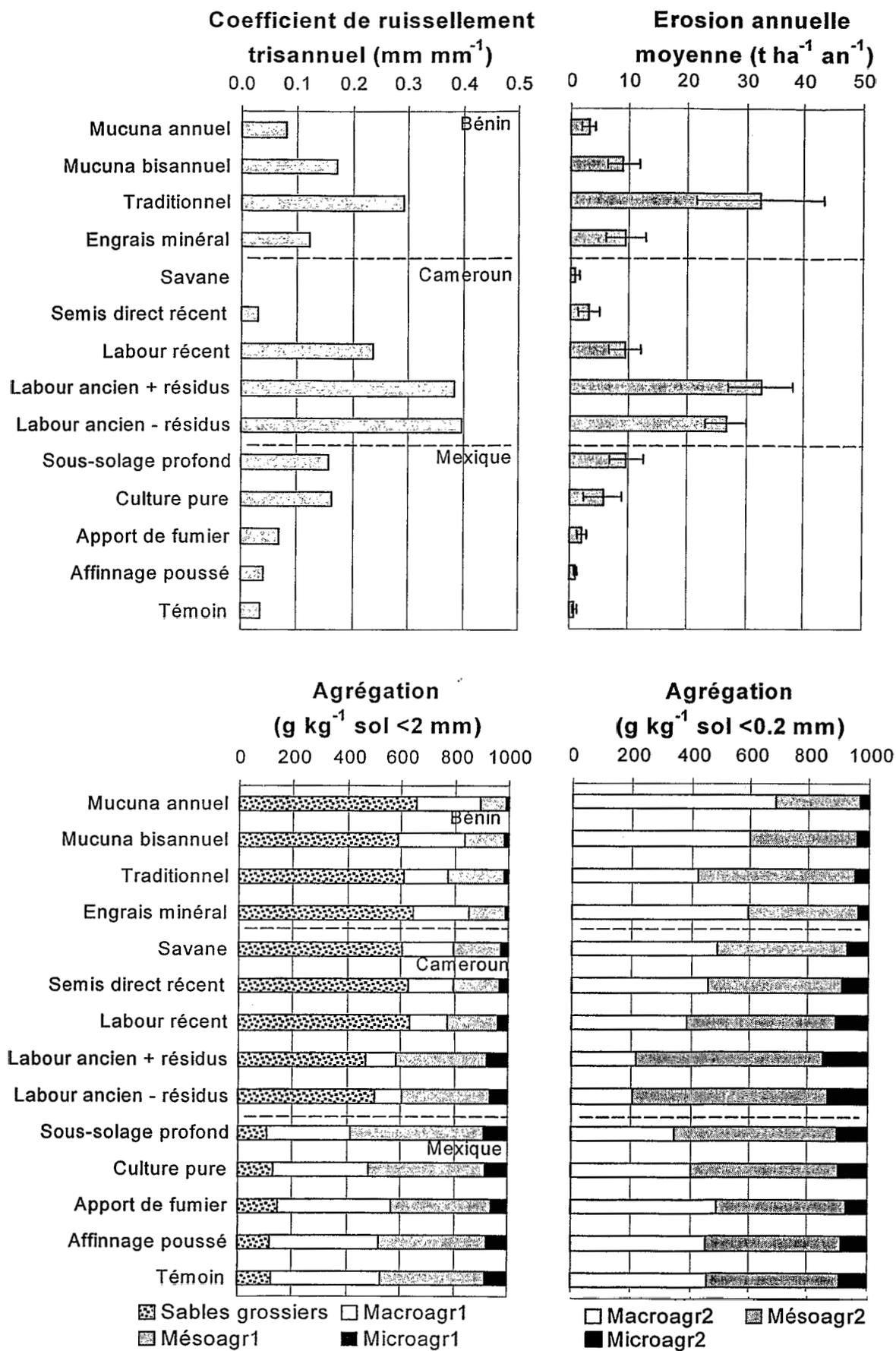


Figure 1. Coefficient de ruissellement trisannuel, perte en terre annuelle moyenne et agrégation sur les parcelles étudiées (Macroagr $>0.2 \text{ mm}$; $0.02 < \text{Mésogr} < 0.2 \text{ mm}$; $\text{Microagr} < 0.02 \text{ mm}$)

