

Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron)

B. Barthès, A. Albrecht, J. Asseline, G. De Noni, E. Roose, M. Viennot

ORSTOM-LCSC. BP 5045. F-34032 Montpellier cedex 1

RÉSUMÉ

Dans les Rougiers de Camarès (Aveyron), les versants cultivés sont sensibles à l'érosion hydrique. Cette sensibilité résulte des caractéristiques du milieu physique, mais également des conditions d'exploitation de ce milieu. L'objectif du travail présenté est d'évaluer l'influence de différentes pratiques culturales (labour, travail superficiel ou semis direct, avec engrais ou fumier) sur l'érodibilité, la stabilité de l'agrégation et la teneur en carbone d'un régosol des Rougiers. L'étude porte également sur les relations entre érodibilité (évaluée par simulation de pluie sur sol nu retravaillé manuellement, initialement sec), stabilité de l'agrégation (évaluée par immersion puis tamisage dans l'eau) et teneur en carbone de la couche de sol 0-10 cm.

Ruissellement et perte en terre sont importants dans les parcelles labourées, plus faibles en semis direct (où le ruissellement reste notable), intermédiaires en travail superficiel, sans influence nette du type d'apport (engrais ou fumier). Dans les parcelles avec engrais, la macroagrégation stable (> 0,2 mm) est plus développée en semis direct qu'en labour; en revanche, elle ne varie pas significativement parmi les parcelles avec fumier. Les profils de teneur en carbone montrent une concentration du carbone en surface dans les parcelles en semis direct et travail superficiel, mais sa dilution sur l'épaisseur des labours.

Ruissellement, turbidité et perte en terre (produit des deux premiers) sont liés à la stabilité de l'agrégation et à la teneur en carbone de la couche de sol 0-10 cm. En début de pluie (30 mn), ruissellement et perte en terre sont étroitement liés à la stabilité de la macroagrégation, mais pas à la teneur en carbone (bien que stabilité des macroagrégats et teneur en carbone soient corrélées). En fin de pluie (ruissellement stabilisé), turbidité et perte en terre sont liées étroitement à la teneur en carbone, et moins étroitement, à la stabilité de la macroagrégation. L'effet des pratiques culturales sur l'érodibilité dépend donc largement de leur effet sur la stabilité de l'agrégation et sur la teneur en carbone de la couche de sol superficiel.

Mots clés

Pratiques culturales, érodibilité, simulation de pluie au champ, stabilité des agrégats, carbone du sol.

SUMMARY

CULTURAL PRACTICES AND SOIL ERODIBILITY IN THE ROUGIERS DE CAMARÈS AREA (AVEYRON, FRANCE)

In the Rougiers de Camarès area (Aveyron, south of France), cultivated hillslopes are susceptible to hydric erosion. It results from physical conditions (steep slopes, soft bedrocks, thin soils), climate aggressivity (frost, storms, drought), as well as farming systems (intensification of tillage, short crop successions, land consolidation).

The main objective of this work was to study the effect of cultural practices (flat or raised mouldboard plowing, superficial tillage, direct drilling, with mineral fertilizers or sheep manure) on soil erodibility, aggregate stability and carbon content in a Rougiers entisol (Udorthent). An other objective was to study the relationships between soil erodibility (which was assessed by field rainfall simulation on

manually retilled bare dry soil), water-stable aggregation (which was assessed by immersion and wet-sieving) and soil carbon content in the 0-10 cm layer.

Runoff and soil losses were important in the plowed plots, lower in the direct drilling plots (where runoff remained rather high) and intermediate in the superficially-tilled plots, with no clear effect of the inputs (table 1, figure 1). In the fertilized plots, water-stable macroaggregation (> 0.2 mm) was higher in the direct drilling plots than in the plowed ones; on the other hand, it did not vary significantly among the manured plots (figure 2). Carbon content profiles showed a carbon concentration near the surface in the direct drilling and superficially-tilled plots, but its dilution within plowed layers (figure 3).

Runoff, turbidity and soil losses (product of runoff and turbidity) were related to water-stable aggregation and soil carbon content in the 0-10 cm layer. At the beginning of the rain (30 min), runoff and soil losses were closely correlated with water-stable macroaggregation, but not with carbon content (table 1, figure 4) although there was a correlation between water-stable macroaggregation and carbon content. At the end of the rain (runoff steady state), turbidity and soil losses were closely correlated with soil carbon content, and to a lesser extent, with water-stable macroaggregation (table 1, figure 4). The effect of cultural practices on erodibility was therefore depending upon their effects on water-stable macroaggregation and carbon content in the superficial soil layer.

Key-words

Cultural practices, erodibility, field rainfall simulation, water-stable aggregates, soil carbon.

RESUMEN

PRÁCTICAS CULTURALES Y ERODIBILIDAD DEL SUELO EN LOS ROUGIERS DE CAMARÈS (AVEYRON, FRANCIA)

En los Rougiers de Camarès (Aveyron, sur de Francia), las vertientes cultivadas son sensibles a la erosión hídrica. Esta sensibilidad resulta de las características del medio físico, pero también de las condiciones de uso del suelo. El objetivo del trabajo presentado es evaluar el efecto de diferentes prácticas culturales (arrado, trabajo superficial o sin trabajo, con abono químico o orgánico) sobre la erodibilidad, la estabilidad de la agregación y el contenido en carbón de un regosol de los Rougiers. El estudio toma en cuenta también las relaciones entre erodibilidad (estimada por simulación de lluvia sobre un suelo desnudo retrabajado manualmente, inicialmente seco), estabilidad de la agregación (estimada por inmersión y luego por tamizado en el agua) y contenido de carbón en la capa de suelo 0-10 cm.

Escorrimento y pérdidas de tierra son importantes en las parcelas trabajadas, menos importantes sobre el suelo no trabajado (donde el escurrimiento es notable), medianas sobre el suelo con trabajo superficial, sin efecto neto del tipo de abono. La macroagregación estable (> 0,2 mm) varía de manera inversa en las parcelas con abono (más desarrollada sobre el suelo sin trabajo que en condiciones de trabajo superficial) pero no varía significativamente en las parcelas con abono orgánico. Los perfiles de contenido de carbono muestran una concentración de carbono en superficie en las parcelas no trabajadas y trabajadas superficialmente, con dilución en el espesor del perfil trabajado.

Escorrimento, turbiedad y pérdidas de suelo (producto de los dos primeros) están ligados a la estabilidad de la agregación y al contenido de carbono en la capa de suelo 0-10 cm. Al inicio de la lluvia (30 mn), escurrimiento y pérdida de suelo están estrechamente ligados a la estabilidad de la macroagregación y no al contenido de carbono (a pesar que estabilidad de la macroagregación y contenido de carbón estén bien corelacionados). Al final de la lluvia (escurrimiento estabilizado), turbiedad y pérdidas de tierra están más estrechamente ligados al contenido de carbono que a la estabilidad de la macroagregación. El efecto de las prácticas culturales sobre la erodibilidad depende entonces en gran parte de su efecto sobre la estabilidad de la agregación y el contenido de carbono de la capa superficial del suelo.

Palabras claves

Prácticas culturales, erodibilidad, simulación de lluvia en el campo, estabilidad de los agregados, carbono del suelo.

Dans les Rougiers de Camarès, au sud du Massif Central, l'érosion hydrique provoque une dégradation des sols, notamment sur les versants cultivés, et une dégradation des infrastructures (Guillerm, 1994). L'intégration de cette région d'élevage ovin (fromage de Roquefort) à l'économie de marché s'est en effet accompagnée d'une forte intensification depuis une cinquantaine d'années : mécanisation, raccourcissement des rotations et travail du sol fréquent, remembrement et suppression des haies, défrichement et mise en culture de terres marginales. Ces évolutions ont accru la sensibilité à l'érosion hydrique de sols souvent peu épais, développés sur des pentes prononcées et une roche-mère friable, et soumis à un climat relativement agressif (gel, orages, sécheresse). Actuellement, 80 % des terres des Rougiers sont ainsi affectées par l'érosion hydrique, en nappe mais également en rigoles et en ravines (Artis, 1995); l'érosion mécanique sèche par le travail du sol est également sensible.

