

# Déterminants biologiques de l'agrégation dans les Vertisols des Petites Antilles

## Conséquences sur l'érodibilité

E. Blanchart<sup>(1)</sup>, W. Achouak<sup>(2)</sup>, A. Albrecht<sup>(3)</sup>, M. Barakat<sup>(2)</sup>, G. Bellier<sup>(4)</sup>, Y.M. Cabidoche<sup>(5)</sup>, C. Hartmann<sup>(1)</sup>, T. Heulin<sup>(2)</sup>, C. Larré-Larrouy<sup>(6)</sup>, J.-Y. Laurent<sup>(6)</sup>, M. Mahieu<sup>(7)</sup>, F. Thomas<sup>(8)</sup>, G. Villemin<sup>(9)</sup>, F. Watteau<sup>(9)</sup>

- (1) IRD - BOST, BP 8006, 97259 Fort-de-France CEDEX, Martinique
- (2) CNRS - LEMIR/DEVM, CEA Cadarache, 13018 Saint-Paul-lez-Durance, France
- (3) IRD - ICRAF, United Nations Avenue, Gigiri, PO Box 30677, Nairobi, Kenya
- (4) IRD - LHP, 32 Avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy CEDEX, France
- (5) INRA - CRAAG, Domaine Duclos, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe
- (6) IRD - LCSC, 911 Avenue Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier CEDEX, France
- (7) Conseil Général de la Martinique (SECI), Vald d'Or, 97227 Sainte-Anne, Martinique
- (8) CNRS - ENSG - LEM, BP 40, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France
- (9) CNRS - CPB, BP 5, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy, France

Cette étude a bénéficié du soutien financier (1996-1999) de l'Action Incitative Interinstitutionnelle (AII) IRD - CIRAD - CNRS - INRA : " Biofonctionnements des sols tropicaux et gestion durable des terres ".

### RÉSUMÉ

Les Vertisols du Sud-Est de la Martinique, développés sur dépôts volcaniques ont une fragilité physique naturelle liée à leur garniture ionique relativement riche en sodium; les Vertisols de la Grande-Terre de la Guadeloupe sont calciques et plus stables physiquement. Ces sols sont actuellement soumis à une agriculture maraîchère intensive; il s'ensuit une forte dégradation physique, surtout en termes d'érosion en nappe pour les Vertisols de Martinique. L'installation de prairies permanentes, irriguées et fertilisées permet l'augmentation rapide et le maintien du stock organique à des niveaux élevés, associé à de fortes activités biologiques (racines, vers de terre, microorganismes). Les conséquences sur l'agrégation, la diminution de l'érosion et l'alimentation en eau pour les plantes sont remarquables.

Le but de cette étude est de (1) mettre en relation les activités biologiques avec l'agrégation de ces sols, (2) identifier des indicateurs biologiques de l'état physique des sols, (3) préciser les rôles respectifs des activités biologiques dans les mécanismes de l'agrégation à différentes échelles de taille et (4) étudier par quels mécanismes, les activités biologiques influencent cette agrégation.

Un dispositif de terrain adapté, basé sur une sélection d'antécédents culturels et d'itinéraires techniques variés mais aussi sur quelques situations expérimentales a permis de différencier à la fois des niveaux de teneur en carbone et des niveaux (biomasses et/ou densités) d'activité biologique. Pour chacune ou certaines de ces situations, diverses analyses ont été réalisées: (1) caractérisation de l'agrégation et de sa stabilité grâce à une cinétique de désagrégation dans l'eau; (2) caractérisation de l'érodibilité par simulation de pluie; (3) caractérisation de la matière organique (teneurs, tailles et origine); (4) caractérisation micromorphologique et analy-

tique des agrégats 2-20  $\mu\text{m}$ ; et enfin (5) à l'échelle la plus fine, étude des phénomènes d'agrégation et d'hydratation des argiles sous l'effet des polysaccharides microbiens.

Ces études ont notamment permis de montrer la relation forte qui existe entre les diverses composantes biologiques, organiques et physiques dans les Vertisols. Les racines, les vers de terre et les microorganismes (notamment ceux producteurs d'exopolysaccharides) sont plus nombreux sous prairies que sous cultures maraîchères (à la fois, pour la Martinique et la Guadeloupe). Ainsi, divers indicateurs de l'état physique de Vertisols peuvent être identifiés, parmi eux, la biomasse ou la densité de vers de terre, la biomasse racinaire, la teneur en carbohydrates, mais de façon plus pertinente, la teneur en C. Dans les Vertisols, l'introduction de plantes fourragères provoque un développement racinaire important qui stimule l'activité microbienne dans la rhizosphère. Ceci se traduit aussi par une entrée importante de C dans le système, sous différentes formes (sucres, débris...). Cette production de C, au contact des particules argileuses, permet le développement d'agrégats organo-minéraux de type 1 (présence de débris organiques) et d'agrégats bactériens qui contrôlent vraisemblablement la stabilité de l'agrégation. Dans ces sols, les vers de terre, bien que produisant des quantités importantes de turricules dans les systèmes fourragers ne semblent pas participer de façon très nette à la stabilité de l'agrégation, même s'ils modifient les proportions d'agrégats bactériens, organo-minéraux type 1 ou type 2.

Ainsi, la conservation des Vertisols, et notamment des Vertisols calco-magnésosodiques tels que ceux de Martinique nécessite l'existence d'une activité racinaire forte qui stimule l'activité microbienne et permet un enrichissement du sol en débris végétaux et produits organiques colloïdaux. L'agrégation du sol est alors renforcée et l'érodibilité beaucoup moins importante. Il est donc recommandée d'utiliser les prairies irriguées en rotation avec des cultures maraîchères intensives ou d'associer ces deux cultures au cours d'un même cycle, et d'utiliser dans tous les cas de figure, des travaux superficiels pour la préparation du sol.

#### Mots clés

Activité biologique, vers de terre, racines, microorganismes, matière organique, agrégation, gestion des terres, Vertisols, Petites Antilles

#### SUMMARY

##### ROLE OF BIOLOGICAL ACTIVITIES IN AGGREGATION OF VERTISOLS OF THE WEST INDIES. Consequences for their erodibility

Owing to a high exchangeable sodium percentage, Vertisols of south-eastern Martinique exhibit a weak structural stability and present a high susceptibility to erosion. Conversely, calcic Vertisols from Grande-Terre (Guadeloupe) are much more stable and less erodible. These soils are now used for intensive vegetable cropping. The installation of permanent, artificial and irrigated pastures allows a high and rapid C storage, associated with high biological activity (roots, earthworms, microorganisms). This in turn implies important consequences in terms of aggregation, erodibility and water availability to plants. The objectives of this work were to (1) link biological activities with soil aggregation, (2) identify some biological indicators of the soil physical state, (3) precise the respective roles of the different soil biota in aggregation at different scales, and (4) study the mechanisms by which biota influence soil aggregation. Several sites different in land use, and experimental situations were chosen in order to provide a wide range of organic, biological and physical characteristics. A number of analyses and measurements were then carried out: (1) characterization of aggregation and aggregate stability (wet sieving test), (2) characterization of soil erodibility (rainfall simulation), (3) characterization of organic matter (content, size, origin), (4) micromorphological and analytical characterization of microaggregates (2-20  $\mu\text{m}$ ), and (5) characterization of aggregates at the smallest scale and study of clay hydration by microbial polysaccharides.

Firstly, this study emphasized the strong relationship between organic, biological and physical parameters. Roots, earthworms and microorganisms (bacteria producing exopolysaccharides, especially) were more abundant under old pastures than under market gardening (in Martinique and Guadeloupe). Earthworm biomass or density, root biomass, carbohydrate content and above all, C content were thus good indicators of the soil physical state. In Vertisols, the introduction of pasture induced an important root development which stimulated microbial activity in the rhizosphere. This also led to a high C input in the soil under the form of plant debris, organic materials (carbohydrates)... This resulted in the development of organo-mineral (associated with plant debris) and microbial aggregates which determined an aggregate stability to a scale of 5-20  $\mu\text{m}$ . In the soils under pasture, earthworms produced high amounts of casts with no influence, however, on aggregate stability. Thus, the sustainable management of calco-magneso-sodic Vertisols (Martinique) requires the use of an intense root activity which stimulates microbial activity and allows an enrichment with plant debris and colloidal organic compounds. Aggregate stability is then enhanced and soil erodibility decreases. It is thus advised to introduce irrigated pasture in rotation or in association with intensive vegetable cropping, and to use superficial tillage.

## Key-words

Biological activity, earthworms, roots, microorganisms, organic matter, aggregate stability, soil management, Vertisols, Lesser Antilles

## RESUMEN

## DETERMINANTES BIOLÓGICOS DE LA AGREGACIÓN EN LOS VERTISOLES DE LAS PEQUEÑAS ANTILLAS.

## Consecuencias sobre la erodabilidad

Los Vertisoles del Sur-Este de la Martinica, desarrollados sobre depósitos volcánicos tienen una fragilidad física natural ligada a su conjunto iónico relativamente rico en sodio; los Vertisoles de la Tierra Grande de Guadalupe son cálcicos y más estables físicamente. Estos suelos son actualmente sometidos a cultivos intensivos de hortalizas; una fuerte degradación física se desarrolla, sobre todo en termino de erosión superficial para los Vertisoles de Martinica. La instalación de pastos permanentes, irrigados y fertilizados permite el aumento rápido y el mantenimiento de la provisión orgánica a niveles elevados, asociados a una fuerte actividad biológica (raíces, lombrices, microorganismos). Las consecuencias sobre la agregación, la disminución de la erosión y el aprovechamiento en agua por las plantas son notables.

El objetivo de este estudio es (1) poner en relación las actividades biológicas con la agregación de estos suelos, (2) identificar indicadores biológicos del estado físico de los suelos, (3) precisar los papeles respectivos de las actividades biológicas en los mecanismos de la agregación a diferentes escalas de tamaño y (4) estudiar por cuales mecanismos las actividades biológicas influyen esta agregación.

Un dispositivo de terreno adaptado, basado sobre una selección de antecedentes culturales y de itinerarios técnicos variados pero también sobre algunas situaciones experimentales permitió diferenciar a la vez niveles del contenido en carbono y niveles (biomasas y/o densidades) de la actividad biológica. Para cada una o ciertas situaciones, diversos análisis se realizaron: (1) caracterización de la agregación y de su estabilidad gracias a una cinética de desagregación en agua; (2) caracterización de la erodabilidad por simulación de lluvia; (3) caracterización de la materia orgánica (contenidos, tamaños y origen); (4) caracterización micro-morfológica y analítica de los agregados 2 – 20 \*m; y al final (5) una escala más fina, estudio de los fenómenos de agregación y de hidratación de las arcillas con efecto de los polisacaridos microbianos.

Estos estudios permitieron particularmente de mostrar la relación entre los diversos componentes biológicos, orgánicos y físicos en los Vertisoles. Las raíces, las lombrices y los microorganismos (particularmente los que producen los exopolisacaridos) son más numerosos en pastos que en cultivos de hortalizas (a la vez para Martinica y Guadalupe). Así, diversos indicadores del estado físico de los Vertisoles pueden ser identificados, dentro de ellos, la biomasa o la densidad de lombrices, la biomasa radicular, el contenido en carbohidratos, pero de manera más pertinente, el contenido en carbono. En los Vertisoles, la introducción de plantas forrajeras provoca un desarrollo radicular importante que estimula la actividad microbiana de la rizosfera. Esto se traduce también por una entrada importante de C en el sistema, en diferentes formas (azucres, residuos...) . Esta producción de C, al contacto de las partículas de arcillas permite el desarrollo de agregados organo-minerales de tipo 1 (presencia de residuos orgánicos) y de agregados bacterianos que controlan verosimilmente la estabilidad de la agregación. En estos suelos, las lombrices que producen cantidades importantes de turriculos en los sistemas forrajeras no parece participar de manera muy neta a la estabilidad de la agregación, mismo si ellos modifican los porcentajes de agregados bacterianos, organo-minerales tipo 1 o tipo 2.

Así, la conservación de los Vertisoles, y particularmente de los Vertisoles calco-magnesio-sódicos como los de Martinica necesita la existencia de una actividad radicular fuerte que estimula la actividad microbiana y permite un enriquecimiento del suelo en residuos vegetales y productos orgánicos coloidales. La agregación del suelo es entonces reforzada y la erodabilidad mucho menos importante. Se recomienda poner pastos irrigados en rotación con cultivos intensivos de hortalizas o asociar estos dos cultivos en un mismo ciclo, y hacer en todos los casos labranza superficial para la preparación del suelo.

## Palabras claves

Actividad biológica, lombrices, raíces, microorganismos, materia orgánica, agregación manejo de las tierras, Vertisoles, Pequeñas Antillas.