mesuré sous semis direct (défriche récente), tandis que le taux de microagrégats est 0.8, 1.2 et 1.5-2.3 fois plus grand. A San Miguel, les différences entre parcelles sont moins marquées que dans les autres situations, et les taux de macroagrégats stables et de microagrégats de la parcelle témoin sont généralement compris entre 0.9 et 1.1 fois ceux mesurés sur les autres parcelles. Au sein de chaque situation, les différences de teneur en mésoagrégats entre parcelles sont généralement du même ordre que celles relevées entre teneurs en microagrégats.

Teneur en carbone et relation avec l'agrégation

A Agonkanmey (Bénin), la teneur en carbone C à 0-10 cm de profondeur varie de 6 (sans apport ni mucuna) à 12 g kg⁻¹ (mucuna annuel); à Mbissiri (Cameroun), cette teneur varie de moins de 3 (labour ancien) à 8 g kg⁻¹ (savane); à San Miguel (Mexique), elle varie de moins de 3 (quadruple passage de disques) à 5 g kg⁻¹ (avec fumier).

Sur l'ensemble des trois sites (14 parcelles), on relève des corrélations linéaires simples entre la plupart des paramètres d'agrégation de la couche de sol 0-10 cm et sa teneur en carbone C (Figure 2): C est significativement corrélé avec Microagr2, Microagr1, Mésoagr2 et Mésoagr1 ($-0.837 \leq r \leq -0.751$; $p < 0.01$), avec Macroagr2 ($r = 0.827$), mais pas avec Macroagr1 ($r = -0.107$). Certains paramètres d'agrégation sont plus étroitement corrélés avec des fonctions puissances de C qu'avec des fonctions linéaires: ainsi, Microagr2, Microagr1 et Mesoagr1 sont plus étroitement corrélés avec C^{-0.87}, C^{-1.35} et C^{-0.84} ($-0.915 \leq r \leq -0.825$; $p < 0.01$), respectivement, qu'avec C. De plus, l'ajustement de ces paramètres d'agrégation à des fonctions puissance de C met en évidence des effets de seuil: les variations de Microagr2, Microagr1 et Mésoagr1 restent relativement limitées lorsque C est supérieur à 8 g kg⁻¹.