L'érosion hydrique des sols résulte d'un détachement de particules, principalement par la pluie, puis de leur transport, principalement par le ruissellement. La sensibilité du sol à l'érosion, ou érodibilité, est liée à la stabilité des agrégats du sol superficiel. La désagrégation s'accompagne en effet du détachement de particules et de petits agrégats, qui favorise la formation de croûtes superficielles, donc le ruissellement et le transport de particules (De Ploey et Poesen, 1985; Lelong et al., 1993; Le Bissonnais, 1996). La stabilité structurale dépend elle-même de différents paramètres, parmi lesquels la teneur en matière organique joue souvent un rôle important (Tisdall et Oades, 1982; Oades, 1984). L'apparition du ruissellement peut également être favorisée par le tassement et la diminution de porosité du niveau le plus superficiel du sol, sous l'impact des gouttes de pluie (Casenave et Valentin, 1989).

Les pratiques culturales, en particulier le travail du sol, ont une influence sur l'érosion des sols cultivés (Boiffin et Monnier, 1994; Roose, 1994). L'objectif du travail présenté est :

1) d'évaluer l'effet de différentes pratiques culturales (labour, travail superficiel ou semis direct, avec engrais ou fumier) sur la sensibilité d'un régosol des Rougiers au ruissellement et à l'érosion en nappe ;

2) d'évaluer cet effet sur la stabilité des agrégats et la teneur en carbone de la couche de sol 0-10 cm ;

3) d'évaluer les relations entre ruissellement, perte en terre, stabilité des agrégats et teneur en carbone.

SITE, MATÉRIEL ET MÉTHODES

Environnement physique

La petite région des Rougiers de Camarès, vaste d'environ 1 700 km², est située dans l'Aveyron, au sud du Massif Central.

C'est un piémont sédimentaire permien constitué de grès, schistes et pélites alternant en bancs peu épais. Le paysage est très vallonné, avec des altitudes d'environ 300 à 600 m; les pentes dépassent 10 % sur plus de la moitié des surfaces, certains versants étant cultivés sur des pentes de 35 % (Artis, 1995). Dans l'ensemble, les sols sont brun-rougeâtres, peu épais (< 50 cm sauf dans les vallées) et peu évolués, souvent riches en éléments grossiers; ce sont principalement des Lithosols, Régosols, Sols Bruns peu épais. Le climat subit trois influences, méditerranéenne (sécheresse estivale), continentale (gelées hivernales) et océanique (pluies souvent orageuses à l'intersaison); la pluviosité annuelle moyenne est d'environ 800 mm (maxima en mai et octobre), et la température mensuelle moyenne varie de 4 °C en janvier à 20 °C en juillet.

Dispositif agronomique

L'essai est implanté à Montlaur, à l'amont d'une colline, sur une pente de 5 à 12 %. Le sol est brun-rougeâtre, peu profond (< 50 cm), peu évolué (Régosol) et peu différencié verticalement, limono-argilo-sableux (environ 30 % d'argile, 40 % de limons et 30 % de sables) avec une charge variable en éléments grossiers (1 à 15 % à 0-10 cm de profondeur).

Le dispositif étudié croise quatre types de travail du sol avec deux types d'apports, soit huit parcelles expérimentales semées en avoine de printemps, couvrant chacune 18 m x 9 m. Quatre types de travail du sol sont testés. LP est un labour à plat conventionnel, profond de 25 cm environ, réalisé avec une charrue à socs à versoirs hélicoïdaux écartés de 16", qui retourne presque complètement la bande de terre découpée; ce labour est suivi d'une préparation du lit de semence comprenant les passages d'une herse rotative combinée à un rouleau léger, d'un rotalabour combiné au semoir, puis d'un rouleau lourd de type cultipacker. LD est un labour dressé, profond de 25 cm environ, réalisé par la même charrue mais avec un écartement entre socs de 12", qui détermine le maintien de la bande de terre découpée en position subverticale; ce labour est suivi de la même préparation du lit de semence que précédemment. TS est un travail superficiel au vibroculteur, avec la même préparation du lit de semence. SD est un semis direct. Les apports, réalisés le même jour que le travail du sol, sont de deux types : e, engrais minéral (70-40-100); f, 30 t.ha⁻¹ de fumier ovin frais (67 % d'eau, 15 % de carbone, 1 % d'azote, 0,2 % de phosphore et 1,5 % de potassium), apporté avec un épandeur à hérissons horizontaux large d'environ 2 m. Les huit parcelles expérimentales sont notées LPe, LDe, TSe, SDe, LPf, LDf, TSf et Sdf.

Avant l'expérimentation, le terrain portait une culture de luzerne-dactyle de quatre ans, fumée initialement, fertilisée, fauchée puis pâturée chaque année; le terrain a été repris par un travail superficiel à l'automne 1995. Les travaux culturaux pour l'installation des parcelles expérimentales d'avoine ont été réalisés mi-avril 1996. La levée a été favorisée par les pluies

survenues après les semis (notamment deux pluies de 21 puis 23 mm dans la semaine suivante), puis par une période d'ensoleillement durable. Nos observations, mesures et prélèvements sont réalisés fin juin 1996, soit 2,5 mois après l'installation des parcelles.

Description de profils

Des fosses larges de 1 m et profondes de 0,5 m ont été ouvertes sur les parcelles afin d'évaluer macroscopiquement l'effet des pratiques culturales sur la distribution des mottes, selon une démarche s'inspirant de celle décrite par Manichon et Gautronneau (1987). Quatre types de mottes sont distingués : mottes « fragmentées », petites (< 1 cm), meubles, poreuses ; mottes « soudées », moyennes en taille (1 à 5 cm), cohésion et porosité ; mottes « massives », grossières (5 cm), compactes, peu poreuses ; mottes d'aspect non travaillé.

Simulation de pluie

La simulation de pluie consiste à produire une averse artificielle sur une microparcelle, afin de mesurer le ruissellement et les pertes en terre induits. La pluie est produite par un gicleur, alimenté par une citerne et une pompe ; ce gicleur est monté sur une tour métallique haute de 4 m, ce qui permet aux gouttes produites d'atteindre le sol avec une énergie proche de celle des gouttes de pluie naturelles. Cette pluie arrose une surface d'environ 4 m², au centre de laquelle un cadre métallique enfoncé dans le sol délimite une microparcelle de 1 m² ; ce cadre est percé d'un exutoire permettant de collecter les eaux de ruissellement pour en mesurer le débit et la charge solide (Asseline et Valentin, 1978).

Une pluie est simulée sur chacune des huit parcelles expérimentales. Avant la pluie, la végétation de la microparcelle est arrachée manuellement, et le sol est travaillé à la houe sur environ 15 cm de profondeur puis ratissé, afin de laisser un état de surface motteux (mottes • 3 cm), identique sur toutes les parcelles. L'intensité de l'averse est fixée à 60 mm.h⁻¹, ce qui correspond, pour une durée de 30 mn, à un événement de fréquence décennale dans les Rougiers. Généralement commencée sur sol sec, chaque pluie est poursuivie jusqu'au régime permanent de ruissellement ; durant cette phase, qui succède à une phase d'imbibition (sans ruissellement) et à une phase transitoire (ruissellement croissant), le ruissellement est maximal et peu variable (Lafforgue, 1977). Dans la suite du texte, les 30 mn initiales de pluie sont considérées comme « début de pluie » et le régime permanent (de ruissellement), comme « fin de pluie ».

L'intensité du ruissellement (mm.h⁻¹) est mesurée chaque minute, au moyen de prélèvements chronométrés dans une éprouvette graduée ; la lame ruisselée (mm) est calculée en intégrant cette intensité sur une durée déterminée. Un prélèvement d'eau ruisselée sur cinq environ est collecté et séché à 105°C, afin de mesurer sa charge solide, ou turbidité (g.L⁻¹). Le

débit solide (g.m⁻².h⁻¹) est le produit de l'intensité du ruissellement par sa turbidité ; la perte en terre (g.m⁻²) est calculée en intégrant ce débit sur une durée déterminée.

