

Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique)

Alain ALBRECHT, Luc RANGON et Pierre BARRET

Laboratoire matière organique des sols tropicaux
Orstom, BP 8006, 97259 Fort-de-France cedex, Martinique

RÉSUMÉ

À la Martinique, sur deux types de sols (vertisol et ferrisol), deux modes d'occupation du sol – maraîchage et prairie – permettent une nette différenciation des stocks organiques en quantité et qualité. Ces différences ont des conséquences sur la stabilité structurale des sols.

L'utilisation de deux approches expérimentales, l'une au laboratoire et l'autre sur le terrain utilisant la simulation de pluie, montre : 1. l'effet positif de la matière organique du sol sur le mode d'organisation du sol et sa résistance à la détachabilité ; 2. la meilleure stabilité structurale, au champ et au laboratoire, des ferrisols par rapport aux vertisols.

Quel que soit le type de sol, la matière organique responsable de cette amélioration est essentiellement celle liée aux argiles (fraction inférieure à 5 μm). Les teneurs en matière organique permettent le développement d'agrégats stables de taille comprise entre 5 et 200 μm pour le vertisol et de plus de 200 μm pour le ferrisol. La conséquence est une nette diminution de la sensibilité à la dispersion (testée au laboratoire) et de la détachabilité (testée au champ par simulation de pluie).

Les résultats obtenus par la méthode de terrain apportent une validation aux tests de laboratoire.

MOTS CLÉS : Agrégation – Détachabilité – Ferrisol – Maraîchage – Martinique – Matière organique – Prairie – Simulation de pluie – Vertisol.

ABSTRACT

EFFECTS OF SOIL ORGANIC MATTER ON SOIL STABILITY AND SOIL DETACHMENT FOR A VERTISOL AND A FERRISOL (MARTINIQUE)

For two soil types (vertisol and ferrallitic soil), two land management – either market gardening or pastures – involved the differentiation of organic status in quantity and quality. Soil structural stability was affected.

By two experimental approaches, in the laboratory and on the field using rainfall simulation, it was displayed the positive effect of soil organic matter on soil aggregation and the decreasing of soil detachment. Ferrisol had a better stability than vertisol.

Soil organic matter which was responsible for the increase of soil stability was colloidal organic matter linked with clay particles. This organic matter permitted the development of medium-sized soil aggregates (5-200 μm) for the vertisol and largest aggregates (> 200 μm) for the ferrisol. Consequently, it was observed, for the situations with high organic content, a sensible decreasing: 1. of soil dispersability detected with the laboratory method and 2. of soil detachment detected with the field method (rainfall simulation). Field results had a good fit with the laboratory results.

KEY WORDS: Aggregation – Ferrisol – Market gardening – Martinique – Pasture – Rainfall simulation – Soil detachment – Soil organic matter – Vertisol.

INTRODUCTION

De la stabilité structurale du sol *in situ* dépendent de nombreux processus liés aux relations eau-sol-plante. L'approche de la stabilité de la structure sur le terrain fut souvent qualitative, essentiellement descriptive. Sa quantification est le fait de techniques de laboratoire, qui, en routine, ne respectent que peu l'organisation initiale du sol et son état hydrique. La prédiction des comportements au champ à partir de quantifications faites au laboratoire a toujours posé de nombreux problèmes. Toutefois, grâce aux techniques de simulation de pluie, il est possible maintenant de quantifier les comportements de la surface du sol. Il n'existe, à l'heure actuelle, que peu de travaux systématiques qui mettent en parallèle des tests de stabilité structurale au laboratoire et ceux de comportements au champ sous pluie simulée (VALENTIN *et al.*, 1990 ; LE BISSONNAIS *et al.*, 1990). Le premier objectif de cet article sera de comparer une méthode de caractérisation de l'agrégation du sol au laboratoire et le comportement de ce même sol sous pluie simulée (en étudiant tout particulièrement sa détachabilité).

La stabilité structurale du sol dépend de nombreux facteurs (nature des constituants, texture, précédents culturels, etc.) et, en particulier, de la qualité et du niveau des stocks organiques. Si l'effet des teneurs en matière organique sur la stabilité structurale des sols tropicaux a été maintes fois étudié au laboratoire (MOREL et QUANTIN, 1972 ; TALINEAU *et al.*, 1979), les mesures quantitatives au champ sont beaucoup plus rares. Par ailleurs, la hiérarchisation des matières organiques du sol impliquées dans la stabilité de l'agrégation est encore mal connue (débris végétaux / complexes organo-limono-argileux, substances préhumiques / polysaccharides / composés humiques). Le second objectif de cette étude est : 1. d'analyser le comportement au champ sous pluie simulée de la surface de sols génétiquement identiques mais très différenciés par le niveau de leur stock organique ; 2. d'essayer d'identifier les compartiments organiques responsables des variations d'agrégation et de comportement observés.

Pour cette étude, menée à la Martinique, nous avons choisi deux types de sols : un vertisol et un sol faiblement ferrallitique (ferrisol). Pour chacun de ces sols, nous avons sélectionné deux parcelles, dont les horizons de surface présentent, par suite de leur histoire culturale, des teneurs en matière organique très différentes (ALBRECHT *et al.*, 1992).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les situations étudiées

Les situations étudiées se trouvent à la Martinique, île volcanique de l'arc Caraïbe. Les deux types de sols concernés par cette étude, vertisol et ferrisol (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965), sont développés à partir de roches volcaniques de type andésitique. Les vertisols étudiés sont situés dans le sud-est de la Martinique. Cette région a une pluviosité de 1 300 mm par an (source : *Atlas de la Martinique*) et subit une saison sèche de trois à cinq mois par an. Les ferrisols étudiés sont situés dans la partie centrale de l'île, sous une pluviosité comprise entre 1 800 et 2 200 mm par an. Deux systèmes de culture sont pratiqués depuis plus de 10 ans sur ces deux types de sols : les cultures maraîchères (une ou deux cultures par an, jachère de courte durée — inférieure à 6 mois) et les cultures fourragères (essentiellement prairies à *Digitaria decumbens*). Les situations étudiées se trouvent dans les champs d'expérimentation de la Station d'Études en Cultures Irriguées à Sainte-Anne (Martinique) pour les situations sur vertisol et de la station du Cirad/Irat au Lamentin (Martinique) et à l'Habitation Grande Savane (Ducos) pour les ferrisols. Ces situations ont été décrites respectivement par TYBURN (1986) et BARRET (1989). Les échantillons traités au laboratoire proviennent de la couche de sol 0-10 cm pour le vertisol et 0-5 cm pour le ferrisol.

LES MÉTHODES D'ANALYSES

Analyses classiques

Le carbone et l'azote organiques sont dosés par voie sèche à l'autoanalyseur Carlo Erba 1106.