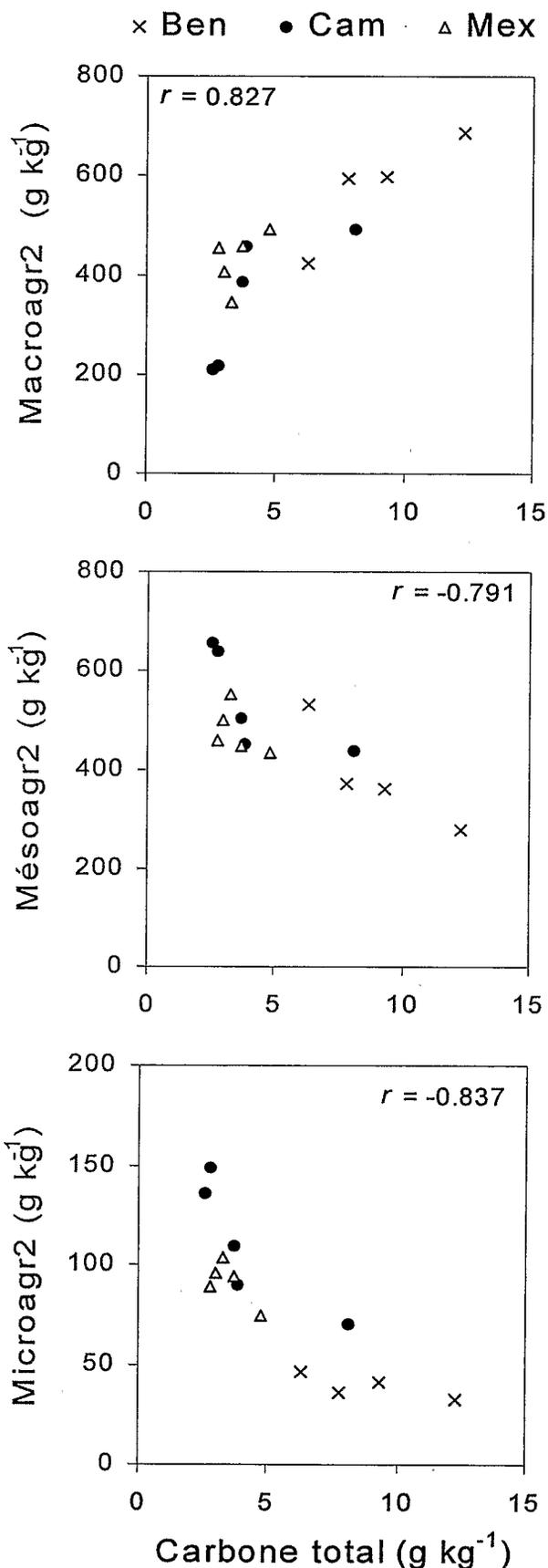


Figure 2. Relations entre carbone et agrégation (horizon 0-10 cm)

Relations entre ruissellement ou perte en terre et stabilité de l'agrégation ou teneur en carbone

Sur l'ensemble des trois sites (14 parcelles), des corrélations linéaires simples entre taux de ruissellement trisannuel ou perte en terre annuelle moyenne, d'une part, et paramètres d'agrégation de la couche de sol 0-10 cm, d'autre part, sont relevées (Figure 3). Ainsi, le coefficient de ruissellement trisannuel et la perte en terre annuelle moyenne sont corrélés avec Macroagr1 et Macroagr2 ($-0.686 \leq r \leq -0.617$; $p < 0.05$), avec leurs fonctions inverses $1/\text{Macroagr1}$ et $1/\text{Macroagr2}$ ($0.714 \leq r \leq 0.800$; $p < 0.01$), avec Mésogr2 ($r = 0.727$ et 0.689 , respectivement; $p < 0.01$), mais pas avec les autres paramètres d'agrégation ou C ($|r| < 0.5$; $p > 0.05$).