Les Vertisols des Petites Antilles sont issus de projections volcaniques contenant initialement des minéraux ferro-magnésiens (amphiboles, pyroxène) et des minéraux feldspathiques calco-sodiques, tous fortement altérables. L'altération en zone à saison sèche marquée, dont le bilan hydrique est globalement déficitaire, conduit à la conservation d'une grande partie de la silice et des bases, donc à la formation de smectites (beidellite) saturées par Ca, Mg et Na en proportions variables :

- dans le sud de la Martinique et à l'ouest de Basse-Terre en Guadeloupe, les garnitures sont globalement calco-magnésio-sodiques CaMgNa, avec dominance du calcium dans les horizons de surface et augmentation du sodium avec la profondeur; ces sols contiennent 60 à 70 g/100 g d'argile gonflante;

- sur la Grande-Terre de la Guadeloupe, ils sont nettement calciques Ca (dépôts volcaniques sur récifs calcaires); ils contiennent 80 à 90 g/100 g d'argile gonflante.

Dans les deux îles, la mécanisation lourde de la culture de la canne à sucre (travail profond du sol et récolte) date du début des années 1960. Les années quatre-vingt marquent un tournant avec l'introduction de l'irrigation et le développement des cultures maraîchères qui provoquent une augmentation, d'une part, du nombre de travaux du sol (2 à 18 passages d'outils par an), d'autre part, des périodes où le sol est nu (en partie en saison des pluies) et des périodes où le sol est travaillé à l'état humide (avec un risque de pétrissage). A l'inverse, il faut noter que l'irrigation a permis l'introduction puis le développement, cependant discret, de prairies artificielles.

A la Martinique cette intensification de l'agriculture a entraîné une augmentation de l'érodibilité (Albrecht et al., 1992a), donc des pertes en terre confirmées par un engraissement des côtes de la Baie du Marin, nettement accru au cours des 10 dernières années (Saffache et al., 1998). A la Guadeloupe, seuls les Vertisols CaMgNa du sud-ouest de la Basse-Terre, en culture maraîchère, ont subi une forte perte en terre à l'occasion du cyclone Marilyn (1995, 300 mm en 6 heures). Ce phénomène est très préoccupant car, sur des sols similaires (CaMgNa), l'île d'Haïti a connu une érosion importante, stérilisant depuis 50 ans plusieurs dizaines de milliers d'hectares. En Guadeloupe, en revanche, aucun phénomène érosif n'a été signalé sur les Vertisols Ca de Grande-Terre.

Derrière la cohérence apparente d'un schéma indiquant que l'érosion observée est d'autant plus forte que la garniture est peu floculante, on observe que les quantités de matière organique d'une part, et les biomasses de racines, de vers de terre et microbiennes d'autre part, sont plus faibles sous les cultures maraîchères que sous les cultures prairiales (Barois et al., 1987; Albrecht et al., 1992b; Chotte et al., 1992).

Les modifications des propriétés physiques et des propriétés biologiques sont-elles des conséquences des pratiques

agricoles ou bien, les agents biologiques et les matières organiques (MO) sont-ils des déterminants synergiques de l'agrégation des sols et de sa stabilité ?

Ce projet s'est attaché à explorer la deuxième hypothèse en regardant à différentes échelles :

- (1) si les MO (éléments figurés, matières humifiées colloïdales, carbohydrates) et les composantes de l'activité biologique (vers de terre, racines et bactéries productrices d'exopolysaccharides) sont des déterminants directs ou indirects de l'agrégation et de sa stabilité ;

- (2) comment leur affectation par des pratiques culturales contribuent à des dégradations des propriétés physiques des Vertisols calciques et calco-magnésio-sodiques ;

- (3) si ces résultats permettent de proposer de nouvelles techniques de gestion des Vertisols des Antilles afin de les conserver et d'optimiser leurs propriétés pour une agriculture durable.

Après une description des situations étudiées, nous caractériserons la stabilité de l'agrégation et l'érodibilité du sol de chacune de ces situations pour vérifier que nous analysons bien des situations très différentes d'un point de vue physique; puis nous préciserons les niveaux d'activités biologiques et de matière organique dans ces situations avant d'étudier plus en détail l'agrégation aux échelles nanométriques et millimétriques. Enfin, nous discuterons de l'importance des différents agents biologiques et organiques dans la détermination de l'agrégation et de sa stabilité.

## SITUATIONS D'ÉTUDE (MODES D'USAGE ET SITUATIONS EXPÉRIMENTALES)

Cette caractérisation a été effectuée (tableau 1, figure 1) :

- d'une part sur des situations de sols mis en valeur, représentant une gamme de couverts végétaux, d'intensité de travail du sol, de fertilisation et de régimes hydriques,

- d'autre part sur des situations expérimentales où les activités de vers de terre et de racines ont été manipulées.

## CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES VERTISOLS (STABILITÉ DE L'AGRÉGATION ET ÉRODIBILITÉ)

Un test de stabilité structurale (cinétique de désagrégation dans l'eau selon la méthode décrite dans Albrecht et al., 1992b) a été appliqué à des agrégats de 1-2 mm, extraits d'échantillons prélevés dans chaque parcelle pour divers horizons (tous les 10 cm jusqu'à 40 cm), après séchage et broyage. Différents paramètres ou indices ont pu être mesurés: le pour-

Tableau 1 - Codes et caractéristiques des situations étudiées à la Martinique et à la Guadeloupe. Signification des lettres : M = Culture maraîchère, J = Jachère, P = Prairie, F = Forêt, NU = sol nu, S = canne à sucre, m = Vertisol calco-magnésio-sodique, c = calcique, l = labouré, b = bêchée. Le chiffre indique l'âge des parcelles.

Situations sur Vertisols calco-magnésio-sodiques (Martinique)	
Code	Caractéristiques
Mm15	Culture maraîchère depuis plus de 15 ans, labourée, irriguée, fertilisée
Mm2J	Culture maraîchère sur antécédent Jm15 (2 ans), labourée, irriguée, fertilisée
Mm2PI	Culture maraîchère sur antécédent Pm17 (2 ans), labourée, irriguée, fertilisée
Mm2Pb	Culture maraîchère sur antécédent Pm17 (2 ans), bêchée, irriguée, fertilisée
Jm15	Jachère plantée en <i>Cynodon nlemfuensis</i> en 1980, non irriguée, non fertilisée, non pâturée
Pm3N	Prairie en reconstitution (3 ans) - traitement herbicide et vermicide (sans plantes, sans vers de terre)
Pm3D	Prairie en reconstitution (3 ans) - traitement vermicide (avec <i>Digitaria decumbens</i> , sans vers de terre)
Pm3V	Prairie en reconstitution (3 ans) - introduction de vers de terre à t 0 (avec <i>Digitaria decumbens</i> , avec vers de terre)
Pm17	Prairie <i>Digitaria decumbens</i> longue durée, irriguée, fertilisée, pâturée
Fm40	Forêt secondaire de 40 ans
Situations sur Vertisols calciques (Guadeloupe)	
Code	Caractéristiques
NUc10	Traitement herbicide et travail du sol (labour) depuis 1987
Jc10	Jachère âgée (petit-foin) plante dominante : <i>Dichantium aristatum</i>
PCc10	Prairie <i>Cynodon nlemfuensis</i> longue durée, irriguée, fertilisée, pâturée
PDc10	Prairie <i>Digitaria decumbens</i> longue durée, irriguée, fertilisée, pâturée
Sc50	Canne à sucre 50 ans

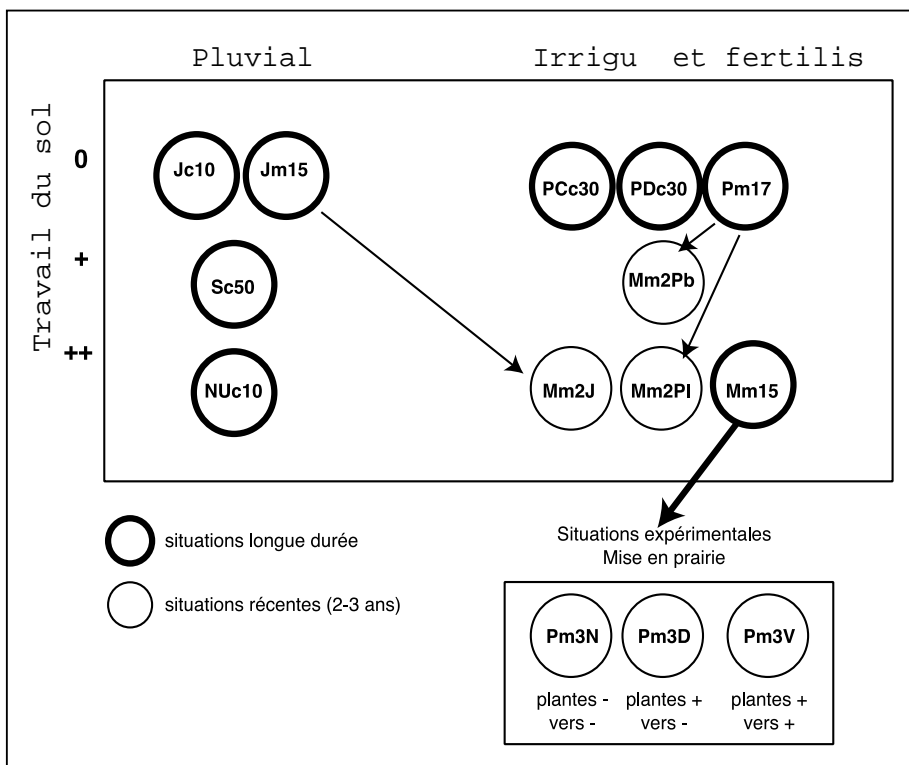


Figure 1 - Situations étudiées sur Vertisols calco-magnésio-sodiques (Martinique) et calciques (Guadeloupe), en fonction de leur mode d'usage. Rajoutons à ce schéma la forêt secondaire de Martinique Fm40.

Figure 1 - List of the sites studied in Martinique (calco-magneso-sodic Vertisols) and in Guadeloupe (calcic Vertisols) with respect to the land uses. The secondary forest Fm40 does not appear in this schema.

centage d'agrégats stables > 500  $\mu\text{m}$  (AS500), l'indice de dispersion (ID), le diamètre médian correspondant à 50 % du poids des agrégats sur la courbe cumulée (D50), pour les différents temps d'agitation.

Les résultats de stabilité à l'eau des agrégats des différentes parcelles (après 2 heures d'agitation) sont très variables (figure 2), les situations prairiales donnant les valeurs les plus élevées et les parcelles en cultures maraîchères/sol nu les valeurs les plus faibles. Quel que soit l'indice utilisé (AS500, D50, ID), on retrouve des différences importantes entre les diverses situations.

L'érodibilité a été étudiée sur des surfaces d'1  $\text{m}^2$  (pente de 2 à 5 %) par un test de détachement, in situ, sous pluie artificielle selon Asseline et Valentin (1978). Trois états de surface (par situation) étaient considérés : couvert végétal intact, couvert végétal ôté et sol nu biné sur 5 cm, et soumis chacun à 3 intensités de pluie, durant 30 minutes : 55, 80 et 150 mm/h, représentant respectivement des pluies de récurrence annuelle, décennale et centennale. Le ruissellement est mesuré en continu. Des prélèvements réguliers sont effectués pendant la phase de ruissellement pour mesurer la turbidité instantanée, transformée en débit solide instantané, ce qui permet ensuite d'intégrer la perte en terre. Les mesures effectuées sous une pluie d'intensité 55 mm/h, pour une surface du sol binée, montrent la très grande sensibilité à l'érosion des sols calco-magnésio-sodiques de Martinique comparée aux sols cal-

ciques de Guadeloupe (figure 3). Les prairies de Martinique qui montrent les valeurs les plus faibles de perte en terre pour ce type de Vertisol donnent des valeurs, malgré tout, élevées (205  $\text{g}/\text{m}^2/30$  minutes), tandis que les parcelles en cultures maraîchères donnent des valeurs proches de 540  $\text{g}/\text{m}^2/30$  mn. A la Guadeloupe, les pertes en terre sont très faibles et la parcelle expérimentalement dégradée (Nuc10) ne donne pas de pertes en terre plus importantes que les prairies (< 50  $\text{g}/\text{m}^2/30$  minutes). Sous une pluie de récurrence centennale, les pertes en terre sur Mm15 atteignent 1450  $\text{g}/\text{m}^2/30$  minutes, ce qui représente des quantités de terre très importantes.

## CARACTÉRISATION DES ACTIVITÉS BIOLOGIQUES ET DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

### Niveaux d'activités biologiques

#### Vers de terre

Des comptages et pesées de vers de terre ont été réalisés après tri manuel sur des prélèvements de 30x30x30 cm. Seule l'espèce *Polypheretima elongata*, espèce de grande taille et largement dominante, a été prise en compte dans cette étude.

Figure 2 - Diamètre médian D50 ( $\mu\text{m}$ ) des agrégats après 2 heures d'agitation dans l'eau d'agrégats 1-2 mm issus de Vertisols de différentes parcelles de Martinique et de Guadeloupe.

Figure 2 - Mean Diameter D50 ( $\mu\text{m}$ ) of 1-2 mm aggregates after 2 hours shaking in water for different situations.