La capacité d'échange cationique est dosée par la méthode à l'acétate d'ammonium. La granulométrie des sols (analyse mécanique) est déterminée par tamisages (200, 50 et 20 μm) et sédimentation (5 et 2 μm), après destruction de la matière organique par un traitement à l'eau oxygénée (20 ml d' H_2O_2 à 110 volumes pour 5 grammes de sol ; 24 heures de contact à froid puis 6 heures de contact à chaud suivi d'une courte ébullition) et dispersion à la soude (addition de NaOH N en quantité suffisante pour atteindre un pH de 10).

FRACTIONNEMENT PHYSIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

La matière organique des sols est caractérisée par une méthode de fractionnement physique selon

ALBRECHT *et al.* (1986) : agitation durant 2 heures de 40 g de sol dans 300 ml d'eau auxquels est ajoutée la quantité nécessaire de NaOH N pour atteindre un pH de 10 ; tamisages à 200, 50 et 20 μm puis séparation par sédimentation des fractions 5-20 et 0-5 μm . Concernant les fractions de tailles supérieures à 200 μm , il a été effectué une « battée » afin de différencier les matières organiques constituées de débris végétaux libres (noté fo) et celles restant associées à la fraction minérale grossière (noté fm). Toutes ces fractions sont séchées, pesées, broyées puis dosées en C et N.

TESTS D'AGRÉGATION ET DE SIMULATION DE PLUIE

L'agrégation du sol et sa stabilité sont caractérisées par trois méthodes (deux méthodes de laboratoire et une de terrain).

Test d'instabilité structurale préconisé par HENIN et al. (1960),

Après divers prétraitements à l'eau, à l'alcool, au benzène, les échantillons de sols sont agités (30 retournements à la main) et tamisés sous eau à 200 μm ; les agrégats (refus sur le tamis) ainsi obtenus sont notés Age pour le prétraitement à l'eau, Aga pour le prétraitement à l'alcool, Agb pour le prétraitement au benzène. Sur la suspension 0-200 μm , on détermine les teneurs en argile + limon fin (A + LF, 0-20 μm). L'indice $A + LF_{\text{max}}$ correspond à la valeur la plus élevée de A + LF pour les trois traitements (eau, alcool, benzène). Toutes ces analyses permettent de calculer l'indice d'instabilité structurale (Is) qui répond à la formule suivante : $Is = (A + LF)_{\text{max}} / [(Age + Aga + Agb) / 3] - 0,9 \times SG$ où SG est la masse de sables grossiers (de taille supérieure à 200 μm) définie par l'analyse mécanique.

Cinétiques de désagrégation sous eau

La méthode choisie s'inspire de celles développées par YODER (1936), WILLIAMS *et al.* (1966) et KEMPER et ROSENAU (1986). Il s'agit de suivre la cinétique de désagrégation du sol dans l'eau au cours d'agitations de durée croissante. On opère de la façon suivante :

- a. les échantillons de sols sont prélevés dans des cylindres afin de ne pas perturber leur organisation ;
- b. ils sont ramenés à la capacité au champ avant traitement ;
- c. ils sont agités dans l'eau (35 g de sol pour 250 ml d'eau ; agitateur rotatif à 50 tours. mn^{-1}) pendant des durées variables : 0, 0,5, 1, 2, 6, 12 et

18 heures. En outre, il a été ajouté à cette cinétique un point qui s'intercale entre les temps d'agitation $t = 0$ et $t = 0,5$ h correspondant à l'énergie de désagrégation préconisée par HENIN *et al.* (1960), soit 30 retournements à la main (noté 30r) ;

d. après agitation, les échantillons sont tamisés à 1 000, 500, 200, 50 et 20 μm puis fractionnés par sédimentation à 5 μm . La distribution granulométrique obtenue après chaque temps d'agitation permet de calculer ou de déterminer graphiquement (à partir d'une courbe cumulée des fréquences de chaque classe granulométrique) le diamètre médian pondéral (MWD — pour « mean weight diameter » — de VAN BAVEL (1949) et YOUKER et MCGUINNESS (1956)) qui est la médiane des fréquences cumulées.

Afin d'éviter toute confusion entre les agrégats obtenus ici et les fractions granulométriques obtenues par la méthode de fractionnement physique de la matière organique, nous définirons les conventions suivantes : 1. sont dénommées « fractions » les produits obtenus lors du fractionnement physique de la matière organique et 2. sont dénommés « agrégats » les produits obtenus lors de la cinétique de désagrégation ; pour chaque type de produit, on définira sa taille.

Afin de tester un effet « matière organique » sur l'agrégation, les échantillons traités lors de la cinétique d'agitation dans l'eau ont également fait l'objet d'une analyse mécanique avec coupure des particules les plus fines à 5 μm au lieu de 2 μm .

Simulation de pluie au champ

L'appareil utilisé est le mini-simulateur de pluie type Orstom (ASSELIN et VALENTIN, 1978) qui permet d'étudier le comportement du sol sur une surface de 1 m^2 . Dans ce travail, ce sont les pertes en terre (quantité, qualité) sous des averses à intensité de pluie constante qui ont été plus particulièrement étudiées. Pour toutes les situations testées, l'état de la surface du sol correspond à un labour manuel sur une profondeur de 5 cm (type lit de semences). Les pluies simulées ont été réalisées sur des sols ayant des teneurs en eau élevées afin : 1. d'obtenir des ruissellements élevés ; 2. de privilégier les processus de désagrégation par rapport aux processus d'éclatement des mottes (LE BISSONNAIS, 1988).

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Principales caractéristiques des situations agropédologiques étudiées.

Pour chacun des deux sols, les horizons de surface des parcelles étudiées (prairie ou maraîchage) apparaissent tout à fait comparables quant à leur texture et leurs propriétés d'échange (tabl. I) mais diffèrent fortement par leurs teneurs en matière organique. Les variations en terme d'agrégation et de stabilité structurale pourront donc être attribuées essentiellement aux variations des stocks organiques dues à l'histoire culturale des parcelles et/ou éventuellement aux différences de travail du sol des années antérieures. Ce dernier effet est probablement très minimisé pour les échantillons remaniés et de petite taille (études en laboratoire). Nous avons aussi essayé de le minorer au champ par une préparation du sol de type labour identique pour toutes les parcelles avant simulation de pluie.

Pour les deux types de sols étudiés, les horizons de surface des parcelles « prairie » ont des teneurs

en C et N deux à trois fois plus élevées que ceux des parcelles « maraîchage ». Le rapport C/N, légèrement supérieur sous prairie, traduit l'accumulation de débris végétaux à C/N élevés.

Les contenus en C des différentes fractions sont présentés dans le tableau II. On constate que :

- les différences de C total sont dues à l'ensemble des fractions (fm 200-2 000 μm exceptée) ;
- les variations pour les fractions 0-5 μm sont déjà très importantes alors que la matière organique associée à cette fraction est souvent considérée comme relativement stable par un effet protecteur des colloïdes minéraux.

La stabilité structurale selon HENIN *et al.* (1960) (tabl. III) se révèle être faible (Is élevé, de 0,7 à 1,2) pour les situations « maraîchage » mais élevée pour les situations « prairie » (Is de 0,1 à 0,3) et ce, quel que soit le type de sol. Cette différence apparaît liée à un effet « matière organique » puisque les différences les plus importantes en quantité d'agrégats stables sont observées avec le prétraitement au benzène censé mettre en évidence le rôle d'agents stabilisants

TABLEAU I
Granulométrie, teneurs en C et N, propriétés d'échange des échantillons étudiés
Particle-size distribution, C and N contents and exchange properties of studied soil samples

Situations	Granulométrie					Matière organique			Propriétés d'échange						
	<2 μm	2-20 μm	20-50 μm	50-200 μm	>200 μm	C	N	C/N	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	S	T	100S/T
	g.100g ⁻¹ sol					mgC.g ⁻¹ sol			cmol.kg ⁻¹ sol						
Vertisol :															
maraîchage	56,9	11,4	4,7	15,9	11,2	10,6	1,1	9,6	20,8	11	0,5	3,7	36,0	39,5	91,2
prairie	52,5	14,6	5,7	18,0	9,2	32,5	2,8	11,6	17,9	9,1	1,59	1,3	29,9	40,0	74,7
Ferrisol :															
maraîchage	56,1	18,1	5,0	13,1	6,6	19,7	2,1	9,4	8,3	3,0	0,5	0,2	12,0	12,1	98,9
prairie	56,3	23,3	3,3	8,5	8,7	49,1	4,6	10,7	6,7	4,0	0,6	0,5	11,8	12,3	95,9

TABLEAU II
Teneur en matière organique (en mgC.g⁻¹sol) des situations étudiées et sa distribution selon la taille des fractions
Particle-size distribution of soil organic matter (in mgC.g⁻¹soil)

Situations	Fractionnement granulométrique				
	>200 μm		5-200 μm	< 5 μm	
	total	fo	fm		
	mgC.g ⁻¹ sol				
Vertisol :					
maraîchage	0,9	0,7	0,3	3,8	5,8
prairie	9,3	8,5	0,8	11,5	11,8
Ferrisol :					
maraîchage	1,0	0,6	0,4	7,7	11,0
prairie	5,9	4,6	0,5	22,5	20,7

TABLEAU III
 Résultats du test d'instabilité structurale de Hénin (légende voir paragraphe « Matériel et méthodes »)
 Results of Hénin's structural instability test (for legend see « Matériel et méthodes »)

Situations	Is	Ag m	Ag e	Ag a	Ag b	A + LF max	SG
Vertisol :							
maraîchage	0,70	46,7	46,3	58,2	34,9	26,1	10,3
prairie	0,27	63,2	48,5	75,8	62,2	14,5	9,3
Ferrisol :							
maraîchage	1,24	42,2	47,5	67,6	11,4	43,3	8,0
prairie	0,14	73,9	78,7	83,6	59,5	9,4	5,6

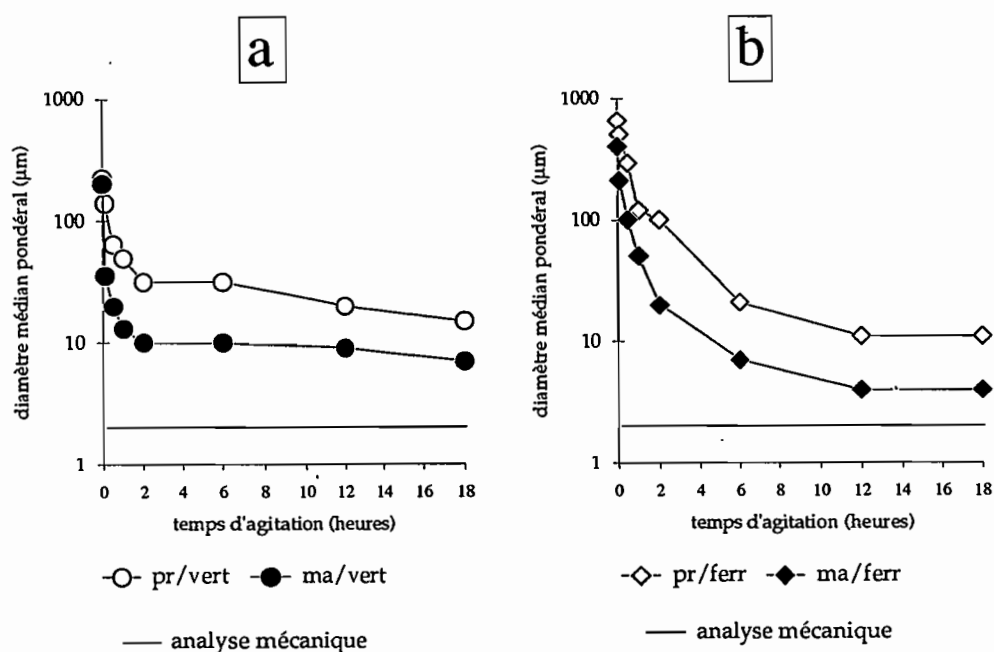


FIG. 1 – Évolution avec le temps d'agitation dans l'eau du diamètre médian des agrégats des sols des situations étudiées (a : vertisol ; b : ferrisol ; vert : vertisol ; ferr : ferrisol ; ma : maraîchage ; pr : prairie).
 Variation with the shaking time of the soil aggregate mean weight diameter (a : vertisol ; b : ferrisol ; vert : vertisol ; ferr : ferrisol ; ma : market gardening ; pr : pasture).

de type colloïdes organiques. Parallèlement, on note une sensibilité à la dispersion des éléments fins (teneur en A+LF_{max}) beaucoup plus forte sous « maraîchage » (26 à 43 %) que sous « prairie » (9 à 15 %).

Effets de la cinétique de désagrégation sur les sols étudiés

VERTISOL

L'ensemble des résultats (fig. 1a et 2a) fait apparaître deux phases dans la cinétique de désagrégation : une phase rapide (0 à 2 h) et une phase très

lente (> 2 h). La figure 1a montre l'évolution, avec le temps d'agitation, du diamètre médian pondéral qui est une approche globale de l'état d'agrégation du sol. On constate que : 1. quelle que soit la situation considérée, les valeurs du diamètre médian pondéral des échantillons bruts sont toujours supérieures à celles des échantillons traités à l'eau oxygénée (analyse mécanique) ; 2. la vitesse de désagrégation est nettement plus élevée pour la situation « maraîchage » que pour la situation « prairie » ; 3. la valeur du diamètre médian reste largement supérieure à

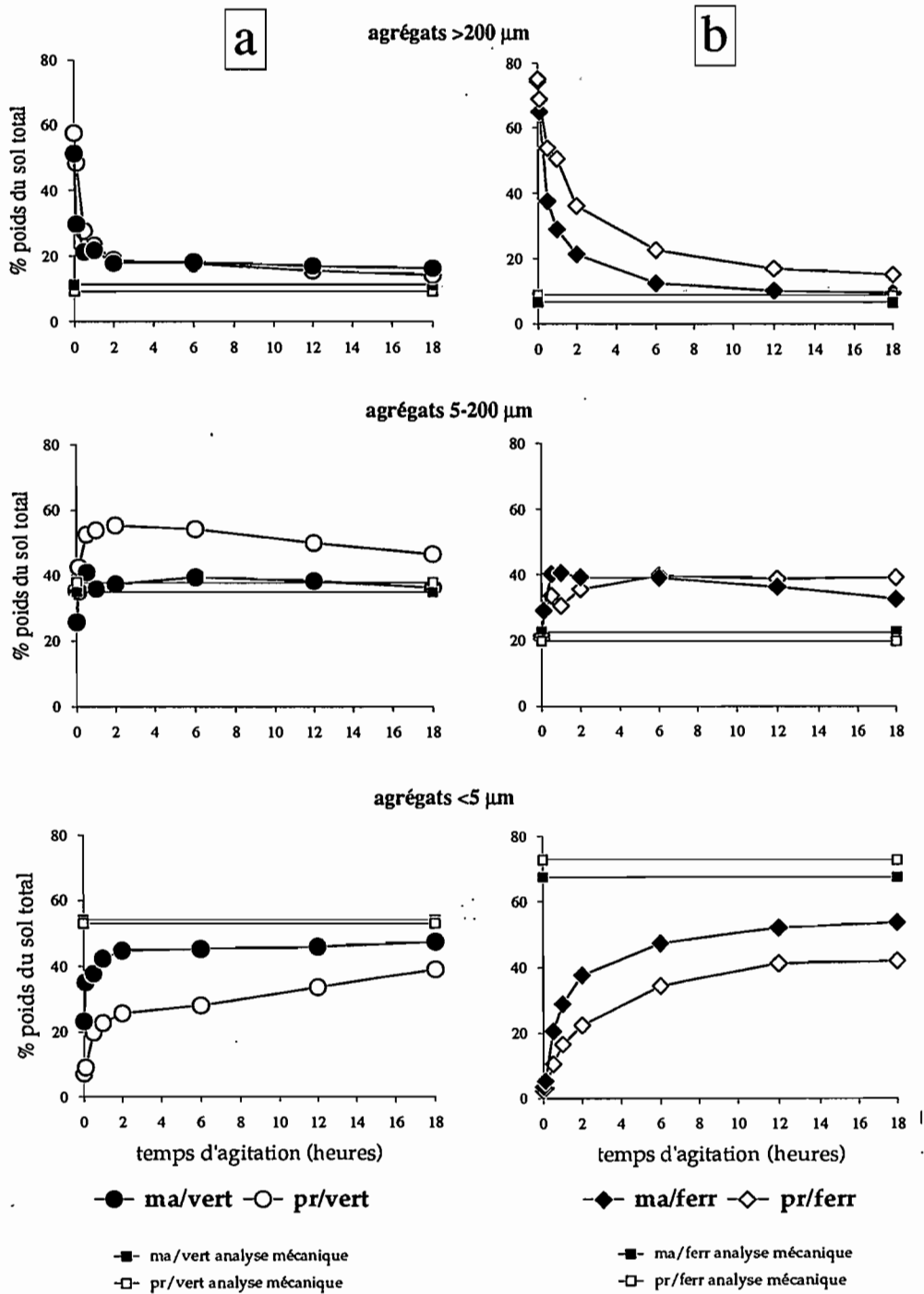


FIG. 2 – Évolution avec le temps d'agitation dans l'eau des classes d'agrégats constitutives des sols des situations étudiées (légende *idem* fig. 1).
 Variation with the shaking time of the soil constitutive aggregates (for legend see fig.1).

10 μm pour la situation « prairie » après la phase initiale de désagrégation rapide, alors qu'elle est proche de 10 μm pour la situation « maraîchage ». Ces résultats sont le reflet d'une évolution différente, selon la situation, des masses des différentes classes d'agrégats avec le temps d'agitation (fig. 2a).

Pour la situation « maraîchage », les masses de toutes les classes d'agrégats atteignent très rapidement — deux heures d'agitation au maximum — des valeurs proches de celles obtenues après analyse mécanique. Par contre, pour la situation « prairie », si les agrégats de taille supérieure à 200 μm suivent un comportement identique à ceux sous maraîchage, les évolutions des deux classes d'agrégats 5-200 μm et 0-5 μm sont très différentes. Dans la phase de désagrégation rapide (de 0 à 2 heures d'agitation), la masse des agrégats de 5-200 μm sous prairie est beaucoup plus élevée que sous maraîchage et celle de 0-5 μm beaucoup plus faible. Qui plus est, notons que, au premier point de la cinétique d'agitation (simple contact dans l'eau pendant 16 heures), les agrégats de taille inférieure à 5 μm de la situation « prairie » (fig. 2a) ne représentent que 7,3 % du sol total alors que pour la situation « maraîchage » ils représentent déjà 23,2 % du sol total. Cette différence de dispersabilité s'accroît dès les premiers points de la cinétique d'agitation, puisque au point $t = 30$ mn la classe d'agrégats de taille < 5 μm de la situation « maraîchage » représente 80 % de la fraction < 5 μm totalement dispersable contre 50 % pour la situation « prairie ». Dans la seconde phase, on ne note qu'une diminution lente et progressive de la masse des agrégats 5-200 μm et une augmentation lente de la masse des agrégats de taille inférieure à 5 μm . Pour ces deux classes, on n'atteint jamais la valeur obtenue après analyse mécanique.

FERRISOL

La désagrégation pour les situations sur ferrisol est nettement plus lente que pour celles sur vertisol et les diamètres médians pondéraux (fig. 1b) des deux situations étudiées restent élevés dans la première phase de la cinétique d'agitation (de l'ordre de 100 μm et au-dessus). Toutefois, le mode d'occupation du sol influe, tout comme pour les situations sur vertisol, sur la vitesse de désagrégation (plus rapide pour la situation « maraîchage ») et la valeur du diamètre médian — plus élevée pour la situation « prairie » — dans la seconde phase de la cinétique d'agitation (6 heures et plus). Les agrégats de taille supérieure à 200 μm montrent des évolutions différentes (fig. 2b) : sous prairie, ces

agrégats se désagrègent plus lentement sans jamais atteindre la valeur obtenue par l'analyse mécanique. Cette différence entre situations se retrouve de manière inversée pratiquement totalement sur les masses des classes d'agrégats de taille inférieure à 5 μm (maraîchage > prairie). En effet, peu de différences apparaissent pour la classe d'agrégats de taille comprise entre 5 et 200 μm , dont les masses, pour les deux situations, sont toujours largement supérieures à celles obtenues par l'analyse mécanique. Cette stabilité des agrégats 5-200 μm dans ces deux situations a également pour conséquence (fig. 2b) que la dispersion obtenue au cours de la cinétique de désagrégation est toujours nettement inférieure à celle obtenue par l'analyse mécanique.

DISCUSSION : EFFETS DU TYPE DE SOL ET DE LA MATIÈRE ORGANIQUE SUR L'AGRÉGATION

L'agrégation, telle qu'elle s'exprime à travers l'évolution du diamètre médian pondéral au cours de la cinétique d'agitation, est influencée à la fois par le type de sol et la teneur en matière organique. Concernant le vertisol, l'agrégation est très instable et l'effet de la matière organique se fait essentiellement sentir sur les classes d'agrégats de petite taille. Concernant le ferrisol, la stabilité de l'agrégation est nette et l'effet matière organique est sensible quelle que soit la taille des classes d'agrégats considérées.

La méthode « cinétique d'agitation » permet de mettre en évidence un ou deux niveaux d'agrégation du sol et d'appréhender la stabilité du niveau d'agrégation d'ordre supérieur. En effet, les organisations et stabilités suivantes ont été mises en évidence :

– *situation maraîchage sur vertisol (ma/vert)*. Des agrégats de taille supérieure à 200 μm sont rapidement détruits par l'énergie liée à l'agitation rotative dans l'eau ; les constituants de ces agrégats sont des éléments constitutifs primaires du sol (sables, limons et argiles), puisque les masses obtenues sont proches de celles obtenues par l'analyse mécanique ;

– *situation prairie sur vertisol (pr/vert)*. Une désagrégation aussi rapide des agrégats > 200 μm donne des produits toujours agrégés (puisque de masse nettement supérieure à celle obtenue par l'analyse mécanique) mais de taille inférieure (5-200 μm). Leur stabilité est importante puisque l'on n'observe qu'une diminution progressive de leur poids au cours de la seconde phase de la cinétique d'agitation ;

– *situation maraîchage sur ferrisol (ma/ferr)*. On observe sur cet échantillon une dynamique de désagrégation proche de celle de la situation pr/vert mais avec une vitesse de désagrégation des agrégats > 200 μm nettement plus lente ;

– situation prairie sur ferrisol (pr/ferr). On notera dans ce cas une grande stabilité des agrégats de taille comprise entre 5 et 200 μm (aucune diminution dans le temps) et également une agrégation de taille $> 200 \mu\text{m}$ très stable : cette fraction représente encore 50 % du sol total après une heure d'agitation alors que la fraction $> 200 \mu\text{m}$ après destruction de la matière organique n'est que de 8 %.

L'effet du type de sol sur l'agrégation se résume ainsi :

1. concernant le vertisol : les agrégats de taille supérieure à 200 μm sont peu stables, quelle que soit la situation ;

2. pour le ferrisol : les agrégats de taille supérieure à 200 μm et compris entre 5 et 200 μm sont moyennement stables.

L'effet « matière organique », considéré ici à travers l'effet « prairie », se traduit pour les situations sur vertisols par le développement d'agrégats de taille comprise entre 5 et 200 μm dont on notera la stabilité. Concernant les situations sur ferrisol, les agrégats de taille supérieure à 200 μm (et aussi, à un degré moindre, ceux compris entre 5 et 200 μm) sous prairie sont très stables. Ces stabilisations sont essentiellement attribuables aux produits organiques liés aux fractions inférieures à 5 μm (tabl. II). Les teneurs en carbone (par gramme d'agrégat) des agrégats obtenus après 6 heures d'agitation (tabl. IV) montrent bien l'effet « matière organique » ; en effet, les teneurs en carbone sont systématiquement plus élevées pour les situations prairies. On notera en particulier des teneurs en carbone élevées pour les classes d'agrégats les plus stables : 1. pour le vertisol et la classe d'agrégats 5-200 μm , 25,4 mgC.g^{-1} pour la situation prairie contre

9,5 mgC.g^{-1} pour la situation maraîchage ; 2. pour le ferrisol et la classe d'agrégats de taille supérieure à 200 μm , 46,9 mgC.g^{-1} pour la situation prairie et 13,2 mgC.g^{-1} pour la situation maraîchage. A *contrario*, les teneurs en carbone des classes d'agrégats qui ont un comportement analogue (par exemple les agrégats de taille comprise entre 5 et 200 μm pour pr/vert, pr/ferr et ma/ferr) sont proches, de l'ordre de 20 mgC.g^{-1} dans ce cas. Enfin, la faible stabilité des agrégats de taille supérieure à 200 μm de pr/vert malgré des teneurs élevées en carbone (46,4 mgC.g^{-1}) peut s'expliquer par le fait que l'essentiel de la matière organique est sous forme de débris végétaux ($fo = 132,2 \text{ mgC.g}^{-1}$) et beaucoup plus faiblement sous forme colloïdale ($fm = 16,4 \text{ mgC.g}^{-1}$). De manière globale, il est intéressant de constater que, toutes situations et classes d'agrégats confondues, il y a agrégation stable lorsque les teneurs en carbone des agrégats $> 200(fm)$, 5-200 et 0-5 μm sont supérieures à 20 mgC.g^{-1} . EMERSON *et al.* (1986) et HAYNES et SWIFT (1990) obtiennent des résultats analogues avec des méthodes de cinétiques d'agitation mais sans appréhender plusieurs fractions inférieures à 250 μm . Ils attribuent l'amélioration de la stabilité des ces agrégats à des produits organiques extractibles à l'eau chaude tels que des polysaccharides que l'on peut également retrouver dans les fractions organiques liées aux argiles des vertisols et ferrisols étudiés (FELLER *et al.*, 1991).

De nombreux auteurs (TISDALL et OADES, 1982 ; OADES, 1984) ont, à partir de méthodes de caractérisation granulométrique des agrégats mais n'utilisant pas une approche cinétique, proposé et testé une classification par taille des agrégats : macroagrégats pour des tailles supérieures à 250 μm et microagrégats pour des tailles inférieures à 250 μm . L'effet matière organique sur l'agrégation pour ces auteurs, ainsi que pour ELLIOTT (1986), dépend de la taille des agrégats considérés. Les débris végétaux, à *turn-over* rapide, facilement décomposables (PAUL, 1984 ; PARTON *et al.*, 1983 ; VAN VEEN et PAUL, 1981) garantiraient une bonne macroagrégation (agrégats $> 250 \mu\text{m}$) alors que la matière organique responsable de la microagrégation (agrégats $< 250 \mu\text{m}$) aurait un *turn-over* lent et un âge apparent élevé. La conséquence de ces considérations est que l'exploitation agricole d'un sol a essentiellement une influence sur la macroagrégation (OADES, 1984). Si l'on appliquait ces conclusions aux résultats présentés ici, aucune différence n'apparaîtrait entre les situations étudiées (fig. 2 : fractions $> 200 \mu\text{m}$ au temps t_0). Ceci ren-

TABLEAU IV
Comparaison des teneurs en carbone (en mgC.g^{-1} agrégat) des agrégats stables après 6 heures d'agitation rotative
Aggregate organic carbon content (in mgC.g^{-1} aggregate) after 6 hours of head over head shaking

Situations	Classes d'agrégats				
	total	$>200 \mu\text{m}$		5-200 μm	$< 5 \mu\text{m}$
		fo	fm		
mgC.g^{-1} agrégat					
Vertisol :					
maraîchage	5,7	216,8	1,7	9,5	12,5
prairie	46,4	132,3	16,4	25,4	25,8
Ferrisol :					
maraîchage	17,5	192,0	13,2	20,9	20,2
prairie	61,0	207,8	46,9	22,9	40,5

force la nécessité de prendre en compte les classes d'agrégats de tailles inférieures à 250 μm , puisque la méthodologie utilisée ici met en évidence le rôle fondamental des agrégats de taille comprise entre 5 et 200 μm . L'agent de stabilisation de ces agrégats est probablement beaucoup plus une matière organique de type colloïdale que des débris végétaux.

Comportement des sols étudiés sous pluies simulées

VERTISOL

Les deux hydrogrammes, maraîchage et prairie, montrent des courbes analogues. Le ruissellement s'installe rapidement et devient maximum en moins de dix minutes de pluie (fig. 3a). Dans les

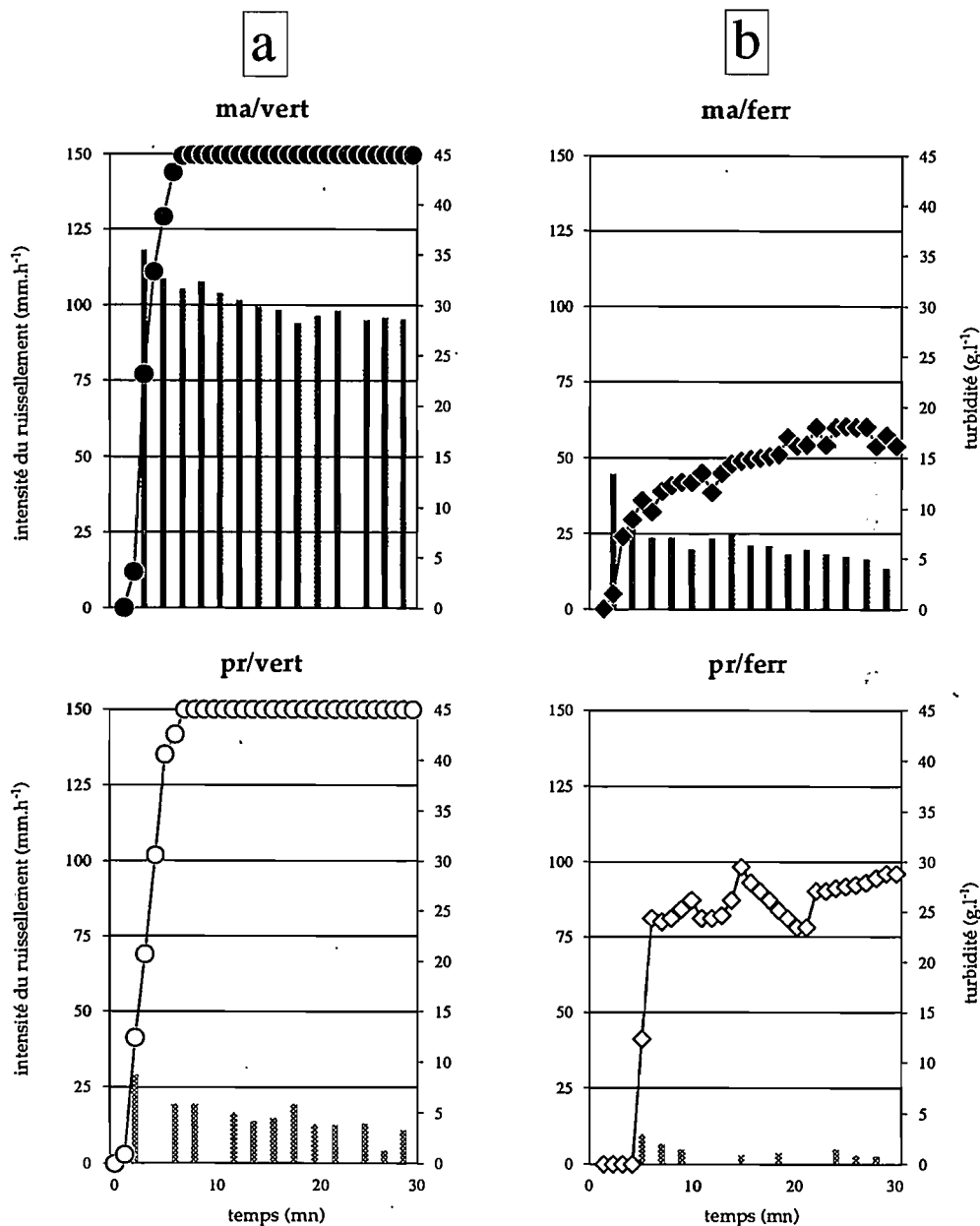


FIG. 3 – Ruissellement (courbes) et turbidité (histogrammes) sous pluie simulée (Intensité de pluie = 150 mm/h ; état de la surface du sol identique dans toutes les situations : labour manuel ; a : vertisol ; b : ferrisol).
Runoff (curves) and turbidity (histograms) under simulated rainfall (rainfall intensity = 150 mm/h ; identical soil surface for all studied situations : handploughed ; a : vertisol ; b : ferrisol).

deux situations, les fentes de retrait sont fermées. Ainsi l'eau arrivant à la surface du sol ne peut que ruisseler. Les turbidigrammes, par contre, montrent des différences spectaculaires : 1. pour la situation « maraîchage », les valeurs de turbidité sont très élevées (de l'ordre de 30 g.l⁻¹) et varient peu dans le temps ; 2. pour la situation « prairie », les valeurs de la turbidité sont beaucoup plus faibles (4,4 g.l⁻¹ en moyenne) et diminuent avec le temps.

FERRISOL

L'hydrogramme pour la situation « prairie » montre l'installation rapide d'un ruissellement dont l'intensité atteint une valeur moyenne de 80 mm.h⁻¹. Pour la situation « maraîchage », le ruissellement est plus faible. Les turbidités décroissent rapidement dans les deux situations mais ont des valeurs nettement plus élevées sous maraîchage que sous prairie.

DISCUSSION : RELATION DISPERSABILITÉ-DÉTACHABILITÉ POUR LES SITUATIONS ÉTUDIÉES

Les turbidités obtenues pour les quatre situations étudiées donnent le classement suivant : ma/vert > ma/ferr ≈ pr/vert > pr/ferr. Ce classement est le même pour les classes d'agrégats inférieures à 5 µm obtenues au laboratoire pour un temps d'agitation de 30 minutes (tabl. V). Ces résultats sont en accord avec ceux de MILLER et BAHARUDDIN (1987) pour des alfisols et des ultisols.

Plus le sol est agrégé, moins il se disperse et moins ses particules constitutives s'en détachent sous les impacts des gouttes de pluies. Dans cet esprit, POESEN et SAVAT (1981 a et b) et HUSSAIN *et*

al. (1988) ont modélisé la relation entre le diamètre médian des particules et leur susceptibilité au détachement : plus le diamètre médian d'un échantillon de sol diminue, plus sa détachabilité (mesurée par la turbidité des eaux de ruissellement sous pluie simulée) augmente et ce jusqu'à une valeur de 60 µm environ. Les valeurs des diamètres médians pondéraux obtenus pour le temps t = 30r et t = 30 mn sont rapportées au tableau V et peuvent être ainsi comparées aux valeurs de turbidité. Le classement est analogue à celui des turbidités (mesurées sur le terrain) pour les situations à plus forte (ma/vert) et à plus faible (pr/ferr) turbidité. Les situations (ma/ferr et pr/vert) dont les valeurs des diamètres médians sont proches ont des turbidités analogues.

Comparaison des différentes approches méthodologiques

Le tableau VI résume le comportement des quatre situations selon les différentes approches méthodologiques utilisées. Ce tableau est conçu de façon à classer les situations en termes de stabilité décroissante : la stabilité structurale des situations décroît de la gauche vers la droite du tableau.

Toutes les approches méthodologiques mettent en évidence la stabilité élevée de la situation prairie sur ferrisol. Le test de cinétique de désagrégation dans l'eau montre, quel que soit l'indice utilisé, la très faible stabilité de la situation maraîchage sur vertisol. Ces deux situations extrêmes sont bien caractérisées par le test de terrain (simulation de pluie). La position intermédiaire des

TABLEAU V
Dispersabilité et détachabilité des sols des situations étudiées
Soil dispersability and soil detachment of the studied sites

Situations	Dispersabilité			Détachabilité turbidité (g.l ⁻¹)	Désagrégation diamètre médian pondéral (µm) selon le temps d'agitation	
	f < 5 µm dispersée (g.100g ⁻¹ sol) selon le temps d'agitation				t = 30 r	t = 30 mn
	t = 0	t = 30 r	t = 30 mn			
Vertisol :						
maraîchage	23,2	35,1	37,7	30,4	36	20
prairie	7,3	9,1	19,8	4,4	140	65
Ferrisol :						
maraîchage	3,5	5,4	20,7	6,7	210	100
prairie	2,3	3,2	10,4	1,5	500	290

TABLEAU VI
 Comparaison des méthodes de caractérisation de la stabilité structurale du sol
Comparison of the methods for soil structural stability characterization

Stabilité de l'agrégation vue au travers	Classement des situations						
du test de Hénin							
1/ (Is)	pr/ferr	>	pr/vert	>	ma/vert	>	ma/ferr
Age	pr/ferr	>	pr/vert	≥	ma/ferr	≥	ma/vert
Aga	pr/ferr	>	pr/vert	>	ma/ferr	>	ma/vert
Agb	pr/ferr	>	pr/vert	>	ma/vert	>	ma/ferr
1/ (A+LF _{max})	pr/ferr	>	pr/vert	>	ma/vert	>	ma/ferr
des cinétiques de désagrégation							
Diamètre médian t = 30 r	pr/ferr	>	ma/ferr	>	pr/vert	>	ma/vert
1/ (Dispersabilité t = 30 r)	pr/ferr	>	ma/ferr	>	pr/vert	>	ma/vert
Diamètre médian t = 30 mn	pr/ferr	>	ma/ferr	>	pr/vert	>	ma/vert
1/ (Dispersabilité t = 30 mn)	pr/ferr	>	pr/vert	≈	ma/ferr	>	ma/vert
Stabilité des agrégats > 200 μm	pr/ferr	>	ma/ferr	>	pr/vert	>	ma/vert
Stabilité des agrégats 5-200 μm	pr/ferr	>	pr/vert	≈	ma/ferr	>	ma/vert
du comportement sous pluie simulée							
1/ (Turbidité)	pr/ferr	>	pr/vert	≈	ma/ferr	>	ma/vert

situations ma/ferr et pr/vert exprimée par le test de terrain se trouve être caractérisée par les cinétiques de désagrégation, en particulier par les indices de dispersabilité et la stabilité au cours du temps des agrégats de taille comprise entre 5 et 200 μm. Les résultats obtenus par le test de Hénin, qui sont dominés par les valeurs d'agrégats et de la fraction fine (argile + limon fin) obtenus après le prétraitement au benzène, ne semblent pas, dans le cadre de cette étude, être validés par le test au champ, excepté pour la situation pr/ferr.

De manière générale, la méthode « cinétique d'agitation » appréhende essentiellement les processus liés à la désagrégation (usure progressive d'agrégats préalablement humectés), alors que le test Is prend également en compte les processus liés à l'éclatement des agrégats. Ce sont ces processus de désagrégation qui sont, au champ et dans les conditions expérimentales de cette étude, responsables de la détachabilité des sols étudiés.

CONCLUSION

Les méthodes proposées, tant au laboratoire (caractérisation de l'agrégation au laboratoire par une cinétique d'agitation dans l'eau) qu'au champ (caractérisation de la détachabilité sous pluies simulées) ont permis d'appréhender les effets du

type de sol et de la matière organique (à travers des effets « prairie » et « maraîchage ») sur les niveaux d'agrégation du sol et sa stabilité structurale.

Pour les ferrisols, le niveau d'agrégation stable est celui des agrégats de 5-200 μm. Cet effet peut être attribué, entre autres, au rôle agrégeant des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium présents dans ces sols (BARRET, 1989). Il en résulte une relativement faible sensibilité à la détachabilité ; celle-ci est encore diminuée pour des échantillons riches en matière organique (prairie) par suite de la formation d'agrégats de taille supérieure à 200 μm. La comparaison des résultats obtenus par ces deux approches est possible car, pour les deux méthodes, les échantillons sont traités à l'état humide ; ainsi les processus en cause, sur le terrain comme au laboratoire, sont ceux liés à la désagrégation des mottes et non à leur éclatement (LE BISSONNAIS *et al.*, 1990).

Pour les vertisols, sous culture maraîchère (teneur en carbone de l'ordre de 10 mgC. g⁻¹ sol), aucune agrégation stable n'est définie par la méthode de cinétique d'agitation dans l'eau. Dès les faibles énergies, ces échantillons se désagrègent en leurs constituants élémentaires ; leur détachabilité atteint des niveaux très élevés (turbidité de l'ordre de 30 g.l⁻¹, soit une perte en terre de l'ordre de 30 t.ha⁻¹, pour une pluie de 30 minutes et

une intensité de 150 mm.h⁻¹). L'effet « matière organique » permet le développement d'une agrégation stable de taille comprise entre 5 et 200 µm et les tests de terrain sous pluie simulée montrent, pour les situations prairies sur vertisol, des détachabilités dont les valeurs sont sept fois plus faibles que celles observées pour les situations maraîchage sur vertisol.

L'effet « matière organique » sur l'agrégation dans les deux types de sols étudiés provient de produits colloïdaux liés à la fraction limono-argileuse du sol. Toutes situations confondues, il est intéressant de noter que, pour qu'il y ait une agrégation stable, la valeur minimale requise de la teneur en carbone de la classe d'agrégat correspondante doit

être de l'ordre de 20 mgC . g⁻¹.

Sur le plan méthodologique, ces premiers résultats, qui ne concernent que quatre échantillons de sols, indiquent que la méthode de cinétique de désagrégation, comme test de laboratoire, est plus probante que le test Is en matière de prédiction de comportement au champ de la structure des sols. D'autres études sont nécessaires pour valider ou infirmer ces premières données.

REMERCIEMENTS

Les résultats de cet article traitant des ferrisols ont pu être obtenus grâce au soutien du programme DBT-INSU (thème Fleuves et Érosion, contrat n° 893833).

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 5 avril 1993.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRECHT (A.), BROSSARD (M.), FELLER (C.), 1986. – « Étude de la matière organique des sols par fractionnement granulométrique. 2 – Augmentation par une prairie à *Digitaria decumbens* du stock organique de vertisols cultivés à la Martinique » in *C.R. du 13^e Cong. Int. AISS*, Hambourg. Vol V : 214-215.
- ALBRECHT (A.), BROSSARD (M.), CHOTTE (J.L.), FELLER (C.), 1992. – Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, vol. XXVII, n° 1 : 23-36.
- ASSELIN (J.), VALENTIN (C.), 1978. – Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, Vol. XV, n° 4 : 321-350.
- BARRET (P.), 1988. – Effets du système de culture sur l'agrégation des horizons de surface de ferrisols (Martinique) : influence du stock organique. *Rapp. multigr.*, DEA Univ. Nancy-I et Centre Orstom de Fort-de-France.
- COLMET-DAAGE (F.), LAGACHE (P.), 1965. – Caractérisation de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, vol. III, n° 2 : 91-121.
- ELLIOTT (E.T.), 1986. – Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 627-633.
- EMERSON (W.W.), FOSTER (R.C.), OADES (J.M.), 1986. – « Organo-mineral complexes in relation to soil aggregation and structure » in P.M. HUANG and M. SCHNITZER (eds.), 1986 : 521-548.
- FELLER (C.), FRANÇOIS (C.), VILLEMIN (G.), PORTAL (J.M.), TOUTAIN (F.), MOREL (J.L.), 1991. – Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 312, Sér. II : 1491-1497.
- HAYNES (R.J.), SWIFT (R.S.), 1990. – Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *J. Soil Sci.*, 41 : 73-83.
- HUANG (P.M.), SCHNITZER (M.) (eds.), 1988. – *Interactions of soils minerals with natural organics and microbes*, SSSA Special Publication n° 17.
- HUSSAIN (S.K.), MIELKE (L.N.), SKOPP (J.), 1988. – Detachment of soil affected by fertility management and crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52 : 1463-1468.
- HENIN (S.), GRAS (J.), MONNIER (G.), 1960. – *Le profil cultural*. Société d'éditions des Ingénieurs agricoles, Paris.
- KEMPER (W.D.), ROSENAU (R.C.), 1986. – « Aggregate stability and size distribution » in *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy monographs n° 9 (2nd edition) : 425-442.
- LE BISSONNAIS (Y.), BRUAND (A.), JAMAGNE (M.), 1990. – Étude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apport à la notion d'érodibilité des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXV, nos 1-2 : 31-40.
- LOWRANCE *et al.* (eds.), 1983. – *Nutrient cycling in agricultural ecosystems*, Athens, The University of Georgia Press, Special Publication n° 23.
- MOREL (R.), QUANTIN (A.), 1972. – Observations sur l'évolution à long terme de la fertilité des sols cultivés à Grimari (République Centrafricaine). *L'Agron. Trop.*, 27 : 667-739.
- MILLER (W.P.), BAHARUDDIN (M.K.), 1987. – Particle size of interrill-eroded sediments from highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51 : 1610-1615.
- OADES (J.M.), 1984. – Soil organic matter and structural stability : Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76 : 319-337.

- PARTON (W.J.), ANDERSON (D.W.), COLE (C.V.), STEWART (J.W.B.), 1983. – « Simulation of organic matter formation and mineralization in semi-arid agroecosystems » in R.R. LOWRANCE *et al.* (eds.), 1983 : 533-550.
- PAUL (E.A.), 1984. – Dynamics of organic matter in soils. *Plant and Soil*, 76 : 275-285.
- POESEN (J.), SAVAT (J.), 1981. – Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I : Calculation of absolute data on detachability and transportability. *Catena*, 8 : 1-17.
- POESEN (J.), SAVAT (J.), 1981. – Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part II : Detachability and transportability measurements. *Catena*, 8 : 19-41.
- TALINEAU (J.C.), BONZON (B.), FILLONNEAU (C.), HAINNEAUX (G.), 1979. – Contribution à l'étude d'un agrosystème prairial dans le milieu tropical humide de la Côte-d'Ivoire. 1. Analyse de quelques paramètres de l'état physique du sol. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 2 : 141-157.
- TISDALL (J.M.), OADES (J.M.), 1982. – Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33 : 141-163.
- TYBURN (P.), 1986. – *Effet de l'intensification des cultures maraîchères et prairiales sur les propriétés de vertisols et ferrisols de la Martinique.* Orstom Martinique et Istom Le Havre, *rapp. multigr.*, 85 p.
- VALENTIN (C.), CHEVALLIER (P.), FRITSCH (E.), JANEAU (J.L.), 1990. – « Le fonctionnement hydrodynamique aux petites échelles » in *Equipe HYPERBAV; Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide.* Paris, Orstom, Études et Thèses : 147-163.
- VAN BAVEL (C.H.M.), 1949. - Mean weight diameter of soil aggregates as statistical index of aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 14 : 20 - 23.
- VAN VEEN (J.A.), PAUL (E.A.), 1981. - Organic carbon dynamics in grassland soils. 1. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.*, 61 : 185-201.
- WILLIAMS (B.G.), GREENLAND (D.J.), LINDSTROM (G.R.), QUIRK (J.P.), 1966. – Techniques for the determination of the stability of soil aggregates. *Soil Sci.*, 101 : 157-163.
- YODER (R.E.), 1936. – A direct method of aggregate analysis of soils and study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.*, 28 : 337-351.
- YOUKER (R.L.), MCGUINNESS (J.L.), 1956. – A short method of obtaining mean weight diameter values of aggregate analysis of soils. *Soil Sci.*, 83 : 291-294.