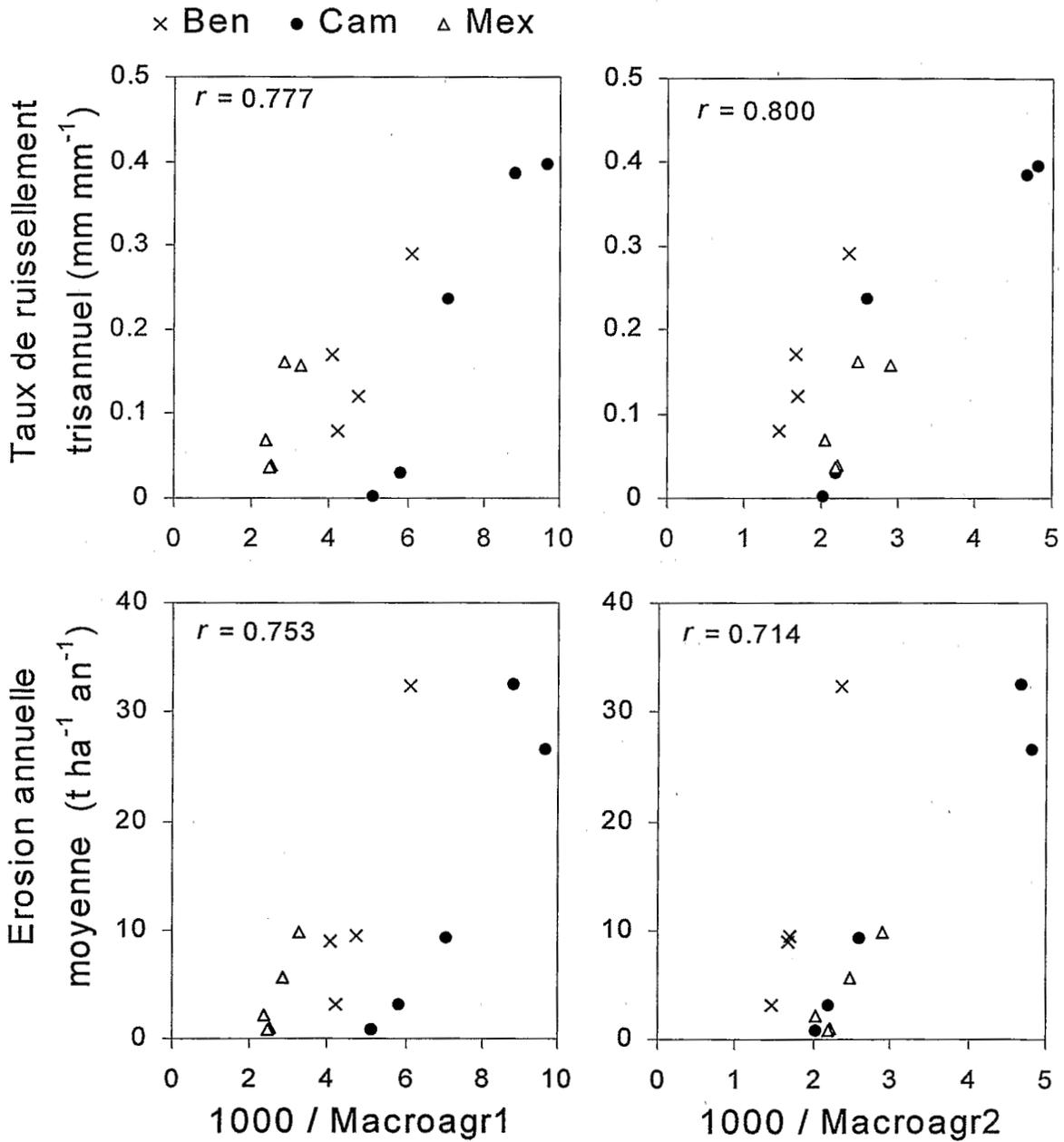


Figure 3. Relation entre macroagrégation et ruissellement ou perte en terre

Les corrélations linéaires multiples entre (i) ruissellement trisannuel ou perte en terre annuelle moyenne et (ii) pente, indice moyen d'érosivité des pluies et paramètres d'agrégation sont plus étroites que celles impliquant uniquement les paramètres d'agrégation. Ainsi, le taux de ruissellement trisannuel est corrélé à la pente, à l'indice moyen d'érosivité des pluies et à Macroagr2, 1/Macroagr1, 1/Macroagr2 ou Mésoagr2 ($0.913 \leq |R| \leq 0.916$; $p < 0.01$). De même, la perte en terre annuelle moyenne est corrélée à la pente, à l'indice moyen d'érosivité des pluies et à Macroagr2, Mésoagr1 ou Mésoagr2 ($0.914 \leq |R| \leq 0.940$; $p < 0.01$).