Analyses au laboratoire : stabilité des agrégats, teneur en carbone, texture

Des échantillons de sol non perturbé sont prélevés fin juin 1996 sur chaque parcelle expérimentale à 0-10, 10-20 et 20-40 cm de profondeur, près de la microparcelle de simulation de pluie. Ces échantillons sont séchés à l'air et tamisés à 2 mm.

La stabilité des agrégats est étudiée sur les échantillons prélevés à 0-10 cm de profondeur. Le test effectué, qui dérive de celui proposé par Kemper et Rosenau (1986), est détaillé ailleurs (Barthès et al., 1996). Il consiste à immerger 4 g d'échantillon dans l'eau permutée froide pendant 30 mn, puis à les tamiser à 0,2 mm en les agitant dans cette eau pendant 6 mn avec un appareillage adapté. Ce tamisage est complété par la détermination des teneurs en éléments < 0,02 mm (méthode de la pipette Robinson) et en sables grossiers > 0,2 mm (par tamisage de la fraction > 0,2 mm dans la soude 0,05 M).

Ce test permet ainsi de caractériser la granulométrie d'un échantillon de sol soumis à une désagrégation standardisée. Il distingue quatre fractions nommées sables grossiers SG (0,2 mm), macroagrégats MA (0,2 mm), mésoagrégats ME (0,02-0,2 mm) et microagrégats MI (< 0,02 mm), avec SG + MA + ME + MI = 1 000 g.kg⁻¹. L'indice de macroagrégation stable I_{ma} est défini comme la teneur en macroagrégats stables du sol sans sables grossiers : I_{ma} = 1 000 MA / (1 000 - SG). Quatre répétitions sont réalisées pour chaque échantillon ; lorsque le coefficient de variation de MA dépasse 20 %, elles sont complétées par quatre répétitions supplémentaires (cas de LDe, TSf et LPf).

Les analyses physico-chimiques suivantes sont réalisées sur les huit échantillons : granulométrie en cinq classes (argile, limons fins et grossiers, sables fins et grossiers) par la méthode de la pipette Robinson, après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée et dispersion à l'hexamétophosphate de sodium (Rouiller et al., 1994) ; carbone total, extrait par combustion sous courant d'oxygène et dosé par cellule infrarouge, avec un microanalyseur CHN Leco 600.

Des prélèvements avaient également été réalisés en mars 1996, afin d'appréhender la variabilité « initiale » des teneurs en carbone sur le site expérimental, avant les travaux culturaux. Trois échantillons régulièrement répartis sur chaque future parcelle avaient été prélevés à la tarière à 0-10 et 10-20 cm de profondeur.

Tests et méthodes statistiques

Dans l'étude de la stabilité des agrégats, les moyennes sont comparées en supposant les distributions normales, à l'aide

d'un test t de Student sans hypothèse sur les variances (Dagnélie, 1975). Les différences entre moyennes ainsi que les corrélations linéaires simples ou multiples significatives au seuil de 1 % sont dites « très significatives » ; elles sont dites « significatives » au seuil de 5 %, et « non significatives » dans les autres cas.

RÉSULTATS (tableau 1)

Description de profils

Les sols étudiés sont peu profonds, la roche-mère schisteuse apparaissant vers 50 cm de profondeur. Dans l'ensemble, ils sont également peu différenciés verticalement, avec une couleur brun-rougeâtre assez homogène (environ 5YR4/4 en surface et 2,5YR4/4 à 40 cm de profondeur) et des teneurs en argile, limons et sables d'environ 25-35 %, 40 % et 25-35 % respectivement. Les fosses des parcelles travaillées présentent toutefois deux limites horizontales, la première vers 10 cm de profondeur séparant le lit de semence affiné de l'horizon travaillé non affiné, la seconde vers 25-30 cm séparant ce dernier de l'horizon non travaillé. Le lit de semence est constitué de mottes fragmentées et de mottes soudées, sans différence nette entre traitements. L'horizon travaillé non affiné est constitué de mottes soudées et de mottes massives, ces dernières étant très développées sur les parcelles en labour dressé. En revanche, le profil est peu différencié sur les parcelles en semis direct, et constitué uniquement de mottes d'aspect non travaillé.

Simulation de pluie (figure 1)

Dans les quatre parcelles labourées, le ruissellement s'installe relativement vite (≈ 20 mn ; 1 à 2,5 mm ruissent durant les 30 mn initiales de pluie) et atteint des intensités maximales élevées (≈ 50 mm.h⁻¹). Dans les parcelles en semis direct, l'installation du ruissellement est aussi rapide (20 mn ; 1 à 3 mm ruissent en 30 mn), mais les intensités maximales sont moindres (40 mm.h⁻¹). Dans les parcelles en travail superficiel, l'installation tend à être plus lente (≈ 30 mn ; lame ruisselée en 30 mn • 0,6 mm) et les intensités maximales sont plus (TSf) ou moins (TSe) élevées.

La turbidité de l'eau ruisselée est plus élevée dans les quatre parcelles labourées (8 à 14 g.L⁻¹ après 30 mn de pluie, 11 à 18 g.L⁻¹ en régime permanent) que dans les parcelles en semis direct (5 g.L⁻¹ après 30 mn, 6-7 g.L⁻¹ en régime permanent). Dans les parcelles en travail superficiel, la turbidité est plus (TSf) ou moins (TSe) élevée.

La perte en terre est généralement plus élevée dans les quatre parcelles labourées (9 à 32 g.m⁻² perdus pendant les 30 mn initiales, 450 à 730 g.m⁻².h⁻¹ en régime permanent) que dans les parcelles en semis direct (5 à 15 g.m⁻² en 30 mn, 180

à 250 g.m⁻².h⁻¹ en régime permanent). Dans les parcelles en travail superficiel, elle est plus (TSf) ou moins (TSe) élevée.

Dans l'ensemble, ruissellement et perte en terre sont donc plus élevés dans les quatre parcelles labourées et dans celle en travail superficiel avec fumier (LDf, LDe, LPf, LPe, TSf) ; ils sont plus faibles dans les parcelles en semis direct et dans celle en travail superficiel avec engrais (SDf, SDe, TSe). L'installation du ruissellement est toutefois aussi rapide dans les parcelles en semis direct que dans celles labourées, et plus rapide que dans celles en travail superficiel.

Stabilité des agrégats (figure 2)



La teneur moyenne en macroagrégats stables MA (0,2 mm) à 0-10 cm de profondeur est de l'ordre de 300 à 400 g.kg⁻¹. Dans les parcelles avec engrais, MA est plus élevé en semis direct que dans les parcelles labourées, la différence étant significative avec le labour dressé et très significative avec le labour à plat ; les autres différences de MA entre parcelles avec engrais ne sont pas significatives. Par ailleurs, aucune différence significative de MA n'est relevée entre parcelles avec fumier, ou entre parcelles travaillées identiquement. L'indice de macroagrégation stable moyen I_{ma} des échantillons est de l'ordre de 380 à 500. Il est plus élevé dans la parcelle en semis direct avec engrais que dans celle avec fumier, la différence étant très significative ; les autres différences entre parcelles sont les mêmes que celles relevées pour MA.

La teneur moyenne en mésoagrégats stables ME (0,02-0,2 mm) est de l'ordre de 300 à 420 g.kg⁻¹. Dans les parcelles avec engrais, ME est moins élevé en semis direct que dans les parcelles labourées, la différence étant très significative, avec une valeur intermédiaire en travail superficiel. Aucune différence significative de ME n'est relevée entre parcelles avec fumier. A travail du sol identique, ME est plus élevé dans la parcelle en semis direct avec fumier que dans celle avec engrais, la différence étant très significative ; les autres différences ne sont pas significatives.

La teneur moyenne en microagrégats stables MI (< 0,02 mm) est de 100 à 150 g.kg⁻¹ environ. Pour un même apport, MI augmente de la parcelle en semis direct à celle labourée à plat, puis de celle-ci à celles en labour dressé et travail superficiel, qui ne diffèrent pas significativement. A travail du sol identique, MI est significativement plus élevé dans la parcelle en labour dressé avec fumier que dans celle avec engrais, les autres différences n'étant pas significatives.