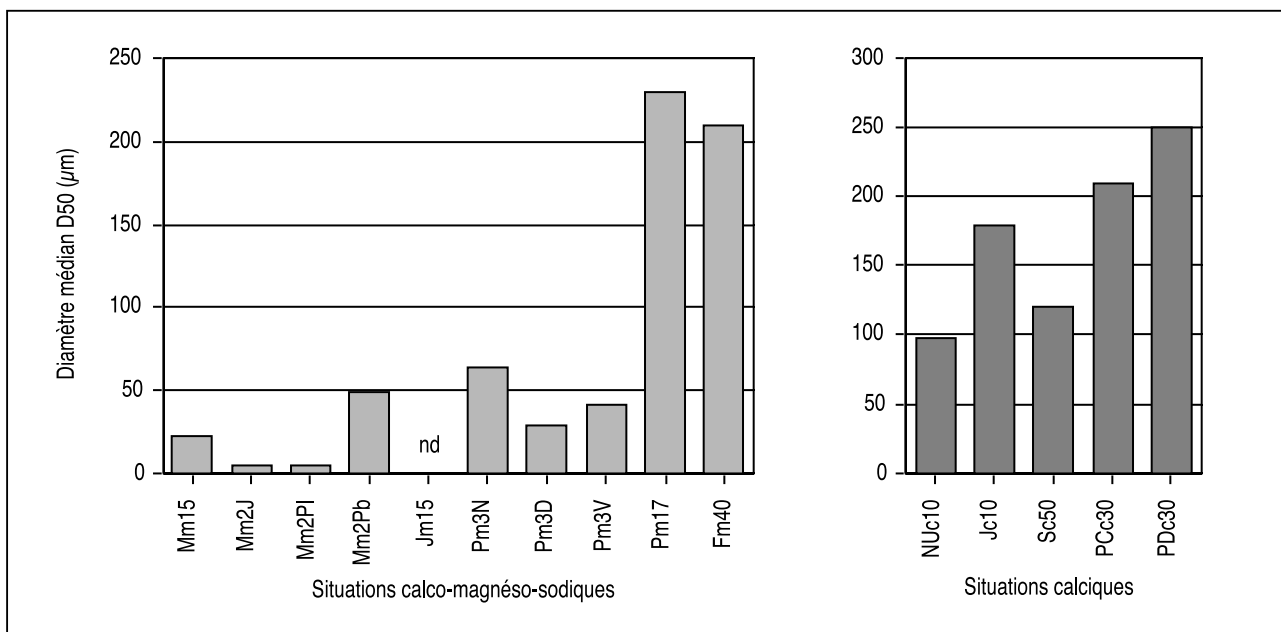
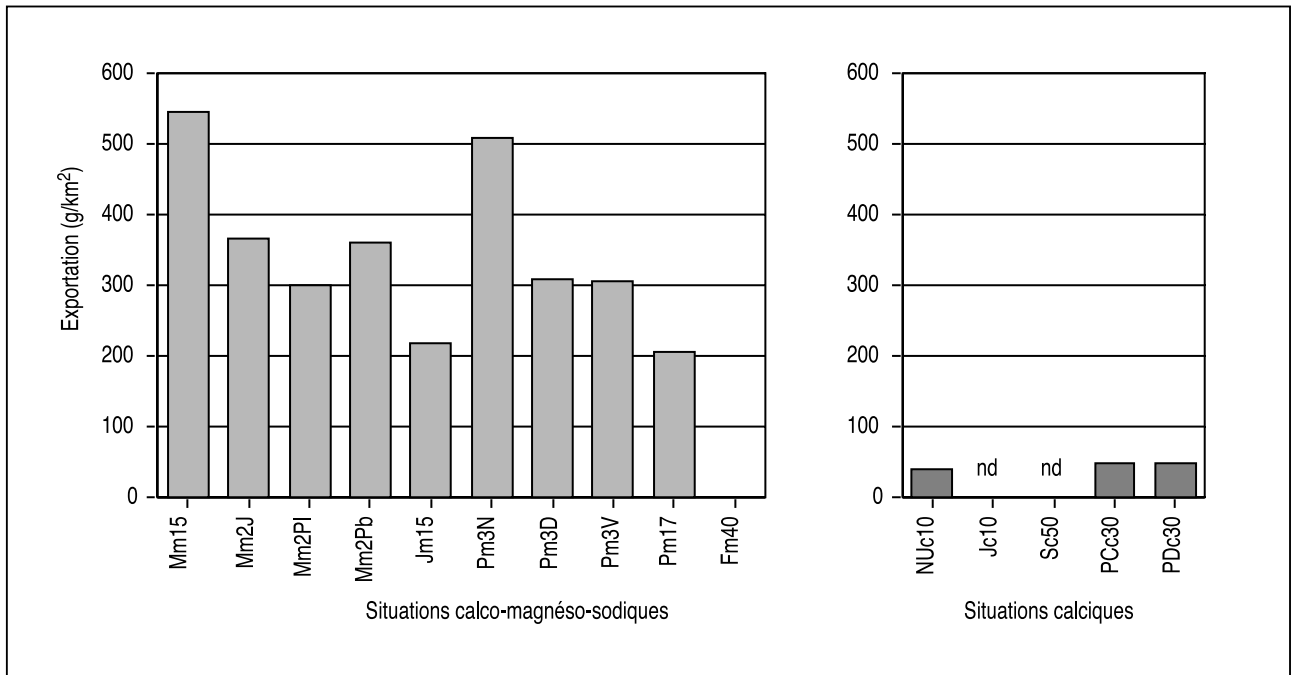


Figure 3 - Pertes en terre ( $\text{g/m}^2$ ) mesurées sous pluie simulée de 55 mm/h pendant 30 minutes et pour une surface du sol binée, pour différentes parcelles de Martinique et de Guadeloupe.

Figure 3 - Soil losses ( $\text{g/m}^2$ ) as measured under a simulated rainfall (55 mm/h during 30 minutes) for a hoed soil surface, in different situations.



Les mesures de biomasses et de densités de vers de terre (mesurées en saison humide) montrent des résultats très variables (figures 4 et 5). Les valeurs moyennes maximales sont observées pour les prairies ( $59 \text{ g/m}^2$  et  $120 \text{ ind/m}^2$  à la Martinique,  $40 \text{ g/m}^2$  et  $133 \text{ ind/m}^2$  à la Guadeloupe). La parcelle Mm2Pb (béchée depuis 2 ans) montre une valeur importante de biomasse vraisemblablement en raison de l'incorporation importante de matière organique et du développement important d'individus de grande taille. La mise en culture intensive (ou un travail intensif pour NUC10) des prairies entraîne rapidement une diminution des populations de vers de terre. Les parcelles caractérisées par un travail profond du sol (Mm15, Mm2J, Mm2PI) ont des populations de vers de terre très faibles (inférieures à  $7 \text{ g/m}^2$  et à  $7 \text{ ind/m}^2$ ).

#### Racines

Les racines ont été séparées par tamisage ( $200 \mu\text{m}$ ) après dispersion du sol à partir de prélèvements volumiques de 10 cm de profondeur ; elles ont ensuite été séchées et pesées.

Les biomasses racinaires sont très élevées pour toutes les situations prairiales (entre 15 et  $20 \text{ g/kg}$  sol) (figure 6). Les jachères (non irriguées) et la canne à sucre donnent des valeurs légèrement plus faibles. Les parcelles maraîchères ou désherbées donnent des valeurs très faibles, voire nulles.

#### Bactéries productrices d'exopolysaccharides (EPS)

Les bactéries produisant des EPS abondants ont été identifiées, dans un premier temps, par une méthode phénotypique (Biolog). En ce qui concerne les bactéries à Gram positif, les populations majoritaires appartenaient aux espèces *Bacillus amyloliquefaciens* et *B. thermoglucosidasius*. Ces populations ont été mises en évidence dans les deux situations Mm15 et Pm17. Ce résultat permet d'exclure l'hypothèse d'une contribution spécifique des bactéries à Gram positif pour expliquer la structuration du sol sous prairie. En ce qui concerne les bactéries à Gram négatif, les espèces majoritaires du sol sous maraîchage (Mm15) ont été identifiées phénotypiquement (méthode Biolog) à *Pseudomonas corrugata* et *Pseudomonas fluorescens*, et les espèces majoritaires sous prairie (Pm17) à *Burkholderia glathei* et *Burkholderia cepacia*. L'utilisation d'un milieu semi-sélectif pour les bactéries appartenant au genre *Burkholderia* a permis de confirmer la présence de cette espèce dans le sol sous prairie (Pm17).

L'ensemble des résultats génotypiques (séquençage de l'ADNr 16S et hybridations ADN : ADN) et phénotypiques obtenus avec les isolats de *Burkholderia* ont conduit à la description d'une nouvelle espèce bactérienne : *Burkholderia caribensis* (*caribensis* en hommage au peuple des Caribs, les

Figure 4 - Biomasses de vers de terre ( $\text{g/m}^2$ ) mesurées dans différentes parcelles, sur Vertisols (0-30 cm), de Martinique et de Guadeloupe.

Figure 4 - Earthworm biomasses ( $\text{g/m}^2$ ) in different situations (0-30 cm depth).

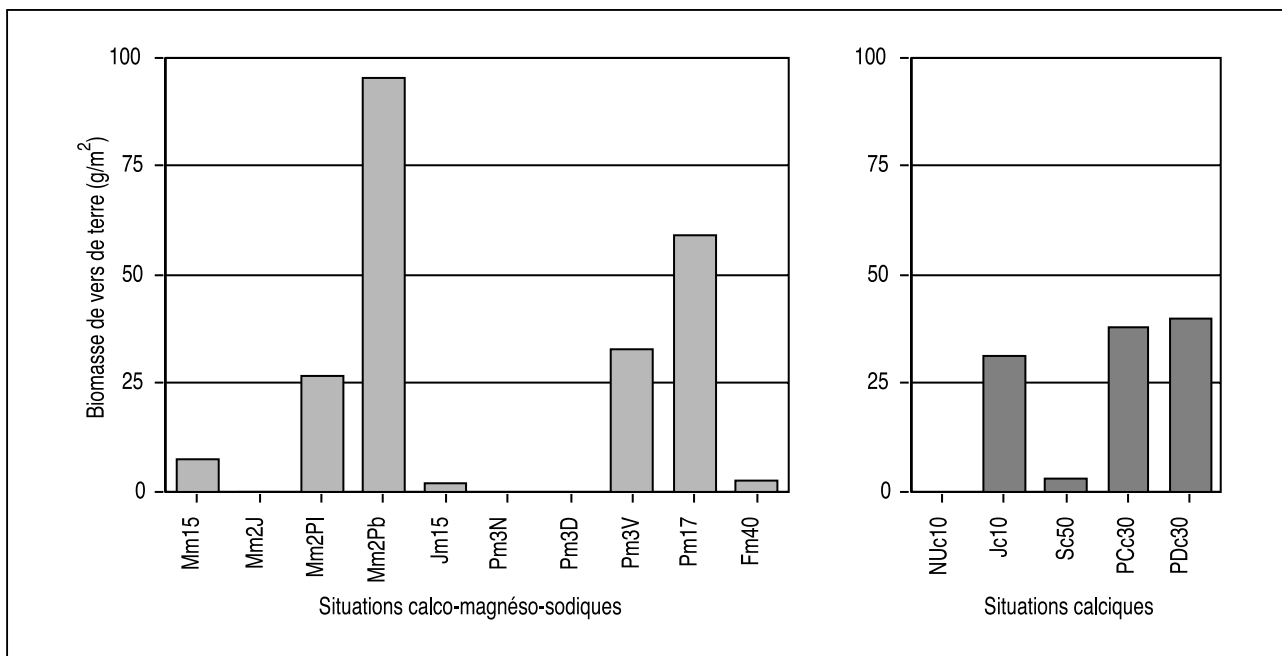


Figure 5 - Densités de vers de terre ( $\text{ind/m}^2$ ) mesurées dans différentes parcelles, sur Vertisols (0-30 cm), de Martinique et de Guadeloupe.

Figure 5 - Earthworm densities ( $\text{ind/m}^2$ ) in different situations (0-30 cm depth).

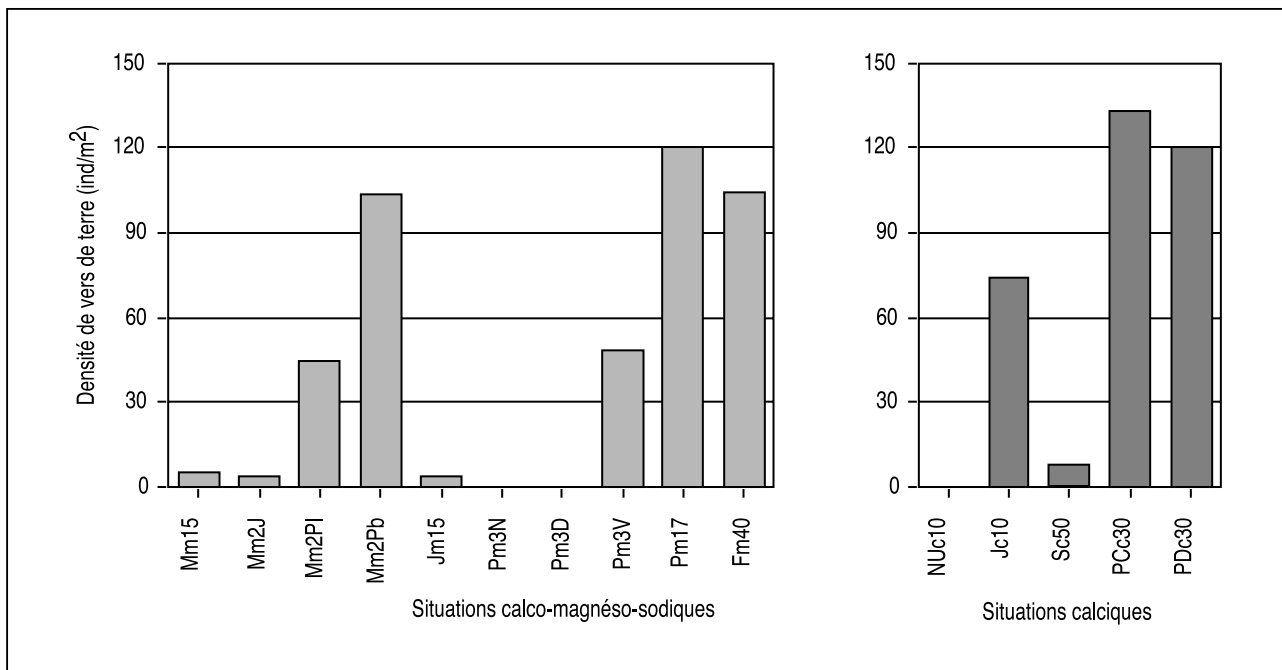
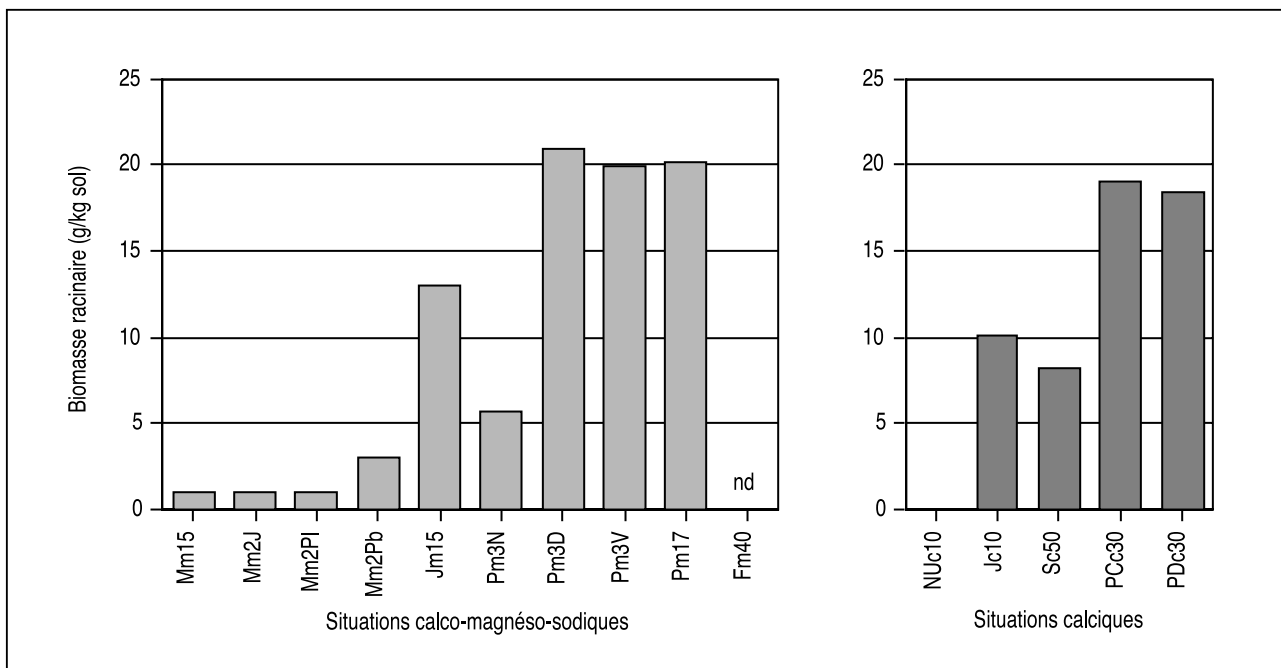




Figure 6 - Biomasses racinaires (g/kg sol) mesurées dans différentes parcelles, sur Vertisols (0-10 cm), de Martinique et de Guadeloupe.

Figure 6 - Root biomasses (g/kg soil) in different situations (0-10 cm depth).



premiers habitants des îles Caraïbes) (Achouak et al., 1999). Nous avons confirmé l'abondance de cette espèce dans les microagrégats du sol sous prairie (Pm17) (> 30% des bactéries poussant sur TSA 1/10) et sa faible fréquence dans la situations sous maraîchage (Mm15) (2 %) par des hybridations sur colonies bactériennes (figure 7). Pour cela, toutes les colonies révélées sur un milieu non sélectif (TSA 1/10) ont été hybridées avec une sonde nucléotidique (500 bp) spécifique de *B. caribensis* (Achouak et al., en préparation). Dans les situations intermédiaires (Mm2J, Mm2PI et Mm2Pb), les colonies hybridant avec la sonde nucléotidique anti-*B. caribensis* représentaient entre 2 et 7 % des bactéries cultivables contenues dans la fraction 5-20  $\mu\text{m}$ . L'espèce *B. caribensis* a également été détectée dans les situations Jc10, PDc10 et Sc50 à la Guadeloupe, mais pas dans la situation NUC10 (hybridations sur colonies). Malgré tout, son abondance dans les sols de Guadeloupe est 10 à 100 fois plus faible qu'à la Martinique (Pm17).

#### Matière organique: teneurs en C, répartition par classes de taille, origine de la MO et caractérisation des sucres

Des prélèvements de 10 cm d'épaisseur ont été effectués entre 0 et 40 cm de profondeur avant d'être séchés et broyés grossièrement. Une partie de chaque échantillon a été soumise

à un fractionnement granulométrique de la MO, selon la méthode de Gavinelli et al. (1995); chaque échantillon et fraction étant ensuite broyés finement (< 0,2 mm) pour l'analyse du C à l'aide d'un analyseur élémentaire Carlo Erba NA 1500 (figures 8 et 9). Les carbohydrates (sucres) ont également été déterminés après extraction à partir de sols totaux, de leurs fractions granulométriques et différentes classes d'agrégats stables (agitation durant une heure) (strates 0-10 cm de certaines situations) (figure 10).

#### Teneurs en C du sol

Les teneurs en C des horizons 0-10 cm sont, pour des situations similaires, plus élevées dans les Vertisols de Guadeloupe que dans ceux de Martinique. Les sols des prairies présentent les valeurs les plus fortes (40 g C/kg de sol à la Martinique et 67 g C/kg de sol à la Guadeloupe), tandis que ceux des parcelles en cultures, maraîchères ou canne à sucre, présentent des valeurs beaucoup plus faibles. La valeur minimale rencontrée à la Martinique (Mm15 et Pm3N) est 14 g C/kg de sol et 21 g C/kg de sol à la Guadeloupe (NUc10).

#### Teneurs en C des fractions granulométriques

Les sols les plus riches en C sont caractérisés par des valeurs élevées de C à la fois dans les fractions fines (0-20  $\mu\text{m}$ ) et dans les fractions grossières (20-2 000  $\mu\text{m}$ )

Figure 7 - Présence de *Burkholderia caribensis* sp. nov. dans les microagrégats 5-20  $\mu\text{m}$  des sols (0-10 cm) de diverses situations de Martinique et de Guadeloupe, en % des bactéries cultivables sur un milieu sélectif (TSA 1/10) et après hybridation sur colonies avec une sonde nucléotidique spécifique de cette espèce.

Figure 7 - Estimation of *Burkholderia caribensis* sp. nov. populations within microaggregates (5-20  $\mu\text{m}$ ) of soils (0-10 cm) sampled in various locations in Martinique and Guadeloupe, in percentage of total culturable bacteria (TSA/10). Colonies of *B. caribensis* were detected after hybridization with a specific oligonucleotide probe.

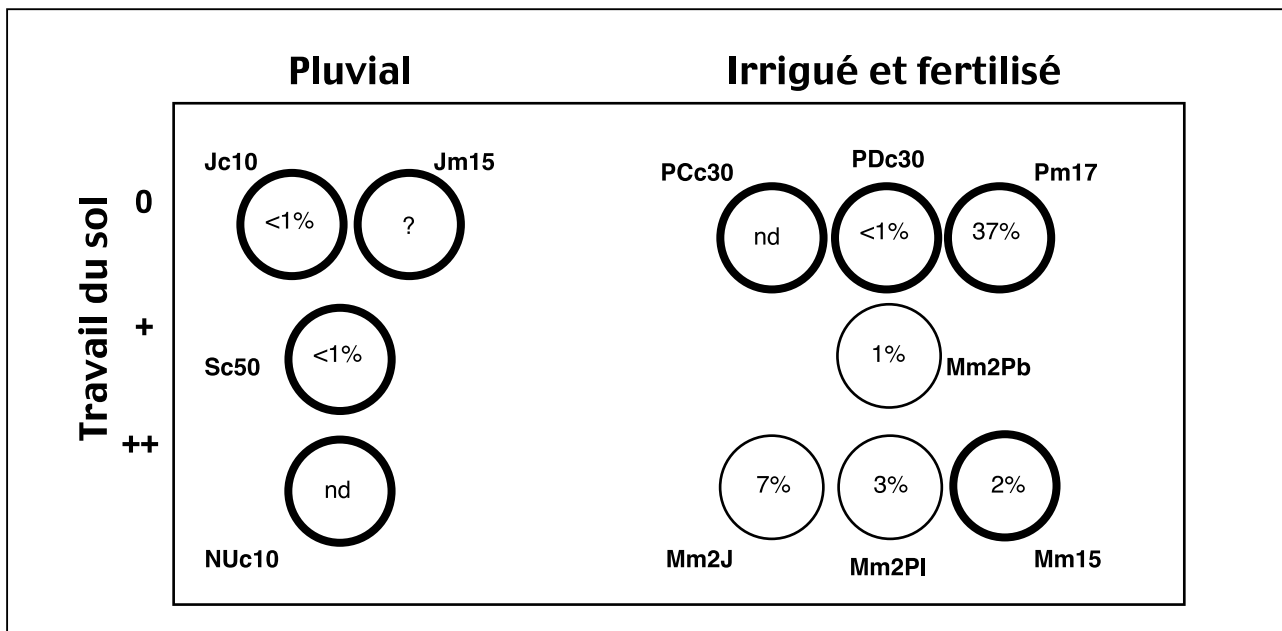


Figure 8 - Teneurs en C (g/kg sol) dans des vertisols (0-10 cm) prélevés dans différentes parcelles de Martinique et de Guadeloupe.  
Figure 8 - C contents (g/kg soil) in different situations (0-10 cm depth).

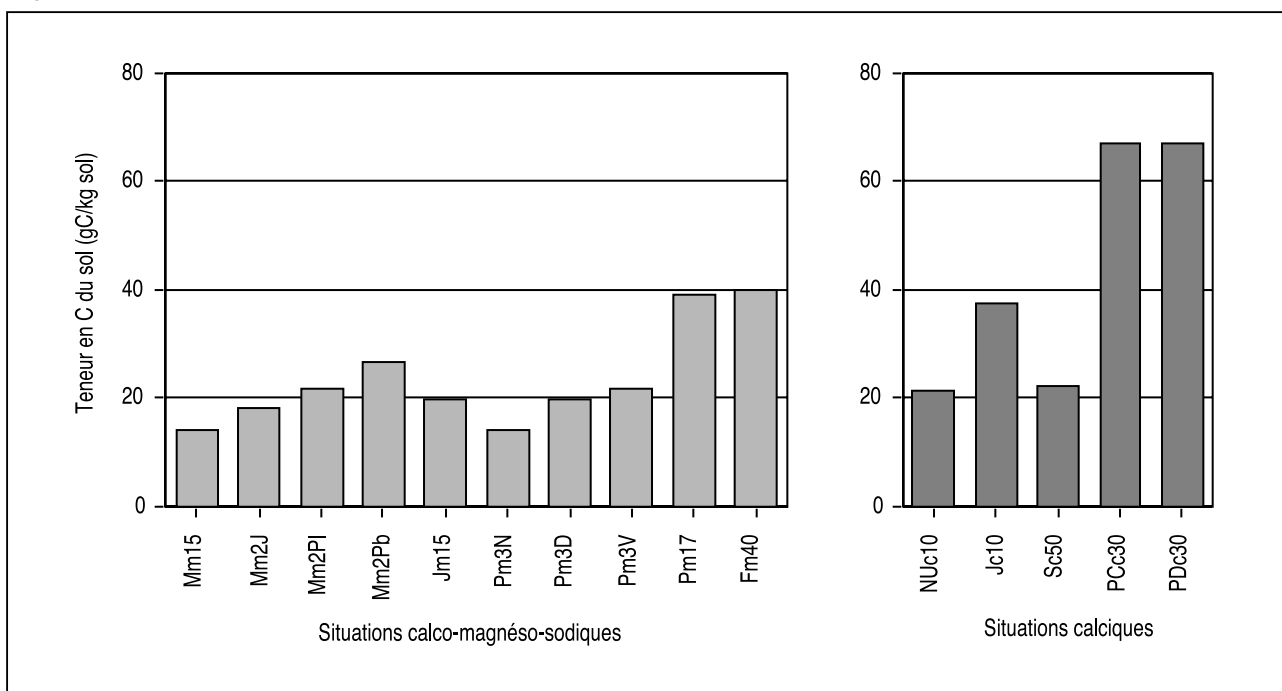


Figure 9 - Teneurs en C (g/kg sol) de différentes fractions granulométriques de Vertisols (0-10 cm) prélevés dans différentes parcelles de la Martinique et de la Guadeloupe.

Figure 9 - C contents (g/kg soil) in different size fractions in different situations (0-10 cm depth).

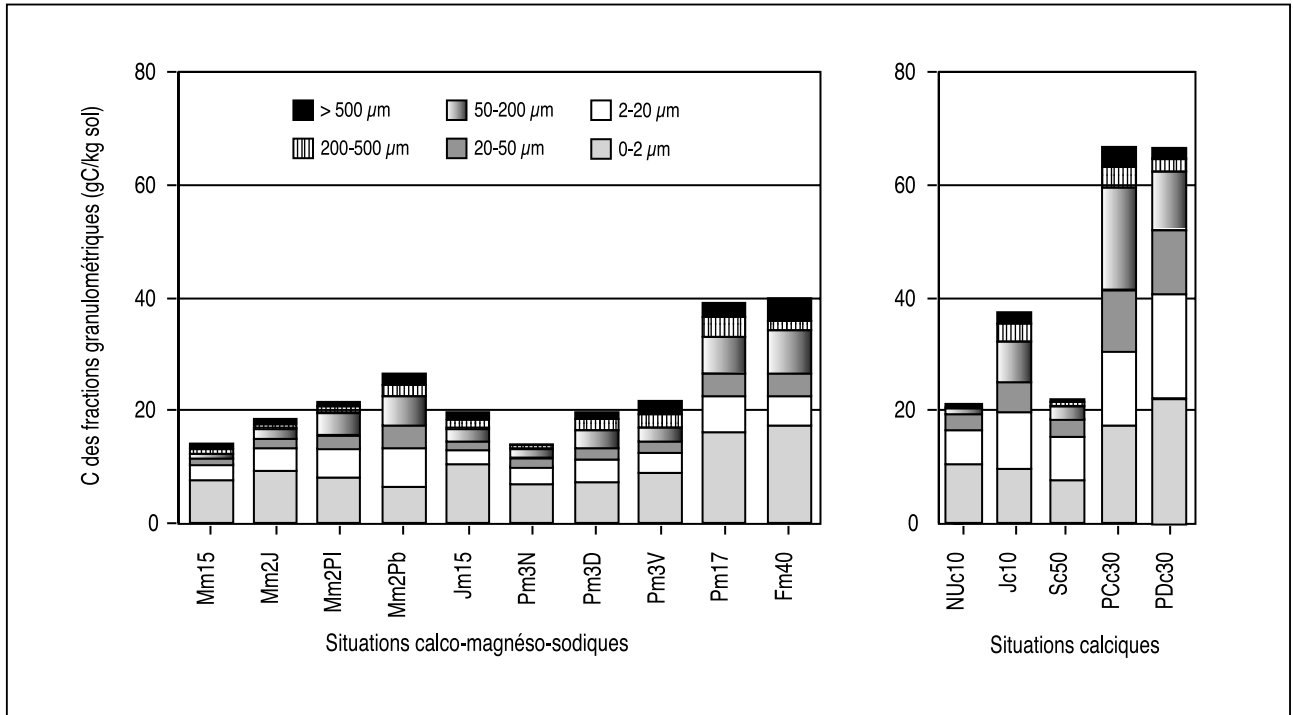
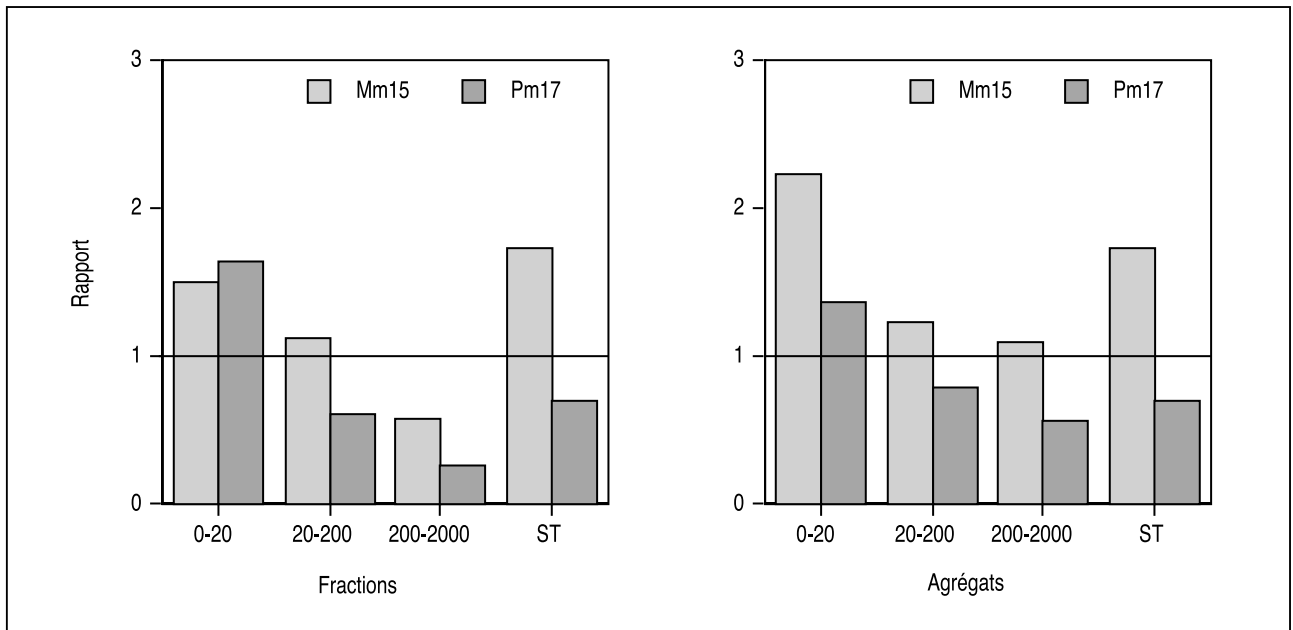


Figure 10 - Rapport r pour les Vertisols prélevés sous prairie longue durée Pm17 et sous culture maraîchère Mm15 (sol total ST, fractions granulométriques et agrégats).

Figure 10 - r ratio measured for Vertisols (0-10 cm depth) under an old pasture Pm17 and an old gardening crop Mm15 (bulk soil ST, size fractions and aggregates).



(figure 9). Ainsi les fractions fines sous prairie (et forêt) contiennent environ 2 fois plus de C que celles sous cultures maraîchères, en valeur absolue. Les fractions grossières sont nettement plus importantes (jusqu'à 5 fois plus si on compare NUc10 et PCc10) sous prairies que sous cultures maraîchères/sol nu.

Les mesures de C des agrégats ont été réalisées sur les classes 0-5, 5-20, 20-200, 200-2000  $\mu\text{m}$ . Sous prairie Pm17, les agrégats stables 200-2000  $\mu\text{m}$  possèdent la plus forte teneur en C (57 g C/kg d'agrégats) par rapport aux 3 autres classes d'agrégats plus fins (de 33 à 39 g C/kg d'agrégats selon la classe). A l'opposé, dans le sol mis en culture Mm15, ce sont plutôt les agrégats 0-20  $\mu\text{m}$  qui apparaissent enrichis en C (16 et 13 g C/kg d'agrégats respectivement pour les agrégats 0-5 et 5-20  $\mu\text{m}$ ). Dans les deux sols, les agrégats stables 20-200 et 200-2000  $\mu\text{m}$  incorporent la plus forte proportion de C total (respectivement 21 et 54 % pour Pm17; 31 et 28 % pour Mm15). Dans le sol Pm17, 64 % des MO associées aux particules 0-20  $\mu\text{m}$  se retrouvent emprisonnées dans des agrégats stables (une heure d'agitation) de taille supérieure à 200  $\mu\text{m}$ . Dans le même ordre d'idée, la moitié des macroagrégats 200-2000  $\mu\text{m}$  du sol Mm15 (et 27 % de ses mésoagrégats 20-200  $\mu\text{m}$ ) serait constituée de MO associées à des particules de taille comprise entre 0 et 5  $\mu\text{m}$ . En d'autres termes, 57 % de la fraction granulométrique 0-5  $\mu\text{m}$  proviendrait de la dispersion d'agrégats 20-200  $\mu\text{m}$ .

Les agrégats 5-20  $\mu\text{m}$  et la fraction soluble participent très faiblement au C total des 2 sols. Après quelques années de culture, on assiste à une diminution des contenus en C, quelle que soit la classe d'agrégats. Cette diminution touche plus particulièrement les agrégats > 200  $\mu\text{m}$ , les agrégats de taille 0-5  $\mu\text{m}$  étant les moins affectés par la mise en culture.

#### Origine de la MO et caractérisation des sucres

Parmi les composés labiles de la matière organique, les carbohydrates peuvent se révéler, suivant le mode de gestion du sol, de bons indicateurs de son état organique (Dalal et Bridge, 1995; Hu et al., 1997). Mélanges complexes de mono- et polysaccharides, facilement dégradés, principale source énergétique pour les microorganismes, ils représentent de 5 à 25 % de la matière organique du sol et sont impliqués dans les processus d'agrégation (Degens, 1997).

Le sol sous prairie (Pm17) présente, par rapport au sol sous maraîchage (Mm15), une plus forte teneur en monosaccharides MS (8 fois plus), provenant aussi bien des matières hémicellulosiques que de sucres celluloses d'origine végétale. Ceci est à mettre en parallèle avec une plus forte teneur en C total dans Pm17 par rapport à Mm15, et en C présent sous forme de MS (18 % du C total pour Pm17 et 9,5 % pour Mm15). Après quelques années de cultures maraîchères, le sol s'appauvrit en MS, plus particulièrement en MS d'origine cellu-

losique (de 76 à 98 % en moins). Dans les deux sols, la MO associée aux argiles, limons et sables fins apparaît enrichie en sucres hémicellulosiques, alors que les fractions les plus grossières sont caractérisées par des sucres typiques des matières celluloses (la fraction 200-2000  $\mu\text{m}$  du sol Pm17 contient près de 12 fois plus de sucres celluloses que d'autres sucres, seulement 3 fois plus pour le sol Mm15).

Quel que soit le sol considéré, la majorité des sucres extraits issus de chaque classe d'agrégats stables (0-20, 20-200 et 200-2000  $\mu\text{m}$ ) provient de matières hémicellulosiques (de 63 à 89 % du C des agrégats). Les macroagrégats 200-2000  $\mu\text{m}$  apparaissent, dans les deux situations, enrichis en carbone de monosaccharides (C-MS) par rapport aux autres classes d'agrégats. Le stockage le plus important de C-MS est bien observé au niveau des macroagrégats (64 et 40 % C-MS du sol respectivement pour Pm17 et Mm15). Les agrégats 5-20  $\mu\text{m}$  participent faiblement au C-MS total. La mise en culture maraîchère entraîne une diminution des contenus en MS de toutes les classes d'agrégats, plus particulièrement des méso- et macroagrégats : 89 % C-MS des agrégats 5-200  $\mu\text{m}$  et 86 % C-MS des agrégats 200-2000  $\mu\text{m}$  disparaissent ainsi.

Dans les deux sols, les hexoses (mannose, galactose, glucose) sont prédominants par rapport aux pentoses, le glucose étant le plus abondant. Sous prairie Pm17, le xylose est le deuxième sucre dominant alors que sous culture maraîchère Mm15, le glucose est suivi par le galactose et le manose. Le rapport  $r$  (mannose+galactose / arabinose+xylose) qui caractérise l'importance de la décomposition des débris végétaux et de l'accumulation des produits de synthèse microbiens (Cheshire, 1979; Oades, 1984), est inférieur à 1 dans le sol sous prairie Pm17 (0,7) suggérant ainsi que ce sol contient une plus forte proportion de carbohydrates d'origine végétale, et supérieur à 1 dans le sol sous culture maraîchère Mm15 (1,7) ce qui traduirait la présence de polysaccharides d'origine microbienne.

Ce rapport  $r$ , étudié dans des fractions granulométriques (après dispersion maximale) et dans des agrégats de sol (après une heure d'agitation), montre une diminution des valeurs des fractions fines (enrichies en manose) aux fractions grossières (enrichies en xylose), ceci pour les deux sols étudiés Mm15 et Pm17. Ce rapport diminue également des agrégats fins vers les agrégats grossiers ce qui indique bien une plus forte proportion de carbohydrates d'origine végétale, par opposition aux agrégats < 20  $\mu\text{m}$  où prédomineraient des carbohydrates synthétisés par les microorganismes. On peut aussi remarquer, dans les macroagrégats 200-2000  $\mu\text{m}$  des sols Pm17 et Mm15 que les 4 sucres dominants (glucose, xylose, galactose et manose) sont en proportions beaucoup plus fortes que dans les fractions de même taille. Les macroagrégats sont en effet constitués d'agrégats de plus petite taille dont la composition en sucres diffère de celle de la fraction granulométrique 200-2000  $\mu\text{m}$  par les teneurs plus importantes en

certaines sucres. Ainsi, les macroagrégats, constitués partiellement de microagrégats et de fractions fines à caractère microbien plus marqué, présentent des valeurs de  $r$  supérieures à celles des fractions de taille correspondante.

## Corrélations entre facteurs biologiques et facteurs physiques

On a bien au regard de ces situations, d'une part une gamme d'activités biologiques et de statut organique des Vertisol et d'autre part, un éventail de stabilité structurale et d'érodibilité des couches de surface. Cette caractérisation a notamment permis de confirmer la sensibilité à l'érosion plus prononcée des sols calco-magnésio-sodiques de Martinique que ceux, calciques, de Guadeloupe. De même, on observe bien des différences importantes de niveaux d'activités biologiques (vers de terre, racines, bactéries productrices d'exopolysaccharides) et de matières organiques (teneurs, répartition par classes de taille, caractéristiques chimiques, origines) entre les différentes situations étudiées.

Une première analyse simple de corrélations a été effectuée afin de voir comment évoluent les paramètres biologiques et physiques en fonction des modes d'usage. Ainsi toutes situations confondues (strate 0-10 cm), on a pu observer que :

- la biomasse racinaire est corrélée de façon positive aux D50 (30 minutes et 1 heure), aux pourcentages d'agrégats stables  $> 500 \mu\text{m}$  (de  $t_0$  à 18 heures) et négativement à la turbidité et la perte en terre pour une parcelle binée et une pluie centennale,

- la teneur en C total est corrélée positivement et significativement avec l'ensemble des teneurs en C des fractions  $< 50 \mu\text{m}$ , avec l'ensemble des paramètres de stabilité des agrégats, et négativement avec l'ensemble des paramètres d'érodibilité et avec l'ID ( $t_0$  et 6 heures),

- les teneurs en C des fractions  $< 50 \mu\text{m}$  sont positivement corrélées, à un degré moindre, avec les mêmes paramètres que le C total,

- l'abondance de l'espèce *B. caribensis* est corrélée positivement avec la biomasse racinaire (situations Mm15 vs Mm2J, Mm2PI, Mm2Pb, Pm17 d'une part et NUc10 vs Jc10, PDc10 et Sc50 d'autre part) et la teneur en C des agrégats de la fraction 5-20  $\mu\text{m}$ ,

- la biomasse de vers de terre est corrélée positivement à la densité de vers de terre, à la teneur en C de la fraction 0-2  $\mu\text{m}$  et au D50  $t_0$  (diamètre médian d'agrégats obtenus par simple immersion dans l'eau, sans agitation),

- la densité de vers de terre est corrélée positivement aux teneurs en C du sol total et des fractions  $< 50 \mu\text{m}$ , aux D50 ( $t_0$ , 30 minutes, 1 heure, 2 heures), aux pourcentages d'agrégats stables  $> 500 \mu\text{m}$  (de  $t_0$  à 18 heures) et négativement à l'ID ( $t_0$ ), la turbidité et la perte en terre pour une parcelle binée et une pluie décennale.

La mise en parallèle des paramètres biologiques et physiques montre que :

- ces paramètres varient généralement dans le même sens : les situations de cultures maraîchères intensives montrent de faibles teneurs en C (tailles et formes), de faibles biomasses racinaires et de vers de terre, une faible stabilité des agrégats et donc une forte érodibilité (pour la Martinique), tandis que les cultures prairiales donnent des résultats opposés,

- la teneur en C reste le meilleur indicateur de l'état physique des Vertisols,

- l'indice de dispersion n'est pas corrélé aux autres indices de stabilité des agrégats, ni avec les paramètres biologiques,

- les Vertisols calciques de Guadeloupe sont plus riches en C que ceux, calco-magnésio-sodiques, de Martinique. Cette différence peut s'expliquer par la teneur en argile légèrement plus élevée pour les sols de Guadeloupe, une meilleure protection de la matière organique contre la minéralisation et/ou des pertes par érosion bien inférieures.

## AGRÉGATION DU SOL AUX ÉCHELLES MICROMÉTRIQUES ET NANOMÉTRIQUES

### Agrégation micrométrique

#### Effet du mode de culture

Les agrégats stables 2-20  $\mu\text{m}$  obtenus après 1 heure d'agitation dans l'eau, à partir d'échantillons de sol de diverses situations de Martinique (Pm17 et Mm15) et de Guadeloupe (NUc10, Jc10, PCc10 et Sc50) ont été caractérisés morphologiquement et analytiquement en MET couplés en EDXS et EELS.

Trois modes d'associations organo-minérales ont été définis à partir des observations (planches 1 et 2) :

- un mode d'association constitué par des restes végétaux figurés associés à une fraction argileuse en proportion variable. Au sein de ces associations, on localise éventuellement des bactéries. Ce mode d'association est qualifié d'agrégats organo-minéraux de type 1 (avec débris), puisqu'il implique la présence de restes végétaux figurant des éléments cellulaires (paroi, cellule...).

- des associations très spécifiques dont les procaryotes sont à l'origine. Elles sont constituées par une bactérie ou une colonie bactérienne ayant produit des exopolymères sur lesquels sont adsorbées des argiles. Ce mode d'association est défini en tant qu'agrégats bactériens.

- enfin, d'autres unités stables sont constituées essentiellement par une fraction minérale agrégée par des substances

colloïdales, dont l'analyse révèle la nature organique. Ce type d'association est défini en tant qu'agrégats organo-minéraux de type 2 (sans débris).

La répartition relative entre les types d'agrégats montre une grande différence entre les situations de cultures maraîchères et les situations " enherbées " (canne à sucre, jachère et prairies) (tableau 2). Il se dégage très nettement dans les deux types de Vertisol que le pourcentage des agrégats organo-minéraux de type 2 est nettement plus bas dans chaque situation de prairie par rapport aux situations "sol nu": une différence de 60 % entre Mm15 et Pm17 pour la Martinique et une différence de 70 % entre NUc10 et PCc10 pour la Guadeloupe.

A la Martinique, la prairie Pm17 est composée de *Digitaria decumbens*, les pourcentages d'agrégats organo-minéraux de type 1 d'une part et d'agrégats bactériens d'autre part sont nettement plus élevés que ceux obtenus pour la situation maraîchage. Pour le Vertisol calcique de Guadeloupe où la prairie PCc10 est plantée en *Cynodon nlemfuensis*, les agrégats organo-minéraux de type 1 sont prédominants et leur pourcentage est plus élevé (71 %) que celui obtenu pour la situation de cultures intensives (30 % pour la canne à sucre) : le pourcentage d'agrégats bactériens est légèrement plus élevé que celui de la situation " canne à sucre " (Sc50). En ce qui concerne la jachère Jc10, le pourcentage d'agrégats organo-minéraux de type 1 est nettement plus bas que celui de la situation canne à sucre d'une part et celui de la prairie d'autre part. Pour le sol nu (NUc10), les proportions d'agrégats organo-minéraux de type 1 et d'agrégats bactériens sont très bas.

#### Relation entre types d'agrégats et stabilité/érodibilité du sol

Les corrélations entre les paramètres biologiques et les paramètres physiques (stabilité / érodibilité) d'une part et les différents types d'associations organo-minérales d'autre part ont permis d'identifier les agrégats organo-minéraux de type 2 comme des indicateurs de l'instabilité du sol. Leur pourcentage est en effet corrélé négativement et significativement avec :

- la biomasse et la densité de vers de terre, la biomasse racinaire, la teneur en C du sol, la teneur en C de la fraction 0-

2  $\mu\text{m}$ , la contribution au C total de la fraction 50-200  $\mu\text{m}$  en ce qui concerne les caractéristiques biologiques

- les D50 à 30 minutes, une heure, 2 heures et 6 heures d'agitation, les ID à une heure et 2 heures d'agitation, les AS 500  $\mu\text{m}$  à t 0, une heure, 2 heures, 6 heures et 18 heures d'agitation, en ce qui concerne les paramètres physiques.

Ainsi, dans les situations à forte activité biologique, à statut organique élevé et à forte stabilité des agrégats, le pourcentage d'agrégats organo-minéraux de type 2 (sans débris) tend à diminuer et celui des agrégats bactériens tend à augmenter.

#### Effet des vers de terre

L'effet des vers de terre sur l'agrégation a été appréhendé à travers l'étude par MET des agrégats 2-20  $\mu\text{m}$  (après 1 heure d'agitation) du sol de Mm15 et de celui de Pm17 d'une part et des turricules de *P. elongata* issus du sol de ces deux situations d'autre part. Les proportions relatives des agrégats organo-minéraux type 1, bactériens et organo-minéraux type 2 dans chacun de ces sols et dans les turricules sont présentées dans le tableau 3.

Le pourcentage d'agrégats organo-minéraux type 2 trouvé dans les turricules prélevés sur la situation Mm15 est nettement plus bas que dans le sol de cette situation, alors que le pourcentage des agrégats organo-minéraux type 1 augmente. Dans ce sol, où les vers de terre sont rares, ils ont la possibilité, à travers un enrichissement du sol en débris figurés (Blanchart, 1997), d'augmenter le pourcentage d'agrégats organo-minéraux de type 1 et de diminuer le pourcentage d'agrégats organo-minéraux de type 2.

Pour la situation prairie Pm17, on constate au niveau du turricule une progression du pourcentage d'agrégats organo-minéraux type 2, et une forte chute du pourcentage d'agrégats bactériens, comparativement au sol d'origine. Le passage dans le tube digestif intestinal de *P. elongata* d'un sol riche en C, en éléments figurés et en agrégats bactériens entraîne une destruction relative des agrégats bactériens, ce qui peut s'expliquer par le fait que les vers de terre se nourrissent en partie de cellules microbiennes. L'augmentation

Tableau 2 - Proportions des 3 types d'agrégats pour différentes situations de Martinique et de Guadeloupe (0-10 cm).

Table 2 - Relative distribution of microaggregate (5-20  $\mu\text{m}$ ) types in different situations (0-10 cm depth).

Situations	Ag. organo-min. type 1	Ag. bactériens	Ag. organo-min. type 2
Mm15 maraîchage	19	14	67
Pm17 prairie pangola	41	52	7
NUc10 sol nu	16	3	81
Jc10 jachère	17	39	44
PCc10 prairie star grass	71	18	11
Sc50 canne à sucre	30	10	60

du taux d'agrégats organo-minéraux type 2, consécutive à cette action, peut être due à la libération de colloïdes organiques à partir de la lyse bactérienne ou lors de la libération de mucus de vers de terre.

### Agrégation nanométrique

L'observation des agrégats organo-minéraux type 2 (sans débris) des Vertisols de Martinique et de Guadeloupe révèle des différences : ceux, calco-magnésio-sodiques, de Martinique sont constitués majoritairement de smectites à l'aspect bouclé, alors que ceux, calciques, de Guadeloupe sont composés de smectites ondulées. Lorsque les smectites sont adsorbées sur les exopolymères bactériens (agrégats bactériens) ou sur les matières organiques végétales (agrégats organo-minéraux type 1), que ce soit à la Martinique ou à la Guadeloupe, ces smectites présentent un aspect ondulé.

A la Martinique, les analyses effectuées en EDXS et EELS sur les agrégats organo-minéraux type 2 à l'aspect bouclé ont montré que ces smectites sont associées à une fraction organique révélée par la présence d'azote. A la Guadeloupe, l'analyse effectuée sur les mêmes associations révèle la présence d'azote donc de matières organiques très fines associées aux smectites. Le calcium a été détecté au sein de ces associations. Il a également été détecté dans les agrégats bactériens au niveau des exopolymères bactériens et dans les agrégats organo-minéraux au niveau des matières organiques associées.

Des études au laboratoire ont montré que les polysaccharides d'origine microbienne (lévane, succinoglycane, polysaccharide de *B. caribensis*) jouent un rôle déterminant dans la structuration locale et l'hydratation de la montmorillonite prise comme modèle des smectites de Vertisol.

En raison de la faible affinité entre ces polysaccharides neutres ou anioniques et l'argile, une interaction n'a été constatée au laboratoire qu'en présence de  $\text{Ca}^{2+}$  (et dans une moindre mesure de  $\text{Na}^+$ ) en large excès par rapport à la CEC.

On observe alors la formation d'agrégats proches du millimètre, même en conditions très diluées (de l'ordre de 100 mg/l de matière sèche totale) : la combinaison du polysaccharide et des cations aboutit à une coagulation-floculation de l'argile. Bien que localisé entre les tactoïdes et non dans l'espace interfoliaire comme l'a montré la diffraction X, le polysaccharide influence considérablement le statut de l'eau dans une matrice concentrée de montmorillonite. Lors de l'humectation d'un mélange sec, l'intrusion de la vapeur d'eau est décalée vers les fortes humidités. En revanche, la déshydratation est peu modifiée, voire favorisée : sur un modèle silice/succinoglycane, le potentiel hydrique mesuré par osmométrie en phase vapeur est inférieur à la somme pondérée des potentiels hydriques du polysaccharide et du minéral.

Il est peu probable dans l'état actuel de nos connaissances que l'on puisse obtenir avec des polysaccharides seuls, une stabilisation marquée des sols argileux magnésio-sodiques. Pour les garnitures ioniques plus riches en Ca, ceci paraît envisageable.

Pour déterminer les comportements de dispersion ou non, il faut au moins prendre en compte les 3 composantes suivantes : la présence de smectite, une garniture cationique et des polysaccharides bactériens. Au laboratoire, la présence du polysaccharide peut modifier les organisations aux niveaux les plus fins.

## DISCUSSION : DÉTERMINANTS DE L'AGRÉGATION À DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TAILLE

### Rôle des vers de terre

Les adultes de l'espèce *P. elongata* consomment environ 1 fois leur propre poids de terre sèche par jour, alors que les

Tableau 3 - Proportions des 3 types d'agrégats pour les sols de deux situations de Martinique et modifications apportées à ces proportions après passage du sol dans le tube digestif du ver de terre *Polypheretima elongata*.

Table 3 - Relative distribution of microaggregates (5-20  $\mu\text{m}$ ) before and after transit through the earthworm *Polypheretima elongata* of vertisols under an old pasture Pm17 and an old gardening crop Mm15.

Situations	Ag. organo-min. type 1	Ag. bactériens	Ag. organo-min. type 2
<b>Maraîchage Mm15</b>			
Sol	19	14	67
Turricules	36	18	44
<b>Pâturage Pm17</b>			
Sol	41	52	7
Turricules	48	17	33

juvéniles consomment jusqu'à 12 fois leur propre poids de sol (Barois et al., 1992). Il a ainsi été possible de mesurer la consommation annuelle de sol pour l'ensemble d'une population: 1280 Mg/ha sous prairie Pm17 et seulement 50 Mg/ha sous cultures maraîchères Mm15. Leur action est essentielle dans les premiers centimètres de sol riche en MO; ils descendent en profondeur lorsque le sol se dessèche.

Les turricules de *P. elongata* ont des propriétés qui sont comparables à celles du sol dont ils sont issus et notamment sous prairie, bien que le sol ait subi un pétrissage important accompagné d'une addition d'eau et de mucus importante. Sous maraîchage, les turricules sont enrichies en éléments figurés organiques, par rapport au sol d'origine. La stimulation de l'activité microbienne dans le tube digestif des vers de terre conduit à une libération relativement importante de  $\text{NH}_4^+$  (Dubois, 1994). D'un point de vue physique, les turricules frais sont très facilement dispersables et peuvent donc facilement être érodés s'ils sont rejetés à la surface du sol. La stabilité augmente avec le séchage, pour devenir au moins égale à celle du sol d'origine (Charles, 1997). Les turricules montrent un volume spécifique d'air peu important: 0,045  $\text{cm}^3/\text{g}$  (s.e. = 0,012) pour la prairie Pm17 et 0,026  $\text{cm}^3/\text{g}$  (s.e. = 0,004) pour le maraîchage Mm15 (Blanchart, 1997). Ils peuvent par conséquent affecter de façon importante la porosité de ces sols (Cabidoche et al., 1999).

L'effet des vers de terre sur les propriétés physiques peut être appréhendé en étudiant plus particulièrement les situations expérimentales Pm3N (sans plantes, sans vers), Pm3D (avec plantes, sans vers) et Pm3V (avec plantes et introduction d'une population importante de vers de terre) après 3 années d'expérience. Les teneurs en C ne sont pas significativement différentes entre Pm3D et Pm3V; elles sont cependant significativement supérieures à celles mesurées pour Pm3N (figure 8). L'examen des résultats de stabilité (figure 2 pour la D50) et d'érodibilité (figure 3 pour l'exportation) montrent qu'après 3 années d'expérience, les niveaux d'agrégation sont peu différents entre ces 3 parcelles, notamment après un certain temps d'agitation (> une heure). En absence d'agitation, les agrégats issus des situations Pm3D et Pm3V sont légèrement plus stables que ceux issus de Pm3N. L'examen des résultats d'exportation de terre (pour une surface du sol binée, sans couverture végétale) montre que le sol de Pm3N est très érodible (exportation > 500  $\text{g}/\text{m}^2$ ), en comparaison avec les sols de Pm3D et Pm3V (exportation proches de 300  $\text{g}/\text{m}^2$ ).

Au niveau des microagrégats, les vers de terre semblent avoir un effet certain sur la distribution relative des différents types d'agrégats organo-minéraux (avec ou sans débris organiques) et bactériens, à l'échelle des turricules. Il sera intéressant d'analyser les sols des situations Pm3D et Pm3V afin de vérifier cet effet au niveau du sol (étude en cours au CPB).

Ainsi, la présence ou l'absence de vers de terre ne semblent pas influencer de façon marquée sur l'agrégation, la stabilité

de cette agrégation et la susceptibilité du Vertisol à l'érosion, à la différence de ce qui est généralement observé pour les sols à kaolinite (Blanchart, 1998).

### Rôle des racines

Les racines, abondantes sous prairie graminéenne (*Digitaria decumbens* notamment), jouent un rôle prépondérant dans la détermination de l'agrégation, de sa stabilité et de la susceptibilité à l'érosion. L'étude des résultats issus des différentes situations montrent que la restauration des teneurs en C et des propriétés physiques n'est effective que dans les situations où une activité racinaire intense est présente. En particulier, il est nécessaire que l'installation de fourrages soit accompagnée d'une irrigation et d'une fertilisation permettant un développement et un turnover (vu au travers des enrichissements en C) racinaire importants (Chevallier et al., en préparation). Ainsi, les jachères ne permettent pas une telle restauration des teneurs en C et des propriétés physiques; c'est notamment le cas de la parcelle Jc15 âgée de 15 ans à l'époque des mesures (teneur en C de l'horizon 0-10 cm égale à 19 g C/kg de sol contre 39 g C/kg de sol pour la prairie irriguée et fertilisée Pm17, âgée de 10 ans seulement, après maraîchage).

### Rôle des bactéries productrices d'EPS

L'espèce *B. caribensis*, dont l'EPS est en cours de caractérisation (A. Heyraud, CERMAV-CNRS, Grenoble), constitue la population bactérienne dominante dans les microagrégats bactériens provenant de la situation sous prairie à *Digitaria decumbens* (Martinique). Sans disparaître totalement, cette population est nettement moins fréquente dans les situations de maraîchage (quel que soit le type de travail du sol). L'absence d'enracinement profond des cultures maraîchères (moins d'exsudats racinaires et régime hydrique modifié en profondeur) pourrait expliquer la disparition partielle de cette population. La production d'EPS par cette bactérie nécessiterait la présence d'exsudats racinaires et l'orientation tangentielle des feuillettes d'argile enrobant les micro-colonies bactériennes (planche 1) serait liée à des variations d'humectation/dessiccation consécutives au prélèvement d'eau par le système racinaire profond de *D. decumbens*. La persistance de cette espèce dans les situations sous maraîchage, à la Martinique, laisse espérer que le retour à un système prairial à enracinement profond s'accompagnera d'une stimulation de cette population bactérienne et la formation de microagrégats bactériens. Bien entendu, cette espèce n'est pas la seule bactérie productrice d'EPS dans ce type de sol. De plus, à la Guadeloupe, cette espèce est beaucoup moins abondante (< 1% des bactéries cultivables) mais les bactéries productrices d'EPS majoritaires n'ont pas été identifiées pour l'instant.

Les bactéries jouent ainsi un rôle important dans l'agrégation aux niveaux nanométrique et micrométrique.



## Rôle de la matière organique

Comme on l'a vu ci-dessus, la teneur en C reste le meilleur indicateur de l'état physique de ces sols, en termes d'agrégation et de sensibilité à l'érosion. La matière organique est largement apportée dans le système par les racines des plantes fourragères, en conditions d'irrigation et de fertilisation. La transformation d'une parcelle maraîchère en parcelle fourragère induit une augmentation à la fois des particules organiques fines et surtout des éléments figurés. Ces derniers semblent jouer un rôle important dans l'agrégation au niveau micrométrique (agrégats 5-20  $\mu\text{m}$  organo-minéraux de type 1); il est vraisemblable qu'ils expliquent également, en partie, l'agrégation aux échelles de taille supérieure, bien que cela reste à vérifier. La matière fine, colloïdale, intervient aussi dans les processus d'agrégation (agrégats 5-20  $\mu\text{m}$  organo-minéraux de type 2), prépondérants dans les situations sans restitution organique (sans racines, ayant peu de débris végétaux et une faible activité microbienne).

## CONCLUSION

### Déterminants de l'agrégation et de sa stabilité

Aux échelles fines, l'agrégation des particules minérales nécessite, outre la présence de cations, l'existence de polysaccharides apportés par des bactéries, de colonies bactériennes, de matières organiques colloïdales dont la nature reste à préciser et/ou de débris végétaux.

Ces conditions existent dans les situations où l'activité et le turnover racinaires sont importants, par conséquent, sous prairies irriguées, fertilisées et pâturées. Les racines de plantes fourragères (Graminées notamment) permettent donc de restaurer et de maintenir un niveau de matière organique et une activité microbienne importants. Les racines jouent donc un rôle moteur dans l'amélioration et la conservation de l'agrégation. Il faut rajouter à cet effet le rôle de filet joué par le réseau racinaire et l'importance de la couverture végétale vis-à-vis de la protection du sol contre l'impact des gouttes de pluie.

Les vers de terre, bien qu'affectant, à l'échelle de leurs turricules, la méso-agrégation 2-20  $\mu\text{m}$  en modifiant la distribution relative des différents types d'agrégats, ne semblent pas affecter l'agrégation à une échelle de taille millimétrique, ni la résistance du sol à l'érosion. Ils n'ont donc qu'un rôle secondaire dans le fonctionnement physique des Vertisols.

### Conséquences en termes de gestion des Vertisols

Cette étude a notamment permis de montrer la faible sensibilité des Vertisols de Guadeloupe à l'érosion (confirmation

d'une des hypothèses de cette étude). La protection des Vertisols contre l'érosion concerne donc plus particulièrement les Vertisols calco-magnésio-sodiques comme ceux de Martinique (et, a fortiori, l'ensemble des Vertisols non calciques). Les pertes en terre étant corrélées à l'état de surface du sol et aux mesures de stabilité des agrégats, il est donc nécessaire, pour proposer des systèmes durables, de favoriser la stabilité des agrégats constitutifs de ces sols et de limiter l'impact érosif de l'eau. Les résultats ont notamment permis de montrer que l'installation de prairie (à *Digitaria decumbens* notamment) permettait une restauration de la stabilité des agrégats, stabilité améliorée par l'incorporation au sol de matières organiques figurées par l'intermédiaire notamment des racines de la plante. Cette incorporation de matière organique permet le développement d'agrégats organo-minéraux (avec ou sans débris) et bactériens qui facilitent l'adhésion des particules argileuses entre elles. Une fois les propriétés des sols restaurées par la mise en prairie, il est important d'utiliser des techniques de préparation du sol pour la mise en cultures maraîchères qui soient le moins destructrices possibles (travail superficiel - Hartmann et al., 1998) ou d'associer, au sein de la même parcelle, des bandes de cultures et des bandes de prairie pour faciliter la recolonisation par les graminées, éviter la mise à nu des sols au moment de la saison des pluies intenses, et préserver une activité biologique importante.

## REMERCIEMENTS

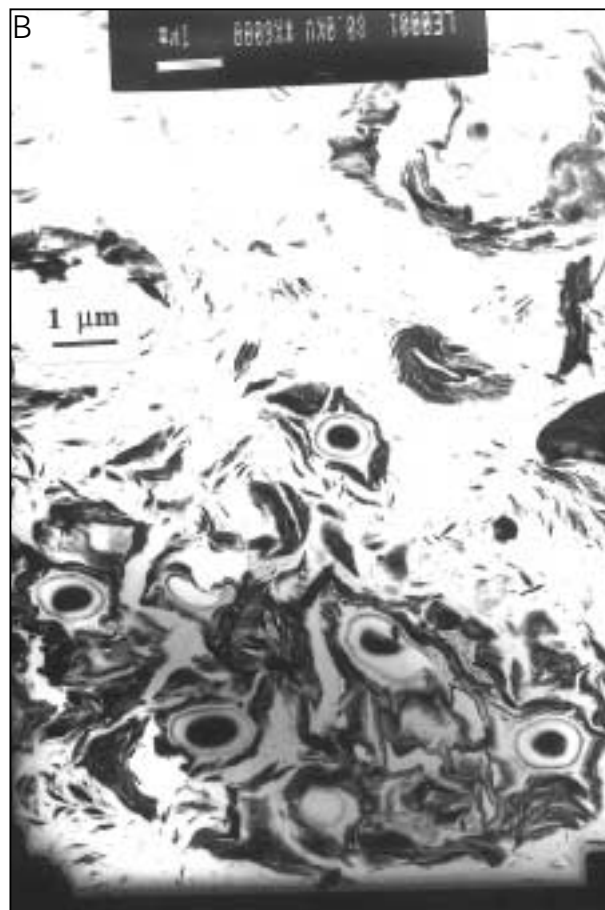
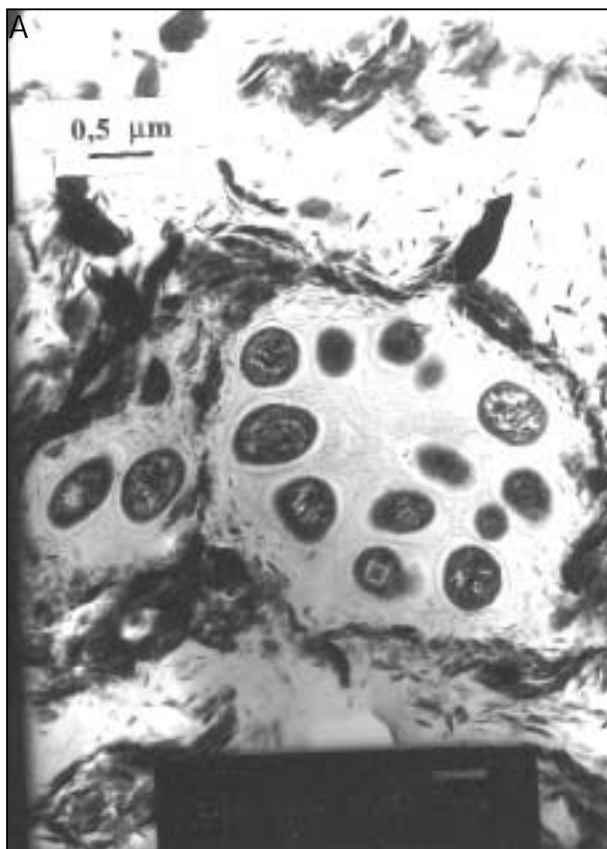
L'équipe du projet P3-Antilles remercie chaleureusement l'ensemble des personnes sans qui les travaux de terrain et de laboratoire n'auraient pu se faire : Ird (ex-Orstom) (Jérôme Bernard, Jean-Pierre Lamoureux, Joele Louri, Luc Rangon, Raymond Totila, Inra (Andève Mulciba). Elle remercie aussi le Conseil Général de la Martinique pour lui avoir permis de travailler à la Station d'Essais en Cultures irriguées (SECI).

## BIBLIOGRAPHIE

- Achouak W., Christen R., Barakat M., Martel M.H., and Heulin T., 1999 - *Burkholderia caribensis* sp. nov. exopolysaccharide-producing bacterium isolated from Vertisol microaggregates in Martinique. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 49, pp. 787-794.
- Achouak W., Barakat M., Albrecht A., and Heulin T. - The impact of crop management on the diversity of EPS-producing bacteria isolated from Vertisol microaggregates. En préparation.
- Albrecht A., Rangon L., et Barret P., 1992a - Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un Vertisol et d'un Ferrisol (Martinique). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 27, pp. 121-133.
- Albrecht A., Brossard M., Chotte J.-C., et Feller C., 1992b - Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 27, pp. 23-36.

Planche 1 - (Th. Heulin) : Agrégats bactériens observés (MET) à partir d'agrégats de taille 5-20  $\mu\text{m}$  de Vertisols prélevés sous prairies (1-A) ou sous maraîchage (1-B) de longue durée. 1-A : 1 cm = 0,5  $\mu\text{m}$ , 1-B : 1 cm = 1  $\mu\text{m}$

Plate 1 - (Th. Heulin) : Bacterial aggregates observed (TEM) from 5-20  $\mu\text{m}$  size aggregates collected from Vertisols under an old pasture (1-A) and an old vegetable cropping (1-B). 1-A : 1 cm = 0,5  $\mu\text{m}$ , 1-B : 1 cm = 1  $\mu\text{m}$



Asseline J., et Valentin C., 1978 - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. Orstom, sér. Hydrol. 15, pp. 321-350.

Barois I., Cadet P., Albrecht A., et Lavelle P., 1987 - Systèmes de culture et faune des sols. Quelques données. In : Fertilité des sols dans les agricultures paysannes caribéennes; effets des restitutions organiques, Feller C. (Rapporteur). Projet CEE-ORSTOM n° TSDA-0178F, pp. 85-95.

Barois I., Lavelle P., and Kanyonyo ka Kajondo J., 1992 - Adaptive strategies and short-term effects of selected earthworm species. In Lavelle P., Conservation of soil fertility in low-input agricultural systems of the humid tropics by manipulating earthworm activities (Macrofauna Project), Rapport novembre 1992, ORSTOM, Bondy, pp. 35-63.

Blanchart E., 1997 - Rôle des systèmes biologiques dans le fonctionnement des Vertisols (Martinique). Application aux processus de restauration des propriétés physiques des sols. Rapport final d'un projet SOFT, ORSTOM-BOST, pp. 49 p.

Blanchart E., 1998 - Earthworms and soil structure and physical properties in kaolinitic and smectitic tropical soils. Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, 20-26 août 1998.

Cabidoche Y.M., Guillaume P., Hartmann C., Ruy S., Blanchart E., Albrecht E., Mahieu M., Achouak W., Heulin T., Villemin G., Watteau F., et Bellier G., 1999 - Déterminants biologiques du système poral des Vertisols cultivés

des Petites Antilles. Conséquences sur la disponibilité de l'eau des sols pour les plantes. Etude et Gestion des Sols, ce même volume.

Charles C., 1997 - Effet des vers de terre sur l'agrégation d'un Vertisol du sud-est de la Martinique. Influence du passage du sol dans le tube digestif. Mémoire de maîtrise UAG, ORSTOM-BOST, 30 p.

Cheshire M.V., 1979 - Nature and origin of carbohydrates in soils. Academic Press, London.

Chevallier T., Girardin C., Mariotti A., Blanchart E., and Feller C. - Role of biological activity (roots, earthworms) on medium-term C dynamics in a Vertisol under a *Digitaria decumbens* pasture (Martinique). En préparation.

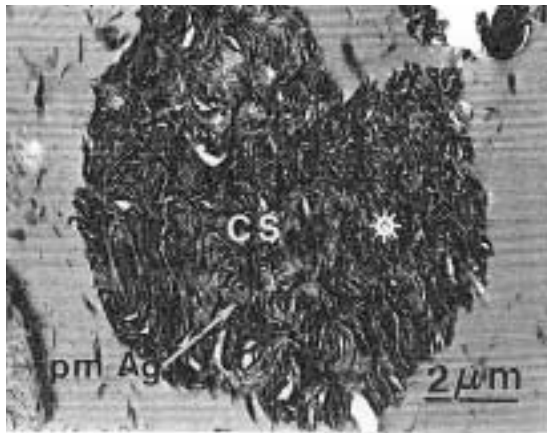
Chotte J.-L., Monrozier L., Villemin G., et Toutain F., 1992 - Effet du mode de dispersion du sol sur la localisation de sa biomasse microbienne. Cas d'un Vertisol. Cah. Orstom, sér. Pédologie, 28, pp. 81-95.

Dalal R.C., and Bridge B.J., 1995 - Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils. In Structure and organic matter storage in agricultural soils. CCRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 263-307.

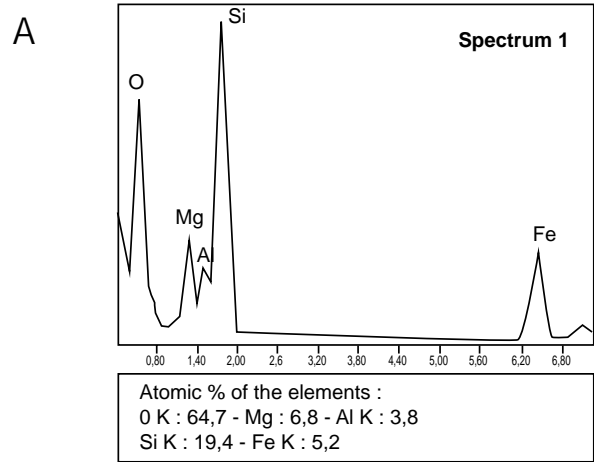
Degens B.P., 1997 - Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: A review. Australian Journal of Soil Research, 35, pp. 431-459.

Planche 2 - (G. Villemin, F. Watteau) : Observation au MET des 3 types d'agrégats observés dans la classe 2-20 µm et analyse EDX des smectites associées. 2-A : agrégat organo-minéral de type 2 (sans débris végétaux), 2-B : agrégat organo-minéral de type 1 (avec débris végétaux), 2-C : agrégat bactérien.

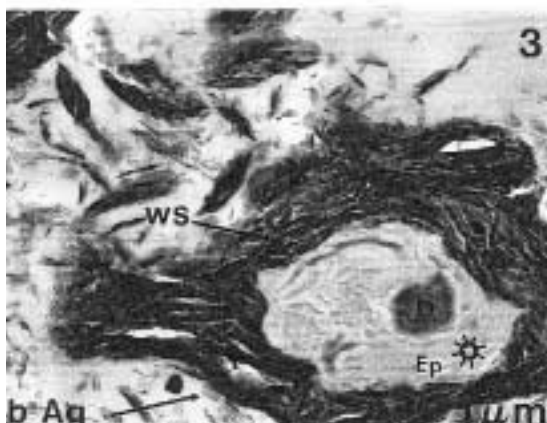
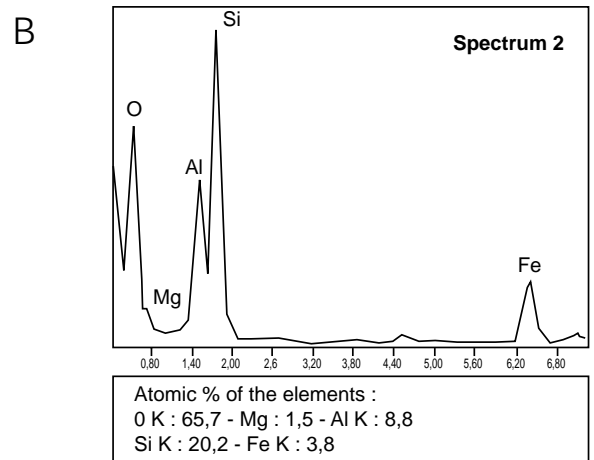
Plate 2 - TEM observations of 3 aggregate types observed in the class 2-20 µm. 2-A : organo-mineral aggregate type 2 (without plant debris), 2-B : organo-mineral aggregate type 1 (with plant debris), 2-C : bacterial aggregate.



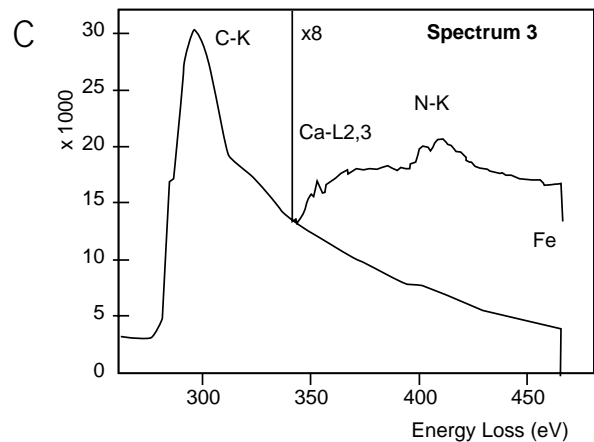
Organo-mineral aggregate type 2 with curled smectites



Organo-mineral aggregate type 1 with wavy smectites



Bacterial aggregate with wavy



- Duboisset A., 1994 - Interactions existant entre *Polypheretima elongata* (Oligochaeta Megascolecidae) et les propriétés physico-chimiques des Vertisols calco-magnésio-sodiques du sud-est de la Martinique suivant le mode d'anthropisation. Rapport de MST, Pris VII, ORSTOM-BOST, 31 p.
- Gavinelli E., Feller C., Larré-Larrouy C., Bacye B., Djegui N., and Nzila J.D.D., 1995 - A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples for tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26, pp. 1749-1760.
- Hartmann C., Blanchart E., Albrecht A., Bonneton A., Parfait F., Mahieu M., Gaullier C., et N'Dandou J.-F., 1998 - Nouvelles techniques de préparation des Vertisols en culture maraîchère à la Martinique. Incidences pédologiques et agro-économiques. *Agriculture et Développement*, 18, pp. 81-89.
- Hu S., Coleman D.C., Carroll C.R., Hendrix P.F., and Beare M.H., 1997 - Labile soil carbon pools in subtropical forest and agricultural ecosystems as influenced by management practices and vegetation types. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 65, pp. 69-78.
- Oades J.-M., 1984 - Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76, pp. 319-337.
- Saffache P., Blanchart E., et Hartmann C., 1998 - De l'érodibilité des sols cultivés à l'engrais-ement des côtes. Exemple de la Baie du Marin. 123<sup>e</sup> Congrès National des Sociétés Historiques et Scientifiques, Fort-de-France, 6-10 avril 1998. Actes du colloque.