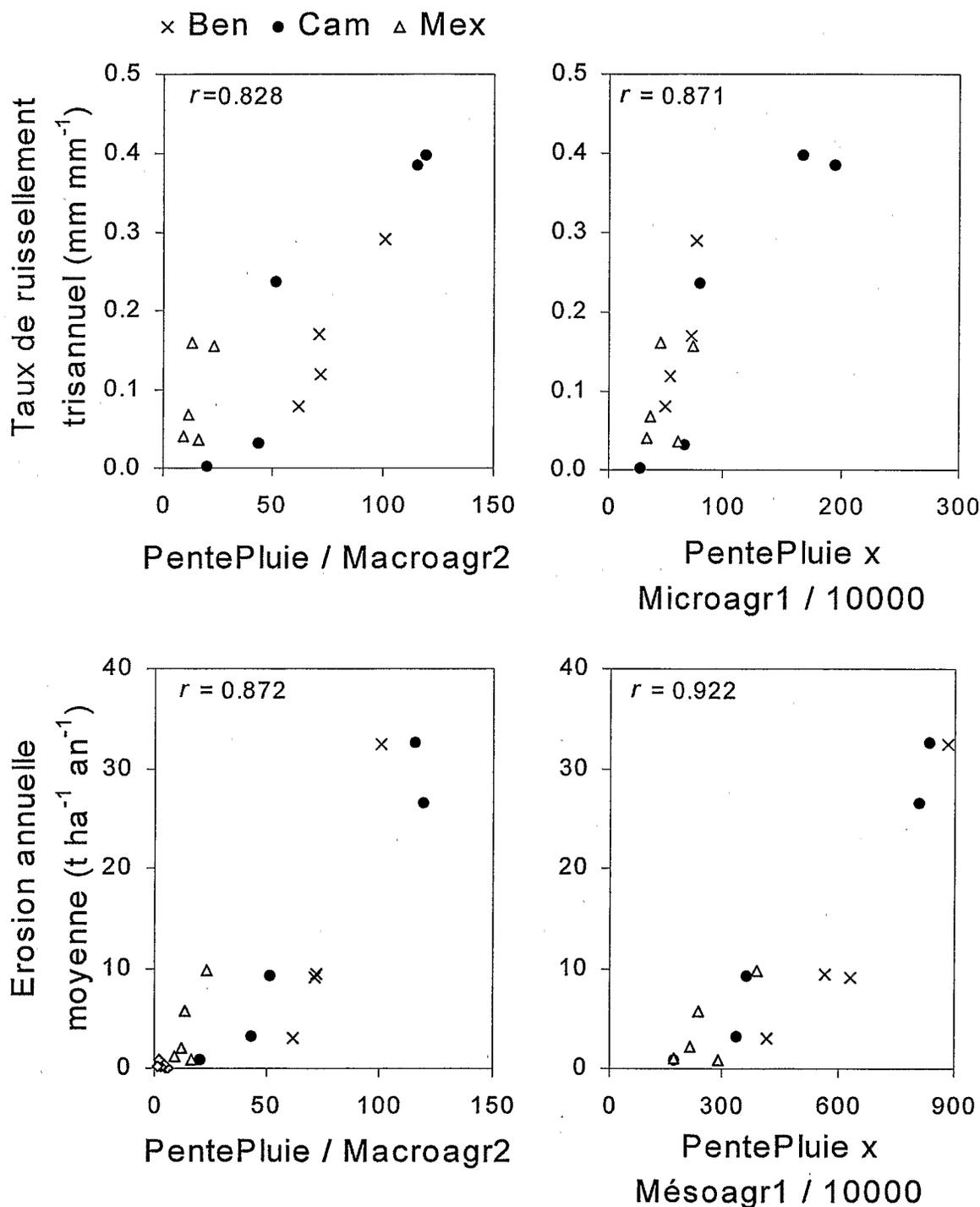


Figure 4. Relations entre agrégation, pente, pluie, et ruissellement ou érosion

Des corrélations linéaires simples sont également relevées entre (i) le taux de ruissellement trisannuel ou la perte en terre annuelle moyenne et (ii) le produit d'un des paramètres d'agrégation par un facteur PentePluie, égal au produit de la pente (%) par l'indice moyen d'érosivité des pluies (MJ mm (ha h)^{-1}). Ainsi, le taux de ruissellement trisannuel et la perte en terre annuelle moyenne sont corrélés au produit du facteur PentePluie par $1/\text{Macroagr2}$, Mésoagr1 , Microagr1 ou $1/\text{C}$ ($0.817 \leq |R| \leq 0.922$; $p < 0.01$) (Figure 4).

Discussion et conclusion

Ruissellement et perte en terre

Les parcelles d'Agonkanmey et de Mbissiri subissent une agressivité climatique comparable (indices d'érosivité des pluies voisins), et ont des teneurs en sables élevées ; malgré des longueurs, des pentes et des teneurs superficielles en argile et en matière organique différentes (plus élevés à Agonkanmey), elles ont également des maxima de taux de ruissellements et de pertes en terre annuels voisins. Les maxima annuels sont moindres à San Miguel, où le climat est moins agressif.