En résumé, la distribution en classes d'agrégats stables varie sensiblement entre parcelles avec engrais : dans celle en semis direct, cette distribution est dominée par MA, avec relativement peu de ME et MI ; dans les parcelles labourées, il y a moins de MA, plus de ME et (labour dressé) plus de MI ; dans la parcelle en travail superficiel, MA et ME sont intermédiaires,

Tableau 1 - Résultats des tests de simulation de pluie; résultats des tests de stabilité des agrégats, teneurs en carbone et en argile dans la couche de sol 0-10 cm (juin 1996); corrélations entre données.

Table 1 - Results of rainfall simulation tests (imbibition duration, runoff depth in 30 min, steady state runoff intensity, runoff water turbidity after 30 min and during steady state, soil loss in 30 min, steady state sediment loss rate); results of water-stable aggregation tests (average content in water-stable macroaggregates, average water-stable macroaggregation index I_{ma}, average contents in water-stable mesoaggregates, microaggregates and coarse sands), total carbon C and clay contents in the 0-10 cm layer (June, 1996); correlations between data.

Type d'apport	Fumier				Engrais				Coeff. de corrélation avec I _{ma} avec C		
	Travail du sol	Travail superficiel	Labour dressé	Labour à plat	Semis direct	Travail superficiel	Labour dressé	Labour à plat		Semis direct	
Durée d'imbibition	mn	27	21	24	22	34	21	18	18	0,891**	0,646
Lame ruisselée en 30 mn	mm	0,62	1,71	1,06	1,01	0,00	1,60	2,37	2,93	-0,950**	-0,676
Intensité du ruissellement en rég. perm.	mm.h ⁻¹	54,0	49,6	54,6	41,4	34,8	54,0	52,8	41,8	-0,621	-0,757*
Charge solide après 30 mn	g.L ⁻¹	13,8	15,7	9,0	5,5	0,0	8,0	13,7	4,8	-0,759*	-0,904**
Charge solide en régime permanent	g.L ⁻¹	10,4	14,9	11,5	6,1	6,6	8,4	11,2	4,3	-0,796*	-0,954**
Perte en terre en 30 mn	g.m ⁻²	8,6	25,4	8,9	4,7	0,0	12,6	31,8	14,6	-0,900**	-0,753
Débit solide en régime permanent	g.m ⁻² .h ⁻¹	561	739	630	253	230	452	591	180	-0,791*	-0,963**
Taux de macroaggrégats stables	g.kg ⁻¹	375	348	360	354	374	337	314	403	0,884**	0,683
Indice de macroaggrégation stable = I _{ma}		417	381	399	415	436	393	381	492	1	0,914**
Taux de mésoaggrégats stables	g.kg ⁻¹	364	416	413	391	341	390	381	302	-0,901**	-0,885**
Taux de microaggrégats stables	g.kg ⁻¹	163	149	128	108	142	131	129	113	-0,335	-0,486
Taux de sables grossiers	g.kg ⁻¹	98	87	99	148	143	143	176	182	0,462	0,670
Teneur en carbone = C	g.kg ⁻¹	14,9	12,8	14,0	16,9	18,2	15,5	14,2	20,1	0,914**	1
Taux d'argile	g.kg ⁻¹	343	349	282	226	356	317	281	281	-0,114	-0,209

* Corrélation significative au seuil de 5%

** Corrélation significative au seuil de 1%
En italiques, parcelle semis direct avec engrais exclue (préhumectée)

Figure 1 - Intensités du ruissellement, turbidités et débits solides lors des simulations de pluie.
 Figure 1 - Runoff intensities, runoff water turbidities and sediment loss rates during rainfall simulations.

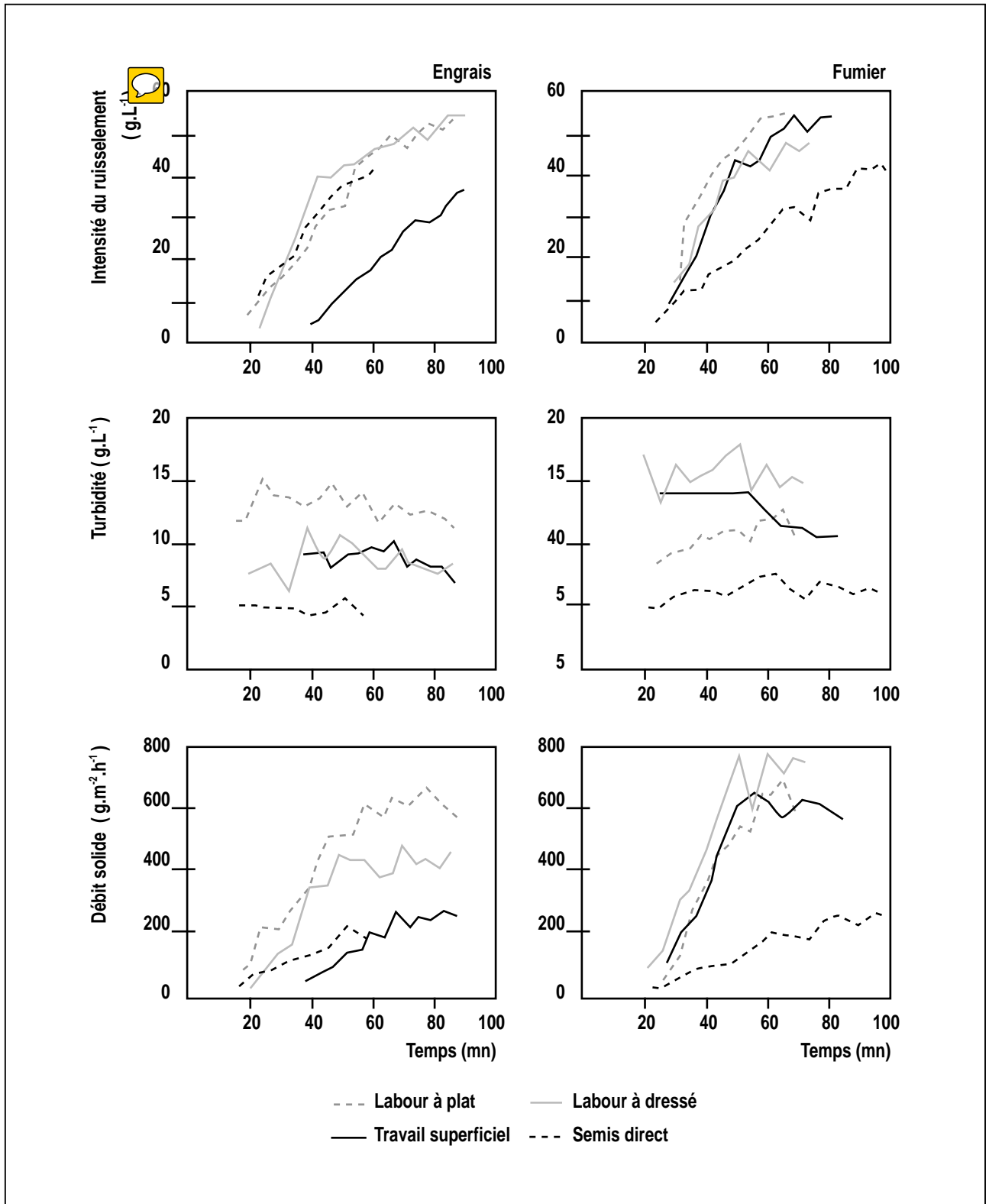
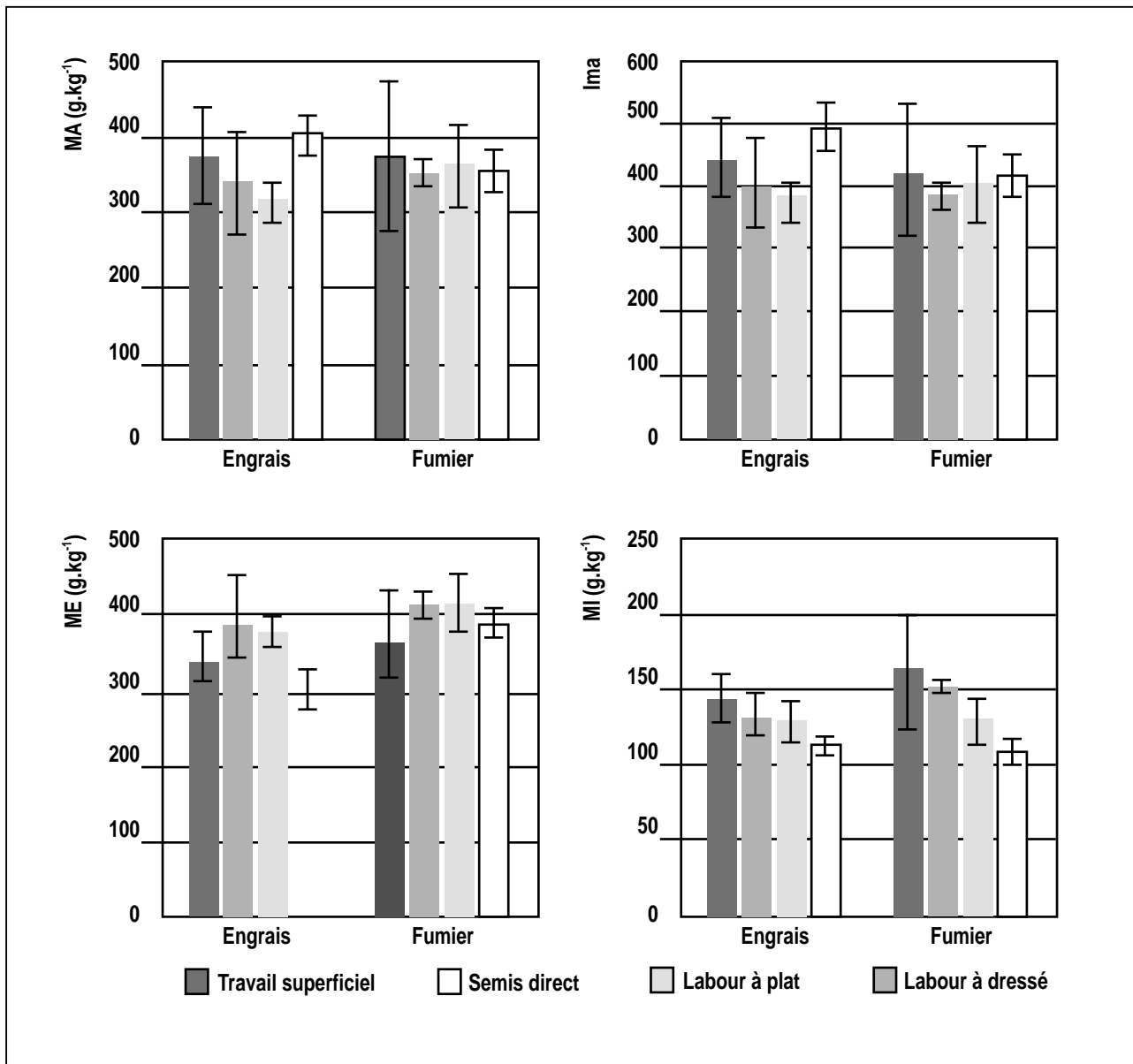


Figure 2 - Teneurs en macroagrégats stables MA, mésoagrégats stables ME, microagrégats stables MI, et indice de macroagrégation stable Ima dans la couche de sol 0-10 cm (moyennes et écarts-types sur 8 répétitions pour LDe, TSf et LPf, sur 4 répétitions ailleurs).

Figure 2 - Contents in water-stable macroaggregates MA, mesoaggregates ME, microaggregates MI, and water-stable macroaggregation index Ima in the 0-10 cm layer (means and standard deviations on 8 repetitions for LDe, TSf and LPf plots, on 4 repetitions otherwise).



mais MI est plus élevé qu'en semis direct. En revanche, la distinction entre parcelles avec fumier est peu nette, parce que ni MA ni ME ne sont discriminants. De même, les différences entre parcelles travaillées identiquement ne sont pas significatives, sauf en semis direct (Ima inférieur et ME supérieur dans la parcelle avec fumier).

La corrélation entre MA et Ima moyens est très significative ($r = 0,884$), ainsi que celle entre Ima et ME moyens ($r = 0,901$). Les autres corrélations entre paramètres d'agrégation ne sont pas significatives.

Analyses physico-chimiques

La granulométrie de la terre fine ($< 2 \text{ mm}$) varie peu avec la profondeur (données non présentées) : dans une même parcelle, les variations de teneur entre 0-10 et 20-40 cm restent généralement inférieures à 30 g.kg^{-1} pour l'argile, à 50 g.kg^{-1} pour les limons (ainsi que pour la somme argile + limons fins) et à 30 g.kg^{-1} pour les sables. En revanche, toutes profondeurs confondues, la teneur en argile est plus élevée à l'amont du site ($310\text{-}390 \text{ g.kg}^{-1}$ en TS-LD) qu'à l'aval ($230\text{-}290 \text{ g.kg}^{-1}$ en LP-SD), à l'inverse de la teneur en sables ($190\text{-}260 \text{ g.kg}^{-1}$ en TS-LD contre $280\text{-}350 \text{ g.kg}^{-1}$ en LP-SD), la teneur en limons étant plus homogène (380 à 460 g.kg^{-1}); les proportions de sables fins et grossiers sont peu différentes, mais 60 à 80 % des limons sont des limons fins. Par ailleurs, la teneur en éléments grossiers $> 2 \text{ mm}$ (10 à 150 g.kg^{-1} de sol total) varie sans relation nette avec le traitement ou la topographie.

L'analyse des échantillons prélevés avant les travaux culturaux révèle une augmentation de la teneur « initiale » en carbone à 0-20 cm de profondeur de TSf (12 g.kg^{-1}) à LDf-LPf ($13\text{-}15 \text{ g.kg}^{-1}$), Sdf-TSe-LDe-LPe ($16\text{-}18 \text{ g.kg}^{-1}$) et SDe (20 g.kg^{-1}). Dans l'ensemble, les parcelles recevant l'engrais étaient donc initialement plus riches que celles recevant le fumier; de même, les parcelles en semis direct étaient initialement plus riches que celles en labour, elles mêmes plus riches que celles en travail superficiel.

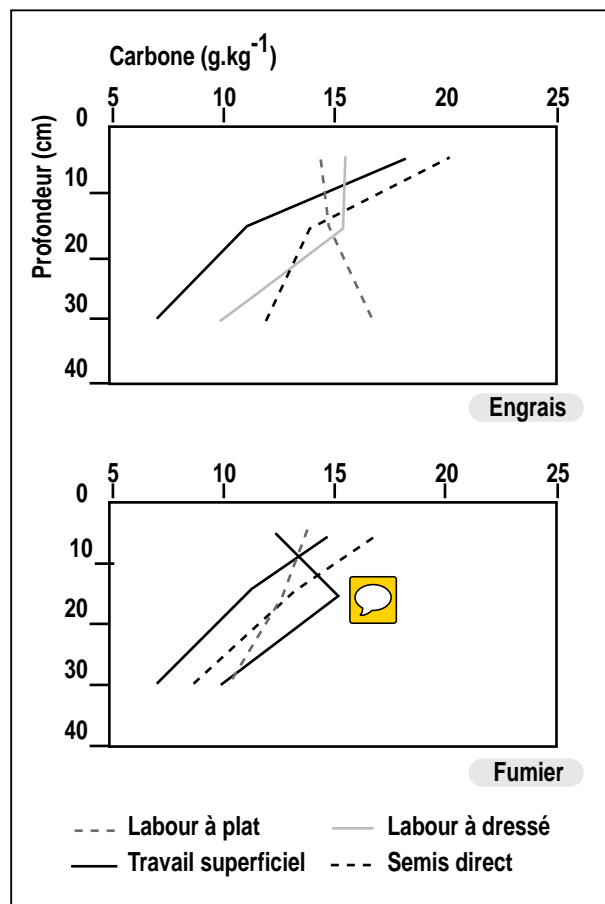
L'analyse des échantillons prélevés 2,5 mois après l'installation de traitements différenciés permet de distinguer différents types de profils de teneur en carbone (figure 3). En semis direct et travail superficiel, cette teneur décroît nettement de 0-10 à 20-40 cm de profondeur. En labour dressé, elle reste stable de 0-10 à 10-20 cm de profondeur avec engrais mais augmente avec fumier, puis décroît nettement jusqu'à 20-40 cm. En labour à plat, elle varie plus modérément de 0-10 à 20-40 cm, augmentant avec engrais, diminuant avec fumier.

Relations entre agrégation stable, teneur en carbone et texture

Différentes corrélations sont mises en évidence entre paramètres d'agrégation (MA, Ima, ME et MI moyens), teneur en carbone C et texture des huit échantillons prélevés à 0-10 cm de profondeur. La corrélation multiple entre MA, d'une

Figure 3- Profils de teneur en carbone 2,5 mois après l'installation des parcelles..

Figure 3- Carbon content profiles after 2.5 months of cultivation.



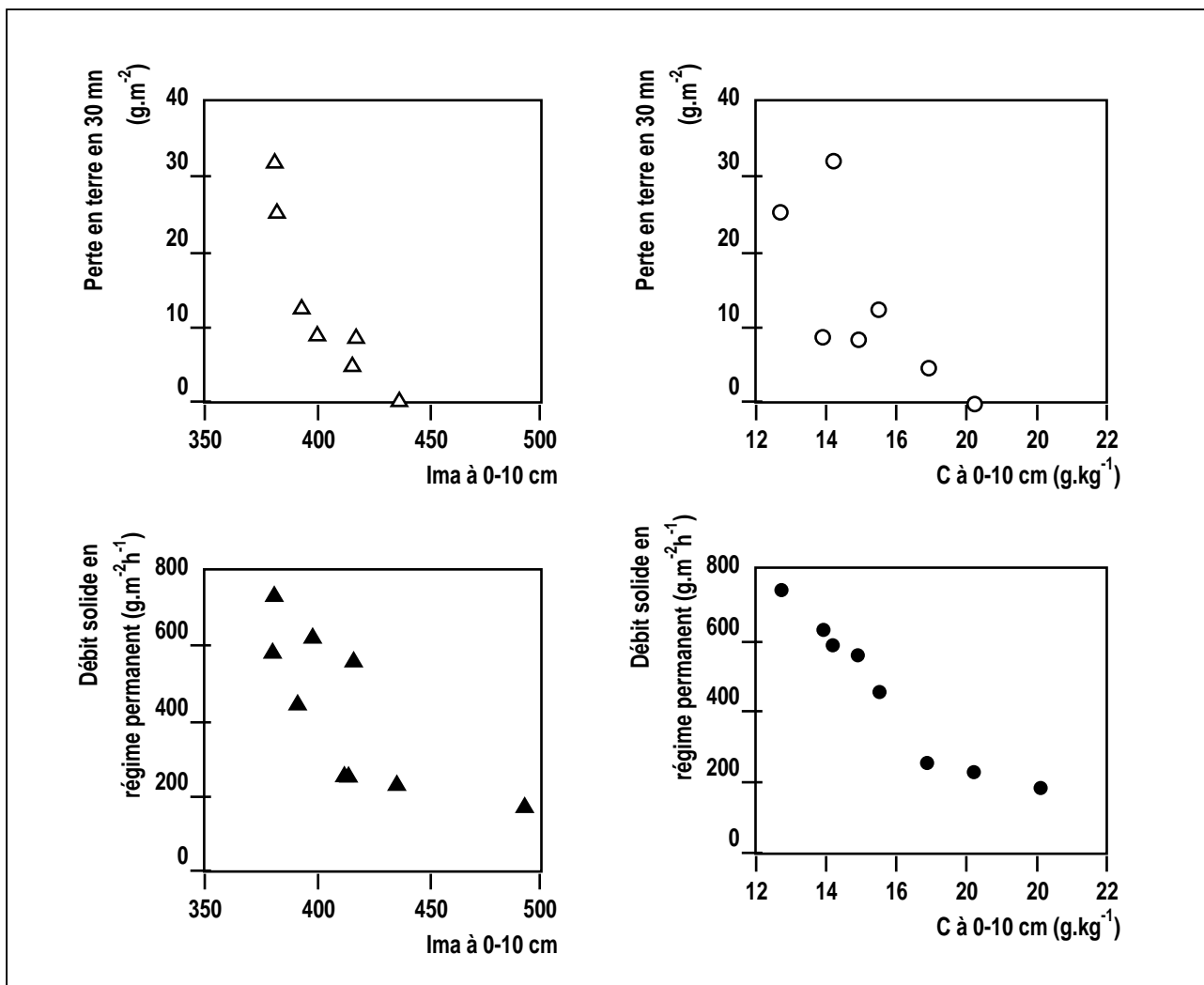
part, et C et SG (teneur en sables grossiers), d'autre part, est très significative ($|R| = 0,925$), mais MA n'est corrélé significativement ni à C seul, ni à SG seul. Ima est corrélé très significativement à C ($r = 0,914$). De même, ME est corrélé très significativement à C ($r = -0,885$), la relation n'étant pas améliorée par la prise en compte d'autres paramètres, notamment SG. MI est corrélé très significativement au taux d'argile ($r = 0,867$), la relation n'étant pas améliorée par la prise en compte d'autres paramètres, notamment C, ou en remplaçant le taux d'argile par le taux d'argile + limons fins.

Relations entre érodibilité, agrégation stable et teneur en carbone (tableau 1 et figure 4)

Les calculs de corrélations linéaires mettent en évidence des relations entre paramètres de simulation de pluie (durée

Figure 4 - Relations entre perte en terre en 30 mn PT ou débit solide en régime permanent DS, et indice de macroagrégation stable Ima ou teneur en carbone C dans la couche de sol 0-10 cm (PT considéré sans SDe préhumecté; coefficients de corrélation : -0,900 entre PT et Ima; -0,753 entre PT et C; -0,791 entre DS et Ima; -0,963 entre DS et C).

Figure 4 - Relationships between soil loss in 30 min SL or steady state sediment loss rate SLR, and water-stable macroaggregation index Ima or carbon content C in the 0-10 cm soil layer (SL is considered without plot SDe, wetted by a 4 mm-natural rainfall just before rainfall simulation; correlation coefficients : -0.900 between SL and Ima; -0.753 between SL and C; -0.791 between SLR and Ima; -0.963 between SLR and C).



d'imbibition, lame ruisselée en 30 mn, intensité du ruissellement maximal, turbidité après 30 mn et en régime permanent, perte en terre en 30 mn et débit solide en régime permanent), d'une part, paramètres d'agrégation (MA, Ima, ME et MI moyens) et teneur en carbone C (mais pas texture) de la couche de sol 0-10 cm, d'autre part.

Sur la population des huit parcelles, aucune corrélation significative n'est relevée entre paramètres du début de pluie (durée d'imbibition, lame ruisselée et perte en terre en 30 mn) et caracté-

ristiques de la couche de sol 0-10 cm. Mais sans la parcelle SDe (« préhumectée » avant la simulation par une pluie naturelle de 4 mm), durée d'imbibition, lame ruisselée et perte en terre en 30 mn sont corrélées significativement à MA ($r = 0,840$, $r = -0,937$ et $r = -0,811$ respectivement) et très significativement à Ima ($r = 0,891$, $r = -0,950$ et $r = -0,900$ respectivement). Ruissellement et pertes en terre en début de pluie sont donc liés étroitement à la stabilité des macroagrégats à 0-10 cm de profondeur, mais pas à la teneur en carbone.

Après 30 mn de pluie, et sans SDe préhumectée, la turbidité est corrélée significativement à I_{ma} ($r = -0,759$) et très significativement à C ($r = -0,904$).

En régime permanent, sur les huit parcelles, l'intensité du ruissellement est corrélée significativement à C ($r = -0,757$) ; la turbidité et le débit solide sont corrélés significativement à ME ($r = 0,759$ et $r = 0,756$ respectivement), à I_{ma} ($r = -0,796$ et $r = -0,791$ respectivement), et très significativement à C ($r = 0,954$ et $r = -0,963$ respectivement). Les résultats des mesures effectuées en régime permanent sont donc liés plus étroitement au taux de carbone qu'aux paramètres d'agrégation.



DISCUSSION ET CONCLUSION

L'analyse des échantillons de sol prélevés avant l'installation de traitements différenciés révèle une certaine variabilité latérale des caractéristiques physico-chimiques : diminution de la teneur en argile de l'amont (parcelles TS-LD) vers l'aval du site (LE-SD), augmentation de la teneur initiale en carbone de la parcelle TSf à la parcelle SDe. Malgré cette hétérogénéité, qui n'est pas l'objet principal de l'étude, l'effet des pratiques culturales sur l'érodibilité reste souvent net ; elle tend par ailleurs à favoriser la mise en évidence de relations entre érodibilité, stabilité de l'agrégation et teneur en carbone.

Simulation de pluie

Dans l'ensemble, 2,5 mois après l'installation de traitements différenciés, les ruissellements et pertes en terre sont plus élevés dans les parcelles labourées (et dans celle en travail superficiel avec fumier), plus faibles dans les parcelles en semis direct (et dans celle en travail superficiel avec engrais). L'installation du ruissellement est toutefois plus tardive dans les parcelles en travail superficiel que dans celles en labour et semis direct.

D'autres auteurs mettent en évidence des relations entre travail du sol et érodibilité, mesurée lors de pluies simulées sur sol nu non remanié (dans notre étude, le sol est remanié juste avant la pluie). Certains travaux rapportent ainsi une augmentation de la lame ruisselée et de la perte en terre avec l'intensification du travail du sol, pour différents types de sols et de cultures (West et al., 1991 ; Choudhary et al., 1997). Toutefois, cette intensification ne s'accompagne pas toujours d'un ruissellement accru (Unger, 1992) ; le ruissellement est parfois même plus important sur les parcelles en semis direct que sur certaines parcelles travaillées (chisel), en particulier en début de pluie (Bradford et Huang, 1994 ; Myers et Waggar, 1996).

L'intensification du travail du sol détermine donc une augmentation des pertes en terre, mais ne détermine pas toujours un ruissellement accru, lors de pluies simulées sur sol nu non

remanié (travaux cités). En effet, les parcelles en semis direct y sont caractérisées par une faible rugosité de surface, qui peut expliquer des ruissellements élevés. Mais sur sol nu remanié (notre étude), les microparcelles ont des rugosités peu différentes en début de simulation, ce qui supprime une cause de ruissellement plus élevé en semis direct. D'autres résultats obtenus sur sol remanié confirment cette relation entre intensification du travail du sol et augmentation du ruissellement et des pertes en terre (Roose et Cavalié, 1988, cités par Roose, 1994).

Stabilité des agrégats

Les corrélations entre classes d'agrégats stables indiquent que la désagrégation des échantillons testés consiste principalement en une fragmentation des macroagrégats en mésoagrégats, avec peu de dispersion en microagrégats. Dans les parcelles avec engrais, cette désagrégation tend à augmenter avec l'intensité du travail du sol. Cet effet est moins net dans les parcelles avec fumier, du fait notamment d'une désagrégation relativement forte en semis direct (par rapport au semis direct avec engrais notamment).

Plusieurs travaux mettent en évidence une liaison entre intensité du travail du sol et stabilité des agrégats (après immersion et tamisage dans l'eau) de l'horizon superficiel. Lors d'essais de moyenne ou longue durée sur différents types de sols, le taux de macroagrégats stables (0,25 mm) est ainsi plus élevé dans les parcelles en semis direct que dans celles travaillées (West et al., 1991 ; Angers et al., 1993 ; Mahboubi et al., 1993). Sur le court terme (2,5 mois), une tendance comparable est relevée dans nos parcelles avec engrais, mais elle n'est pas nette dans celles avec fumier.

Teneurs en carbone

En semis direct et travail superficiel, la diminution rapide de teneur en carbone avec la profondeur témoigne d'un remaniement du sol sur une faible épaisseur et d'une concentration de la matière organique en surface. En labour dressé, la stabilité de la teneur en carbone de 0-10 à 10-20 cm avec engrais témoigne du dressage effectif du labour ; son augmentation avec fumier suggère que celui-ci est enfoui vers 20 cm de profondeur, plutôt que réparti uniformément sur l'horizon labouré (comme escompté). En labour à plat avec engrais, la teneur en carbone augmente légèrement de 0-10 à 20-40 cm, indiquant que ce labour, qui enfouit les couches superficielles riches en carbone, dépasse largement 20 cm de profondeur ; cet enrichissement en profondeur n'est pas observé avec fumier, celui-ci étant peut-être enfoui peu profondément par le labour à plat (un enfouissement plus profond était escompté).

Les résultats d'essais de longue durée montrent que le carbone est concentré en surface par le travail superficiel et surtout le semis direct, mais que sa répartition est plus uniforme dans les horizons labourés (Germon et al., 1994 ; Alvarez



et al., 1995; Ball et al., 1996). Les effets à court terme (passage d'un outil ou d'une série d'outils) sont moins étudiés, mais semblent comparables à ceux relevés à long terme, la profondeur d'enfouissement augmentant avec l'intensité du travail (Allmaras et al., 1996). Nos résultats confirment cet effet à court terme de l'intensité du travail du sol sur la localisation du carbone : concentration en surface après non travail ou travail superficiel, dilution après labour.

Relations entre érodibilité, agrégation stable et teneur en carbone

Les paramètres de début de pluie sont étroitement liés à l'agrégation à 0-10 cm : plus la macroagrégation est stable, plus l'installation du ruissellement est tardive, la lame ruisselée et la perte en terre en 30 mn faibles. La liaison entre paramètres de début de pluie et teneur en carbone est faible, malgré la corrélation étroite entre cette teneur et la macroagrégation, souvent notée (Tisdall et Oades, 1982; Elustondo et al., 1990; Haynes et al., 1991). En revanche, les paramètres de fin de pluie sont liés étroitement à la teneur en carbone à 0-10 cm : plus cette teneur est élevée, plus l'intensité du ruissellement, la turbidité et le débit solide en régime permanent sont faibles (mais ces deux derniers restent liés à l'agrégation).

Plusieurs auteurs signalent des corrélations négatives entre (i) ruissellement ou perte en terre lors de pluies simulées au laboratoire sur sol tamisé sec et (ii) stabilité des agrégats (après immersion dans l'eau) ou taux de carbone en surface. Des corrélations entre lame ruisselée ou perte en terre en 30 mn et taux de macroagrégats stables (0,5 voire de matière organique (MO), sont notées (Bryan, 1968; Luk, 1977). Des corrélations entre paramètres de fin de pluie (intensité du ruissellement et débit solide en régime permanent ou lame ruisselée après 2 h de pluie) et agrégation stable, voire taux de MO, sont également rapportées (Reichert et Norton, 1994; Amezketa et al., 1996; Le Bissonnais et Arrouays, 1997). D'autres travaux présentent des résultats obtenus lors de pluies simulées au champ sur sol nu. Ils montrent que le taux de MO est corrélé à la perte en terre en 1 h (Meyer et Harmon, 1984), à la turbidité (Feller et al., 1996), à la durée d'imbibition sur sol humide (Valentin et Janeau, 1989), ou que la lame ruisselée en 1 h est liée à la stabilité de l'agrégation (Roth et al., 1987).

Les références consultées confirment la liaison entre comportement en début de pluie sur sol sec et stabilité des macroagrégats en surface; en effet, cette stabilité s'oppose au détachement de particules facilement transportables, donc au colmatage de la surface du sol et au ruissellement (Le Bissonnais, 1996). Elles confirment aussi la liaison entre comportement en fin de pluie et taux de carbone en surface. Dans notre étude, ce taux devient plus discriminant en fin de pluie que l'agrégation, l'organisation initiale étant largement détruite après une longue et forte pluie sur sol nu. Cette influence du

taux de carbone en fin de pluie peut être expliquée par son influence sur la limite de liquidité (Combeau, 1964; Rémy, 1971); ruissellement et perte en terre en conditions humides sont en effet liés étroitement à la consistance (Bryan et De Ploey, 1983; Valentin et Janeau, 1989). Dans plusieurs travaux cités, la stabilité de l'agrégation reste relativement discriminante en fin de pluie par rapport au taux de carbone; mais la pluie est modérée (Amezketa et al., 1996; Le Bissonnais et Arrouays, 1997) ou les sols argileux, souvent riches en oxydes, et stables (Roth et al., 1987; Reichert et Norton, 1994).

L'effet des pratiques culturales sur l'érodibilité est donc lié à leur effet sur l'agrégation et le taux de carbone. Les pratiques limitant l'érodibilité sont celles qui assurent à l'horizon de surface un taux de carbone élevé et une agrégation stable : travail superficiel ou non travail, apports de matières organiques, insertion de prairies ou d'engrais verts dans l'assolement.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'un financement de la Chambre d'Agriculture de l'Aveyron et du concours efficace de R. Chaume, A. Galibert, E. Gavinelli, B. Le Rouget et J.C. Marcourel.

BIBLIOGRAPHIE

- Allmaras R.R., Copeland S.M., Copeland P.J., Oussible M., 1996 - Spatial relations between oat residue and ceramic spheres when incorporated sequentially by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 : 1209-1216.
- Alvarez R., Diaz R.A., Barbero N., Santanoglia O.J., Blotta L., 1995 - Soil organic carbon, microbial biomass and CO₂-C production from three tillage systems. *Soil Till. Res.* 33 : 17-28.
- Amezketa E., Singer M.J., Le Bissonnais Y., 1996 - Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 : 888-894.
- Angers D.A., Samson N., Légère A., 1993 - Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can. J. Soil Sci.* 73 : 51-59.
- Artis S., 1995 - La lutte contre l'érosion dans les Rougiers de Camarès : gestion des eaux de ruissellement. *Mém. Maîtrise Univ. Paris 7*, 58 p.
- Asseline J., Valentin C., 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* 15 (4) : 321-349.
- Ball B.C., Cheshire M.V., Robertson E.A.G., Hunter E.A., 1996 - Carbohydrate composition in relation to structural stability, compactibility and plasticity of two soils in a long-term experiment. *Soil Till. Res.* 39 : 143-160.
- Barthès B., Kouakoua E., Sala G.H., Hartmann C., Nyeté B., 1996 - Effet à court terme de la mise en culture sur le statut organique et l'agrégation d'un sol ferrallitique argileux du Congo. *Can. J. Soil Sci.* 76 : 493-499.
- Boiffin J., Monnier G., 1994 - Suppression du labour et érosion hydrique dans le contexte agricole français : bilan et possibilités d'application des références disponibles. In Monnier G., Thévenet G., Lesaffre B. (éds.) « Simplification du travail du sol », pp. 85-103. *Les Colloques n°65*, INRA, Paris.

- Bradford J.M., Huang C., 1994 - Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Till. Res.* 31 : 353-361.
- Bryan R.B., 1968 - The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma* 2 : 5-26.
- Bryan R.B., De Ploey J., 1983 - Comparability of soil erosion measurements with different laboratory rainfall simulators. In De Ploey J. (éd.) « Rainfall simulation, runoff and soil erosion », pp. 33-56, *Catena supplement* 4.
- Casenave A., Valentin C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne; influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 229 p.
- Choudhary M.A., Lal R., Dick W.A., 1997 - Long-term tillage effects on runoff and soil erosion under simulated rainfall for a central Ohio soil. *Soil Till. Res.* 42 : 175-184.
- Combeau A., 1964 - Remarques sur les facteurs de variation des limites d'Atterberg. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 2 (4) : 29-39.
- Dagnélie P., 1975 - Théorie et méthodes statistiques; applications agronomiques. Vol. II. Les méthodes de l'inférence statistique. 2e éd. Presses agronomiques de Gembloux, 463 p.
- De Ploey J., Poesen J., 1985 - Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In Richards K.S., Arnett R.R., Ellis S. (éds.) « Geomorphology and soils », pp. 99-120. Allen and Unwin, Londres.
- Elustondo J., Angers D.A., Laverdière M.R., N'Dayegamiye A., 1990 - Etude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Can. J. Soil Sci.* 70 : 395-402.
- Feller C., Albrecht A., Tessier D., 1996 - Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In Carter M.R., Stewart B.A. (éds.) « Structure and organic matter storage in agricultural soils », pp. 309-359. *Advances in Soil Science*, Lewis, New-York.
- Germon J.C., Taureau J.C., Thomas J.M., 1994 - Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates. In Monnier G., Thévenet G., Lesaffre B. (éds.) « Simplification du travail du sol », pp. 125-154. *Les Colloques n°65*, INRA, Paris.
- Guillerm C., 1994 - Diagnostic de l'érosion pluviale dans les Rougiers de Camarès; propositions de pratiques anti-érosives. *Mém. ITIA-CNAM-INAPG*, Paris, 51 p.
- 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 Till. Res.* 19 : 77-87.
- Kemper W.D., Rosenau R.C., 1986 - Aggregate stability and size distribution. In Klute A. (éd.) « Methods of soils analysis. Part 1 », pp. 425-442. *Agron. Monogr. n°9*, 2e éd., ASA-SSSA, Madison, WI, USA.
- Lafforgue A., 1977 - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* 14 (4) : 299-344.
- Le Bissonnais Y., 1996 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *Europ. J. Soil Sci.* 47 : 425-437.
- Le Bissonnais Y., Arruays D., 1997 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Europ. J. Soil Sci.* 48 : 39-48.
- Lelong F., Roose E., Darhout R., Trévisan D., 1993. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. Expérimentation au champ sous pluies simulées. *Sc. Sol* 31 (4) : 251-279.
- Luk S., 1977 - Rainfall erosion of some Alberta soils; a laboratory simulation study. *Catena* 3 : 295-309.
- Mahboubi A.A., Lal R., Faussey N.R., 1993 - Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 506-512.
- Manichon H., Gautronneau Y., 1987. Guide méthodique du profil cultural. CEREF-GEARA, Lyon.
- Meyer L.D., Harmon W.C., 1984 - Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 : 1152-1157.
- Myers J.L., Waggoner M.G., 1996 - Runoff and sediment loss from three tillage systems under simulated rainfall. *Soil Till. Res.* 39 : 115-129.
- Oades J.M., 1984 - Soil organic matter and structural stability : mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76 : 319-337.
- 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 Sci.* 158 (3) : 159-169.
- Rémy J.C., 1971 - Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. *Ann. Agron.* 22 (3) : 267-290.
- Roose E., 1994 - Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO n°70*, Rome, 420 p.
- 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. *J. Agron. Crop Sci.* 159 : 186-191.
- Rouiller J., Souchier B., Bruckert S., Feller C., Toutain F., Védry J.C., 1994 - Méthodes d'analyse des sols. In Bonneau M., Souchier B. (éds.) « Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol », pp. 619-652. Masson, Paris.
- Tisdall J.M., Oades J.M., 1982 - Organic matter and water-stable aggregation in soils. *J. Soil Sci.* 33 : 141-163.
- Unger P.W., 1992 - Infiltration of simulated rainfall : tillage system and crop residue effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 : 283-289.
- Valentin C., Janeau J.L., 1989 - Les risques de dégradation de la surface des sols en savane humide (Côte d'Ivoire). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 25 (1-2) : 41-52.
- West L.T., Miller W.P., Langdale G.W., Bruce R.R., Laffan J.M., Thomas A.W., 1991 - Cropping system effects on interrill soil loss in the Georgia