Au sein de chaque situation, ruissellement et perte en terre sont généralement plus importants dans les parcelles travaillées longtemps que dans celles travaillées depuis peu d'années ou non travaillées (Mbissiri), ils sont également plus importants dans les parcelles en culture intensive que dans les autres (Mbissiri, San Miguel). Ruissellement et perte en terre sont aussi plus élevés en général dans les parcelles en culture pure que dans celles en culture associée du même site (Agonkanmey, San Miguel). Mais ils sont généralement plus faibles dans les parcelles avec engrais minéral que dans celles du même site sans engrais (Agonkanmey, San Miguel), probablement en relation avec une meilleure couverture du sol par la végétation. En revanche, l'effet de la restitution des résidus de culture sur le ruissellement et l'érosion n'est pas clair (Mbissiri). L'augmentation du ruissellement et de l'érosion avec l'augmentation de l'ancienneté et de l'intensité du travail du sol, et avec la diminution de la couverture du sol, est rapportée par de nombreux auteurs, sur la base d'expérimentations en microparcelles ($< 2 \text{ m}^2$) sous pluies simulées (West *et al.*, 1991 ; Bradford et Huang, 1994 ; Barthès *et al.*, 1998) ou en parcelles d'érosion sous pluies naturelles (Roose, 1983, 1994). Certains auteurs notent toutefois que le ruissellement et l'érosion cessent parfois d'augmenter quelques années après la mise en culture (Roose et Sarrailh, 1989) ; d'autres notent également que le ruissellement peut parfois être plus élevé sur semis direct que sur labour (Myers et Waggar, 1996 ; Ghidry et Alberts, 1998).

Stabilité des agrégats

Après immersion et tamisage dans l'eau, la granulométrie est dominée par les macro- et les mésoagrégats, avec peu de microagrégats et de particules dispersées. Au sein de chaque situation, les parcelles anciennement ou intensivement travaillées, où ruissellement et érosion sont élevés, ont moins de macroagrégats et plus de microagrégats que les autres parcelles (Mbissiri, San Miguel). Cet effet, lié à la destruction mécanique des macroagrégats et à l'activation de la minéralisation du carbone sous l'effet du travail du sol, est relevé par plusieurs auteurs (Quantin et Combeau, 1962 ; West *et al.*, 1991 ; Barthès *et al.*, 1998) ; en effet, nos résultats mettent en évidence une relation étroite entre taux de carbone et agrégation, notée par de nombreux auteurs (Tisdall et Oades, 1982 ; Haynes *et al.*, 1991 ; Barthès *et al.*, 1998). Les parcelles en culture pure, qui ruissellent et érodent généralement plus, ont moins de macroagrégats et plus de microagrégats que celles en culture associée (Agonkanmey, San Miguel) ; ceci pourrait être en relation avec des restitutions de résidus de culture plus importantes, donc avec un taux plus élevé de carbone sous culture associée que sous culture pure, comme Triomphe (1996) et Azontonde *et al.* (1998) l'ont également noté.

Par ailleurs, si les parcelles fertilisées ruissellent et érodent généralement moins que celles sans engrais, l'effet de la fertilisation sur l'agrégation de l'horizon de surface est variable : les sols recevant une fertilisation minérale contiennent plus de macroagrégats stables et moins de microagrégats que ceux ne recevant aucun apport (Agonkanmey) ; mais ils ont autant de macroagrégats et plus de microagrégats que ceux recevant du fumier mais pas d'engrais (San Miguel). Ces effets pourraient également être dus à l'influence des pratiques culturales sur le taux de carbone de l'horizon de surface.

Relations entre stabilité des agrégats de l'horizon de surface et ruissellement ou érosion

Sur l'ensemble des 14 parcelles d'érosion étudiées, le taux de ruissellement trisannuel et la perte en terre annuelle moyenne sont étroitement liés à la stabilité des agrégats de l'horizon de surface, en particulier au taux de macroagrégats stables. Ainsi, lorsque des échantillons de sol superficiel séché à l'air puis tamisé à 2 mm sont immergés puis tamisés dans l'eau, les mécanismes en jeu permettent d'appréhender de manière satisfaisante le taux de ruissellement et la perte en terre annuels mesurés au champ. L'éclatement est le principal mécanisme de désagrégation lors de l'humectation rapide d'échantillons de sol sec. D'autres mécanismes sont en jeu dans l'érosion, tels que l'arrachement et le transport par les gouttes de pluie ou le ruissellement. Mais nos résultats indiquent que la sensibilité des agrégats à l'éclatement rend correctement compte de la sensibilité du sol au ruissellement et à l'érosion, au moins pour des parcelles sous végétation herbacée ayant un horizon de surface sableux à argilo-sableux et une pente de longueur (<50 m) et de déclivité (<5%) modérées. On sait d'ailleurs que la stabilité des agrégats de l'horizon de surface s'oppose au détachement de particules facilement transportables, et donc à la fermeture de la porosité de surface et au ruissellement (Le Bissonnais, 1996). Le taux de carbone de l'horizon de surface s'avère être un moins bon indicateur d'érodibilité, malgré l'existence de relations étroites entre taux de carbone et stabilité de l'agrégation. Des relations entre stabilité de l'agrégation et érodibilité sont rapportées par de nombreux auteurs, sur la base de simulations de pluies au laboratoire (Bryan, 1968 ; Reichert et Norton, 1994 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997) et au champ sur microparcelles (Roth *et al.*, 1987 ; Barthès *et al.*, 1999). Mais peu d'auteurs rapportent de telles relations à l'échelle de la parcelle et sous pluies naturelles (Quantin et Combeau, 1962), ainsi que nous l'avons fait.

La prise en compte de la pente et de l'agressivité climatique en plus de l'agrégation permet une meilleure explication du ruissellement et de l'érosion. Les relations obtenues sont alors proches de celles proposées par les équations USLE (Wischmeier et Smith, 1978) et RUSLE (Renard *et al.*, 1995), pour des gammes relativement étroites de longueur de pente (20-40 m), de déclivité (1-5%), de couvert végétal (herbacé) et de pratiques conservatoires (absence). La stabilité des agrégats de l'horizon de surface peut alors être considérée comme rendant compte du facteur d'érodibilité *K* de Wischmeier et Smith (1978).

Bibliographie

- Amézketa E., Singer M.J., Le Bissonnais Y., (1996).** Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 60 : 888-894.
- Azontonde A., (1993).** Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 28(2) : 217-226.
- Azontonde A., Feller C., Ganry F., Rémy J.C., (1998).** Le mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au sud du Bénin. *Agriculture et Développement* 18 : 55-62.

- Barthès B., Albrecht A., Asseline J., De Noni G., Roose E., Viennot M. (1998).** Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron). *Etude et Gestion des Sols* 5(3) : 157-169.
- Barthès B., Albrecht A., Asseline J., De Noni G., Roose E. (1999).** Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30 : 1929-1938.
- Boli B.Z. (1996).** Fonctionnement des sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord Cameroun (expérimentation au champ en parcelles d'érosion à Mbissiri). Thèse Doctorat Université Dijon, 344 p.
- Boli B.Z., Roose E., Bep A Ziem B., Sanon K., Waechter F. (1993).** Effets des techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la production de coton et maïs sur un sol ferrugineux tropical sableux. Recherche de systèmes de culture intensifs et durables en région soudanienne du Nord-Cameroun (Mbissiri, 1991-1992). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 28(2) : 309-325.
- Bradford J.M., Huang C.H. (1994).** Interrill erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil and Tillage Research* 31 : 353-361.
- Bryan R.B. (1968).** The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma* 2 : 5-26.
- Casenave A., Valentin C. (1989).** Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 229 p.
- Dagnélie P. (1975).** Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. 2^{nde} édition. Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique.
- Ghidey F., Alberts E.E. (1998).** Runoff and soil losses as affected by corn and soybean tillage systems. *Journal of Soil and Water Conservation* 53(1) : 64-70.
- Haynes R.J., Swift R.S., Stephen R.C. (1991).** Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water-stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil and Tillage Research* 19 : 77-87.
- Hénin S., Monnier G., Combeau A. (1958).** Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques* 9 : 73-92.
- Hudson N.W. (1993).** Field measurements of soil erosion and runoff. *Bulletin Pédologique* FAO n°68, Rome.
- Kemper W.D., Rosenau R.C. (1986).** Aggregate stability and size distribution. In « *Methods of soils analysis. Part 1* » Klute édit. *Agronomy Monography* n°9, 2^{nde} édition, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 425-442.
- 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.
- Le Bissonnais Y., Arrouays D. (1997).** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48 : 39-48.
- Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Chaplot V., Fox D., King D., Daroussin J. (1998).** Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil and Tillage Research* 46 : 69-80.
- Luk S., (1977).** Rainfall erosion of some Alberta soils ; a laboratory simulation study. *Catena* 3 : 295-309.
- Mutchler C.K., Murphree C.E., McGregor K.C. (1988).** Laboratory and field plots for soil erosion studies. In « *Soil erosion research methods* » Lal édit. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, 9-36.

- Myers J.L., Waggoner M.G. (1996).** Runoff and sediment loss from three tillage systems under simulated rainfall. *Soil and Tillage Research* 39 : 115-129.
- Quantin P. (1997).** Régénération et conservation des sols volcaniques indurés et stériles d'Amérique Latine (Chili, Equateur, Mexique). Rapport scientifique final, Commission Européenne, Bruxelles.
- Quantin P., Combeau A. (1962).** Relation entre érosion et stabilité structurale du sol. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 254 : 1855-1857.
- Quantin P., Prat C., Zebrowski C. (1993).** Erosion et restauration de sols volcaniques indurés « tepetates » de la région de Mexico et de Tlaxcala, Mexique. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 28(2) : 175-185.
- Reichert J.M., Norton L.D. (1994).** Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. *Soil Science* 158(3) : 159-169.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. (1995).** Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA, Agriculture Handbook 703, 384 p.
- Roose E. (1977).** Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. ORSTOM, Paris, sér ;Travaux et Doc.n° 78 : 108 p.
- Roose E. (1983).** Ruissellement et érosion avant et après défrichage en fonction du type de culture en Afrique occidentale. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 20(4) : 327-339.
- Roose E. (1994).** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique FAO n°70*, Rome, 420 p.
- Roose E., Sarrailh J.M. (1989).** Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie* 25(1-2) : 7-30.
- Roth C.H., Vieira M.J., Derpsch R., Meyer B., Frede H.G. (1987).** Infiltrability of an oxisol in Parana, Brazil, as influenced by different crop rotations. *Journal of Agronomy and Crop Science* 159 : 186-191.
- Rouiller J., Souchier B., Bruckert S., Feller C., Toutain F., Védry J.C. (1994).** Méthodes d'analyse des sols. In « *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol* » Bonneau et Souchier édit. Masson, Paris, 619-652.
- Tisdall J.M., Oades J.M. (1982).** Organic matter and water-stable aggregation in soils. *Journal of Soil Science* 33 : 141-163.
- Triomphe B. (1996).** Un système de culture original et performant dans une zone de montagne du tropique humide : la rotation maïs/mucuna au Nord-Honduras. In « *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides* » Pichot, Sibelet et Lacoëuilhe édit. CIRAD, Montpellier, 318-328.
- West L.T., Miller W.P., Langdale G.W., Bruce R.R., Laflen J.M., Thomas A.W. (1991).** Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia Piedmont. *Soil Science Society of America Journal* 55 : 460-466.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978).** Predicting rainfall erosion losses. A guide to erosion planning. USDA, Agriculture Handbook 537, 58 p.
- Yoder R.E. (1936).** A direct method of aggregate analysis of soils and a study of nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy* 28 :337-351.

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Barthès, B.; Azontonde, A.; Boli Baboulé, Z.; Prat, C.; Roose, E. - Agrégation du sol, ruissellement et érosion à l'échelle parcellaire dans trois régions intertropicales (Bénin, Cameroun, Mexique), pp. 373-387, Bulletin du RESEAU EROSION n° 20, 2000.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr