

Action Incitative Interinstitutionnelle
(ORSTOM, CNRS, CIRAD, INRA)

"Fonctionnement Biologique des Sols Tropicaux et
Gestion Durable des Terres"

U
Projet P3

Déterminants biologiques de l'agrégation et de la
porosité des vertisols des Petites Antilles.
Conséquences sur l'érodibilité et la disponibilité de
l'eau du sol pour les plantes.

Rapport final d'activité
décembre 1998



13 DEC. 1999

415 300 300
2 100
1 200

F



ORSTOM Documentation

010055309

AVANT-PROPOS

Ce rapport contient :

* La proposition d'article pour la revue Etudes et Gestion des Sols (il s'agit d'une version provisoire, cet article méritant qu'on lui apporte encore certaines améliorations)

* Les différents rapports rédigés séparément par chacune des équipes du projet

- rapport de ORSTOM-BOST p. 40
- rapport de INRA-APC p. 90
- rapport de ORSTOM-LCSC p. 94
- rapport de CNRS-LEMIR p. 115
- rapport de CNRS-CPB p. 119
- rapport de CNRS-ENSG-LEM p. 132

* Certains des articles publiés, acceptés pour publication ou en préparation

La partie financière sera envoyée un peu plus tard.

Eric BLANCHART et Alain ALBRECHT
Coordonnateurs du Projet P3

VERSION PROVISOIRE D'ARTICLE

POUR LA REVUE

ETUDES ET GESTION DES SOLS

Déterminants biologiques de l'agrégation dans les vertisols des Petites Antilles. Conséquences sur l'érodibilité.

Role of biological activities in aggregation of vertisols of the West Indies.
Consequences for their erodibility.

E. Blanchart¹, W. Achouak², A. Albrecht³, M. Barakat², G. Bellier⁴, Y.M. Cabidoche⁵,
C. Hartmann¹, T. Heulin², C. Larré-Larrouy⁶, J.Y. Laurent⁶, M. Mahieu⁷, F. Thomas⁸,
G. Villemin⁹, F. Watteau⁹

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

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 analytique des agrégats 2-20 µm ; 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-magnésio-sodiques 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

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 μm), 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 μm . 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

Introduction

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 80 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 h). 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 flocculante, 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.

I. Situations d'étude (modes d'usage et situations expérimentales)

Cette caractérisation a été effectuée (Tableau I, Figure 1) :

- d'une part sur des situations de sol 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.

II. 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 pourcentage d'agrégats stables > 500 μm (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 h 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 m^2 (pente de 2 à 5%) par un test de détachement, *in situ*, sous pluie artificielle selon Asseline & 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 calciques 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 $\text{g}/\text{m}^2/30 \text{ mn}$), tandis que les parcelles en cultures maraîchères donnent des valeurs

proches de 540 g/m²/30 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 g/m²/30 mn). Sous une pluie de récurrence centennale, les pertes en terre sur Mm15 atteignent 1450 g/m²/30 mn, ce qui représente des quantités de terre très importantes.

III. Caractérisation des activités biologiques et de la matière organique

III.a. 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.

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 g/m² et 120 ind/m² à la Martinique, 40 g/m² et 133 ind/m² 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 au 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, Mm2Pl) ont des populations de vers de terre très faibles (inférieures à 7 g/m² et à 7 ind/m²).

* Racines

Les racines ont été séparées par tamisage (200 µm) 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 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 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, Mm2Pl 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 µm. 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).

III.b. 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 broyé 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 1 h) (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 μm) et dans les fractions grossières (20-2000 μm) (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 μm . Sous prairie Pm17, les agrégats stables 200-2000 μm 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 μm

qui apparaissent enrichis en C (16 et 13 g C/kg d'agrégats respectivement pour les agrégats 0-5 et 5-20 μm). Dans les deux sols, les agrégats stables 20-200 et 200-2000 μm 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 μm se retrouvent emprisonnées dans des agrégats stables (1 h d'agitation) de taille supérieure à 200 μm . Dans le même ordre d'idée, la moitié des macroagrégats 200-2000 μm du sol Mm15 (et 27% de ses mésoagrégats 20-200 μm) serait constituée de MO associées à des particules de taille comprise entre 0 et 5 μm . En d'autres termes, 57% de la fraction granulométrique 0-5 μm proviendrait de la dispersion d'agrégats 20-200 μm .

Les agrégats 5-20 μm 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 μm , les agrégats de taille 0-5 μm 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 & 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 cellulosiques 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 cellulosique (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 cellulosiques (la fraction 200-2000 μm du sol Pm17 contient près de 12 fois plus de sucres cellulosiques 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 μm) provient de matières hémicellulosiques (de 63 à 89% du C des agrégats). Les macroagrégats 200-2000 μm 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 μm 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 μm et 86% C-MS des agrégats 200-2000 μm 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 mannose. 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'appartenance microbienne**.

Ce rapport r , étudié dans des fractions granulométriques (après dispersion maximale) et dans des agrégats de sol (après 1 h d'agitation), montre une diminution des valeurs des fractions fines (enrichies en mannose) 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 μm où prédomineraient des carbohydrates synthétisés par les microorganismes. On peut aussi remarquer, dans les macroagrégats 200-2000 μm des sols Pm17 et Mm15 que les 4

sucres dominants (glucose, xylose, galactose et mannose) 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 μm par les teneurs plus importantes en certains 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.

III.c. 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 vertisols 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 mn et 1h), aux pourcentages d'agrégats stables $> 500 \mu\text{m}$ (de t0 à 18h) 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 (t0 et 6h),
- 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, Mm2Pl, 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 μm ,

- 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 μm et au D50 t0 (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 μm , aux D50 (t0, 30 mn, 1h, 2h), aux pourcentages d'agrégats stables > 500 μm (de t0 à 18h) et négativement à l'ID (t0), la turbidité et la perte en terre pour une parcelle binée et une pluie décennale.

La mise en parallèle des paramètres biologiques et physiques montrent 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-magnésosodiques, 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.

IV. Agrégation du sol aux échelles micrométriques et nanométriques

IV.a. Agrégation micrométrique

*** Effet du mode de culture**

Les agrégats stables 2-20 μm 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 (Planche 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...).

- 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 II). Il se dégage très nettement dans les deux types de vertisols 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.

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 μm , la contribution au C total de la fraction 50-200 μm en ce qui concerne les caractéristiques biologiques

- les D50 à 30 minutes, 1 h, 2 h et 6h d'agitation, les ID à 1 h et 2 h d'agitation, les AS 500 μm à t0, 1 h, 2 h, 6 h et 18 h 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 μm (après 1h 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 III.

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 nourriraient en partie de cellules microbiennes. L'augmentation 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.

IV.b. 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 vertisols.

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 Ca^{2+} (et dans une moindre mesure de 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 deshydratation 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 : des smectites, une garniture cationique et des polysaccharides bactériens. Au laboratoire, la présence du polysaccharide peut modifier les organisations aux niveaux les plus fins.

V. Discussion : déterminants de l'agrégation à différentes échelles de taille

V.a. 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 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 cm 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 enrichis 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 NH_4^+ (Duboisset, 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 cm^3/g (s.e.= 0,012) pour la prairie Pm17 et 0,026 cm^3/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 (> 1 h). 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 g/m^2), en comparaison avec les sols de Pm3D et Pm3V (exportation proches de 300 g/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 observée pour les sols à kaolinite (Blanchart, 1998).

V.b. 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).

V.c. 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 feuillets d'argile enrobant les microcolonies 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.

V.d. 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 μm 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 μm organo-minéraux de type 2), prépondérants dans les situations sans restitution organique (sans racines, ayant peu de débris végétaux et une faible activité microbienne).

VI. Conclusion

VI.a. 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 d'élément moteur dans le système pour 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 μm 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.

VI.b. 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 techniques durables, de favoriser la stabilité des agrégats constitutifs de ces sols et de limiter l'impact 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

Cette étude a bénéficié du soutien financier (1996-99) de l'Action Incitative Interinstitutionnelle (AII) Orstom-Cirad-Cnrs-Inra : « Biofonctionnement des Sols tropicaux et Gestion Durable des terres ». 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, 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, 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, 23-36.

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

Barois I., Cadet P., Albrecht A., & 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*, 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, 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, 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, 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, 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, 431-459.

Duboisset A., 1994 - Interactions existant entre *Polypheretima elongata* (Oligochaeta Megascolecidae) et les propriétés physico-chimiques des vertisols calco-magnésosodiques 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, 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, 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, 69-78.

Oades J.M., 1984 - Soil organic matter and structural stability : mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76, 319-337.

Saffache P., Blanchart E., et Hartmann C., 1998 - De l'érodibilité des sols cultivés à l'enrichissement des côtes. Exemple de la Baie du Marin. 123e Congrès National des Sociétés Historiques et Scientifiques, Fort-de-France, 6-10 avril 1998. Actes du colloque.

Légende des figures :

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 (calciic vertisols) with respect to the land uses. The secondary forest Fm40 does not appear in this schema.

Figure 2 : Diamètre médian D50 (μm) 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 (μm) of 1-2 mm aggregates after 2 hours shaking in water for different situations.

Figure 3 : Pertes en terre (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 (g/m^2) as measured under a simulated rainfall (55 mm/h during 30 mn) for a hoed soil surface, in different situations.

Figure 4 : Biomasses de vers de terre (g/m^2) mesurées dans différentes parcelles, sur vertisols (0-30 cm), de Martinique et de Guadeloupe.

Figure 4 : Earthworm biomasses (g/m^2) in different situations (0-30 cm depth).

Figure 5 : Densités de vers de terre (ind/m^2) mesurées dans différentes parcelles, sur vertisols (0-30 cm), de Martinique et de Guadeloupe.

Figure 5 : Earthworm densities (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).

Figure 7 : Présence de Burkholderia caribensis sp. nov. dans les microagrégats 5-20 μm 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 μm) 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).

PLANCHE 1 (Th. Heulin) : Agrégats bactériens observés (MET) à partir d'agrégats de taille 5-20 μm de vertisols prélevés sous prairies (1-A) ou sous maraîchage (1-B) de longue durée. 1-A : 1 cm = 0,5 μm , 1-B : 1 cm = 1 μm

PLATE 1 (Th. Heulin) : Bacterial aggregates observed (TEM) from 5-20 μm size aggregates collected from Vertisols under an old pasture (1-A) and an old vegetable cropping (1-B). 1-A : 1 cm = 0.5 μm , 1-B : 1 cm = 1 μm

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.

Tableau I : 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=calciq, l=labouré, b=bêchée. Le chiffre indique l'âge des parcelles.

Table I : Codes and characteristics of sites studied in Martinique and Guadeloupe.

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
Mm2Pl	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 t0 (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

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

Table II : Relative distribution of microaggregate (5-20 μm) types in different situations (0-10 cm depth).

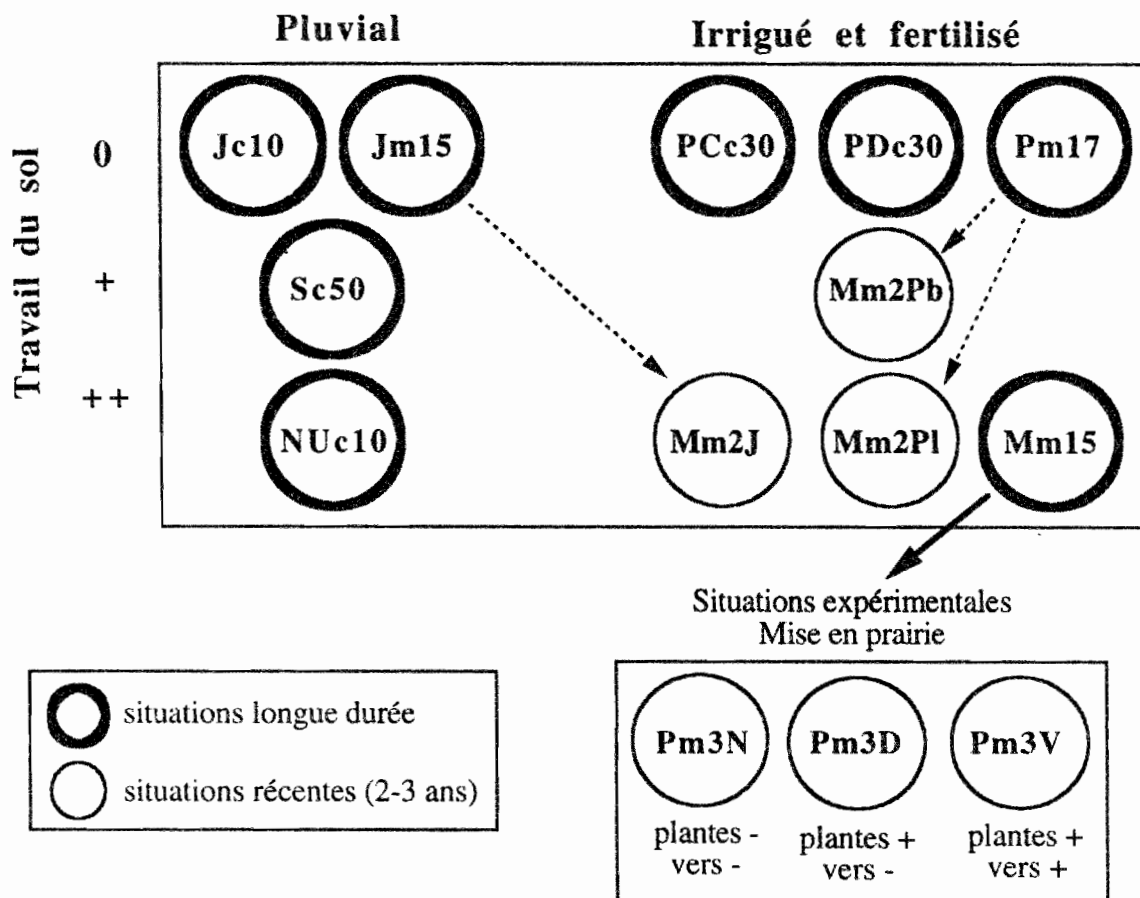
Situations	Ag. organo-min. type 1	Ag. bactériens	Ag. organo-min. type 2
Mm15 maraîchage	19	14	67
Pm17 prairie pangola	41	52	7
NUc10 sol nu	16	3	81
Jc10 jachère	17	39	44
PCc10 prairie star grass	71	18	11
Sc50 canne à sucre	30	10	60

Tableau III : 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 III. Relative distribution of microaggregates (5-20 μm) 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
Maraîchage Mm15			
Sol	19	14	67
Turricules	36	18	44
Pâturage Pm17			
Sol	41	52	7
Turricules	48	17	33

Figure 1



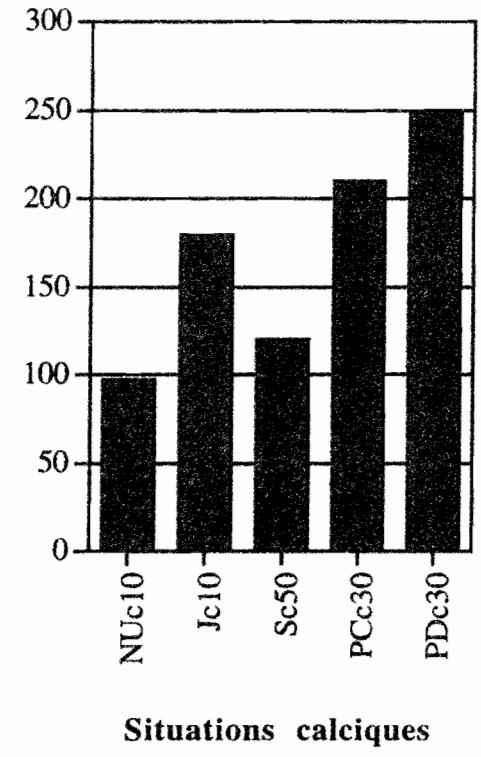
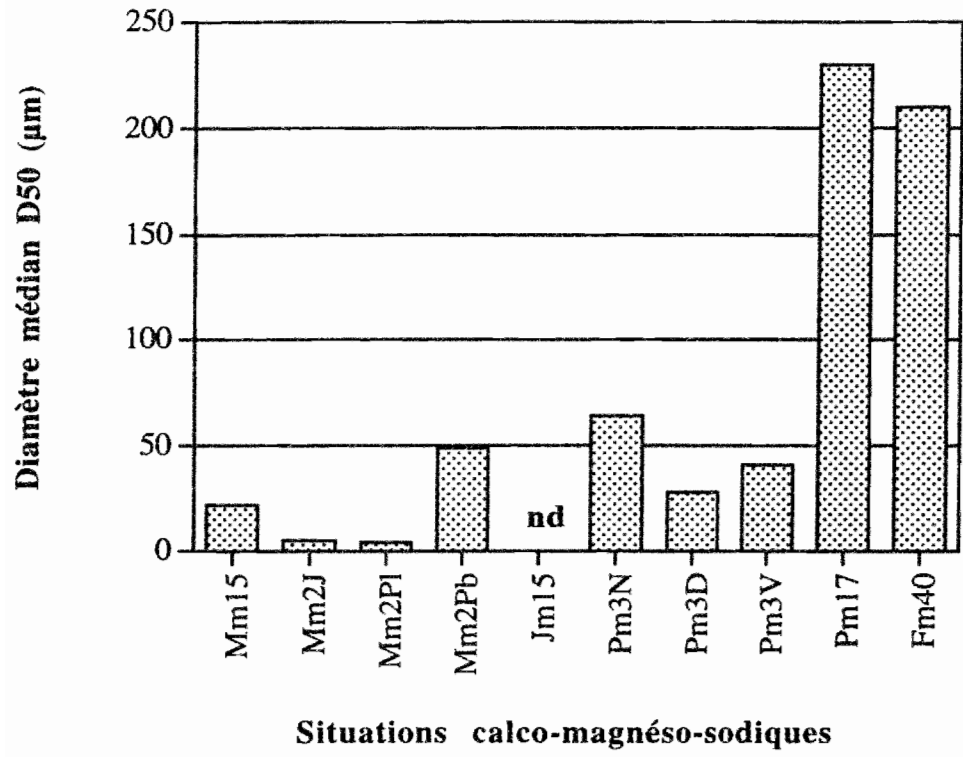


Figure 2

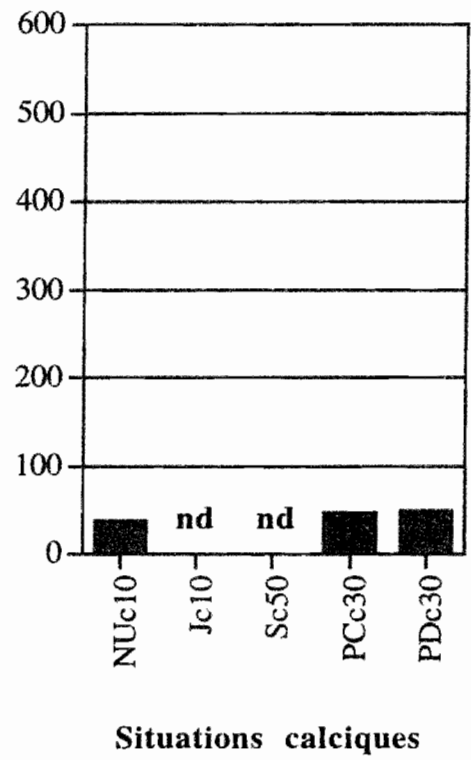
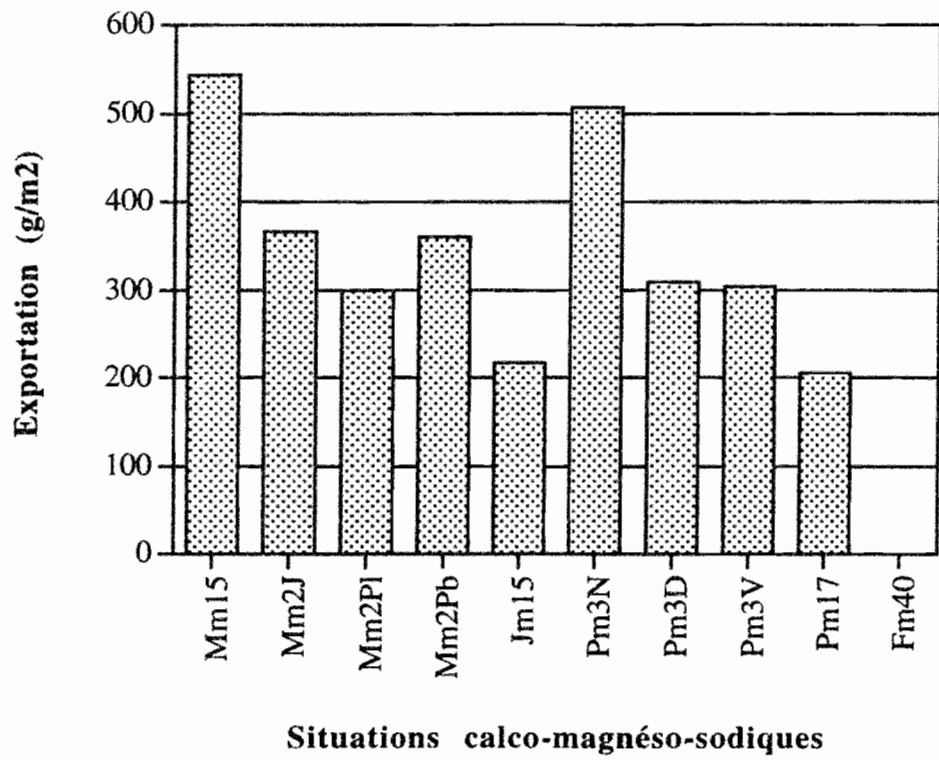
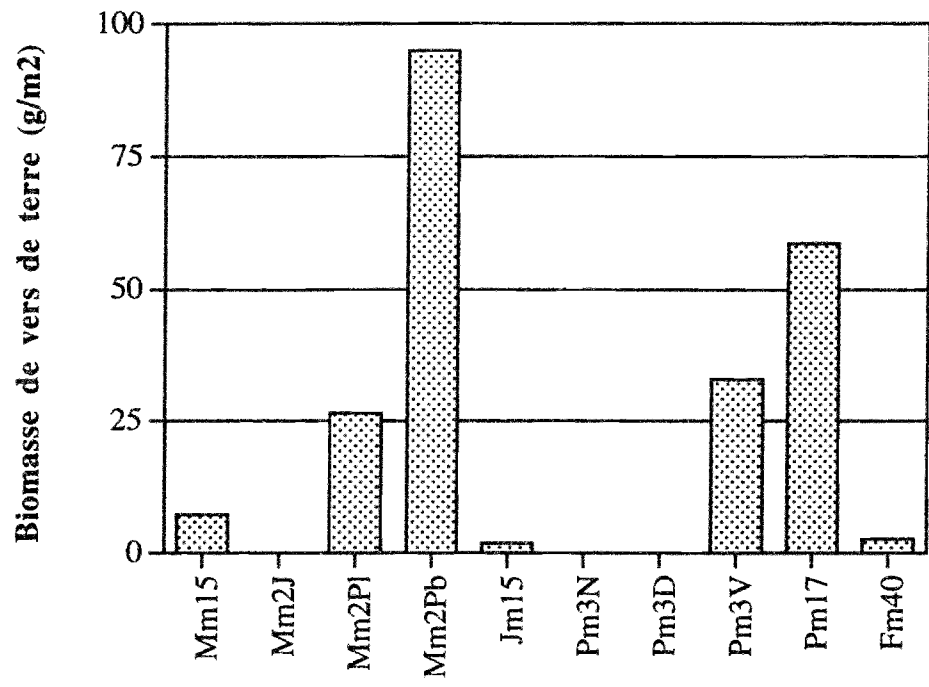
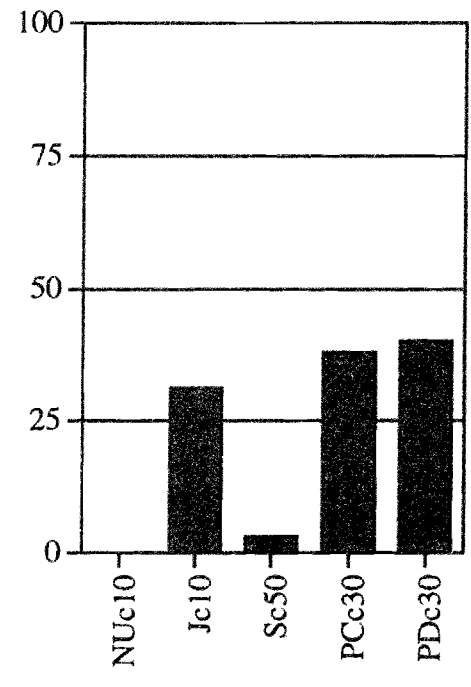


Figure 3



Situations calco-magnésio-sodiques



Situations calciques

Figure 4

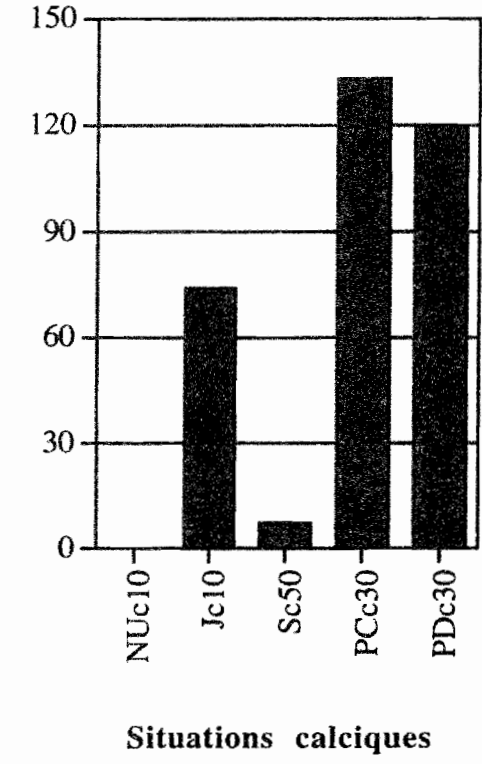
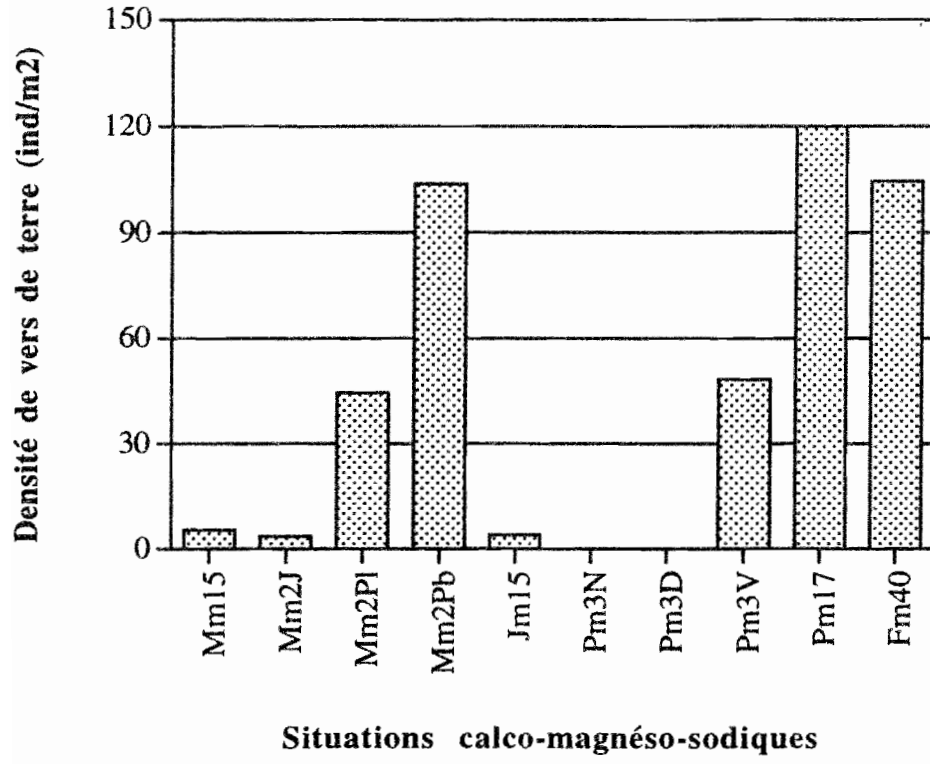


Figure 5

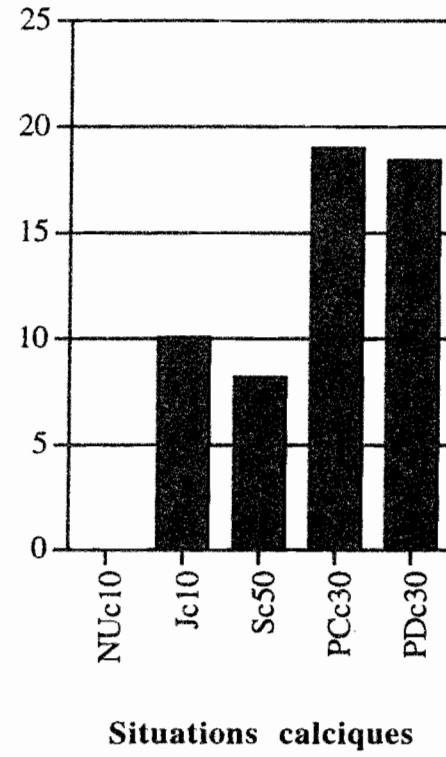
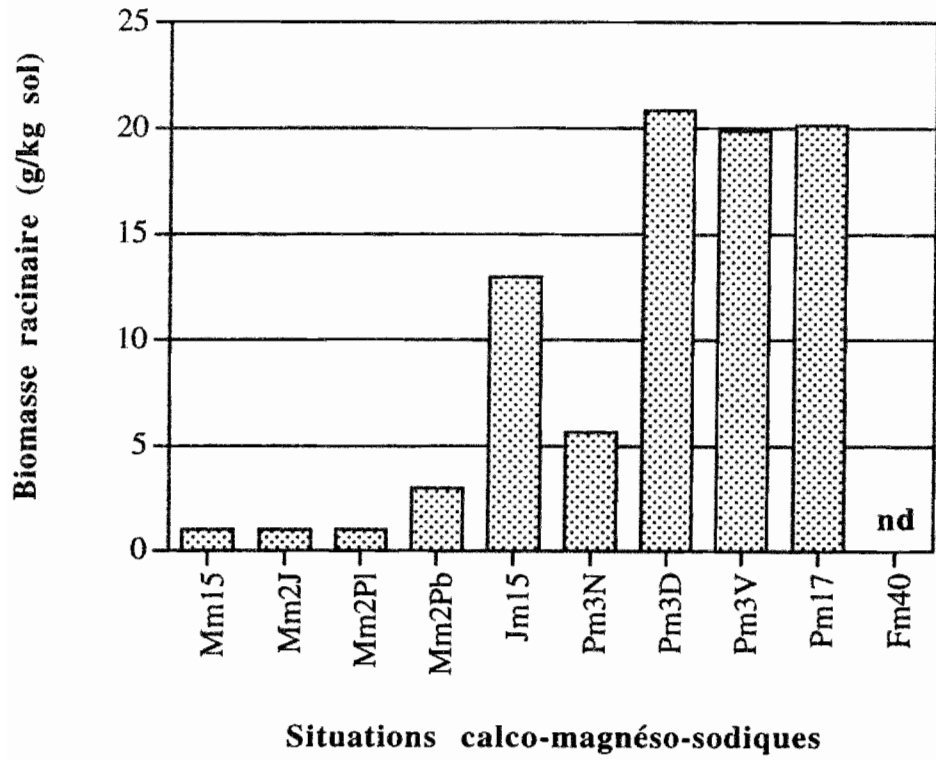
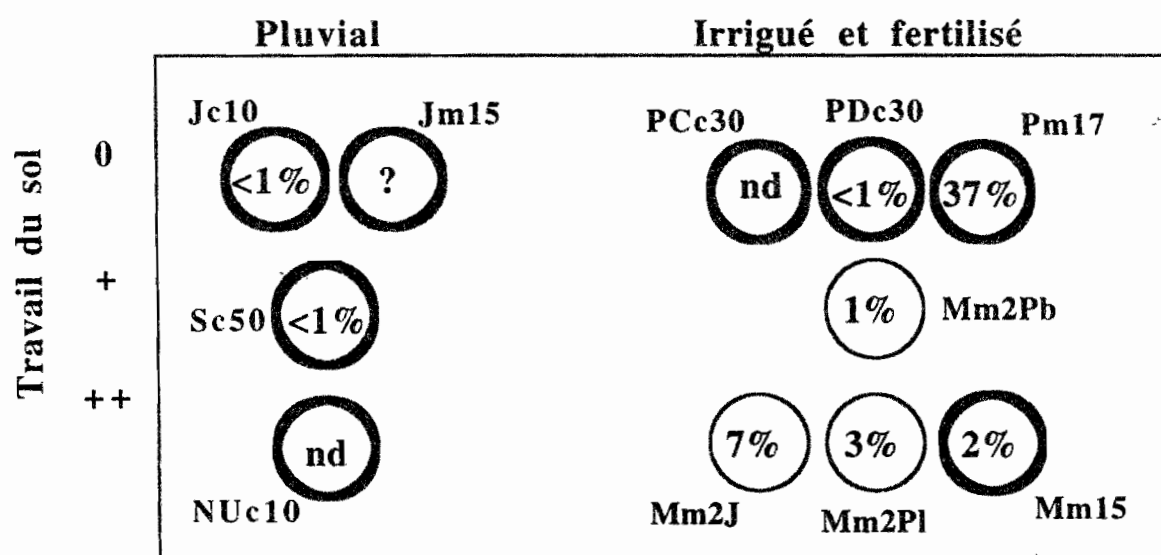


Figure 6

Figure 7



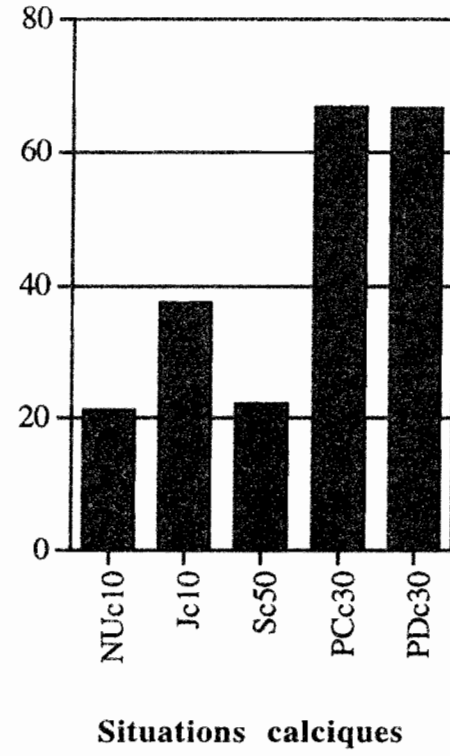
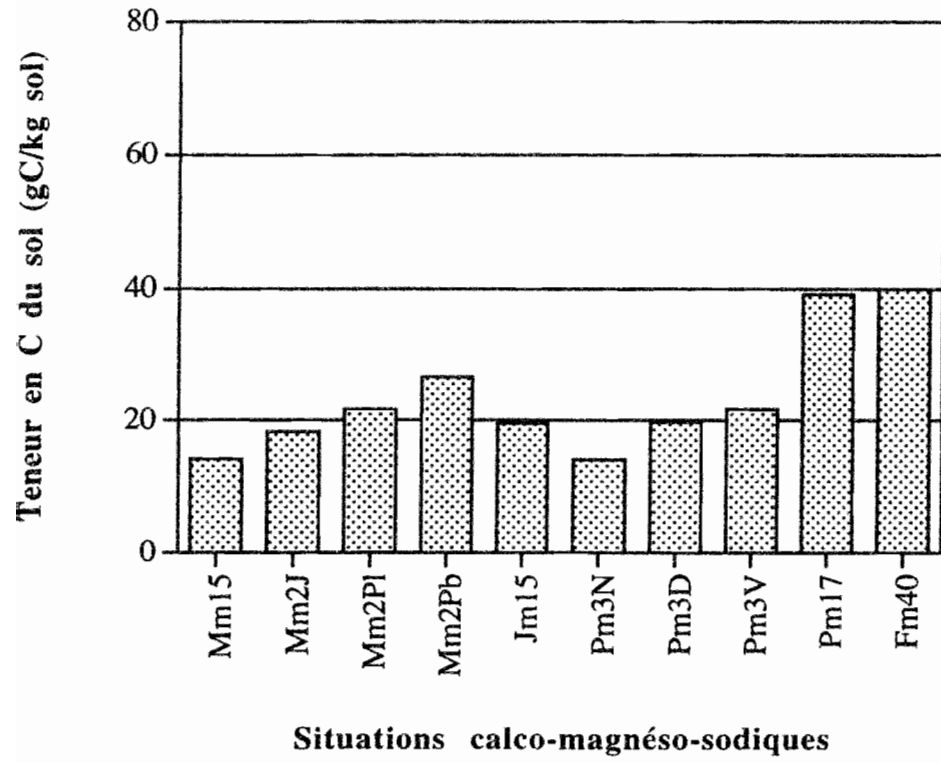


Figure 8

C des fractions granulo. (gC/kg sol)

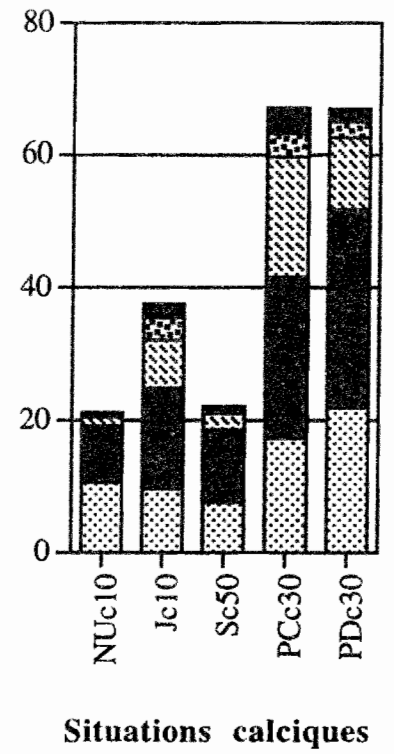
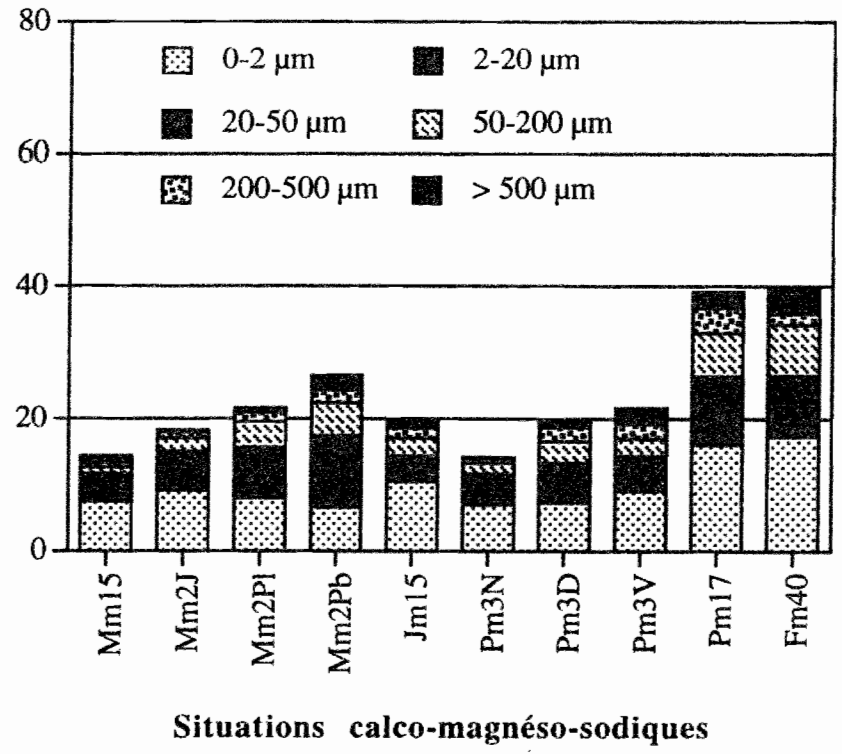


Figure 9

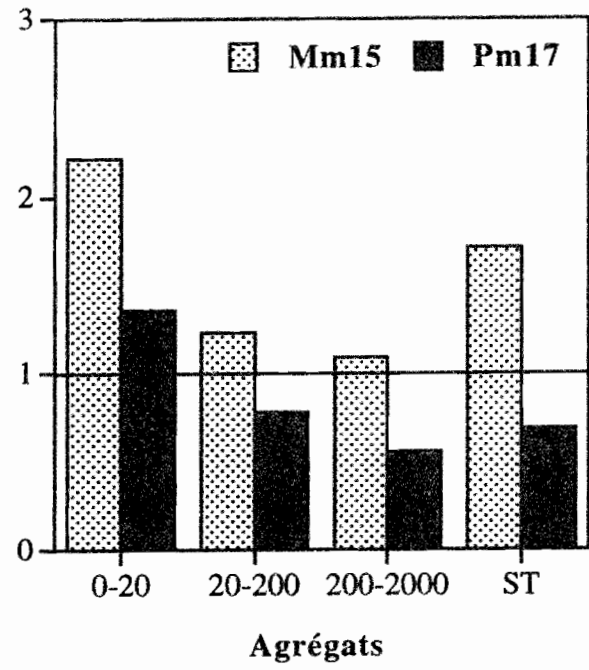
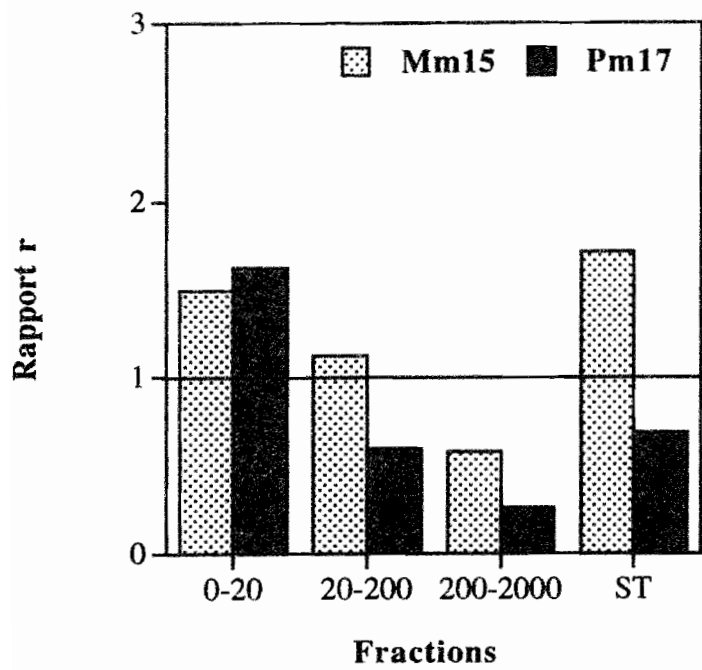


Figure 10

RAPPORT DU

LABORATOIRE BIOLOGIE ET ORGANISATION DES SOLS TROPICAUX

MARTINIQUE

IRD (ex-ORSTOM)

**Laboratoire Biologie et Organisation des Sols Tropicaux
ORSTOM - Martinique**

I. Parcelles étudiées

En raison du manque d'évolution des parcelles "Kill" (élimination sur prairie ancienne à *Digitaria* des vers de terre et/ou des plantes), qui complique l'image qu'on peut avoir de la présence ou de l'absence des vers de terre ou des racines, ces parcelles n'ont pas été prises en compte dans l'exploitation des résultats. Il s'agit des parcelles M4, M7, M8 pour la Martinique et G2, G3, G4 pour la Guadeloupe.

Conservation des autres parcelles soit 8 pour la Martinique et 4 pour la Guadeloupe

Ajout de deux autres parcelles pour la Martinique : une jachère naturelle (plantée en *Brachiaria* en 1980), non irriguée, non fertilisée, non pâturée (notée M12) et une forêt secondaire de 40 ans (notée M13). Ajout d'une parcelle pour la Guadeloupe : une prairie longue durée en *Digitaria decumbens* afin de faire le pendant des prairies irriguées fertilisées de Martinique (notée G6')

Au total 10 parcelles pour la Martinique et 5 parcelles pour la Guadeloupe (Tableau I)

MARTINIQUE

Code	Caractéristiques
M1	Culture maraîchère longue durée, labourée, irriguée, fertilisée
M2	prairie en reconstitution (3 ans) - traitement herbicide et vermicide
M3	Culture maraîchère sur antécédent M12 (2 ans), labourée, irriguée, fertilisée
M5	Culture maraîchère sur antécédent M11 (2 ans), labourée, irriguée, fertilisée
M6	prairie en reconstitution (3 ans) - traitement vermicide
M9	Culture maraîchère sur antécédent M11 (2 ans), bêchée, irriguée, fertilisée
M10	prairie en reconstitution (3 ans) - introduction de vers de terre à t0
M11	prairie <i>Digitaria decumbens</i> longue durée, irriguée, fertilisée, pâturée
M12	jachère plantée en <i>Brachiaria</i> en 1980, non irriguée, non fertilisée, non pâturée
M13	forêt secondaire de 40 ans

GUADELOUPE

Code	Caractéristiques
G1	traitement herbicide et travail du sol depuis 1987
G5	jachère âgée (petit-foin)
G6	prairie <i>Brachiaria decumbens</i> longue durée, irriguée, fertilisée, pâturée
G6'	prairie <i>Digitaria decumbens</i> longue durée, irriguée, fertilisée, pâturée
G7	canne à sucre 50 ans

Tableau I : codes et caractéristiques des situations étudiées à la Martinique et à la Guadeloupe

Ce présent rapport donne l'ensemble des résultats (mesures biologiques et physiques) pour toutes les situations Martinique et Guadeloupe, pour les 40 premiers cm de sol, avec une attention particulière pour les 10 premiers cm de sol.

II. Paramètres biologiques et statuts organiques des sols des situations étudiées

II.a. Biomasses et densités de vers de terre

* Echantillonnage

Les vers de terre sont été triés manuellement sur des blocs sol de 30x30x30 cm. Ils ont ensuite été fixés (alcool + formol) avant d'être identifiés, comptés et pesés.

Selon les parcelles, entre 3 et 6 blocs de sol ont été échantillonnés.

Seules les données concernant les espèces endogées géophages sont présentées et prises en compte dans les différentes analyses : il s'agit principalement de l'espèce *Polypheretima elongata* (Megascolecidae) mais aussi de l'espèce *Pontoscolex sp.* (Glossoscolecidae) qui n'a été rencontré que dans la forêt secondaire (M13).

* Résultats

Les résultats montrent des différences importantes entre les situations. Notons ici que, ne prenant en compte qu'une seule espèce (exceptée *Pontoscolex sp.* pour la forêt), la densité est généralement bien corrélée avec la biomasse. Nous considérerons ici la densité (ind/m²)

Dans certaines parcelles, les vers de terre sont abondants ; il s'agit des parcelles en prairie longue durée M11, G6, G6', des prairies mises en cultures maraîchères récemment M5 et M9, de la jachère spontanée de Guadeloupe G5 et de la parcelle où les vers de terre ont été introduits M10.

Il n'ya pas de différences notables entre la Martinique et la Guadeloupe pour des parcelles à mode d'usage identique, les densités ne dépassent pas 150 ind/m² pour les prairies irriguées, fertilisées et pâturées, de longue durée ; les biomasses dépassent rarement 50 g/m².

Certaines parcelles montrent en revanche une absence (ou faible abondance) de vers de terre : il s'agit de la jachère spontanée de Martinique, qu'elle soit mise en culture maraîchère (M3) ou non (M12), de la culture maraîchère longue durée M1, de la parcelle sol nu de Guadeloupe (G1) et des parcelles expérimentales à traitement vermicide M2 et M6.

II.b. Biomasses racinaires

* Echantillonnage

Des blocs de sol volumiques de 10 cm de profondeur (jusqu'à 40 cm dans certains cas) ont été dispersés dans de l'eau (manuellement puis à l'aide de soude) ; les racines ont ensuite été pesées puis séchées et l'humidité du sol a été déterminée afin d'exprimer les résultats en g racines / kg de sol sec (ou g/dm³ sol sec).

Seule la forêt M13 n'a pas été échantillonnée.

* Résultats

Les mesures sur 10-40 cm étant incomplètes, nous ne présenterons ici que les résultats concernant la strate 0-10 cm.

Les prairies présentent les valeurs les plus élevées (autour de 20 g/kg sol), qu'elles soient installées depuis plus de 10 ans (M11, G6, G6') ou depuis 3 ans (M6, M10).

Certaines parcelles présentent des valeurs intermédiaires (autour de 10 g/kg sol) : il s'agit des jachères spontanées (non irriguées, non fertilisées) (M12 et G5) et de la canne à sucre (G7).

L'ensemble des parcelles labourées (M1, M3, M5 et M9) présentent des valeurs faibles, de même que la parcelle soumise à un herbicide (M2) (l'herbicide de contact appliqué tous les 2 mois environ permet une repousse de plantes et explique donc cette valeur non nulle).

II.c. Statut organique

* Prélèvements et analyses

Des échantillons de sol de 10 cm de profondeur ont été prélevés jusqu'à 40 cm de profondeur. Le sol a ensuite été séché (étuve à 60°C) puis broyé à 2 mm.

Une partie du sol broyé a été encore plus finement broyé afin de réaliser les dosages de C grâce à un microanalyseur CNS Carlo Erba 1500.

Une autre partie du sol broyé a permis de réaliser des fractionnements granulométriques de la matière organique selon la méthode Gavinelli et al. (1995). Les fractions 0-2 µm, 2-20 µm, 20-50 µm, 50-200 µm, 200-500 µm et 500-2000 µm seront ici considérées.

* Résultats - Carbone total

Les teneurs en C diminuent avec la profondeur. Nous discuterons ici les résultats obtenus pour la strate 0-10 cm.

Les valeurs pour les situations de Martinique varient de 14,25 gC/kg sol pour la culture maraîchère longue durée (M1) à 40,00 g/kg pour la forêt (M13). La prairie longue durée présente une valeur également élevée (39,16 g/kg). Les prairies en restauration (sans herbicide) (M6 et M10) présentent au bout de 3 ans des valeurs intermédiaires autour de 20 g/kg, proches de la valeur observée pour la jachère longue durée (M12). Les parcelles cultivées montrent une diminution des teneurs en C par rapport à leur antécédent : M5 et M9 par rapport à M11 et M3 par rapport à M12.

En ce qui concerne la Guadeloupe, les valeurs sont comprises entre 21,15 g/kg pour la parcelle labourée et désherbée (G1) et près de 67 g/kg pour les prairies de longue durée G6 et G6'.

La jachère spontanée (G5) présente une valeur intermédiaire (37,53 g/kg) tandis que la canne à sucre (G7) a une teneur en C faible, légèrement supérieure à celle de G1. Dans cet éventail de situations, le résultat concernant la canne à sucre (G7) est surprenant.

Ainsi, pour des modes d'usage identiques (M11 comparée à G6 et G6', M1 comparée à G1) les vertisols de Guadeloupe ont des teneurs en C plus importantes que ceux de Martinique (1,7 fois plus pour les prairies et 1,5 fois plus pour les sols labourés), pour la strate 0-10 cm.

* Résultats - fractionnement granulométrique de la matière organique

La contribution des fractions au C du sol total varie selon les situations. Les débris organiques figurés (> 50 µm) sont peu abondants dans les situations où la teneur en C est relativement basse (M1, M2, M3, G1, G7). Le C mesuré dans ces fractions représente moins de 20% du C total.

Pour les situations où la teneur en C total est légèrement ou beaucoup plus élevée, ces fractions organiques grossières représentent jusqu'à 38% du C total (G6).

On peut en particulier noter une corrélation positive entre la teneur en C total et la contribution de la fraction 50-200 µm (cette corrélation est significative $P < 0,05$ pour les situations Guadeloupe et Martinique étudiées ensemble).

Les fractions < 50 µm contribuent ainsi pour l'essentiel au C total de la strate 0-10 cm (entre 62 et 91% selon les situations).

La fraction 20-50 μm contribue assez peu au C total, l'essentiel du C se concentre donc dans les fractions 2-20 μm et surtout dans la fraction argileuse 0-2 μm .

Il faut ici noter une relation négative entre la teneur en C total et la contribution de la fraction 0-2 μm (corrélation significative pour les situations Martinique et Guadeloupe étudiées ensemble).

Ainsi, les sols à teneurs en C élevées sont caractérisés par une relative abondance de C dans les fractions grossières et une diminution proportionnelle du C dans les fractions fines < 20 μm .

Malgré ceci, les sols à teneur en C élevée montrent les teneurs en C les plus élevées dans les fractions 20-50, 2-20 et 0-2 μm (en g/kg fraction). Les teneurs en C de ces fractions montrent des différences entre les vertisols de Guadeloupe et ceux de Martinique.

Ainsi pour des teneurs en C identiques, les teneur en C des fractions 20-50 et 2-20 μm sont plus importantes pour les vertisols de Guadeloupe que pour ceux de Martinique ; on observe l'inverse pour la fraction 0-2 μm : les vertisols de Martinique montrent des valeurs plus importantes en C dans cette fraction que ceux de Guadeloupe, pour des teneurs en C total identiques.

III. Paramètres physiques des sols des situations étudiées

Différents mesures physiques ont été réalisées sur les vertisols des différentes situations de Guadeloupe et de Martinique : tests de stabilité d'agrégats (cinétique de désagrégation), érodibilité (par simulation de pluie) et porosité (volumes spécifiques d'air)

III.a. Agrégation, stabilité de l'agrégation

* Echantillonnage - Mesures

Après broyage du sol (voir préparation du sol pour analyses de C), les agrégats 1-2 mm des vertisols des différentes situations de Martinique (excepté M12 = jachère longue durée) et de Guadeloupe (tous les 10 cm jusqu'à 40 cm) ont été soumis à un test de stabilité. Après une nuit dans l'eau, les échantillons sont agités de plus en plus longtemps (sur un agitateur rotatif) : t0 (absence d'agitation), 1mn, 30 mn, 1h, 2h, 6h, 12h et 18h.

A chaque temps d'agitation, l'échantillon est tamisé sous eau à 500 et 200 μm (ces fractions sont ensuite séchées et pesées) ; la fraction < 200 μm est transféré dans un granulomètre à diffraction LASER qui permet le découpage en 80 classes de taille d'agrégats.

Différents paramètres peuvent être calculés pour chaque temps d'agitation :

- indices de dispersion des argiles (ID)
qui augmentent avec le temps d'agitation,
 - diamètres correspondant à 50% du poids des agrégats sur la courbe cumulée (D50)
 - pourcentages d'agrégats stables > 500 μm (AS500)
 - pourcentages d'agrégats stables > 200 μm (AS200)
- qui diminuent avec le temps d'agitation.

* Résultats

• D50

En ce qui concerne les D50, les valeurs se situent, en l'absence d'agitation (t0), entre 550 μm (M1) et 800 μm (M9) pour la Martinique et entre 270 μm (G1) et 800 μm (G5) pour la Guadeloupe. Excepté G1 qui présente une valeur très faible, l'ensemble des situations Martinique et Guadeloupe présentent des valeurs supérieures à 500 μm .

Notons, toutes stations confondues, l'absence de corrélation entre la teneur en C total de l'échantillon et le D50 à t0.

Après 30 mn d'agitation, la plupart des situations Martinique montrent des valeurs faibles $< 250 \mu\text{m}$, exceptées la prairie M11 ($510 \mu\text{m}$) et la forêt M13 ($480 \mu\text{m}$). Certaines situations présentent même un $D50 < 50 \mu\text{m}$ (M1, M3, M5 qui sont les 3 situations labourées de la Martinique). Les situations de Guadeloupe ont assez peu évoluées, les valeurs restent fortes exceptées pour G1 et à un degré moindre pour G7.

Après 1 h et 2 h d'agitation, les valeurs diminuent pour chacune des parcelles, par rapport à 30 mn d'agitation, mais les différences entre parcelles sont respectées : les parcelles M1, M3, M5 présentent les $D50$ les plus faibles, les parcelles M11 et M13 les valeurs les plus fortes, les autres parcelles présentent des valeurs intermédiaires. Pour la Guadeloupe, les situations G1 et G7 ont des $D50$ inférieures à G5, G6 et G6'.

Après 6 h d'agitation, seules 3 situations présentent des $D50 > 40 \mu\text{m}$: M11, M13 et surtout G6' (il s'agit donc des 2 prairies à *Digitaria* et de la forêt).

Les $D50$ ont été corrélées aux variables biologiques : le $D50 t_0$ est corrélé positivement et significativement avec la biomasse et la densité de vers de terre, mais ni avec les racines, ni avec la teneur en C total. Les $D50$ 30 mn et 1h sont corrélés positivement et significativement à la densité de vers de terre, aux biomasses racinaires et aux teneurs en C du sol total ou des fractions $< 50 \mu\text{m}$. Le $D50$ 2h est corrélé significativement et positivement à la densité de vers de terre et aux teneurs en C du sol total et des fractions $< 50 \mu\text{m}$. Le $D50$ 6h n'est corrélé significativement et positivement qu'aux teneurs en C du sol total et des fractions $< 50 \mu\text{m}$.

• AS 500 et AS 200

Si l'on considère les agrégats stables $> 500 \mu\text{m}$ (corrigés des sables $> 500 \mu\text{m}$), les valeurs les plus fortes, en l'absence d'agitation (t_0), sont observées, à la Martinique, pour les situations prairies (anciennes : M11, ou récentes : M6 et M10) : près de 70%. Les parcelles prairies bêchées (M9) et sol nu sans travail du sol (M2) présentent des valeurs voisines de 56%. A la Guadeloupe, les 3 situations enherbées présentent également les valeurs les plus élevées : près de 70% également. La situations G1 présente une valeur très faible.

Pour les agitations plus longues, les AG 500 diminuent, les parcelles M11, M10, G5, G6 et G6' présentant les valeurs les plus importantes.

Quel que soit le temps d'agitation, le taux d'agrégats stables AS 500 est corrélé positivement et significativement avec la densité de vers de terre, la biomasse racinaire et la teneur en C du sol total.

Si l'on considère les agrégats stables $> 200 \mu\text{m}$ (200-2000 μm) (AS 200), corrigés des sables $> 200 \mu\text{m}$, les différences entre situations sont moins importantes que pour les AS 500, même si les situations dont le sol est le plus stables restent les mêmes M11, M10, M6 pour la Martinique et G5, G6 et G6' pour la Guadeloupe (t_0). AS 200 est corrélé, en l'absence d'agitation (t_0), avec la densité de vers de terre, la biomasse racinaire et la teneur en C du sol total.

Pour les temps d'agitation supérieurs, des différences importantes apparaissent en comparaison avec AS 500, les situations M6 et M9 présentent les valeurs les plus faibles à la Martinique et les autres situations donnent des valeurs identiques. Les AS 200 pour ces temps d'agitation ne sont pas corrélés avec les densités de vers de terre ni avec les biomasses racinaires, mais seulement avec les teneurs en C du sol total.

Certaines situations présentent donc une forte stabilité des agrégats $> 200 \mu\text{m}$, ce qui ne se traduit pas forcément par une forte stabilité des agrégats $> 500 \mu\text{m}$.

Ainsi, en l'absence d'agitation (t_0), certaines situations présentent un taux d'agrégats 200-500 μm au moins égal à celui des agrégats $> 500 \mu\text{m}$: il s'agit des situations M1 et G1 (situations labourées depuis longtemps, sol nu). Les situations M3, M5 et G7 présentent un taux d'agrégats 200-500 μm égal environ au 1/3 des agrégats stables $> 500 \mu\text{m}$. Les autres situations présentent essentiellement des agrégats $> 500 \mu\text{m}$ et peu d'agrégats 200-500 μm .

Avec la durée de l'agitation, le taux d'agrégats stables 200-500 μm tend à augmenter par rapport aux agrégats > 500 μm . Cependant, certaines situations continuent de montrer une bonne stabilité des agrégats > 500 μm .

On a ainsi pu montrer des corrélations positives entre la teneur en C du sol total et le taux d'agrégats stables > 500 μm (pour les différents temps d'agitation) et des corrélations négatives entre teneur en C et AS 200-500 μm .

- indice de dispersion (ID)

Les indices de dispersion augmentent avec le temps d'agitation.

En l'absence d'agitation (t_0), entre 6,8 et 12,5% des argiles sont dispersées pour les situations de Martinique, et entre 4,7 et 9,6% pour les situations de Guadeloupe.

Les parcelles travaillées ou nues montrent les valeurs les plus élevées alors que les situations enherbées montrent les valeurs les plus faibles (exceptées M6).

Au fur et à mesure de l'agitation, il y a une inversion des tendances (excepté après 6 h pour les situations Guadeloupe) : les situations enherbées présentent des valeurs de dispersion des argiles supérieures aux parcelles travaillées et nues.

Seul l'indice de dispersion à t_0 montre une corrélation significative (et négative) avec la densité de vers de terre et avec la teneur en C du sol total.

III.b. Erodibilité du sol

* Mesures

Un test de détachabilité a été appliqué sur toutes les parcelles de Martinique et sur 3 parcelles de Guadeloupe : G6, G6' et G1.

Il s'agit de mesurer la détachabilité du sol, sous pluie simulée, sur une surface d'1 m^2 , pour 3 états de surface du sol : surface enherbée, surface nue et surface binée. Trois intensités de pluie ont été testées l'une après l'autre : 55 mm/h (pluie de récurrence annuelle), 80 mm/h (pluie de récurrence décennale) et 150 mm/h (pluie de récurrence centennale). Chaque pluie dure 30 minutes. Les pentes des parcelles varient de 2 à 5%.

Trois paramètres sont mesurés : la turbidité de l'eau de ruissellement (g/l), le débit solide (g/mn) et la perte en terre (g/m²).

Nous présentons ici les résultats des 3 intensités de pluie appliquée sur la surface binée.

* Résultats

- Turbidité de l'eau de ruissellement

Sous pluie de 55 mm/h, les valeurs de turbidité sont importantes pour les situations de Martinique : elles varient de 13,7 g/l pour la situation M12 et M11 à 37,71 g/l pour la situation M5. Les valeurs les plus faibles sont observées pour les prairies ou les parcelles non travaillées, les valeurs les plus fortes sont observées pour les parcelles travaillées. La forêt présente une valeur nulle en raison du fait que rien n'a ruissellé et que la totalité de l'eau s'est infiltrée.

A la Guadeloupe, les valeurs de turbidité sont beaucoup plus faibles qu'à la Martinique : 7,2 pour la situation "sol nu" G1 et < 5 g/l pour les prairies.

Sous pluie de 80 mm/h, les valeurs de turbidité diminuent à la Martinique. Ceci vient du fait que l'essentiel des particules facilement détachables ont été entraînées par la pluie de 55 mm/h. En revanche, la valeur mesurée pour G1 augmente légèrement ce qui signifie que de nouvelles particules ont été arrachées et entraînées.

L'évolution observée pour la pluie de 80 mm/h se renforce sous la pluie très intense de 150 mm/h. La turbidité diminue pour les parcelles de Martinique et augmente pour celles de Guadeloupe.

Des corrélations réalisées entre la turbidité et les activités biologiques montrent que la turbidité mesurée pour les 3 intensités de pluie varie significativement et négativement avec la teneur en C du sol total. De plus, la turbidité mesurée sous pluie de 55 mm/h varie avec la teneur en C des fractions < 50 µm. Les turbidités mesurées sous pluie de 80 et 150 mm/h varie significativement et négativement avec les biomasses racinaires.

- Débit solide et pertes en terre

La perte en terre étant calculée à partir du débit solide, nous ne présenterons ici que les résultats de pertes en terre ce qui donne une meilleure image de la sensibilité des sols à l'érosion.

Sous pluie de 55 mm/h, les pertes en terre varient de 200 g/m² (pour une pluie de 30 mn) pour la situation M11 à près de 550 g/m² pour la situation M1. Pour la Guadeloupe, les pertes en terre sont faibles : < 50 g/m² pour les 3 parcelles étudiées.

Avec l'augmentation de l'intensité de la pluie simulée, les pertes en terre augmentent sur toutes les parcelles : elles présentent, à la Martinique, des valeurs maximum pour les parcelles travaillées (valeurs > 1200 g/m² pour la pluie de récurrence centennale). La prairie et la jachère perdent moins environ 500 g/m². A la Guadeloupe, les pertes en terre augmentent également avec l'intensité de pluie. Elles atteignent 800 g/m² pour la situation G1 et restent très faibles pour les 2 prairies (210 g/m² pour G6').

Il est intéressant de noter que les débits solides et pertes en terre mesurées pour la pluie de 80 mm/h sont significativement et négativement corrélés avec la densité de vers de terre et que les débits solides et pertes en terre mesurés pour la pluie de 150 mm/h sont significativement et négativement corrélés avec la biomasse racinaire. Notons enfin que toutes les valeurs de débits solides et de pertes en terre sont très significativement et négativement corrélées avec les teneurs en C du sol total et des fractions < 50 µm.

III.c. Porosité du sol

La porosité des vertisols n'est pas seulement le résultat de l'assemblage des constituants ou des agrégats. Même lorsque le sol est humide et gonflé il existe une porosité non fissurale d'origine principalement biologique. L'objectif de nos mesures est de décrire l'évolution de ce compartiment de la porosité en fonction des contraintes subies par le sol (contraintes mécaniques et hydriques, mode d'occupation). Nous essayerons d'en tirer des conclusions en terme de gestion et de pratiques culturales.

* Matériels et méthodes

- Capteurs de déplacement

Les capteurs sont implantés dans les parcelles M2,, M6 et M10 (env. 50 m² chacune) qui sont installées au milieu d'une prairie irriguée. Les capteurs de déplacement sont installées à 2 profondeurs différentes : 4 capteurs pour la couche 10-30 cm et 2 capteurs dans la couche 30/50 cm.

Ils ont été installés le 14 avril alors que le sol était saturé suite à une irrigation et ils ont laissés jusqu'au 18 juin, soit 64 jours situés dans une période sèche (P<ETP). Comme les parcelles sont installées au milieu d'une prairie irriguée, les apports d'eau sont constituées des précipitations naturelles (mesurées à l'aide d'un pluviomètre) et des apports par irrigation (quantités d'eau mesurée par compteur et ramenées en hauteur d'eau). L'ETP étant d'environ 5 mm/jour, l'irrigation se fait avec une dose d'environ 35 mm en théorie tous les 10 jours (il existe quelques pluies durant cette période). L'intensité et la fréquence des précipitations peuvent changer les doses et les dates d'apport ; d'autres décalages interviennent pour diverses raisons (techniques, rotation du matériel, ...).

Les relevés se font quotidiennement, le matin, après relevé de la pluviométrie de la station météo. La lecture se fait à l'aide d'un pied à coulisse 'électronique' avec une précision de 1/10e de mm.

Les graphiques présentent la moyenne des différents capteurs pour une profondeur donnée.

- Mesures physiques

Les mesures physiques sont effectuées sur des échantillons non remaniés. Des échantillons à structure conservée sont prélevés lorsque le sol est assez ressuyé, c'est-à-dire en dessous de la limite de plasticité mais encore suffisamment humide et gonflé pour qu'il n'y ait pas de fissuration. Les prélèvements sont donc effectués entre le mois de décembre et de janvier sur la paroi de :

- 2 ou 3 fosses pour M1, M3, M5, M9, M11, M12 (superficie supérieure à 300 m²)
- une seule fosse pour M2, M6 et M10 (surface d'environ 50 m²).

Des blocs de 10x10x35 cm sont découpés dans les horizons 0/10, 10/20, 20/30, 30/40 cm avec 3 répétitions pour chaque fosse. Ces échantillons sont ramenés et conservés au laboratoire à l'étude humide (sac plastique). Au moment de la mesure ces échantillons sont découpés en évitant les lissages en blocs de 2 tailles : blocs d'environ 500 cm³ et mottes d'environ 5 cm³. Le volume spécifique d'air (v_a cm³ g⁻¹) est calculé dans les 2 cas à partir de la mesure de la poussée hydrostatique de l'échantillon plongé dans le pétrole.

Il se calcule : $v_a = v_{\text{éch}} - v_s - v_w$ avec

- $v_{\text{éch}}$: volume spécifique de l'échantillon, inverse de la masse volumique mesurée par la poussée au pétrole
- v_s : volume spécifique de solide, inverse de la masse volumique de solide
- v_w : volume spécifique de l'eau, égal à la teneur pondérale (masse volumique de l'eau = 1)

Si la mesure de v_a est effectuée entre le point d'entrée structural et fissural (respectivement vidange de la porosité structurale et début du retrait matriciel), v_a représente alors le volume spécifique d'air structural équivalent à la porosité structurale.

Les mottes de petite taille sont mises en équilibre durant une semaine avec des contraintes pneumatiques de 1kPa, 2,7 kPa, 10kPa, 27 kPa, 100 kPa et 1, 6Mpa que nous noterons respectivement $pF=1$; 1,5 ; 2 ; 2,5 ; 3 et 4,2.

Les blocs de 500 cm³ conservés à l'humidité de prélèvement au champ sont soumis à la poussée hydrostatique avec un dispositif similaire mais de plus grande taille.

Dans les 2 cas l'humidité est calculée après passage de l'échantillon à l'étuve à 105°C.

* Résultats

- Les capteurs de déplacement (fig. 1)

Parcelle M2 (témoin)

Les 2 couches ne présentent ni retrait ni gonflement jusqu'à l'irrigation qui intervient à J6.

Après cet apport de 35 mm un léger gonflement ($\approx 0,3$ mm) est observé dans la couche superficielle uniquement ; un retrait intervient qui permet de revenir à la position initiale. L'irrigation qui intervient à J23 et la pluie de 5 mm à J25 induisent un nouveau gonflement similaire mais beaucoup plus temporaire. Malgré la succession de petites pluies (< 3 mm), à partir de J28 commence un retrait régulier jusqu'à J44 environ ; à cette date le retrait par rapport à la situation initiale est de 10mm. Il faut noter que la pluie de 20 mm à J41 ne provoque une réaction à peine perceptible. Le retrait se ralentit entre J44 et J58. A cette date une nouvelle pluie d'environ 20 mm provoque un gonflement rapide (24h) d'environ 4 mm. Durant les derniers jours on observe encore un léger gonflement.

Durant toute la période de mesure la couche inférieure (30/50 cm) présente une quasi absence de mouvement. On note simplement une tendance à un très léger retrait durant les 10 derniers jours.

Cette parcelle est normalement sans plante. En fait, le développement végétatif est extrêmement rapide et malgré tous les efforts pour la maîtrise de l'enherbement un couvert se développe. A J30 ces plantes commencent à prélever l'eau matricielle et induisent un retrait régulier. La pluie à J41 remplit la porosité structurale ; la consommation matricielle s'arrête et le retrait se ralentit. La pluie à J58 remplit complètement cette porosité structurale et réalimente le compartiment matriciel (gonflement) qui est rapide dès le premier jour mais se poursuit aussi au-delà. La couverture végétale, même limitée, induit des mouvements structuraux mais qui reste limités à la partie superficielle du sol (30 cm environ dans notre cas).

Parcelle M6 (plantes sans vers)

La couche superficielle présente un retrait dès le début des mesures. Après l'irrigation de 35 mm on note un gonflement immédiat (1 jour) qui permet aux capteurs de revenir dans leur position de départ mais un nouveau retrait débute le jour suivant. La pluie de 10 mm qui intervient à J13 provoque aussi un gonflement rapide (1 jour) mais plus limité avant un nouveau retrait. Celui-ci se poursuit jusqu'à l'irrigation à J23 (35 mm d'eau) et la pluie à J25 (20 mm) qui provoquent un gonflement dès le lendemain et qui se poursuit jusqu'à J26. Une nouvelle phase de retrait régulier débute qui se poursuit jusqu'à la pluie à J41. Cette pluie et les quelques précipitations qui suivent provoquent un nouveau et léger gonflement avant qu'un retrait n'intervienne jusqu'à la pluie de J58 ; à ce moment là le retrait maximal est de ≈ 6 mm. Cette pluie provoque, dans les 24h, un gonflement d'environ 2 mm puis la situation se stabilise jusqu'à la fin de l'expérimentation.

La couche inférieure ne présente aucun mouvement significatif jusqu'à l'irrigation de J23. Cette irrigation induit un gonflement qui ne s'exprime réellement que 48h plus tard (J24) et se poursuit encore jusqu'à J25. Après cette date débute un retrait identique à celui de la couche supérieure : les 2 courbes sont alors parallèles, mais avec un décalage d'intensité de retrait d'environ 2,5 mm. La pluie de J58 provoque dans cette couche un gonflement tout aussi rapide et presque aussi intense que dans la couche superficielle.

La couverture végétale nettement plus développée que dans la parcelle M2 induit presque immédiatement un retrait de la couche 0-10 cm indiquant que l'eau de la porosité structurale y est déjà consommée. La pluie de moins de 10 mm à J13 permet de réalimenter le compartiment matriciel et structural dans lequel les plantes prélèvent préférentiellement dans les jours qui suivent (absence de retrait). Après l'irrigation de 35 mm (J23), qui constitue une quantité d'eau 3 fois plus importante, on pouvait s'attendre à une meilleure réalimentation de la porosité matricielle et un retrait plus tardif. La rapidité avec laquelle ce retrait intervient pourrait s'expliquer par une évacuation d'eau hors de la parcelle par ruissellement et en profondeur. En effet, le retrait a débuté aussi dans la couche 30-50 cm (porosité matricielle vide) et l'irrigation est 'brutale' (très forte intensité instantanée) puisqu'elle se fait au 'canon à eau'. La précipitation à J41 est atmosphérique est certainement d'une intensité plus faible. Ceci explique que, malgré une quantité d'eau plus faible et un retrait du sol beaucoup avancé, on puisse avoir à nouveau un gonflement matriciel : l'eau a pu remplir la porosité structurale puis matricielle. La pluie à J58, du même type, a donc un effet encore plus marqué sur le gonflement.

Parcelle M10 (plantes et vers ajoutés)

La couche superficielle présente dès le départ un retrait régulier. L'irrigation de J6 provoque un gonflement suivi d'un nouveau retrait. Les 2 événements pluvieux de faible intensité qui interviennent aux alentours de J15 provoquent un gonflement temporaire suivi d'un retrait régulier jusqu'à l'intervention de l'irrigation à J23. Cette irrigation et les pluies qui suivent provoquent un nouveau gonflement suivi d'un retrait régulier jusqu'à la pluie de J41. La réponse à cette pluie est immédiate (1 jour) et le retrait commence presque tout de suite jusqu'à la pluie de J58. Là aussi la pluie réponse est immédiate et le gonflement suivi d'un retrait léger mais régulier. Le retrait maximal mesuré se situe là aussi avant la pluie de J58 et il est de environ 5 mm (donc le maxi est proche de celui de plante mais les réactions de gonflement sont plus rapides et plus intenses, non ?).

Dans la couche inférieure on observe un léger retrait dans les premiers jours. La pluie à J6 agit sur cette couche aussi (ce qui n'est pas le cas dans plante et témoin). Après cette pluie le retrait de la couche 30-50 est similaire à celui de la couche 10-30. La réaction à la pluie de J23 est

immédiate. Après quelques jours durant lesquels il n'y a 'pas' de mouvement on observe un nouveau retrait, là aussi parallèle à celui de la courbe. La pluie de 41 provoque une réaction assez faible suivi d'un nouveau retrait jusqu'à la pluie de J58. Celle-ci provoque une réaction aussi immédiate et intense que dans l'horizon de surface.

Le comportement de la parcelle M10 se distingue de M6 par 2 phénomènes uniquement : retrait plus faible de la couche 10-30 cm (M10 par rapport à M6) et retrait identiques des 2 couches en M10. Le retrait est en grande partie induit par l'utilisation de l'eau par les plantes. Or, dans la parcelle M10 la densité de racines est toujours supérieure à celle que l'on mesure en M6 (ces différences ne sont pas significatives mais vont toujours dans la même sens). Ceci devrait induire un prélèvement plus important de l'eau. Il semble que le prélèvement soit à peu près identique en M6 et M10 mais dans cette dernière situation il se ferait de façon identique dans les 2 couches.

SYNTHESE

Ces résultats montrent l'influence du couvert végétal sur la dynamique de l'eau des vertisols de Martinique tout comme cela avait été montré en Guadeloupe. Il s'agit non seulement de l'utilisation de l'eau par les plantes mais aussi des possibilités des possibilités de reconstitution de la réserve une meilleure ouverture et répartition de la porosité structurale permet aussi une meilleure réalimentation de la porosité matricielle).

• Courbes de retrait (Fig. 2)

Toutes les courbes de retrait présentent la forme caractéristique des vertisols :

- aux fortes humidités certains points qui se rapprochent de la 1^{ère} bissectrice : la porosité structurale est remplie d'eau,
- dans une large gamme d'humidité les points sont alignés sur une droite parallèle à la première bissectrice : le retrait de l'échantillon est normal. Ces points sont décalés par rapport à la 1^{ère} bissectrice : il existe bien un volume spécifique d'air qui reste à peu près constant à toutes les humidités mesurées.
- aux plus faibles humidités certains points s'éloignent de la 1^{ère} bissectrice : l'augmentation de porosité est supérieure au départ d'eau = retrait résiduel.

Aux humidités extrêmes le faible nombre de points ne permet pas de connaître avec précision l'humidité à laquelle commence et finit le retrait normal. Le volume spécifique d'air (v_a) a donc été calculé de 2 manières : soit en prenant tous les points disponibles, soit en prenant les points de mesures dans les $pF=2$ à 3.

M1		M3		M5		M9	
a	b	a	b	a	b	a	b
0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
3	3	7	6	5	4	0	5
0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
7	6	3	3	9	2	3	8
0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
0	2	7	7	6	7	0	0
		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		4	6	8	8	7	4

a = moyenne de tous les volumes spécifiques

b = moyenne des volumes spécifiques d'aire pour des contraintes hydriques entre $pF=2$ et 3

Il existe des différences mais elles ne sont pas significativement différentes. Dans un premier temps nous avons donc choisi d'utiliser le volume spécifique d'air aux pF compris entre 2 et 3 lorsque cela était possible et de faire la moyenne de tous les points disponibles lorsqu'ils étaient peu nombreux.

Les résultats en terme de volume spécifique d'air sur ces petits échantillons seront présentés et discutés dans le paragraphe suivant, en relation avec les mesures effectués sur échantillons de plus grande taille.

Ces résultats peuvent aussi être discutés en terme d'humidité des échantillons à différents pF. Cette analyse n'est pas complète à ce jour et ne sera pas présentée ici. Tout de fois il semble qu'à des contraintes hydriques identiques les situations travaillées profondément présente une humidité plus élevée à des contraintes identiques. Si ce résultat se confirme il indique une dégradation des conditions de circulation des engins dans la parcelle qu'il est nécessaire de prendre en compte en terme de pratique agricole.

- Les mesures de porosité à 2 échelles (Fig. 3).

La figure 3 présente l'évolution des volumes spécifiques d'air en fonction de la profondeur mesurée sur les mêmes échantillons mais découpés à 2 tailles différentes.

Sur ces figure il est possible de décrire la porosité aux deux niveaux d'organisation, son évolution avec la profondeur, de considérer la différence entre les 2 mesures ou de voir l'évolution de cette différence en fonction de la profondeur.

L'accent sera mis sur l'horizon 0/10 cm.

La situation M11 présente les valeurs les plus élevées aussi bien pour, $v_a 5$ et la différence entre ($v_a 500 - v_a 5$) ; aux 2 échelles de mesure il y a une décroissance avec la profondeur. Pour la situation M12 (en jachère de longue durée après une période de maraîchage) $v_a 5$ et 500 sont significativement plus faibles. La différence entre les mesures reste malgré tout élevée. Il faut noter que la valeur V_{a5} reste identique (env. $0,03 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$) sur tout le profil alors qu'il y a décroissance avec la profondeur pour $v_a 500$.

Ces situations sont mises en valeurs durant 2 années avec des travaux de retournement effectués à une profondeur de 40 cm (M5 et M3). Par rapport aux situations initiales une forte décroissance globale de la porosité est constatée. Il faut noter aussi la forte variabilité des résultats.

Dans l'horizon 0/10 cm la décroissance est importante et concerne les 2 tailles d'échantillon. Pour la situation M5 les horizons 10/20 et 20/30 cm la décroissance du volume poral par rapport à la situation initiale reste limitée. En revanche pour l'horizon 30/40 les valeurs de porosité aux 2 échelles mesurées deviennent faible (aux alentours de $0,02 \text{ cm}^3/\text{g}$), et les valeurs $v_a 500$ se rapprochent des valeurs $v_a 5$. Pour la situation M3 cette décroissance est très nette et significative dès la profondeur de 20 cm.

Pour M3 il existe toujours une diminution de la porosité avec la profondeur alors que pour M5 la porosité de l'horizon de surface ($0,05 \text{ cm}^3/\text{g}$) est plus faible que dans les 2 horizons sous-jacents.

La parcelle M9 correspond à la parcelle M11 mise en valeur avec des travaux superficiels (machine à bêcher sur 10 cm). La décroissance de porosité est mesurée principalement sur les échantillons de grande taille ; la porosité sur échantillon de petite taille reste non significativement différente.

Dans M1 (labour profond de longue durée) le volume spécifique d'air sur 'grosses mottes' est aux alentours de $0,05 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ et $V_a 5$ environ $0,03 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. Avec la profondeur ces valeurs diminuent encore pour atteindre un minimum dans l'horizon 30/40 cm.

Dans la situation M2, toutes les valeurs sont similaires sur l'ensemble du profil : il n'y a plus de changements en fonction de la profondeur, ni en fonction de la taille de l'échantillon. Toutes les

valeurs sont proches de $0,03 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ excepté va 5 à 20/30 cm qui prend une valeur de $0,02 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$.

Pour la parcelle M6 (pâturage irrigué, destruction des *polypheretima*) va 500 est nettement plus élevé que va 5 ; environ $0,02 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ sauf dans le premier horizon où cette différence est deux fois importante, soit $0,04 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$. Il faut noter le profil très régulier de va 5 aux alentours d'une valeur de $0,02 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ sur l'ensemble du profil.

Enfin dans la parcelle M10 (pâturage irrigué, introduction de *polypheretima*), là aussi les différences de porosité mesurées suivant la taille de l'échantillon sont importantes de l'ordre de $0,02$ à $0,03 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$. Aux 2 échelles de mesure il y a une décroissance des valeurs de porosité avec la profondeur. Il faut noter tout de même sa forte variabilité des mesures des horizons 0/10 et 10/20 cm.

[Dans les situations plante et vers on observe une réhabilitation mais qui n'est pas significative par rapport à PAM L]

En résumé, les situations M11, M12, M6 et M10 présentent les caractéristiques suivantes : la différence entre va 5 et 500 est significative sur la plus grande partie du profil ; va 500 de l'horizon 0/10 cm est supérieur à $0,06 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$; alors que va 5 peut prendre des valeurs très variables ; les horizons de surface présentent un volume spécifique d'air supérieur à celui des horizons sous-jacents.

Pour M5 la différence entre va 5 et 500 est significative sur l'ensemble du profil excepté l'horizon 30/40 cm ; va 500 à 0/10 cm est inférieur à $0,05 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$; va 5 et 500 à 0/10 cm sont plus faibles qu'à 10/20 cm ;

Pour M3 la différence reste significative dans l'horizon 0/10 et 10/20, en dessous les 2 valeurs à 0/10 cm est significativement plus faible qu'à 10/20 cm.

Pour M9 la différence entre les 2 profils est élevée en surface mais nulle à 20/30 cm ; il y a une décroissance régulière de va avec la profondeur ; cette décroissance est plus rapide pour va 500 qui devient identique à va 5 à partir de 20 cm.

Pour M2 les 2 profils sont identiques avec des valeurs relativement faibles aux alentours de $0,03 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$.

Conclusion partielle :

Dans la situation après travail du sol mais sans activité biologique (M2) il n'existe pas d'effet de la taille de l'échantillon sur la mesure de va ; il n'existe donc pas de réseau poral de plus grande taille ou dont maille est plus grande. La faible valeur de va 5 à 20/30 cm pourrait être une relique de la compaction qui est intervenue lorsque la parcelle était cultivée. La faible variation des mesures autour de la moyenne indique que la situation est relativement homogène.

Dans les autres situations sans travail du sol et avec activité biologique (M11, M12, M10 & M6), va de l'horizon de surface est la plus élevée de tout le profil ($>0,07$ pour Va 500 et $\geq 0,04$ pour Va 5) et en relation avec le niveau d'activité biologique (racines et vers). Dans cet horizon, plus de la moitié de la porosité mesurée sur grosse motte (500 cm³) ne se retrouve pas au niveau des petites mottes (5 cm³). La maille de ce réseau poral est donc certainement pluricentimétrique.

Les labours à 40 cm induisent une diminution de va simultanément dans l'horizon de surface et le fond de la zone travaillée. Ces diminutions peuvent être attribuées aux tassements de surface (passages répétés d'engins) ainsi qu'aux lissages du soc de charrue mais ont aussi en relation avec une diminution du niveau d'activité biologique (racines et plantes)

La réhabilitation après mise en prairie (M10 et M6) concerne surtout va 5.

- Discussion sur les mesures physiques

Afin d'avoir une vue synthétique de l'ensemble des résultats de volume spécifique nous avons représenté les résultats de volume spécifique d'air de l'horizon 0-10 cm de toutes les situations sur la figure 4.

Cette figure permet de constater qu'il existe une cinétique de déplacements des points en fonction de l'histoire culturale. Les plus fortes valeurs de porosité sont obtenue dans la situation de pâturage irrigué longue durée (M11). Plus les opérations de travail du sol sont intensives (en profondeur et en durée), plus la diminution de porosité est importante (M9, M10, M3, M1). Une diminution supplémentaire intervient en détruisant l'activité biologique (M2). Après un maraîchage de longue durée la mise en jachère sous régime pluvial (M12) induit une réhabilitation plus limitée que l'implantation d'une prairie irrigué et fertilisée, avec ou sans vers (M6, M10). Dans ces différents cas de figure la réhabilitation concerne principalement l'échelle des petits agrégats.

L'intensité des opérations de préparation du sol de même que le niveau d'activité biologique ont un effet net sur le niveau de porosité et les caractéristique de celle-ci :

- les retournements profonds et répétés on induits une dégradation plus importante que des pratiques superficielles, cette dégradation s'intensifie encore en l'absence d'activité biologique ;

- Le développement limité de la couverture végétale sous régime hydrique pluvial de la jachère a induit une réhabilitation bien plus faible que le pâturage irrigué et fertilisé.

De plus, la comparaison des effets de l'irrigation au canon à eau et des précipitations atmosphériques sur la réalimentation des divers compartiments de la porosité suggère que la façon dont l'eau est apportée à la parcelle détermine le mode reconstitution des réserves. Il ne suffit pas d'apporter l'eau en quantité suffisante, même dans un sol qui a commencé à se fissurer. Même en créant ou en conservant une porosité structurale importante, pour bien valoriser celle-ci il faut procéder à des apports d'intensité limitée (apports d'eau étalés dans le temps).

La profondeur de l'enracinement influe sur la vidange et l'organisation de la porosité structural dans les différentes couches. Les meilleures possibilités de réalimentation de la réserve en eau sont aussi en relation avec un enracinement plus profond.

Pour limiter les perturbations du sol au cours des travaux de préparation il est indispensable qu'ils soient effectués à une humidité inférieure à celle de la limite de plasticité. Les caractéristiques mécaniques du matériau n'ont pas été déterminés au cours de ce travail. Mais il apparaît que l'utilisation d'une plante de couverture avec un fort recouvrement (M11) ou avec un fort enracinement (M10) assure un drainage profond et important. Or c'est bien la vitesse à laquelle le sol va se ressuyer après un événement pluvieux qui va déterminer le nombre de jours de l'année pendant lesquels un exploitant peu rentrer dans sa parcelle.

Par conséquent, l'utilisation d'une couverture végétale irriguée intercalaire à deux cultures maraîchères pourrait permettre en même temps une reconstitution des stocks organiques, d'une partie des caractéristiques porales et d'assurer un ressuyage plus rapide du sol. La possibilité technique et économique de ces pratiques restent à évaluer.

IV. Relations entre paramètres biologiques et physiques. Recherche d'indicateurs et de déterminants de l'état physique

Corrélations significatives entre divers paramètres mesurés pour l'horizon 0-10 cm (excepté vers de terre mesurés sur 0-30 cm) de l'ensemble des situations Martinique et Guadeloupe (les signes + indiquent une corrélation significative et les signes - une corrélation négative ; un signe indique une significativité à $P < 0,05$, deux signes à $P < 0,01$ et trois signes à $P < 0,001$)

	Biom. vers	Dens. vers	Biom. racines	C total	C fraction 20-50 μ m	C fraction 2-20 μ m	C fraction 0-2 μ m
Biom. vers	1						
Dens. vers	+++	1					
Biom. racines			1				
C total		+++		1			
C fraction 20-50 μ m		++		+++	1		
C fraction 2-20 μ m		+		+++	+++	1	
C fraction 0-2 μ m	++	+++		+++	+++	++	1
D50 t0	++	++					+
D50 30mn		++	+	+++	++	++	+++
D50 1h		++	+	+++	+++	+++	+++
D50 2h		++		+++	+++	+++	+++
D50 6h				++	+++	+++	+
AS500 t0		+	+++	+			+
AS500 1h		++	+++	+++	++	+	++
AS500 2h		+++	++	+++	+++	++	+++
AS500 6h		++	+++	+++	+++	++	+++
AS500 18h		+++	+	+++	++	++	++
AS200 t0		+	+++	+			+
AS200 1h		+		++	+++	++	+
AS200 2h				++	+++	+++	
AS200 6h				++	++	++	+
AS200 18h		+		++	++	++	+
ID t0		-		--	--	--	
ID 1h							
ID 2h							
ID 6h				-	-	-	
ID 18h							
Tur BA				--	--	--	-
Tur BD		-		-			-
Tur BC			--	--			--
PeT BA				--	--	--	-
PeT BD		--		--	--	--	---
PeT BC			--	--	-	-	--
Va5	+						
Va500							
pF1							
pF1,5							
pF2							
pF2,5							
pF3							
pF4,2							
∂ (4,2-1)							

Une première analyse simple de corrélations (voir tableau ci-dessus) 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 de vers de terre est corrélée positivement à la densité de vers de terre, à la teneur en C de la fraction 0-2 μm et au D50 t0 (diamètre médian d'agrégats obtenus par simple immersion dans l'eau, avant agitation),

- la densité de vers de terre est corrélée positivement aux teneurs en C du sol total et des fractions < 50 μm , aux D50 (t0, 30 mn, 1h, 2h), aux pourcentages d'agrégats stables > 500 μm (de t0 à 18h) et négativement à l'ID (t0), la turbidité et la perte en terre pour une parcelle binée et une pluie décennale,

- la biomasse racinaire est corrélée aux D50 (30 mn et 1h), aux pourcentages d'agrégats stables > 500 μm (de t0 à 18h) 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 significativement avec l'ensemble des teneurs en C des fractions < 50 μm , avec l'ensemble des paramètres de stabilité des agrégats, et négativement avec l'ensemble des paramètres d'érodibilité et avec l'ID (t0 et 6h),

- les teneurs en C des fractions < 50 μm sont corrélées, à un degré moindre, avec les mêmes paramètres que le C total.

La mise en parallèle des paramètres biologiques et physiques montrent 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, une porosité structurale réduite 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.

Laboratoire BOST - Fort-de-France, Martinique

Chercheurs : Eric Blanchart
Christian Hartmann

Techniciens : Jérôme Bernard
Jean-Pierre Lamoureux
Jean-Yves Laurent (pro parte)
Joele Louri
Luc Rangon
Raymond Totila

	Biomasses de vers de terre (g/m ²)	Densités de vers de terre (ind/m ²)	Biomasses racinaires (g/kg sol)
M1	7,27	5,55	1,00
M2	0,00	0,00	5,65
M3	0,01	3,70	1,00
M5	26,53	44,40	1,00
M6	0,00	0,00	20,87
M9	94,98	103,60	3,00
M10	32,81	48,10	19,88
M11	58,70	120,00	20,15
M12	1,80	4,00	13,00
M13	2,73	104,44	ND
G1	0,00	0,00	0,00
G5	31,10	74,07	10,08
G6	37,84	133,20	19,00
G6'	40,00	120,00	18,40
G7	3,09	7,40	8,16

Biomasses et densités de vers de terre (pour 30 cm de profondeur) et biomasses racinaires (pour 10 cm de profondeur) dans les différentes situations de Martinique et de Guadeloupe

	C total (mg/g sol)	C 20-50 (mg/g fraction)	C 2-20 (mg/g fraction)	C 0-2 (mg/g fraction)	C > 500 (% C total)	C 200-500 (% C total)	C 50-200 (% C total)	C 20-50 (% C total)	C 2-20 (% C total)	C 0-2 (% C total)
M1	14,25	19,16	17,86	14,14	7,08	4,54	7,05	9,05	20,11	52,18
M2	14,14	16,38	18	14,03	1,67	4,52	11,84	10,83	22,24	48,9
M3	18,31	22,24	19,73	13,66	2,45	4,81	11,17	9,62	22,59	49,36
M5	21,68	26,47	20,17	13,11	3,08	6,87	18,18	10,22	25,21	36,43
M6	19,71	18,85	17,075	15,61	5,5	10,75	16,75	8,93	21,33	36,74
M9	26,59	32,34	23,66	25,79	8,43	7,32	18,73	15,1	25,65	24,77
M10	21,65	25,855	25,105	14,175	11,18	10,72	12,17	7,72	16,61	41,6
M11	39,16	39,93	26,55	30,51	6,19	9,5	16,53	10,21	16,56	41
M12	19,55	19,81	14,36	20,44	4,96	8,22	13,61	7,84	11,75	53,62
M13	40	39,04	25,43	50,12	10,27	4,1	19,17	10	13,1	43,36
G1	21,15	42,05	35,68	12,95	2,17	0,69	6,39	13,66	27,06	50,03
G5	37,53	57,27	37,48	18,07	5,27	9,15	19,22	13,41	27,5	25,44
G6	66,93	94,34	64,44	32,14	5,75	5,06	27	16,29	20,12	25,78
G6'	66,81	129,18	86,19	34,16	2,91	3,55	15,91	16,97	27,77	32,88
G7	22,14	37,88	26,97	14,22	2,22	2,76	10,96	14,5	35,49	34,06

Teneurs en C du sol total, teneurs en C des fractions < 50 µm
et contribution au C total des différentes fractions,
pour la strate 0-10 cm des situations de Martinique et de Guadeloupe

		D50 10 (μm)	D50 30mn (μm)	D50 1h (μm)	D50 2h (μm)	D50 6h (μm)
M1	0-10	550	50	40	22	4,3
	10-20	220	130	130	68	34
	20-30	180	120	75	75	22
	30-40	99	52	52	52	24
M2	0-10	570	210	120	64	6,9
	10-20	320	150	145	69	25
	20-30	185	86	74	57	28
	30-40	105	90	41	16	7,6
M3	0-10	600	16	9,5	5	1,7
	10-20	480	13	9,6	5,9	2,1
	20-30	45	2,3	1,8	2,2	1,8
	30-40	21	5,3	4	1,8	1,8
M5	0-10	700	14	13	3,8	1,8
	10-20	610	48	34	8,2	6
	20-30	580	61	61	10	3
	30-40	500	3,9	3,3	3	1,8
M6	0-10	650	170	115	28	4,6
	10-20	615	65	20	5,1	2
	20-30	615	106	44	19	3,8
	30-40	410	70	34	11,5	2,5
M9	0-10	800	240	120	49	12
	10-20	720	250	110	40	10,5
	20-30	280	52	32	16	5,7
	30-40	120	43	23	18	4
M10	0-10	665	200	147	41	6,5
	10-20	550	110	51,5	24,5	5,95
	20-30	630	111	55	25,5	5,1
	30-40	625	56	30	13	3,6
M11	0-10	730	510	390	230	50
	10-20	600	280	210	73	20
	20-30	340	205	53	30	13
	30-40	230	82	32	20	5,8
M13	0-10	780	480	480	240	53
	10-20	ND	ND	ND	ND	ND
	20-30	ND	ND	ND	ND	ND
	30-40	ND	ND	ND	ND	ND
G1	0-10	270	200	130	97	3,3
	10-20	410	260	220	105	32
	20-30	620	470	270	220	13
	30-40	430	310	270	205	8,5
G5	0-10	800	530	280	180	15
	10-20	720	400	280	210	20
	20-30	550	320	240	140	20
	30-40	360	240	230	35	15
G6	0-10	730	570	330	210	27
	10-20	720	520	260	200	40
	20-30	710	330	260	210	6,8
	30-40	ND	ND	ND	ND	ND
G6'	0-10	730	530	500	450	300
	10-20	800	680	530	520	280
	20-30	720	410	330	320	250
	30-40	520	300	280	270	220
G7	0-10	500	300	230	120	10,5
	10-20	640	410	340	240	13
	20-30	430	300	300	240	35
	30-40	490	300	230	210	30

Stabilité des agrégats 1-2 mm des vertisols de Martinique et de Guadeloupe exprimée par la D50 (diamètre correspondant à 50% des agrégats sur la courbe cumulée), pour 4 strates de sol et différents temps d'agitation

		Agrégats stables > 500 µm (10)	Agrégats stables > 200 µm (10)	Agrégats stables > 500 µm (1h)	Agrégats stables > 200 µm (1h)	Agrégats stables > 500 µm (2h)	Agrégats stables > 200 µm (2h)	Agrégats stables > 500 µm (6h)	Agrégats stables > 200 µm (6h)	Agrégats stables > 500 µm (18h)	Agrégats stables > 200 µm (18h)
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
M1	0-10	28,85	56,67	16,09	43,76	11,76	39,51	7,54	33,00	3,80	25,41
	10-20	23,38	52,11	18,54	42,83	11,27	35,94	7,26	31,66	1,39	12,69
	20-30	15,14	41,40	8,57	36,24	4,81	32,26	4,44	24,21	1,38	12,90
	30-40	4,12	27,34	2,74	19,64	1,54	18,67	1,74	14,42	1,16	5,16
M2	0-10	56,31	67,68	26,89	42,50	22,66	37,06	16,20	29,45	6,68	16,55
	10-20	52,14	65,44	21,79	44,78	15,91	39,05	9,26	33,80	1,99	12,76
	20-30	53,68	66,13	23,04	43,14	14,49	36,33	9,92	30,13	2,98	19,30
	30-40	30,40	48,91	5,94	31,38	5,75	28,07	3,34	24,33	0,91	9,15
M3	0-10	32,98	54,61	26,64	41,69	13,69	39,29	9,57	29,86	5,25	20,33
	10-20	39,64	57,58	25,04	41,85	11,58	37,16	11,59	32,13	4,53	22,70
	20-30	16,17	36,85	8,83	32,00	8,42	26,89	4,54	19,81	1,60	9,34
	30-40	11,82	33,67	6,59	26,97	5,38	25,27	3,82	18,72	1,95	9,35
M5	0-10	42,63	62,16	23,58	44,73	17,10	34,82	10,40	25,47	8,55	19,31
	10-20	40,09	60,20	19,94	41,60	12,71	30,10	10,44	24,82	2,46	11,57
	20-30	40,42	61,09	17,32	39,78	14,62	32,25	8,91	23,50	4,33	8,85
	30-40	26,16	46,30	13,42	31,19	7,14	21,50	1,45	5,37	2,82	10,57
M6	0-10	69,64	74,68	28,90	34,41	22,41	28,23	14,99	19,11	9,43	12,65
	10-20	56,57	67,86	23,64	35,91	15,40	27,11	9,52	20,37	4,10	10,46
	20-30	38,27	54,27	19,80	34,92	12,53	26,94	7,12	20,63	3,24	12,70
	30-40	37,50	50,40	11,68	26,82	5,94	18,79	3,18	12,44	-0,04	3,76
M9	0-10	56,14	65,28	23,04	35,68	15,76	22,76	10,67	14,83	8,70	10,19
	10-20	64,81	77,23	23,79	34,54	16,46	24,56	11,77	16,59	10,93	12,92
	20-30	50,27	64,61	17,39	31,59	12,32	20,15	12,13	13,43	7,66	7,86
	30-40	22,33	38,99	8,27	20,02	6,69	14,74	5,34	6,29	6,25	5,30
M10	0-10	70,36	77,62	33,51	43,65	25,28	35,77	21,97	30,46	14,52	22,78
	10-20	63,92	73,09	25,95	38,25	21,92	29,72	16,26	26,32	9,80	18,44
	20-30	45,83	61,84	18,19	40,55	19,52	38,30	12,78	29,20	5,11	20,63
	30-40	44,64	59,67	25,69	42,89	17,45	36,64	12,09	29,04	4,72	16,75
M11	0-10	70,16	83,45	44,02	57,66	36,61	48,84	26,73	37,67	18,09	25,63
	10-20	53,73	76,43	31,41	45,99	25,27	38,71	18,10	24,77	14,00	19,20
	20-30	36,13	64,88	17,42	37,59	14,37	34,20	10,30	26,80	9,08	14,95
	30-40	19,61	51,92	8,42	30,95	7,19	26,50	5,77	19,51	4,55	7,86
G1	0-10	24,66	59,32	10,76	42,52	12,17	38,87	4,51	19,64	5,52	9,12
	10-20	46,45	67,85	23,10	52,48	18,67	45,00	10,22	39,54	4,78	7,19
	20-30	60,27	76,70	30,43	57,86	28,61	51,58	14,10	35,58	6,84	17,95
	30-40	46,51	75,25	28,34	58,82	19,06	49,70	10,78	24,34	8,16	15,21
G5	0-10	74,06	83,64	41,48	53,54	35,45	48,29	25,80	36,37	20,37	27,68
	10-20	69,66	79,23	41,13	54,22	35,91	50,79	26,06	46,15	18,63	38,49
	20-30	53,77	73,76	32,27	54,19	24,83	47,73	17,40	35,02	8,95	14,43
	30-40	41,00	66,43	23,89	57,13	13,42	32,06	9,59	23,57	7,18	10,83
G6	0-10	70,24	78,03	45,31	55,06	40,89	50,42	32,04	39,54	19,57	27,45
	10-20	68,66	78,06	40,94	53,69	35,72	49,67	29,89	42,42	18,64	29,53
	20-30	67,67	77,65	40,37	53,89	35,95	50,06	21,69	35,16	10,05	17,84
	30-40	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G6	0-10	69,81	82,57	48,19	67,83	46,77	63,06	38,61	55,80	22,70	44,59
	10-20	76,74	87,82	52,05	70,07	50,62	66,97	35,12	56,03	24,71	44,05
	20-30	68,65	84,27	35,48	65,89	31,44	66,30	26,18	58,12	16,88	46,28
	30-40	51,02	80,46	23,81	62,36	22,20	60,72	19,38	51,76	14,74	50,74
G7	0-10	49,87	73,31	23,50	55,11	15,45	44,79	14,85	36,30	6,79	17,90
	10-20	61,96	75,95	41,02	61,39	33,37	53,71	10,43	36,74	5,39	16,32
	20-30	45,55	73,25	28,61	62,72	25,58	55,83	13,89	38,60	6,02	15,30
	30-40	48,15	72,14	22,02	56,20	17,19	52,16	11,16	36,21	6,34	19,46

Pourcentages d'agrégats stables (> 500 µm et > 200 µm) mesurés pour les agrégats 1-2 mm de 4 strates des situations de Martinique et de Guadeloupe, pour différents temps d'agitation dans l'eau

		ID t0 (%)	ID 1h (%)	ID 2h (%)	ID 6h (%)	ID 18h (%)
M1	0-10	11,34	21,14	26,62	38,79	47,39
	10-20	15,45	23,18	27,26	30,57	60,07
	20-30	18,47	22,76	29,33	37,21	51,84
	30-40	29,52	34,51	36,23	39,95	47,44
M2	0-10	12,53	39,13	46,01	63,57	90,61
	10-20	10,60	23,89	30,15	38,14	51,21
	20-30	11,35	31,74	34,75	44,77	53,08
	30-40	27,59	38,13	47,59	46,00	65,51
M3	0-10	9,13	36,71	31,44	40,31	52,19
	10-20	13,46	34,10	32,74	39,09	52,78
	20-30	18,97	27,37	36,96	38,09	59,81
	30-40	23,50	34,43	30,69	43,35	52,13
M5	0-10	12,47	27,79	36,05	44,05	49,98
	10-20	13,10	28,26	40,53	45,09	62,12
	20-30	12,50	28,43	35,64	43,60	61,71
	30-40	17,66	32,12	39,91	49,83	52,12
M6	0-10	11,79	65,94	67,45	68,52	89,17
	10-20	15,45	53,01	72,17	77,90	82,58
	20-30	20,47	41,25	49,45	60,84	64,98
	30-40	24,00	49,02	55,07	61,47	84,07
M9	0-10	10,60	38,30	53,02	61,86	68,34
	10-20	8,42	45,61	56,91	68,70	73,43
	20-30	14,76	41,15	50,15	64,25	73,18
	30-40	15,21	35,11	42,64	55,62	59,11
M10	0-10	6,75	44,52	45,61	55,25	73,90
	10-20	9,79	48,51	59,21	58,92	66,84
	20-30	17,29	38,07	40,66	43,88	62,61
	30-40	20,53	38,29	46,34	52,19	67,84
M11	0-10	7,75	33,70	42,31	51,01	61,00
	10-20	10,12	41,56	50,11	62,75	64,50
	20-30	17,97	50,07	54,12	58,01	70,39
	30-40	28,06	49,01	53,83	62,81	76,87
G1	0-10	9,60	23,90	28,58	56,64	55,26
	10-20	11,90	30,78	37,59	43,12	63,99
	20-30	8,00	24,93	31,44	44,01	53,74
	30-40	8,71	23,71	29,13	45,48	48,46
G5	0-10	4,69	26,81	32,08	43,97	51,96
	10-20	5,99	39,80	44,49	29,52	49,10
	20-30	12,42	23,62	35,58	43,28	58,04
	30-40	11,25	26,75	36,40	42,40	56,76
G6	0-10	5,52	30,66	36,74	37,51	44,49
	10-20	5,64	37,20	41,61	36,61	46,40
	20-30	8,20	30,54	35,44	49,84	61,90
	30-40	ND	ND	ND	ND	ND
G6'	0-10	5,02	18,17	22,67	31,13	45,45
	10-20	4,28	18,88	22,58	33,69	47,56
	20-30	4,38	23,17	23,50	34,06	45,39
	30-40	5,98	18,03	19,97	31,91	39,44
G7	0-10	6,65	24,61	34,41	48,45	63,77
	10-20	9,10	28,05	36,85	51,47	64,02
	20-30	13,49	29,85	35,78	49,51	74,24
	30-40	11,48	27,85	32,36	43,39	64,91

Indices de dispersion (% des argiles) mesurés lors de cinétique de désagrégation (tests de stabilité d'agrégats 1-2 mm) pour 4 strates des situations de Martinique et de Guadeloupe

	Turbidité	Turbidité	Turbidité	Débit solide	Débit solide	Débit solide	Perte en terre	Perte en terre	Perte en terre
	(g/l) 55 mm/h	(g/l) 80 mm/h	(g/l) 150 mm/h	(g/mn) 55 mm/h	(g/mn) 80 mm/h	(g/mn) 150 mm/h	(g/m2) 55 mm/h	(g/m2) 80 mm/h	(g/m2) 150 mm/h
M1	29,91	25,97	19,14	22,67	29,40	50,08	544,10	852,53	1452,19
M2	23,73	19,65	15,01	22,04	24,36	34,63	506,94	706,30	1023,53
M3	32,24	25,86	17,85	18,32	27,31	43,37	366,47	792,07	1290,10
M5	37,71	50,50	30,86	18,16	19,94	49,70	300,00	518,00	1441,42
M6	22,58	19,41	12,86	16,29	24,51	31,04	309,51	710,67	900,14
M9	26,54	15,35	16,06	20,04	16,79	41,38	360,61	486,80	1199,98
M10	18,60	14,48	10,31	16,02	18,90	28,94	304,30	548,08	839,23
M11	13,75	10,20	7,29	9,78	12,29	18,43	205,30	356,31	534,44
M12	13,70	9,72	5,85	12,06	11,64	14,91	217,06	326,01	432,40
M13	0,00	1,79	1,83	0,00	1,76	3,70	0,00	13,50	53,50
G1	7,23	14,33	18,86	4,19	15,77	26,13	37,74	457,27	757,72
G5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
G6	4,88	4,20	4,95	3,14	6,03	12,54	47,10	168,70	363,61
G6'	2,92	2,15	2,13	2,87	3,88	7,27	48,79	108,54	210,93
G7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

	Turbidité (g/l)	Débit solide (g/mn)	Perte en terre (g/m ²)
M1	29,91	22,67	544,10
M2	23,73	22,04	506,94
M3	32,24	18,32	366,47
M5	37,71	18,16	300,00
M6	22,58	16,29	309,51
M9	26,54	20,04	360,61
M10	18,60	16,02	304,30
M11	13,75	9,78	205,30
M12	13,70	12,06	217,06
M13	0,00	0,00	0,00
G1	7,23	4,19	37,74
G5	ND	ND	ND
G6	4,88	3,14	47,10
G6'	2,92	2,87	48,79
G7	ND	ND	ND

Erodibilité des vertisols de Martinique et Guadeloupe pour une surface binée sur 5 cm, et sous une pluie de 55 mm/h (récurrence annuelle) pendant 30 minutes

Figure : Vers de terre (biomasse et densité) et racines (biomasse) pour les situations Martinique et Guadeloupe

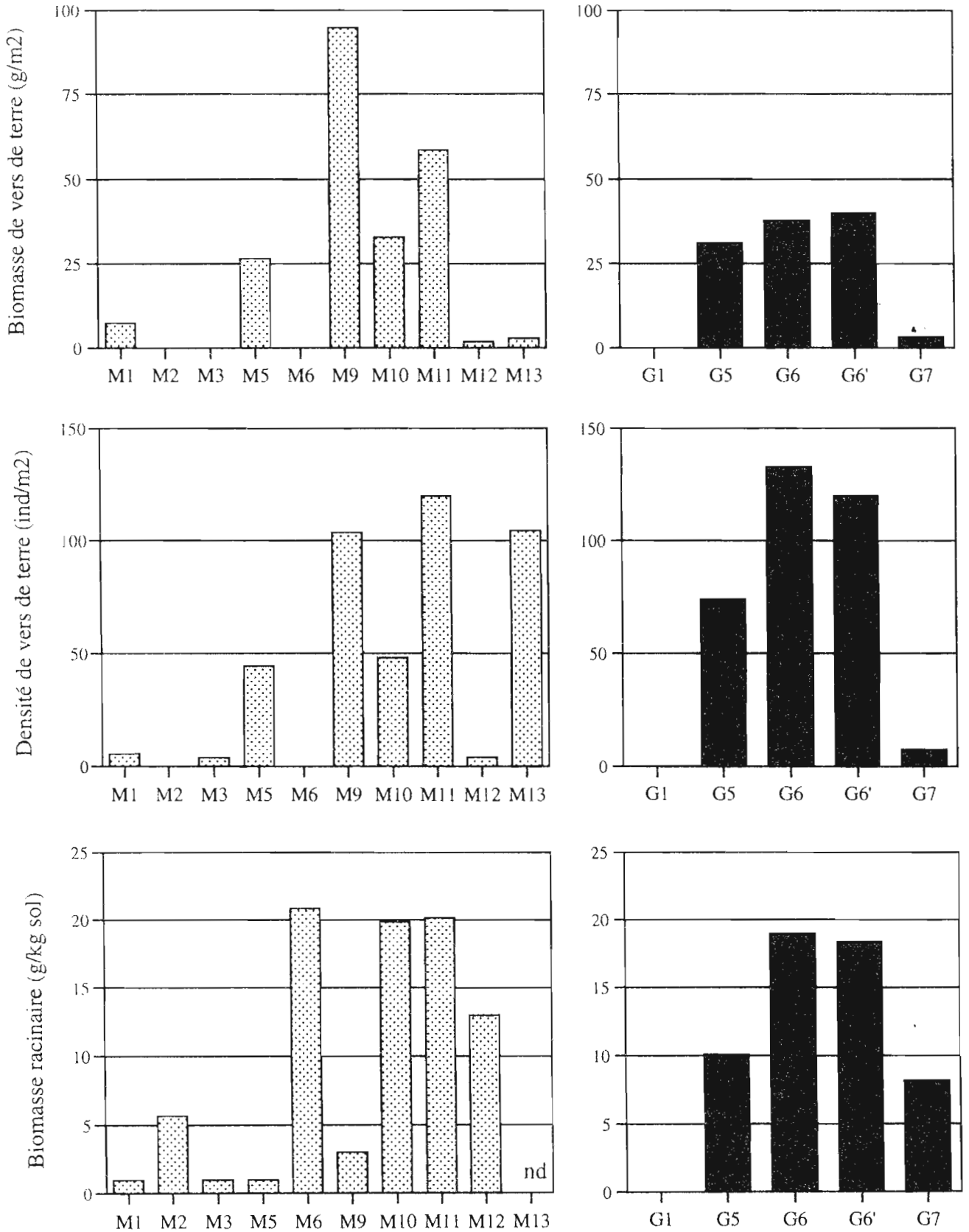


Figure : Carbone total et teneurs des 3 fractions < 50 μm pour les situations Martinique et Guadeloupe

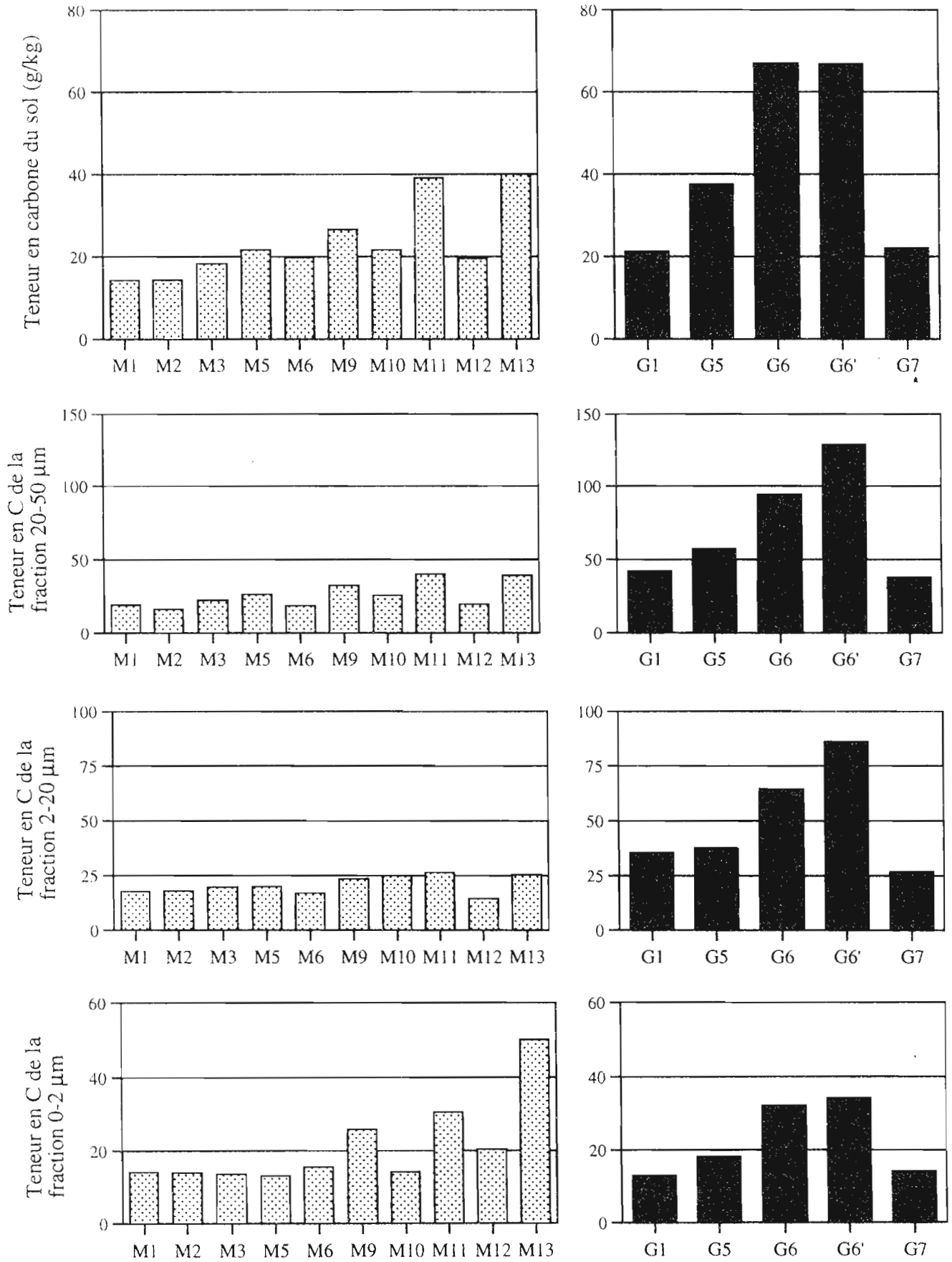


Figure : Relations entre biomasses et densités de vers de terre, biomasses racinaires et teneurs en C pour les vertisols des situations Martinique et Guadeloupe

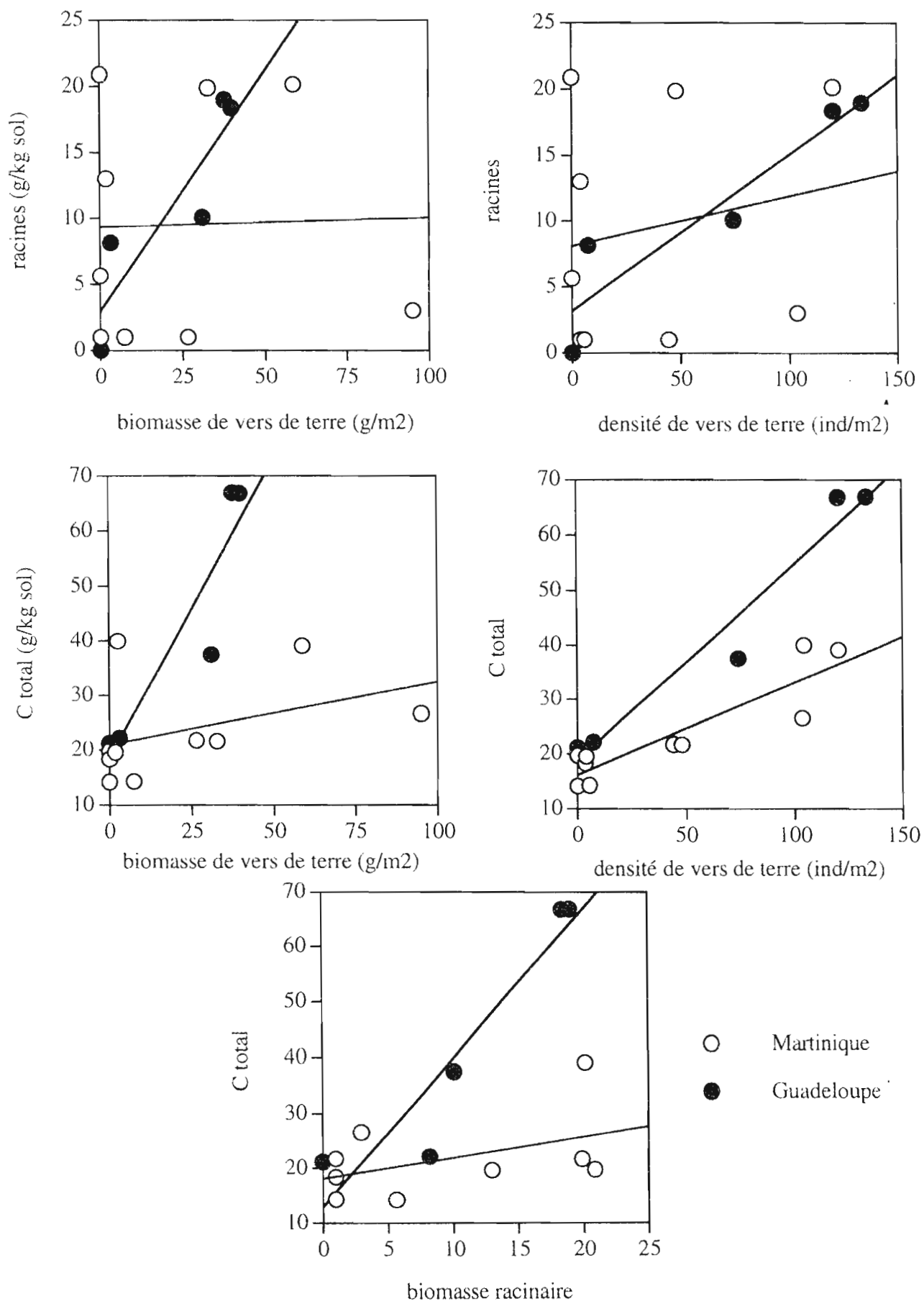


Figure : Relation entre C total et teneur en C des fractions 0-2 μm , 2-20 μm et 20-50 μm pour les situations de Martinique et de Guadeloupe

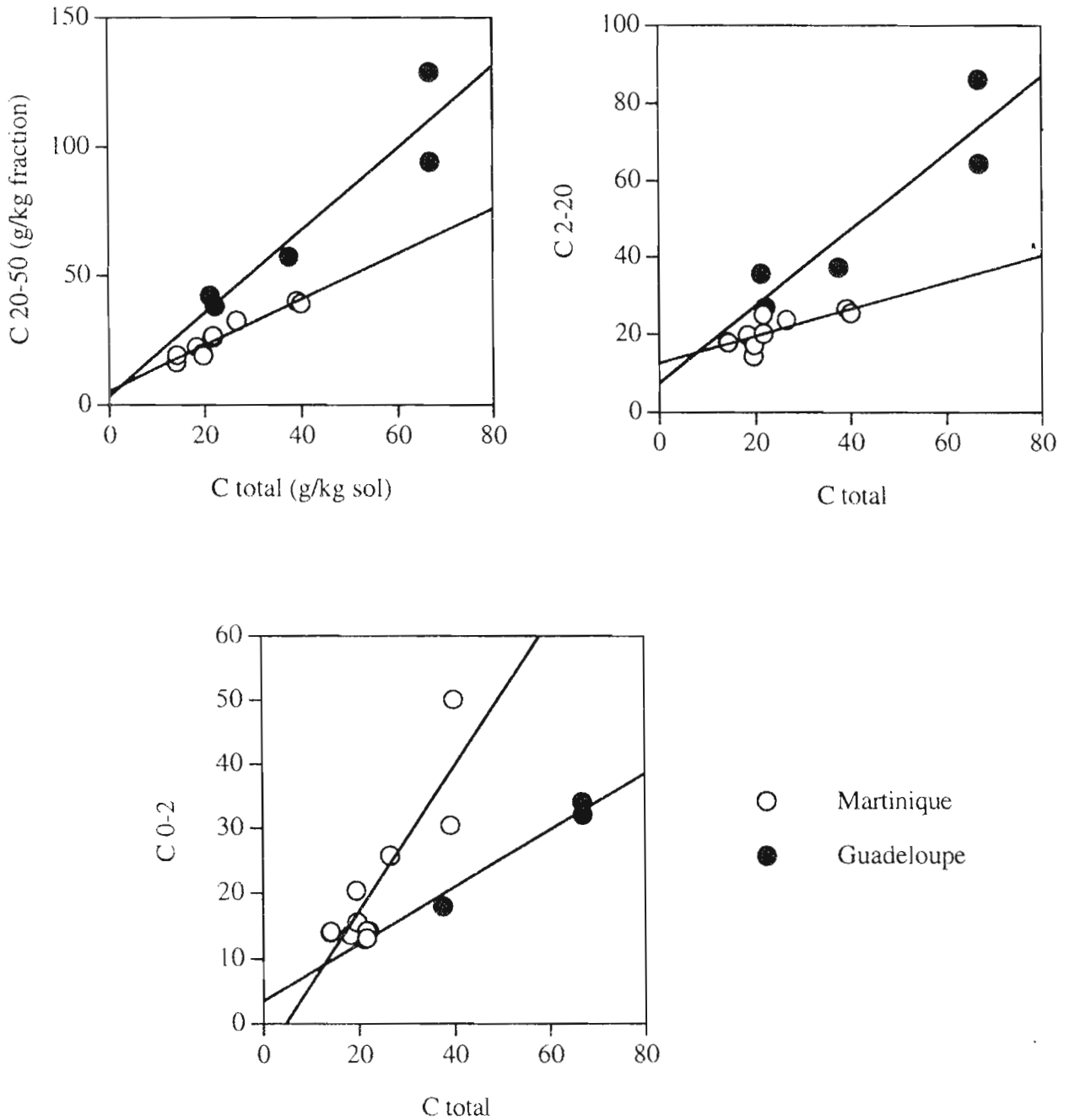


Figure : Contribution des différentes fractions granulométriques au Carbone total

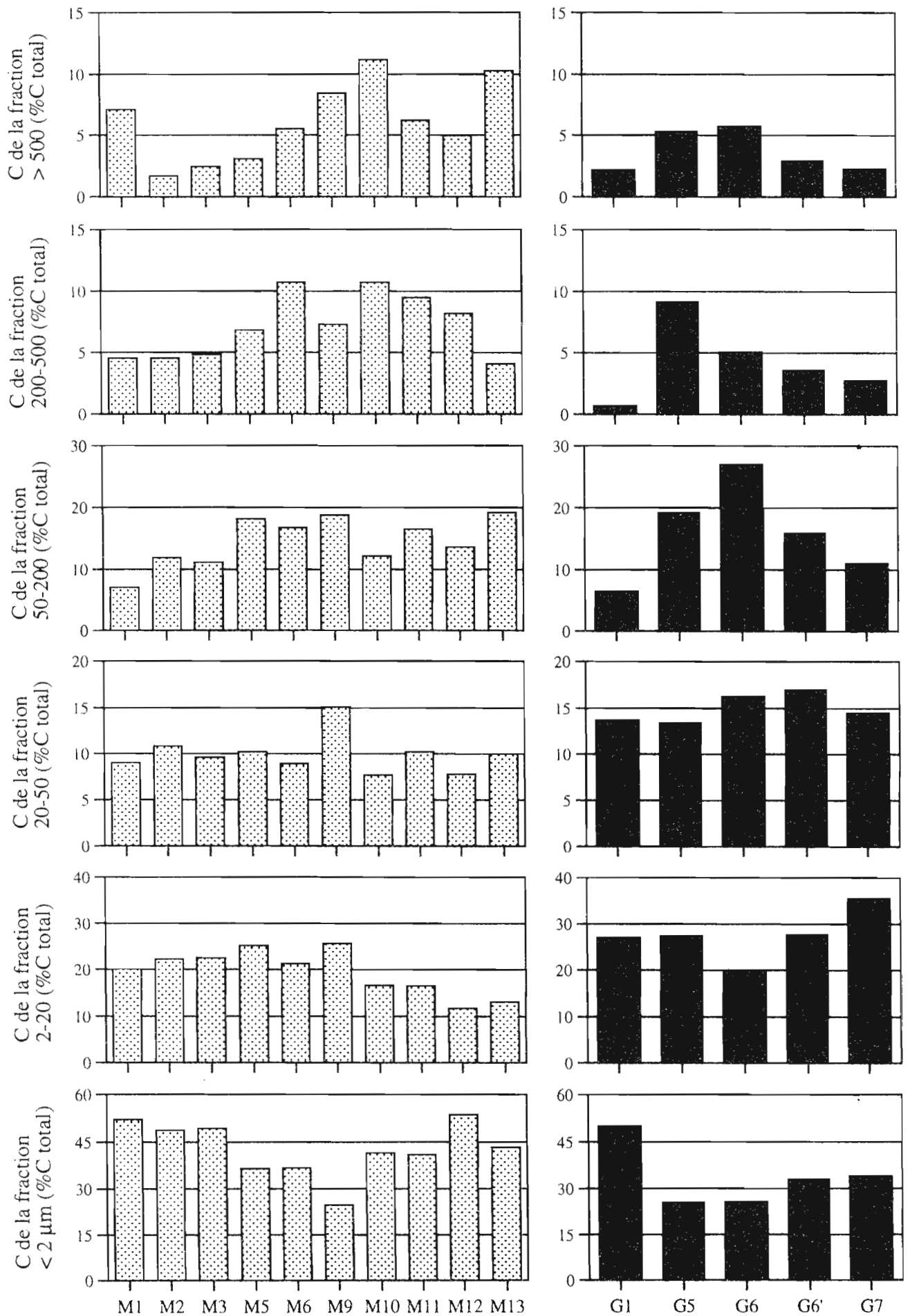


Figure : Relation entre C du sol total et contribution des différentes fractions granulométriques au C total

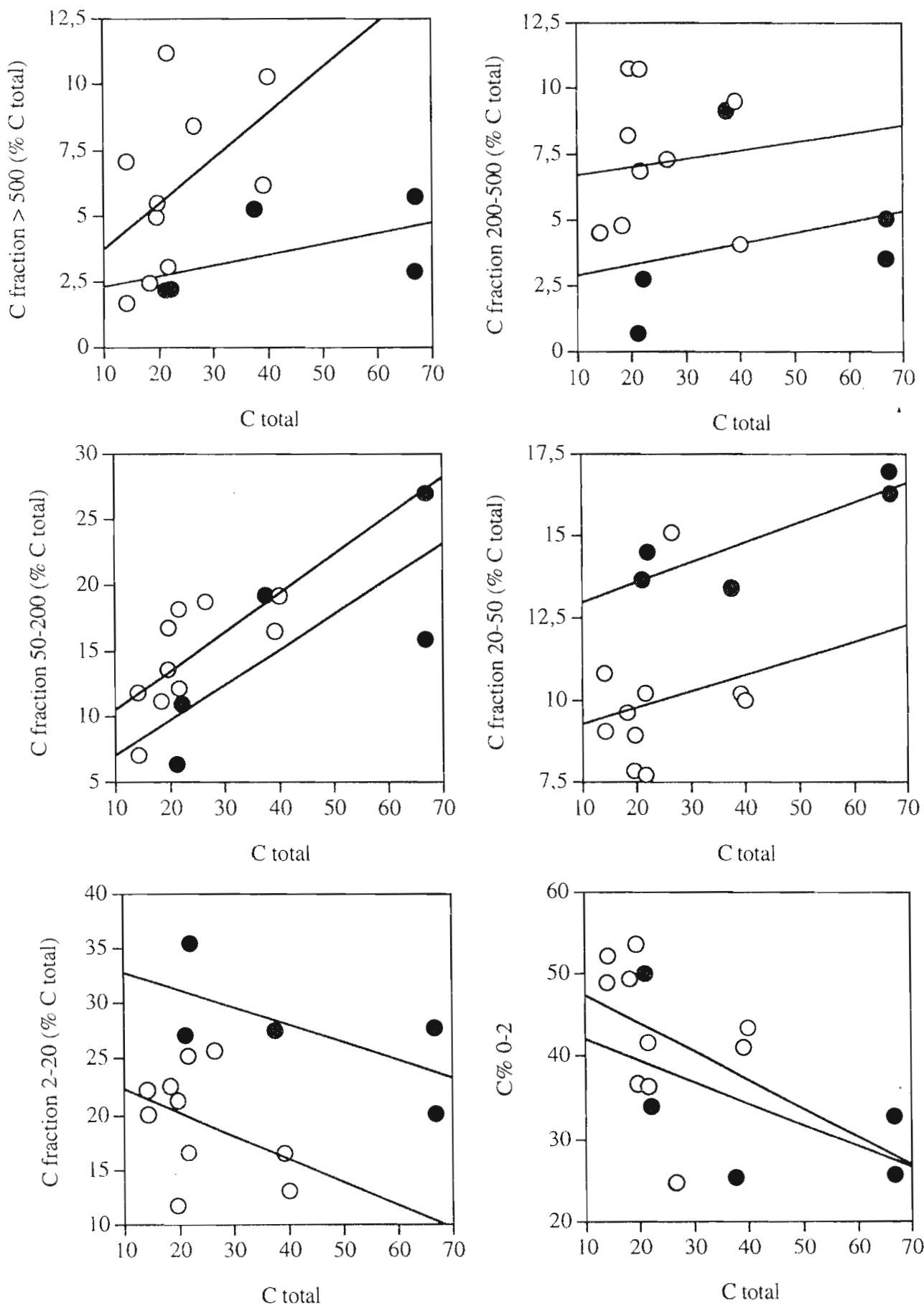


Figure : Contribution des fractions granulométriques au C total pour la strate 0-10 cm des vertisols des situations Martinique et Guadeloupe

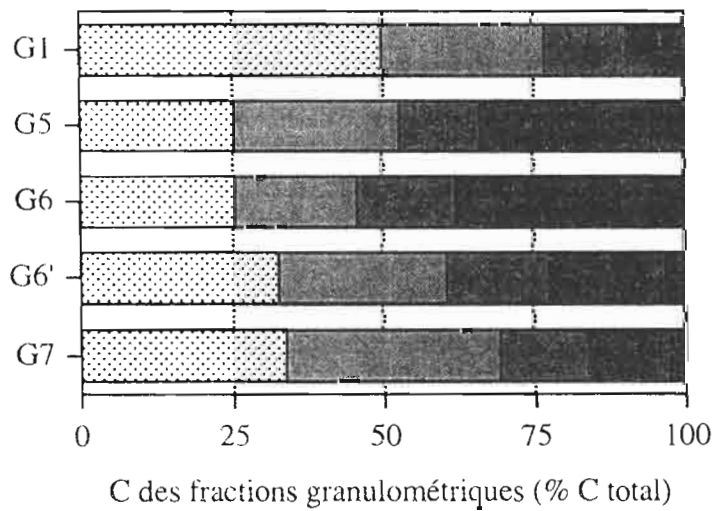
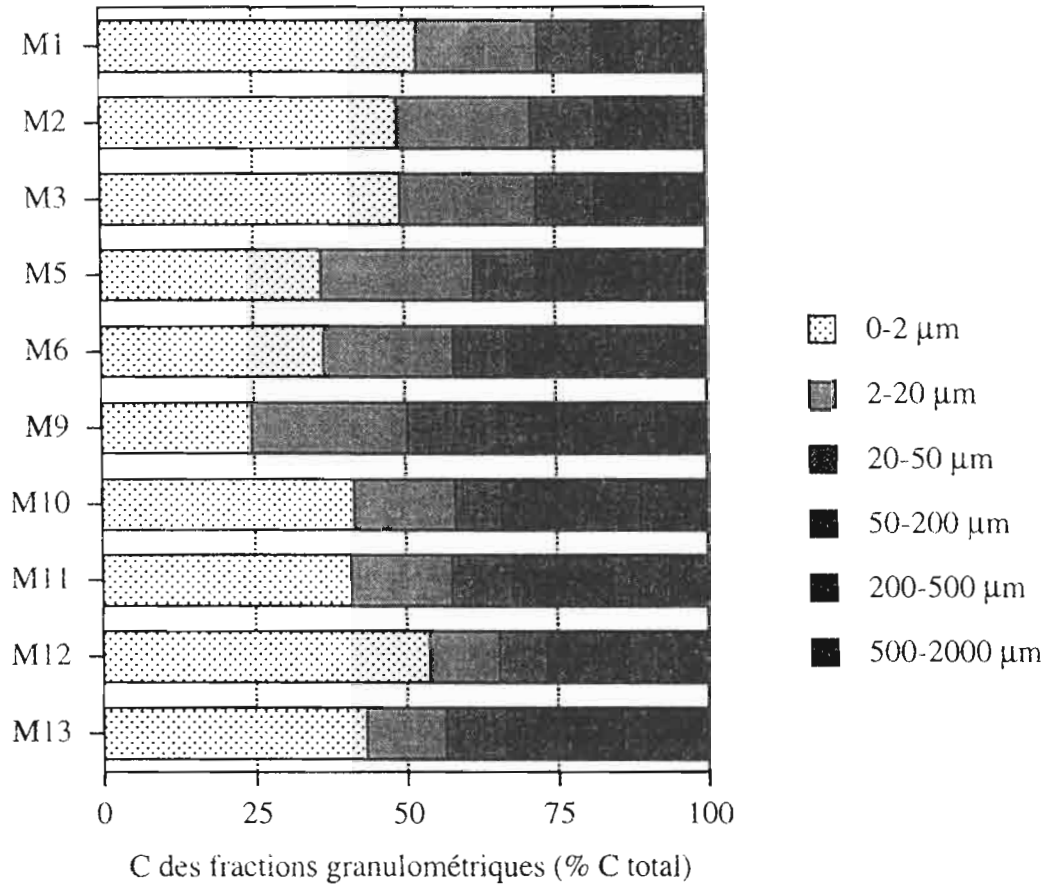


Figure : Cinétique de désagrégation
Diamètre des agrégats correspondant à 50% de la masse sur la courbe cumulée (D50) pour les agrégats 1-2 mm après différents temps d'agitation (situations Martinique et Guadeloupe)

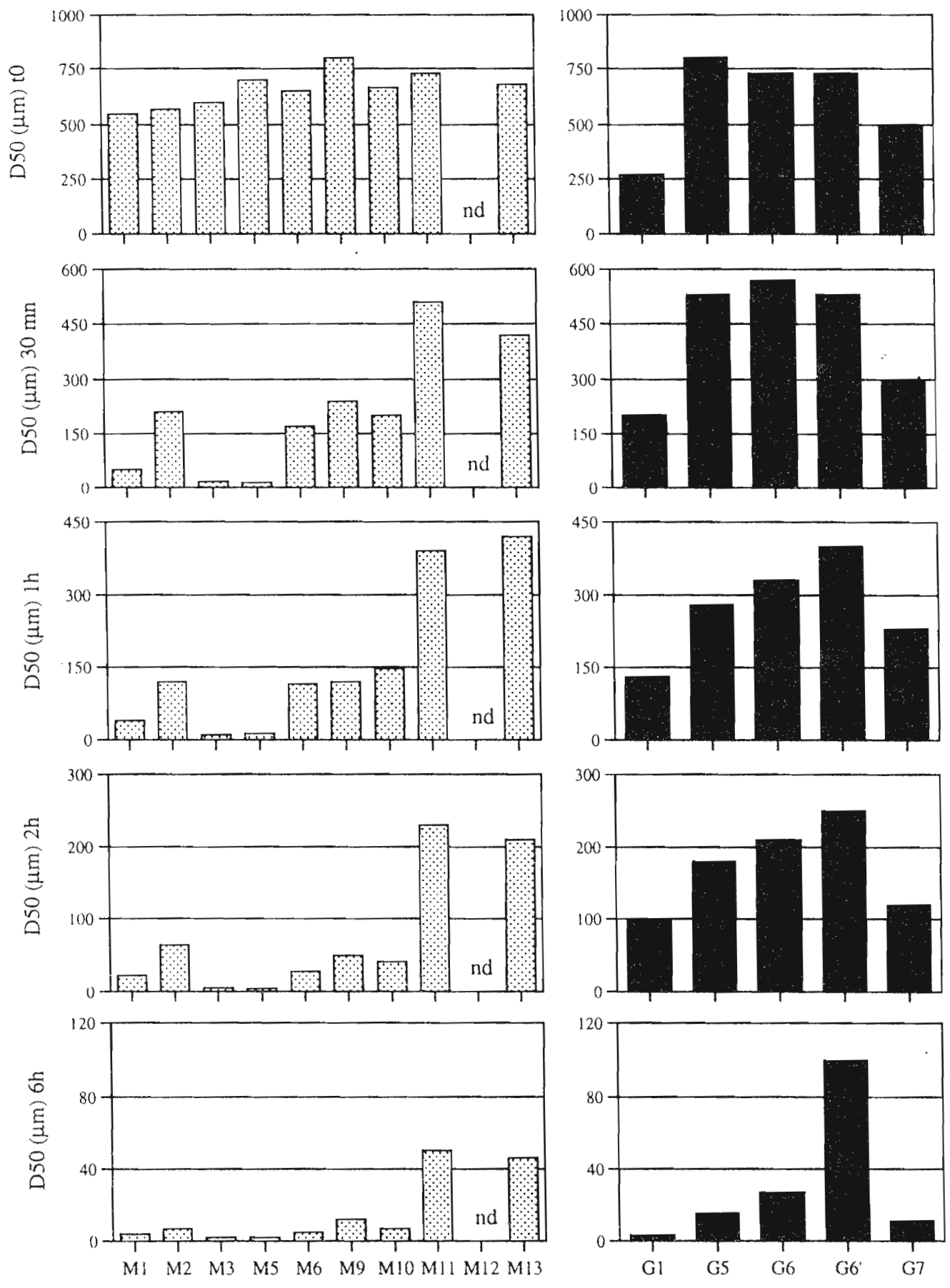


Figure : Cinétique de désagrégation
 Diamètre des agrégats correspondant à 50% de la masse sur la courbe cumulée (D50)
 pour différents temps d'agitation (situations Martinique et Guadeloupe)

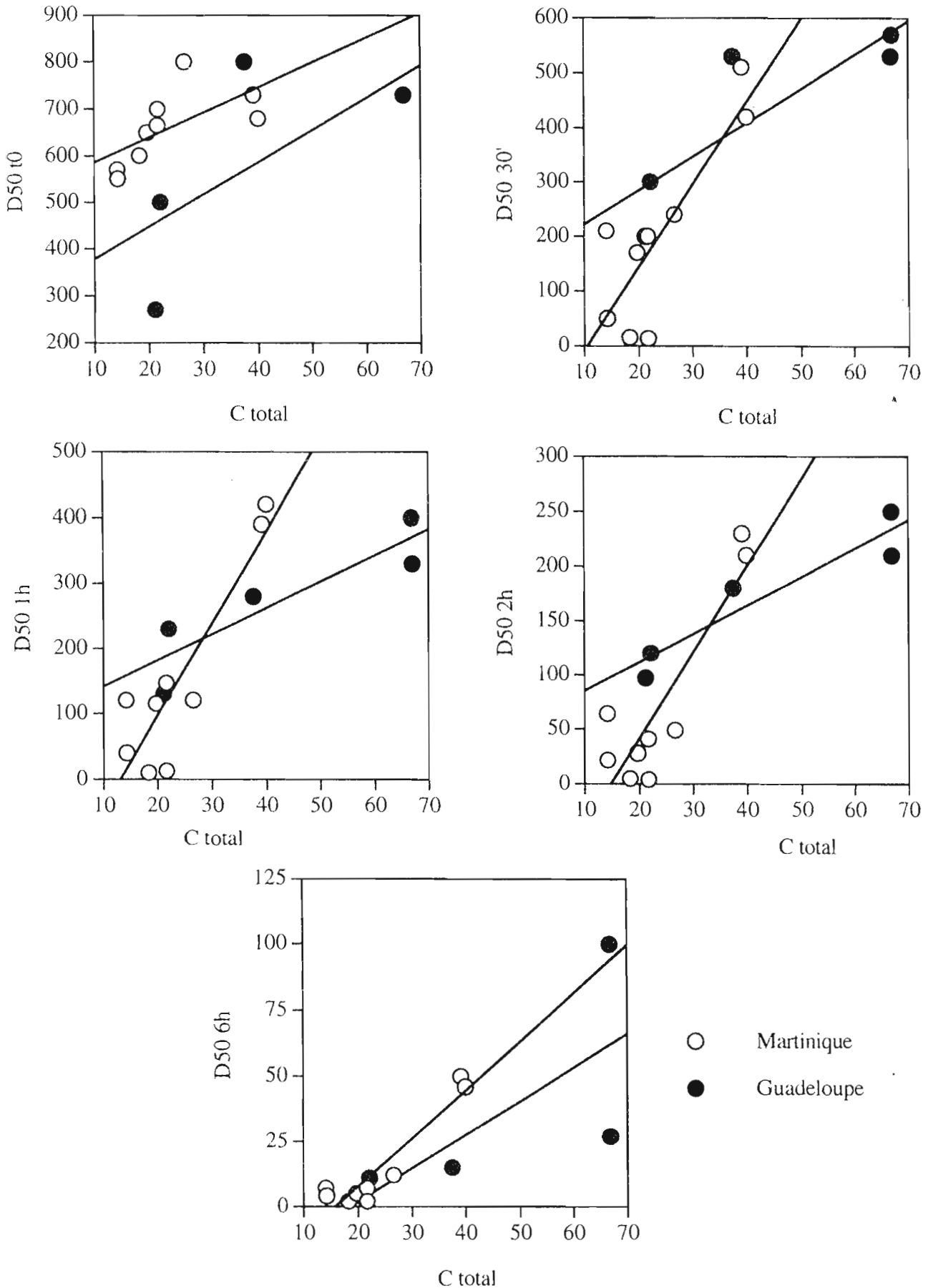


Figure : Cinétique de désagrégation
Pourcentages d'agrégats stables (> 500 µm)

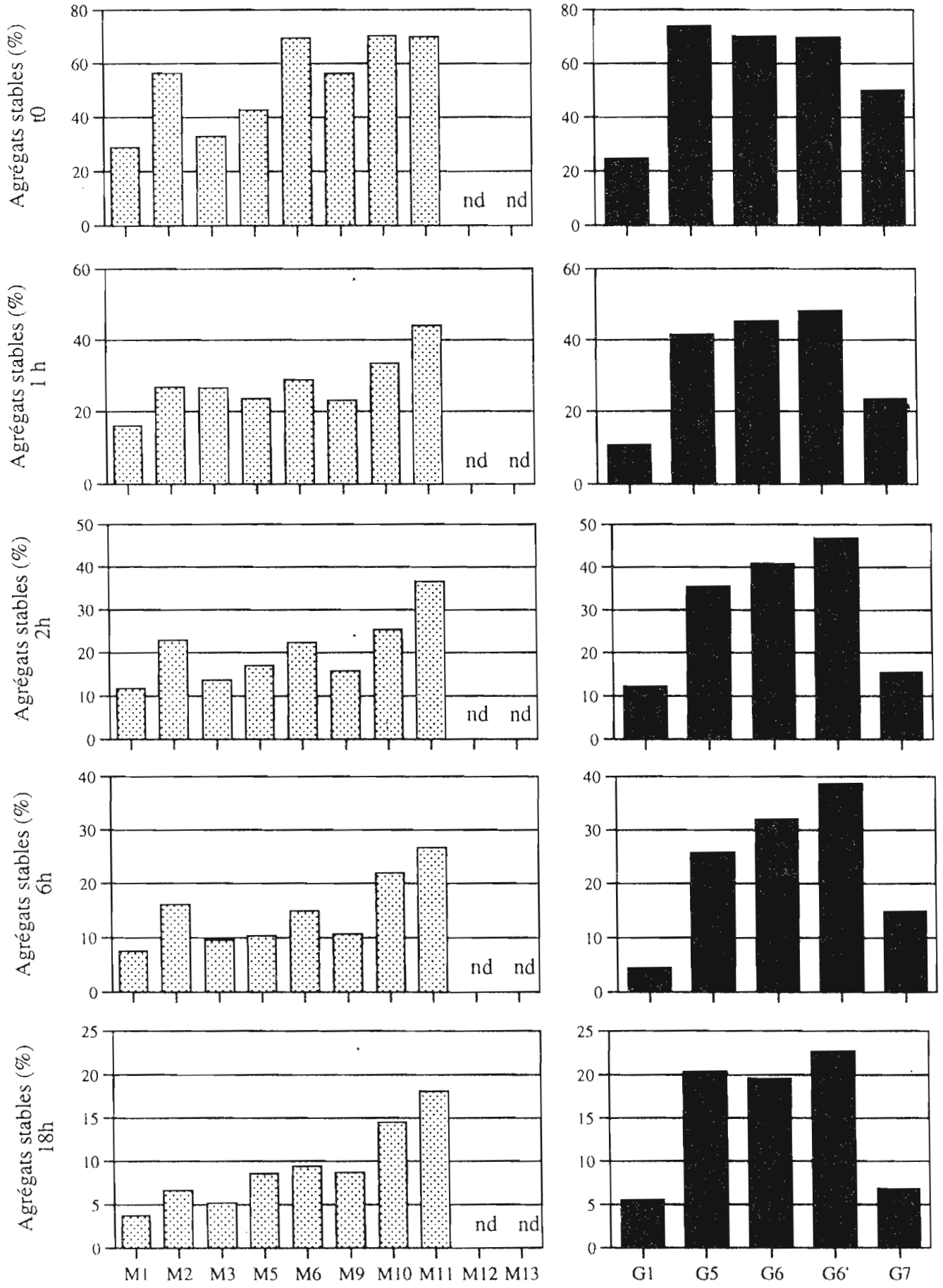


Figure : Cinétique de désagrégation
 Pourcentages d'agrégats stables (> 200 µm)

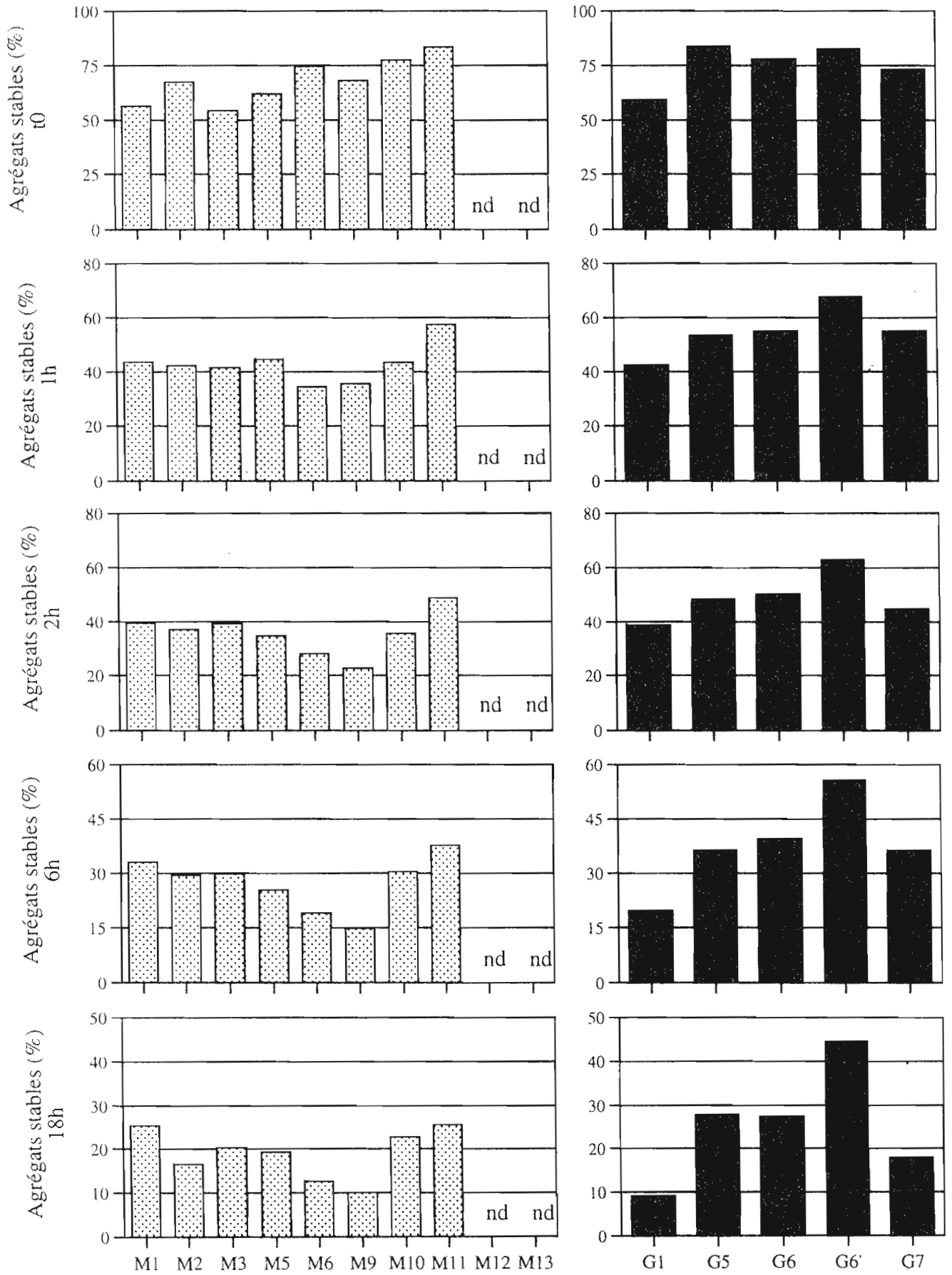
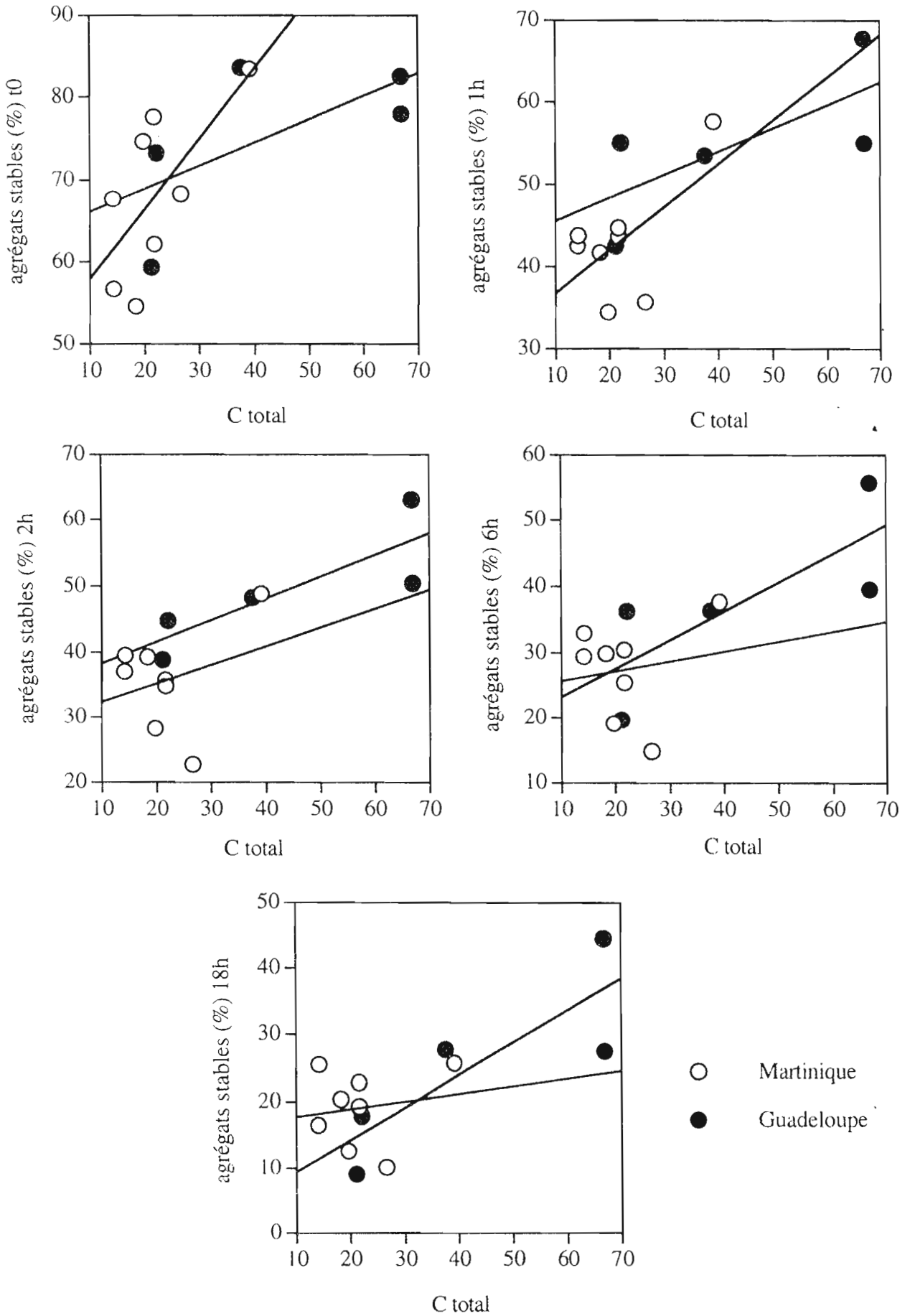


Figure : Relation entre C du sol total et pourcentages d'agrégats stables > 200 μm pour les vertisols des situations Martinique et Guadeloupe



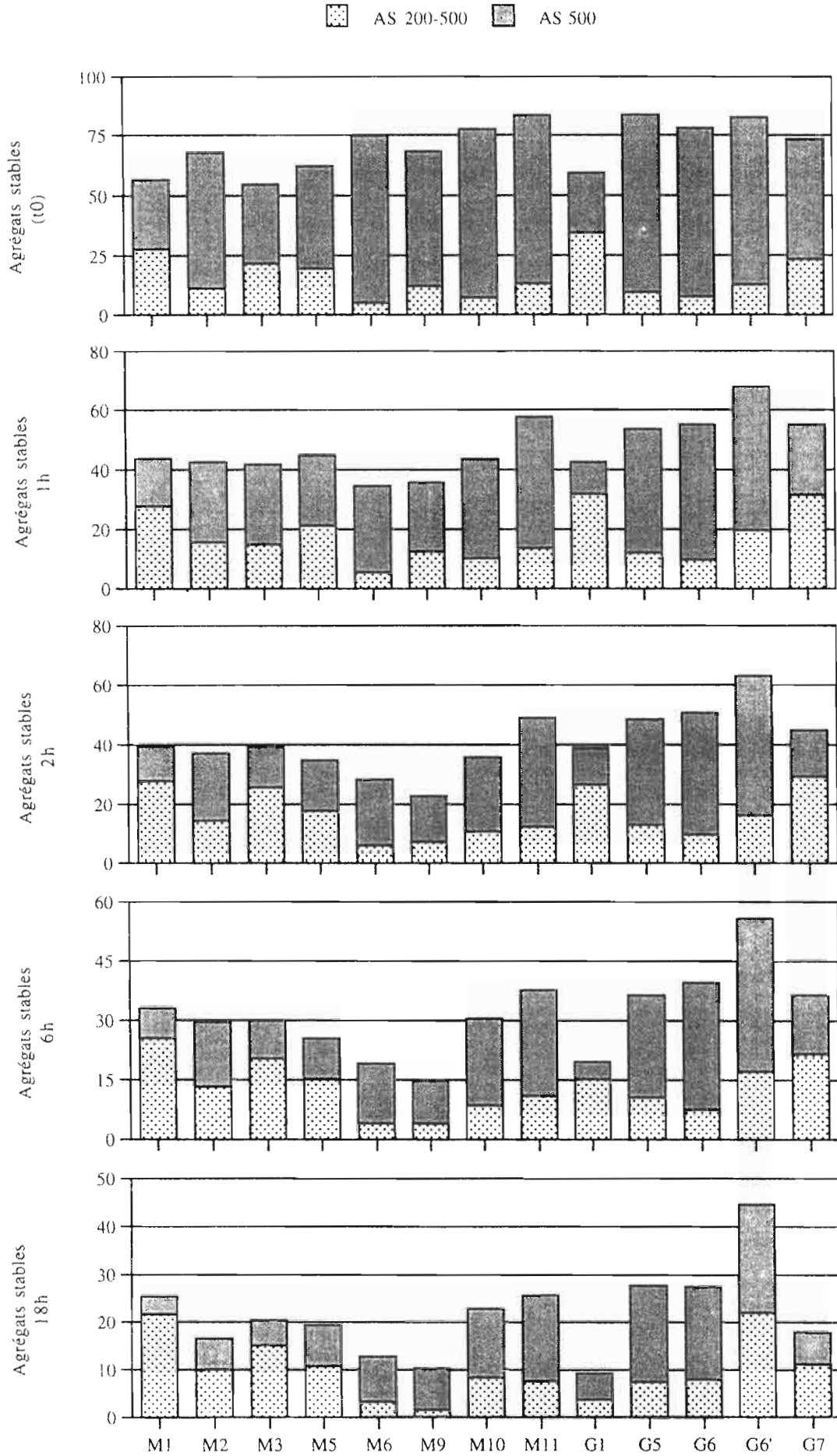


Figure : Cinétique de désagrégation
 Indices de dispersion (% de la teneur en argiles) pour différents temps d'agitation
 des agrégats 1-2 mm des situations Martinique et Guadeloupe

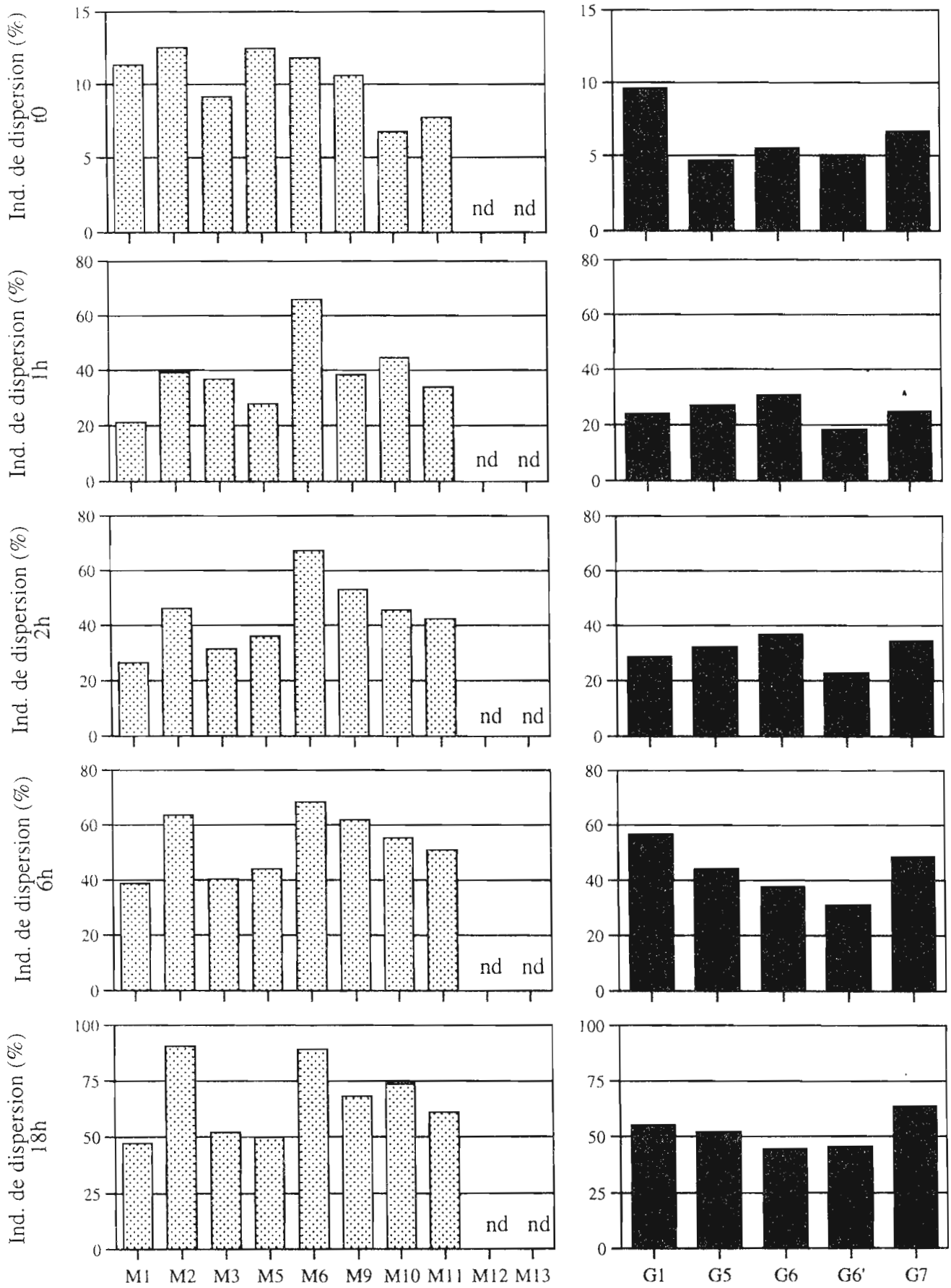
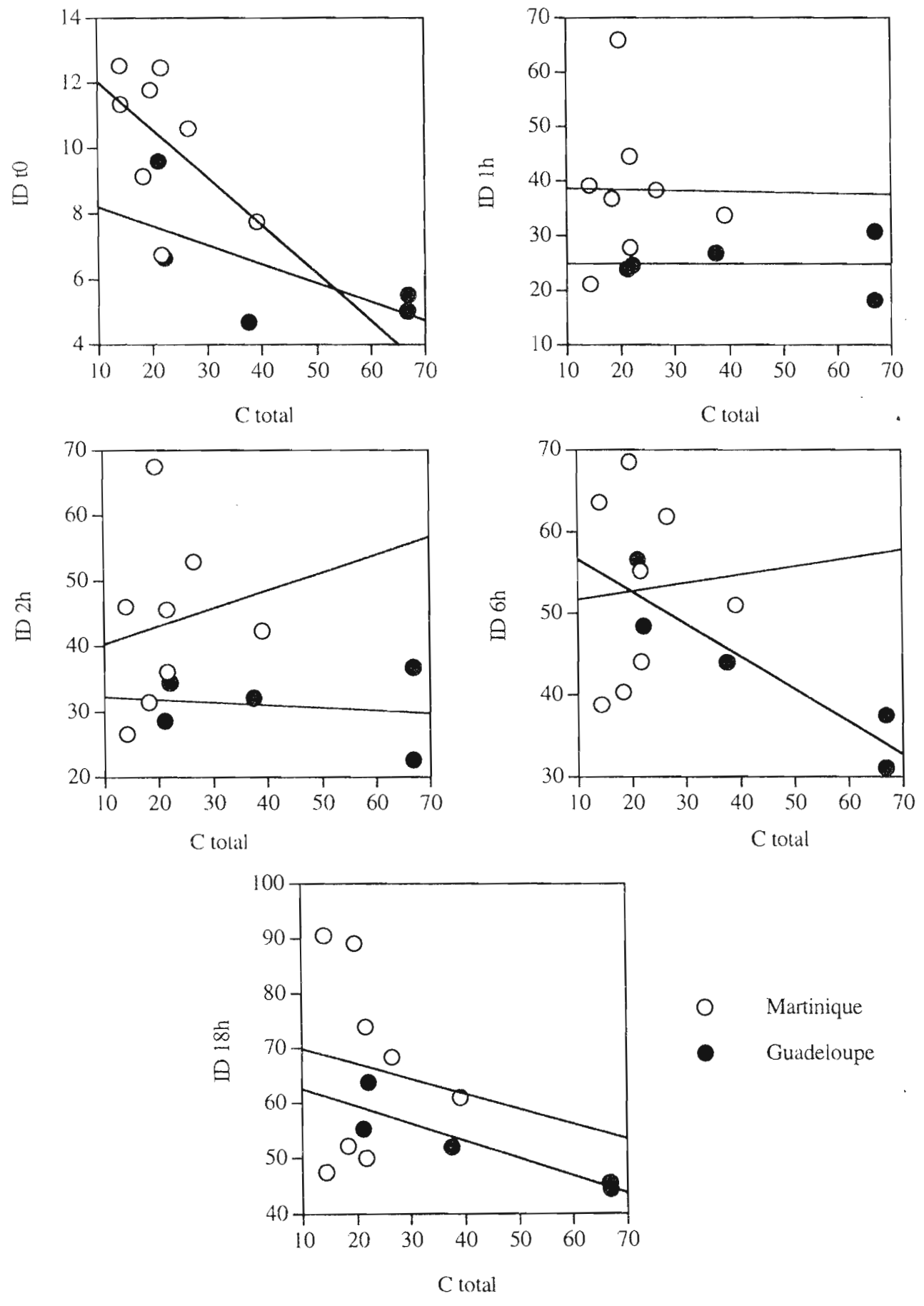


Figure : Cinétique de désagrégation
Relation entre C total et Indices de dispersion (% de la teneur en argiles) pour différents
temps d'agitation des agrégats 1-2 mm des situations Martinique et Guadeloupe



Simulation de pluie
 Turbidité de l'eau de ruissellement mesurée pour une surface binée et 3
 intensités de pluie

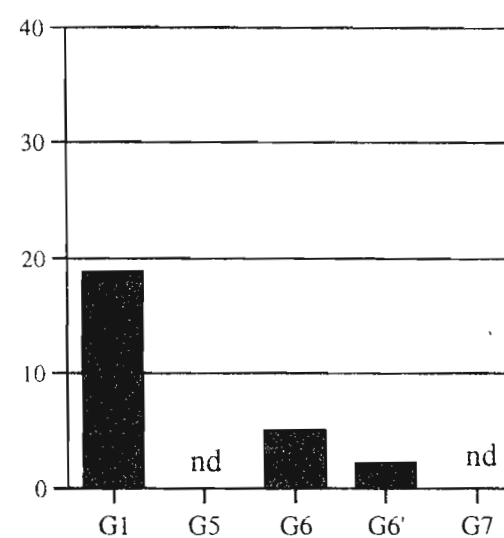
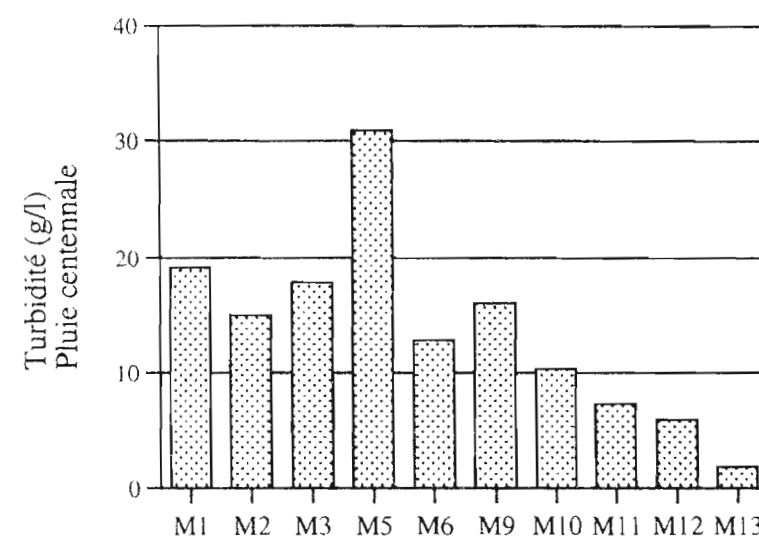
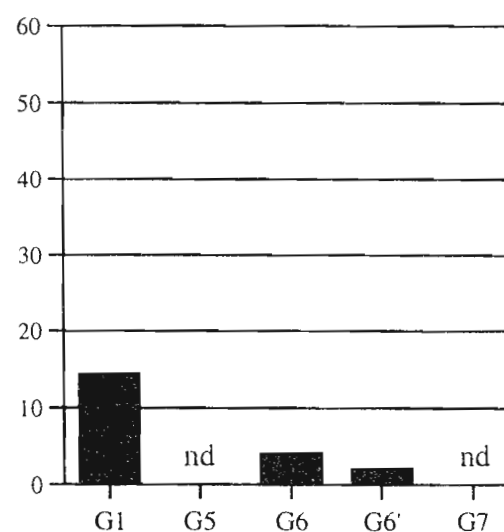
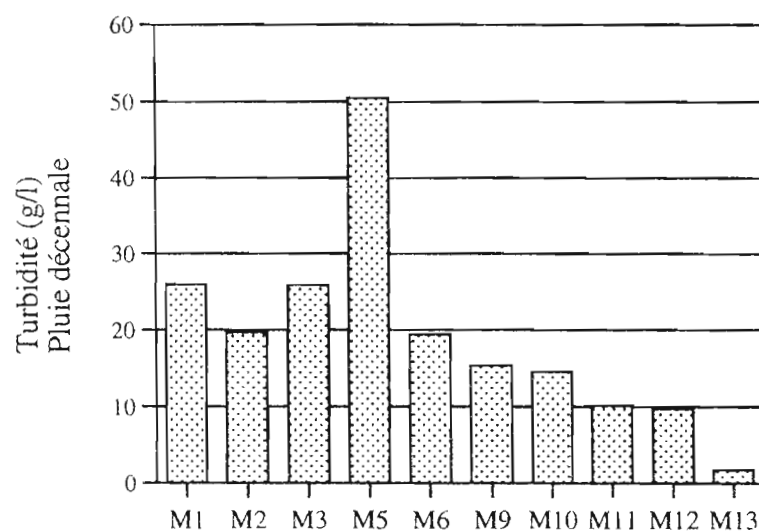
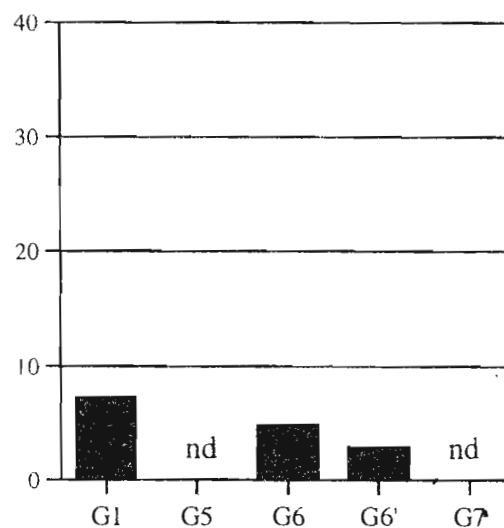
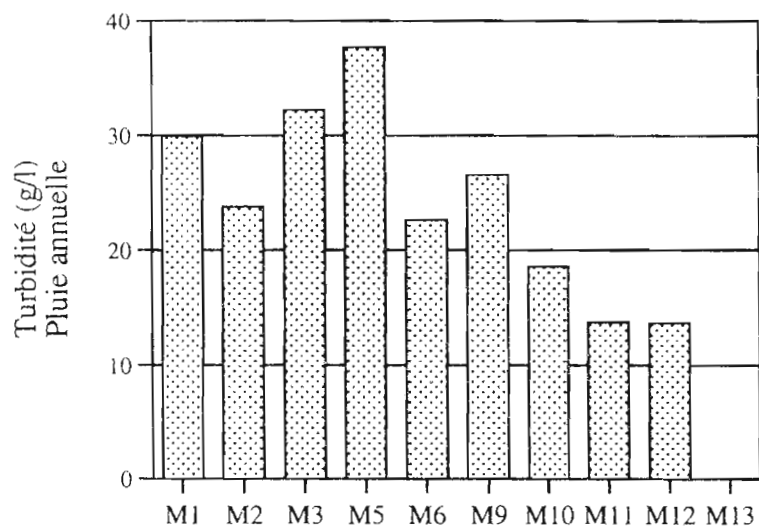
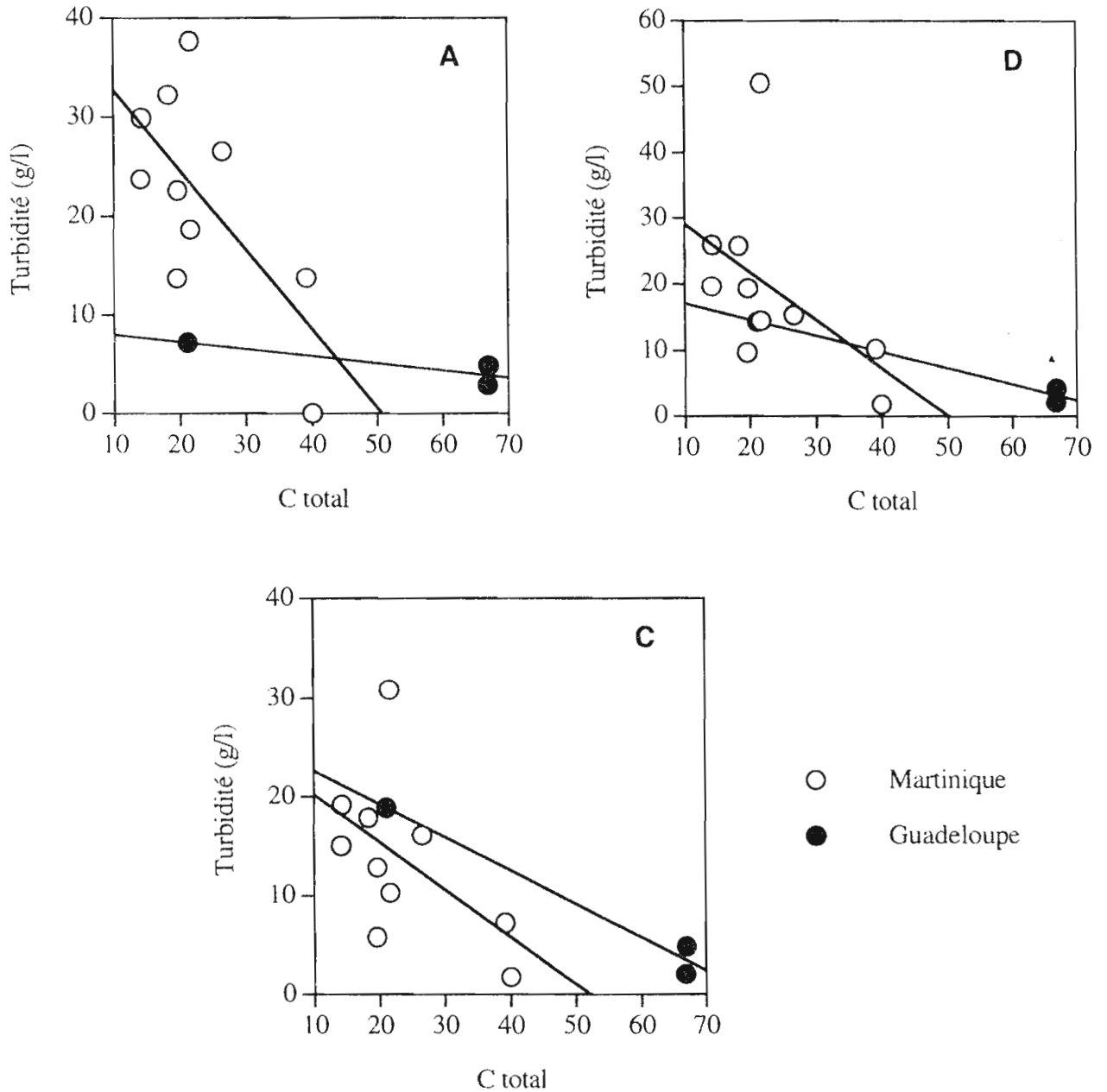


Figure : Relation entre C du sol total et la turbidité de l'eau de ruissellement mesurée sous simulation de pluie, pour une surface binée et 3 intensités de pluie A=55 mm/h, D=80 mm/h et C=150 mm/h (situations Martinique et Guadeloupe)



Simulation de pluie
Débit solide mesurée pour une surface binée et 3 intensités de pluie

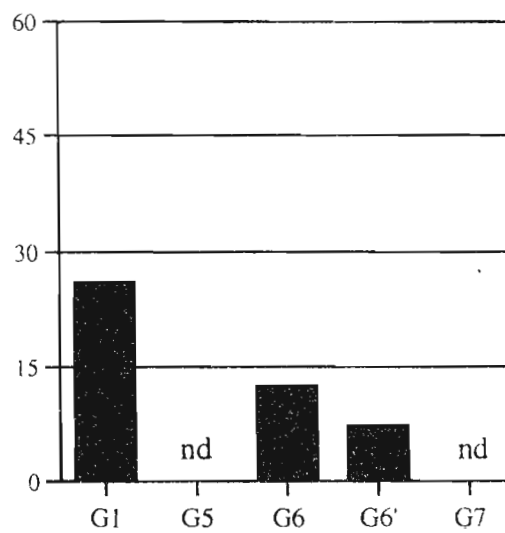
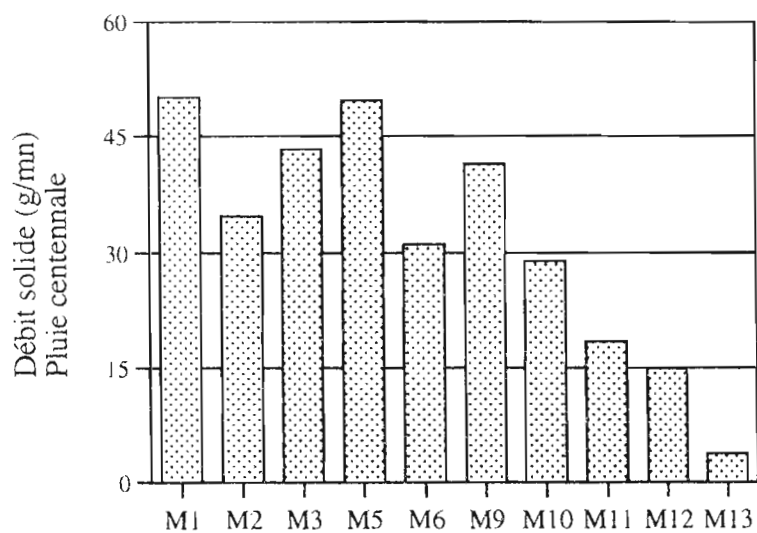
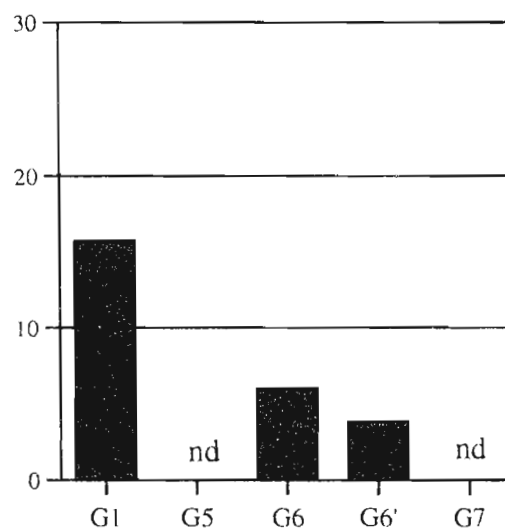
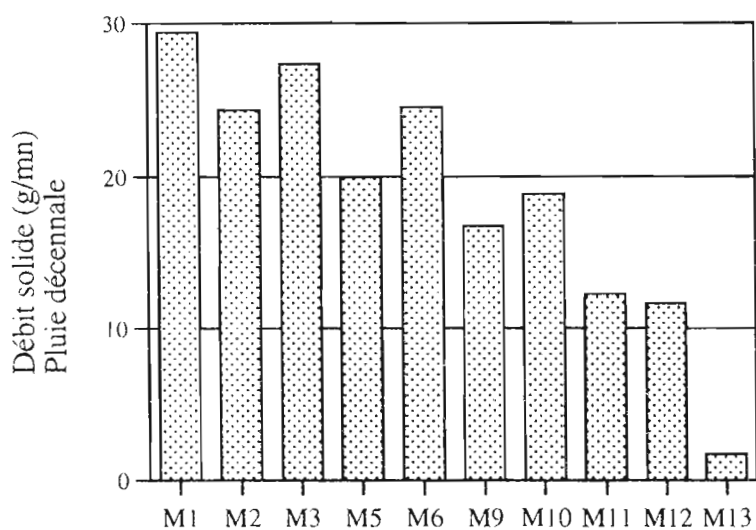
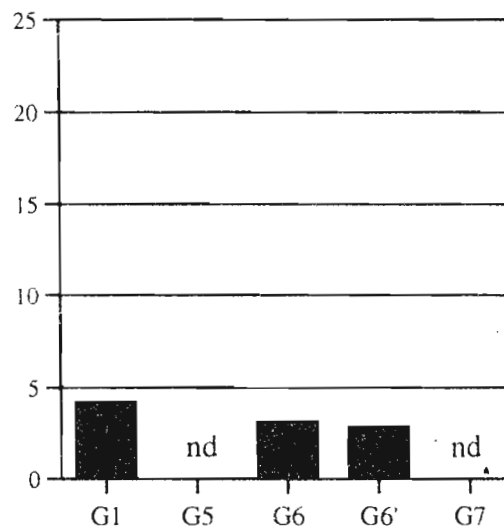
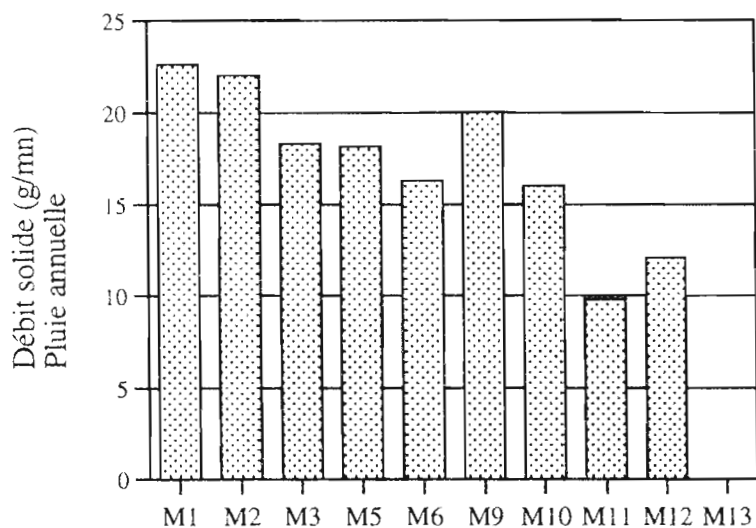
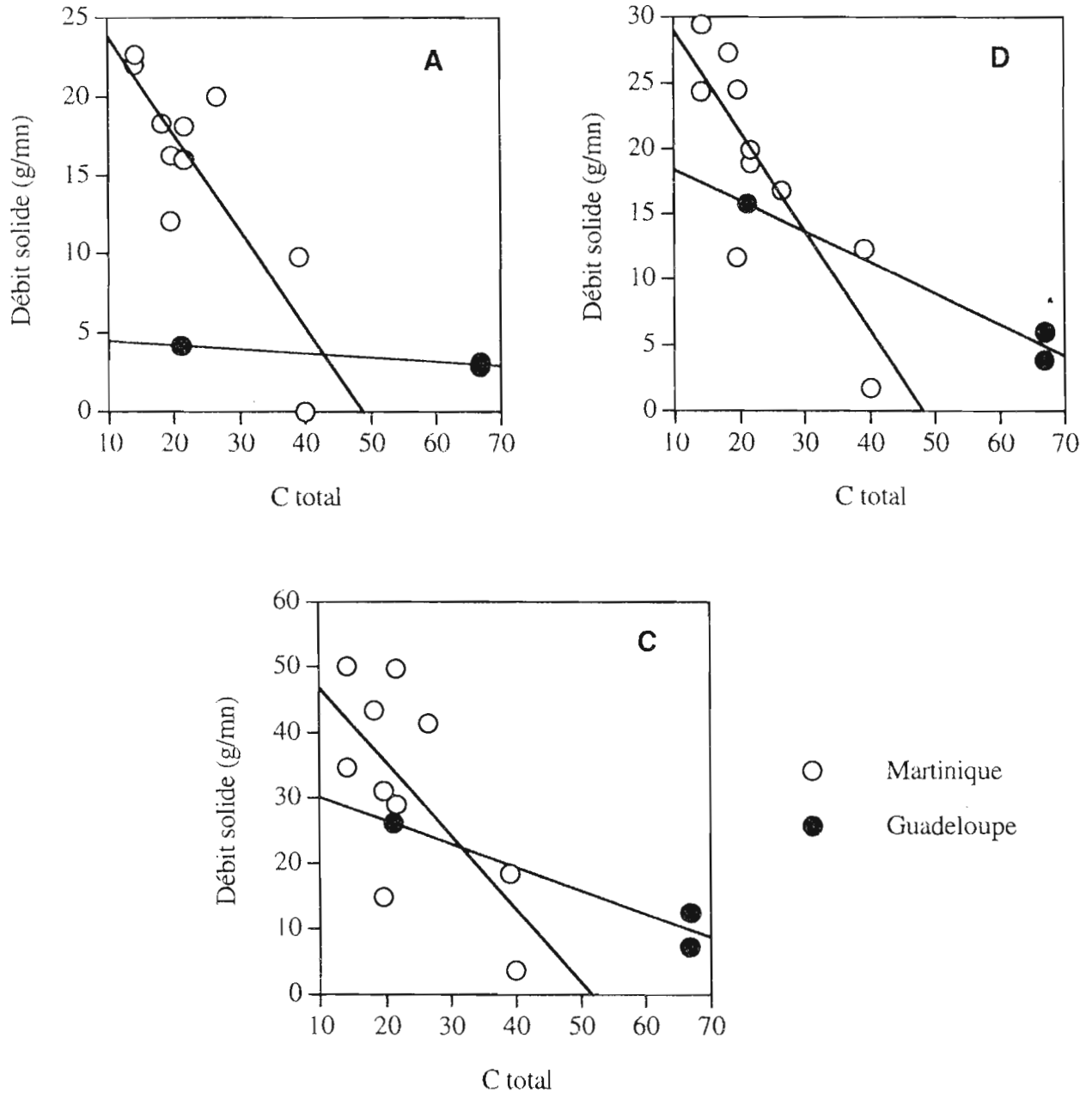


Figure : Relation entre C du sol total et le débit solide mesuré en simulation de pluie, pour une surface binée et 3 intensités de pluie A=55 mm/h, D=80 mm/h et C=150 mm/h (situations Martinique et Guadeloupe)



Simulation de pluie
 Pertes en terre mesurées pour une surface binée et 3 intensités de pluie

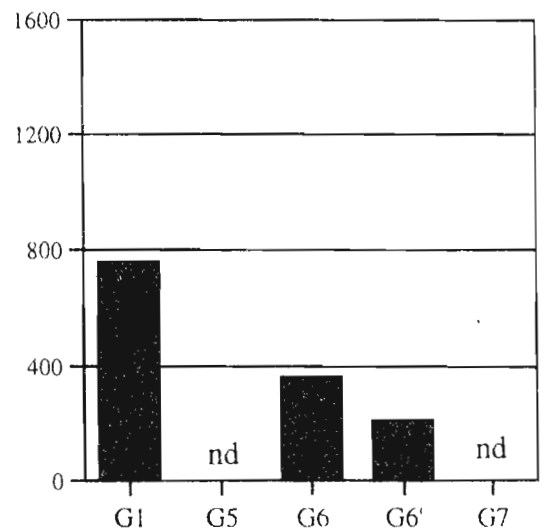
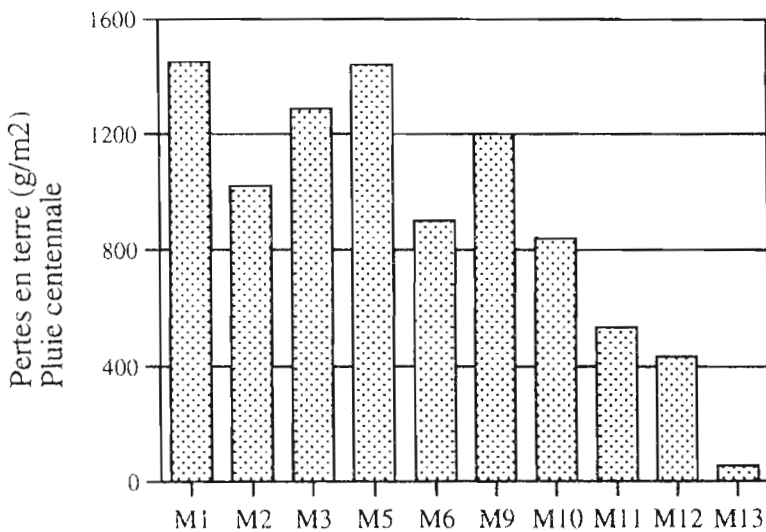
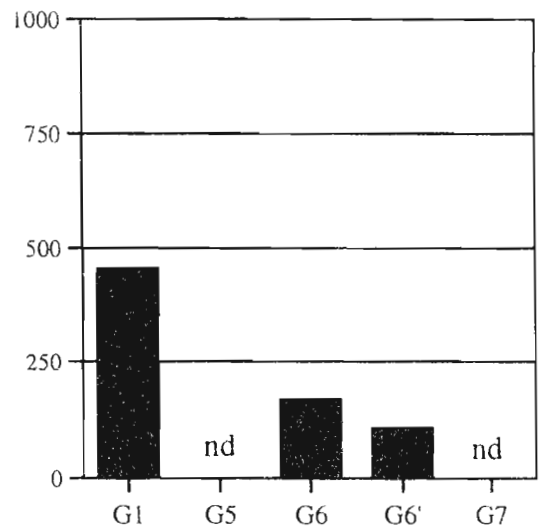
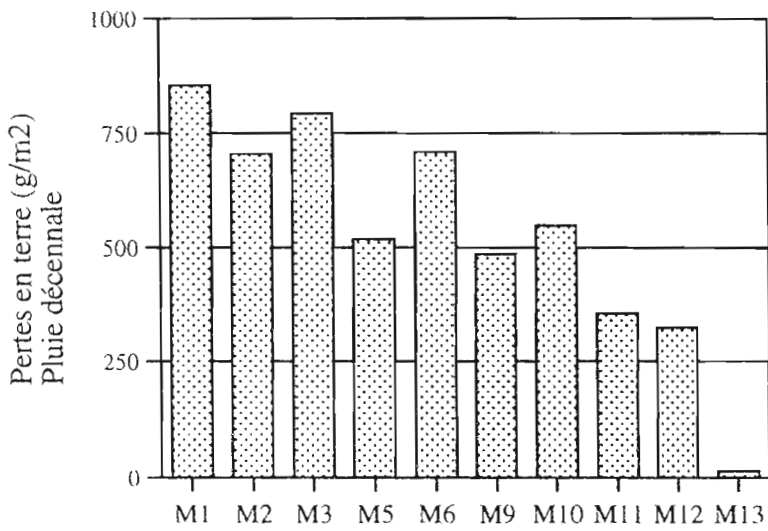
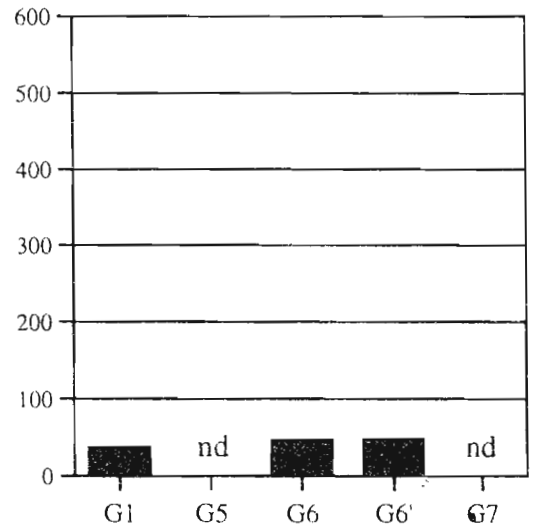
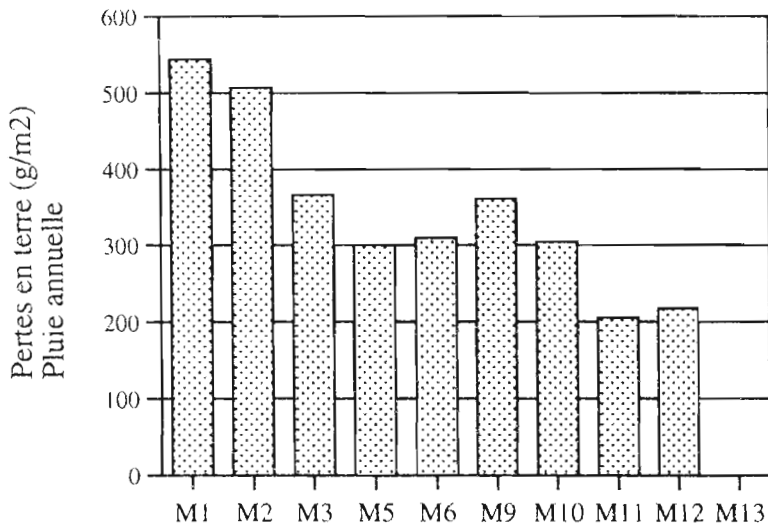
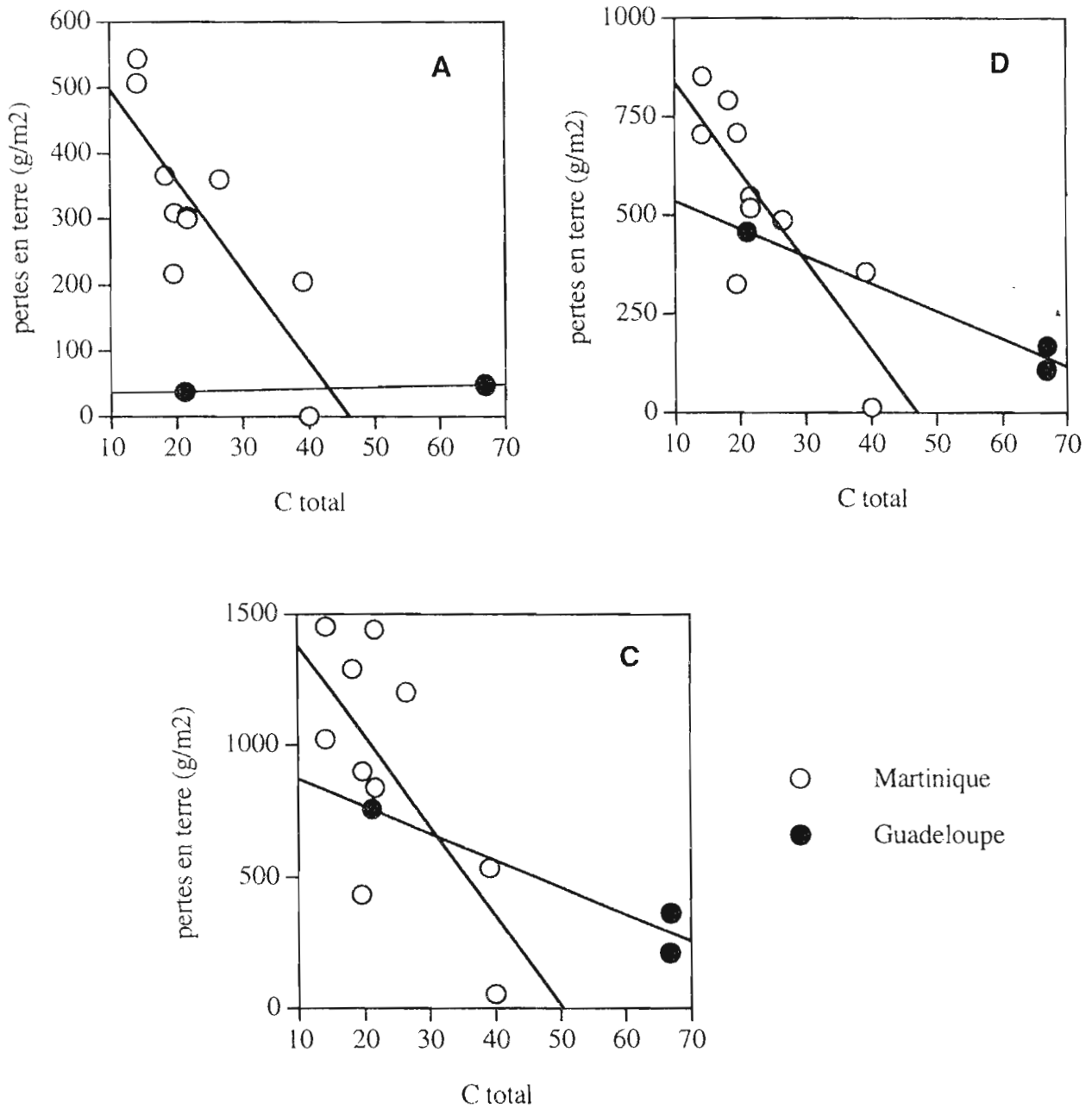


Figure : Relation entre C du sol total et la perte en terre mesurée sous simulation de pluie, pour une surface binée et 3 intensités de pluie A=55 mm/h, D=80 mm/h et C=150 mm/h (situations Martinique et Guadeloupe)



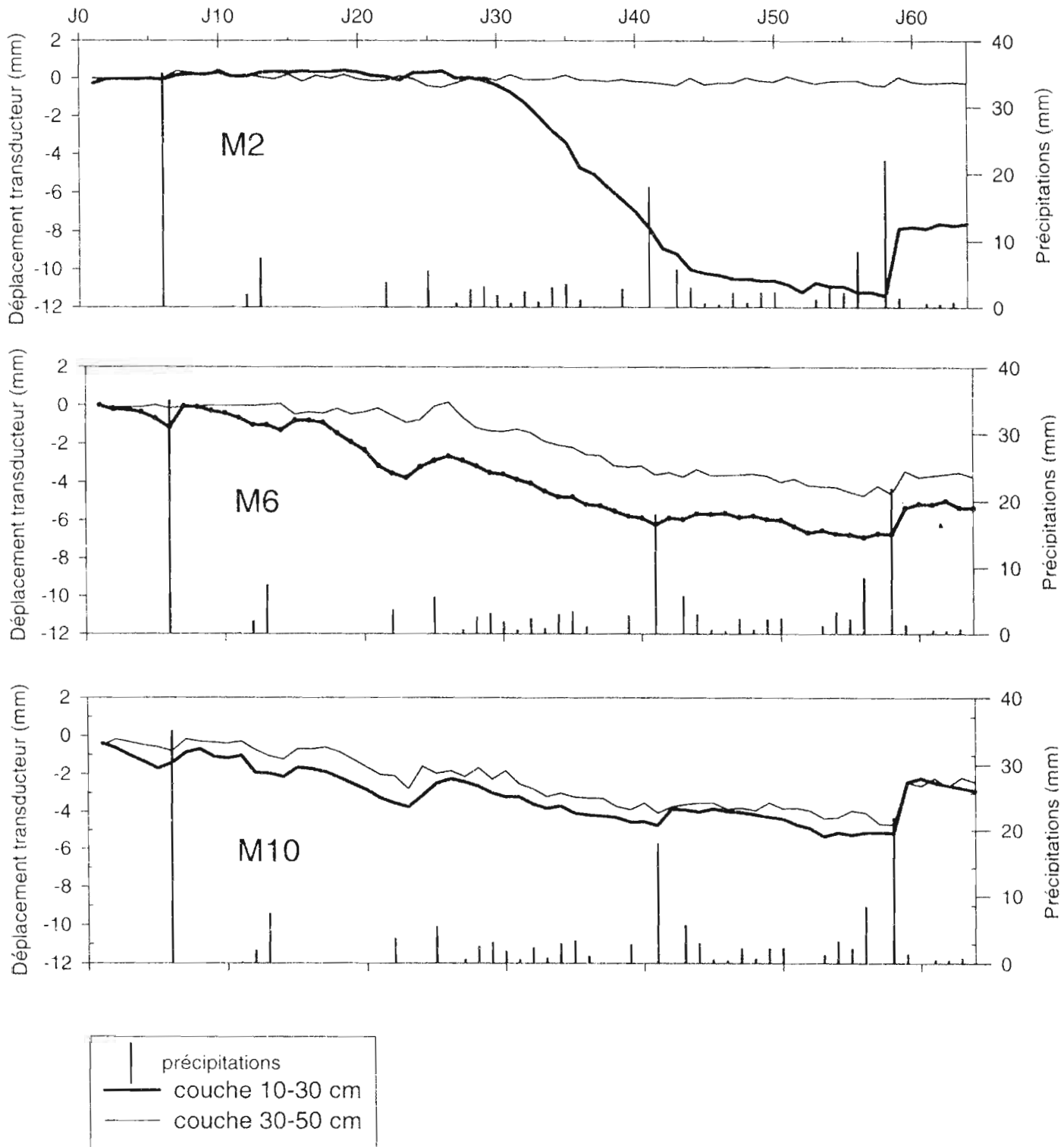


Fig. 1 - Mesure de déplacement des capteur ou transducteurs implantés dans 2 couches de sol (10-30 et 30-50 cm) entre le 14 avril et le 18 juin 1998, représentation des précipitations, (irrigation et atmosphérique) intervenues durant la même période.

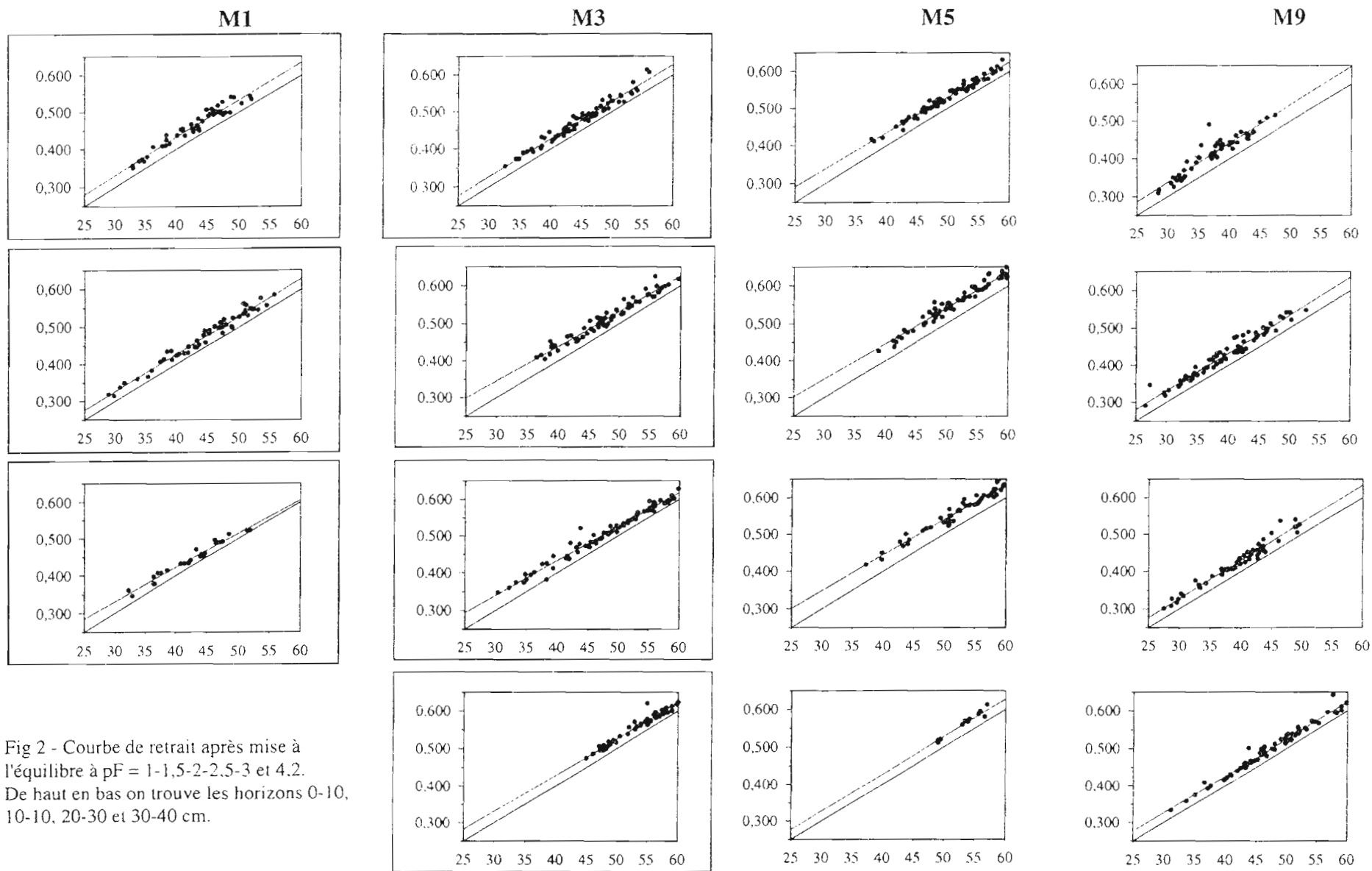


Fig 2 - Courbe de retrait après mise à l'équilibre à $pF = 1-1,5-2-2,5-3$ et 4.2 . De haut en bas on trouve les horizons 0-10, 10-10, 20-30 et 30-40 cm.

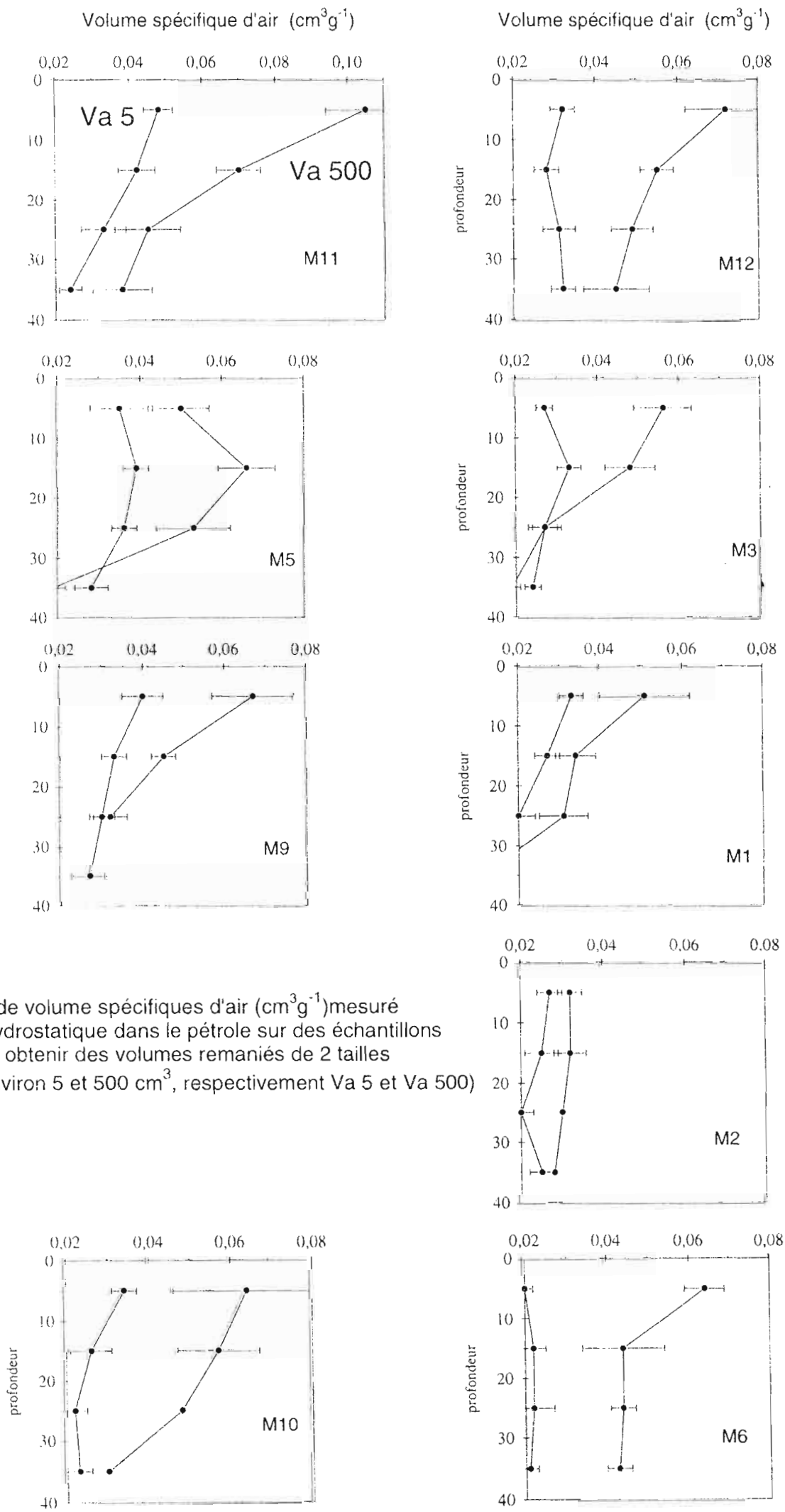


Fig. 3 - Profils de volume spécifiques d'air (cm³g⁻¹) mesuré par poussé hydrostatique dans le pétrole sur des échantillons découpés pour obtenir des volumes remaniés de 2 tailles différentes (environ 5 et 500 cm³, respectivement Va 5 et Va 500)

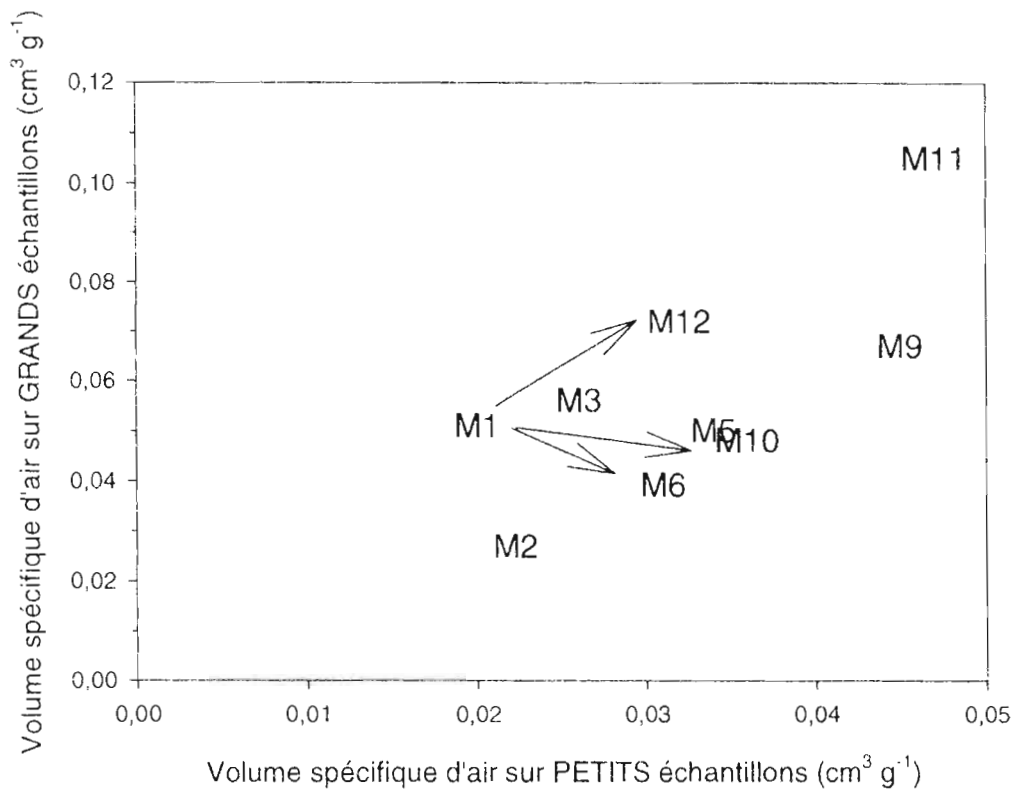
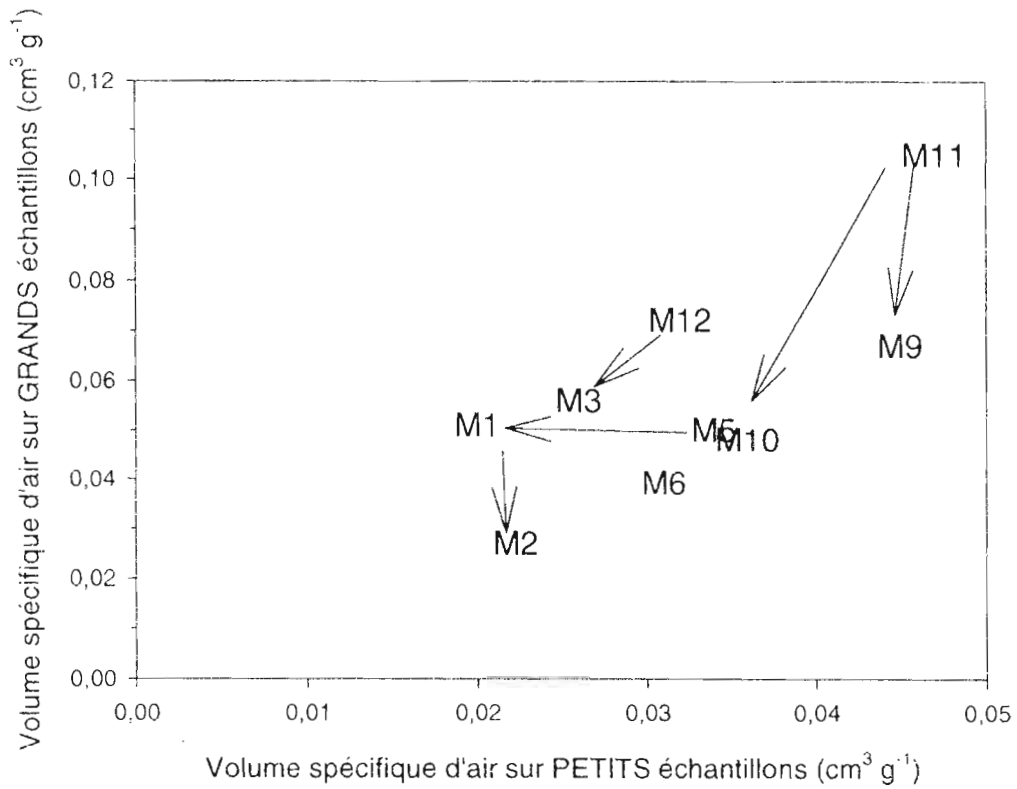


Fig. 4. Comparaison des volumes spécifiques d'air ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) sur des échantillons de 2 tailles différentes (5 et 500 cm^3 environ) ; les mesures de poussée hydrostatique ont été faites dans le pétrole. En haut les flèches représentent la cinétique de dégradation du volume poral en fonction de l'intensité des pratiques culturales ; en bas elles représentent la cinétique de réhabilitation d'une parcelle après maraîchage de longue durée.

RAPPORT DU

LABORATOIRE DE RECHERCHES AGRO-PEDO-CLIMATOLOGIQUES

GUADELOUPE

INRA

Figure 1 a : courbe de retrait de massif inter-macro-fissural contenant une porosité tubulaire dominante, horizon (B)

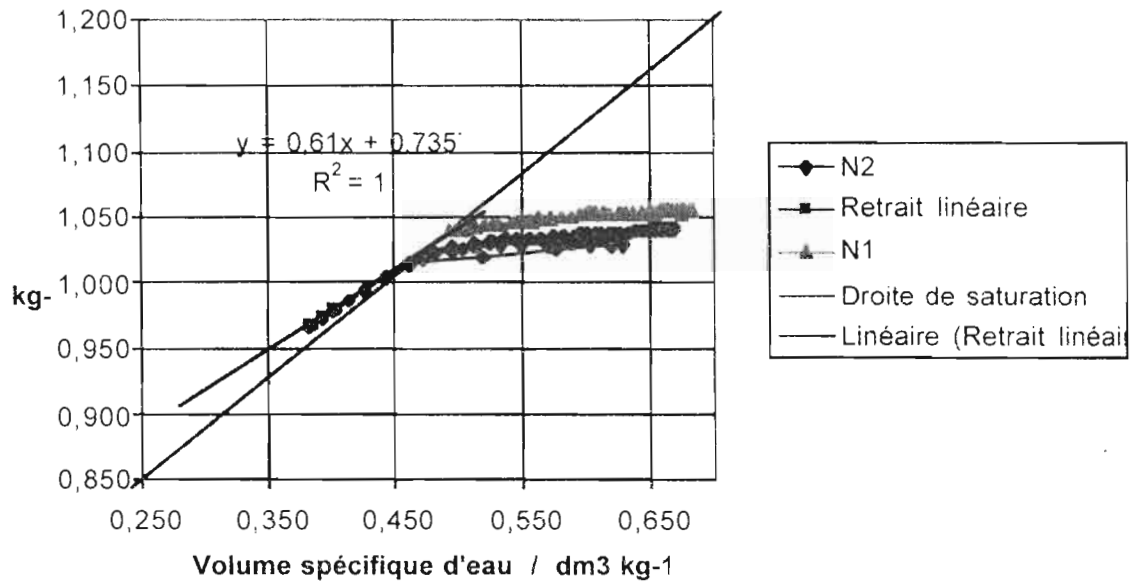


Figure 1 b : courbe de retrait de massif inter-macro-fissural contenant des méats polyconcaves, fissures gaufrées et tubes fins (F)

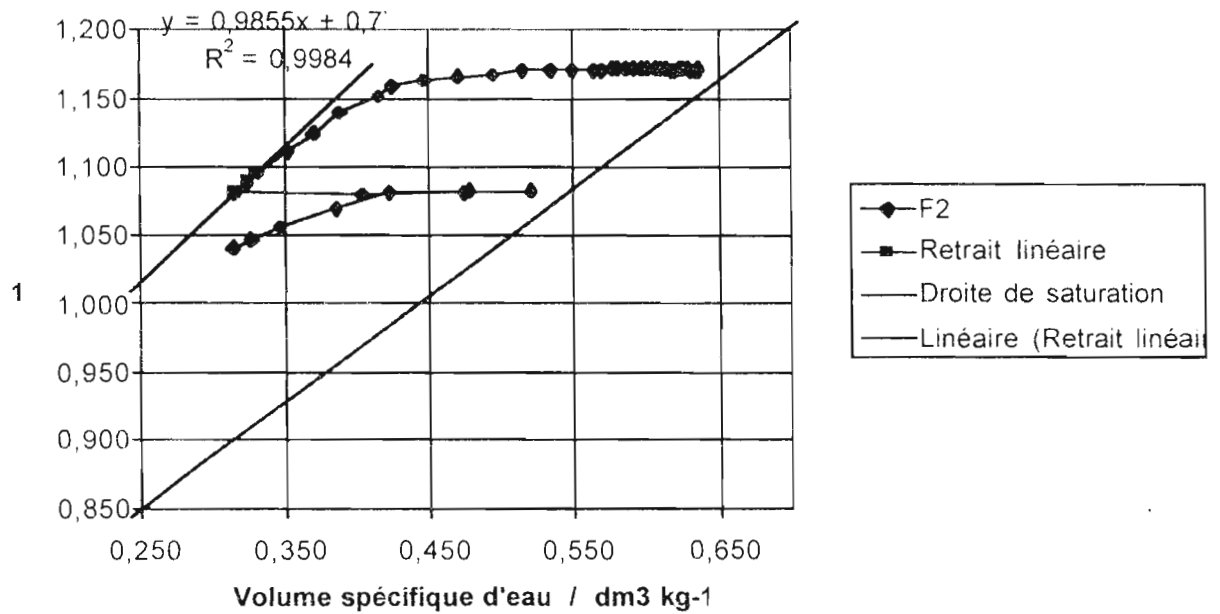


Figure 1 c : courbe de retrait de massif inter-macro-fissural contenant des amas spongiformes, tubes moyens et fissures planes et lisses (Fg)

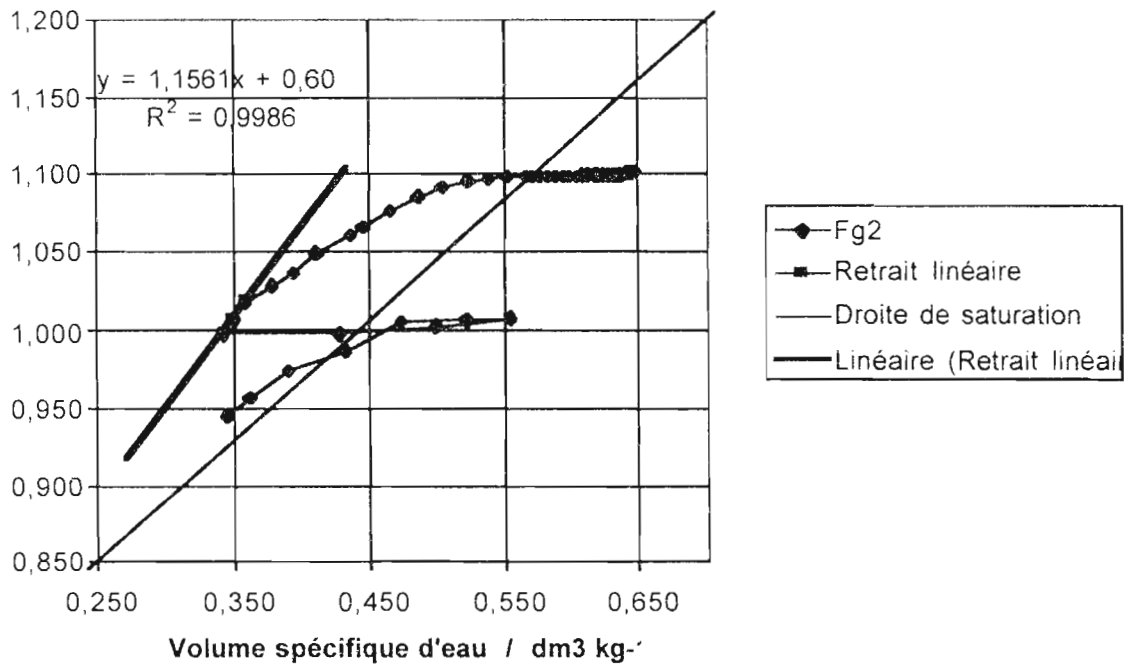


Figure 1 d : courbe de retrait de massif inter-macro-fissural contenant des méats polyédriques et réseaux de vides plans cellulaires, à tubes rares (P)

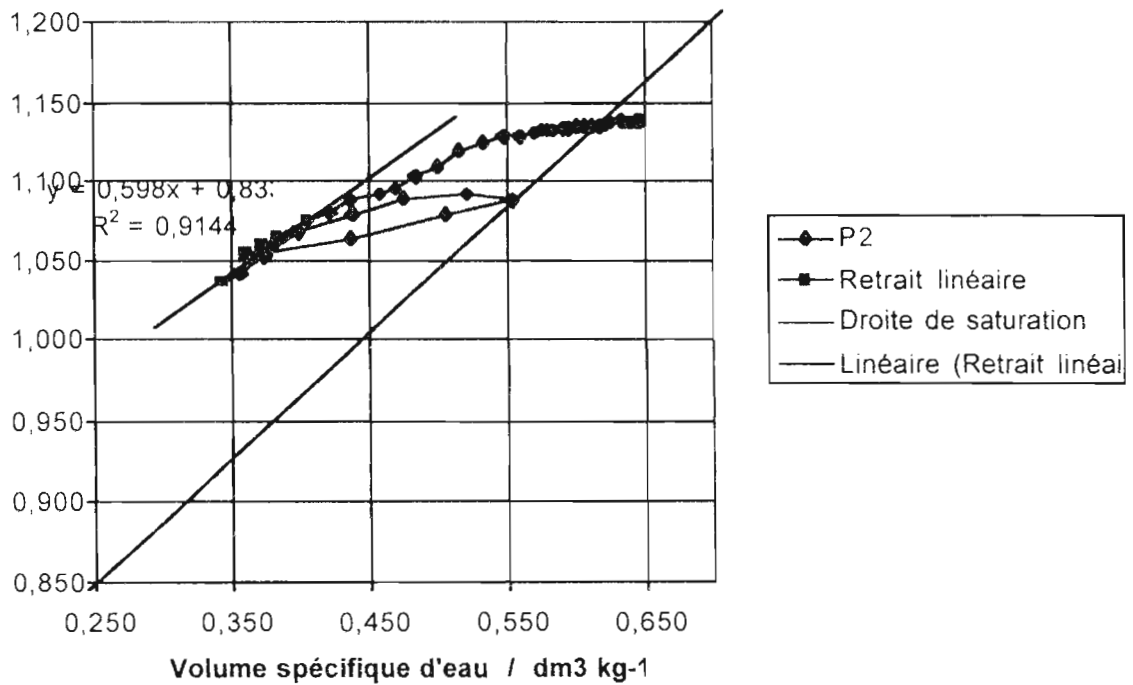
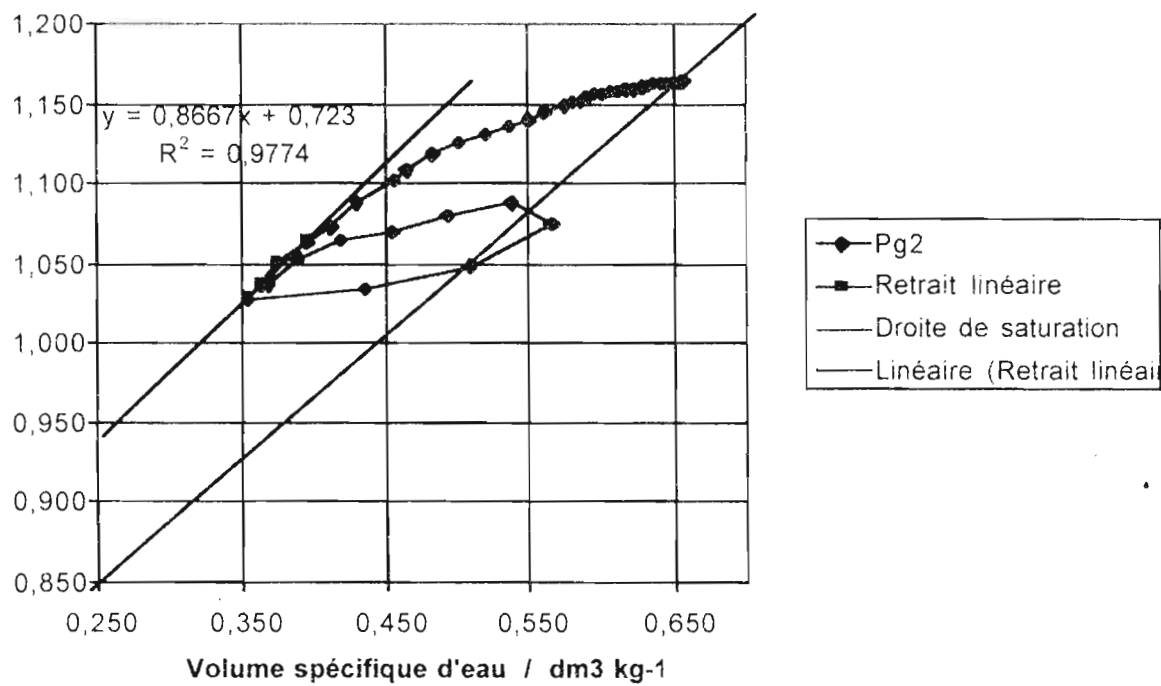


Figure 1 e : courbe de retrait de massif inter-macro-fissural contenant des méats polyconvexes et fissures lisses, sans tubes fins (Pg)



RAPPORT DU

LABORATOIRE D'ETUDES DU COMPORTEMENT DES SOLS CULTIVES

MONTPELLIER

IRD (ex-ORSTOM)

FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS TROPICAUX ET GESTION DURABLE DES TERRES

DETERMINANTS BIOLOGIQUES DE L'AGREGATION ET DE LA POROSITE DES VERTISOLS DES
PETITES ANTILLES - CONSEQUENCES SUR L'ERODIBILITE ET LA DISPONIBILITE DE L'EAU DU
SOL POUR LES PLANTES

Contribution du LCSC, ORSTOM Montpellier

Rapport final, Novembre 1998

M. Christine LARRE-LARROUY

INTRODUCTION

La mise en culture continue conduit à une diminution du stock organique dans les horizons de surface des sols tropicaux et parallèlement, à une diminution de la stabilité structurale de ces sols. Cette baisse du stock organique se reflète au niveau des fractions granulométriques du sol ou de ses agrégats et peut concerner des composés organiques regroupés au sein de compartiments labiles de la matière organique. Parmi ces composés, 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.

Lors de la mise en culture et de la diminution du stock organique, y a-t'il une modification de la distribution ou de la composition en carbohydrates? Si oui, y a-t'il une fraction granulométrique ou une classe d'agrégats plus marquée qu'une autre par cette modification? Certains sucres sont-ils plus concernés que d'autres par une telle modification?

Afin de pouvoir répondre à ces questions, la détermination des carbohydrates a été effectuée sur deux vertisols de Martinique, sur le sol sous prairie de longue durée (S11) et ce sol après quelques années de culture maraîchère (S1), leurs fractions granulométriques et différentes classes d'agrégats. La composition en sucres a également été étudiée sur la culture fourragère plantée sur la parcelle de prairie (*Digitaria decumbens*).

MATERIELS ET METHODES

Préparation des échantillons

Les échantillons de sols (0-10 cm) prélevés sous une prairie de longue durée (Situation 11, S11) et maraîchage de longue durée (Situation 1, S1) sont séchés à l'air et tamisés à 2mm ou finement broyés (< 0,2 mm) pour l'analyse du carbone et des carbohydrates. L'analyse mécanique est réalisée par la méthode de la pipette après destruction de la matière organique par H₂O₂ (selon le protocole SSC-ORSTOM).

Les échantillons de matériel végétal abondant dans la situation prairie (racines, tiges, parties aériennes de la graminée *Digitaria decumbens*) sont séchés à l'air puis broyés finement (1 mm).

Fractionnement granulométrique

Les sols, tamisés à 2 mm, sont fractionnés selon la méthode décrite par Gavinelli *et al.* (1995). Elle consiste, après dispersion et agitation d'une suspension de sol, en tamisages sous eau à 200, 50 et 20 µm et conduit, après sédimentation, à l'obtention de 5 fractions granulométriques : F 200-2000 µm, F 50-200 µm, F 20-50 µm, F 5-20 µm, F 0-5 µm. Les fractions de taille comprise entre 20 et 200 µm ont été regroupées par calcul en une fraction F 20-200 µm après vérification en microscopie optique : (a) de l'absence d'agrégats dans ces fractions et (2) du caractère figuré végétal dominant des matières organiques de ces fractions. Plusieurs fractionnements sont nécessaires pour obtenir des fractions en quantité suffisante pour l'extraction des sucres.

Fractionnement en agrégats

Une suspension de sol (35 g de sol -préalablement tamisé à 2 mm-, pour 250 mL d'eau), après contact pendant une nuit et agitation d'une heure, est tamisée à 200, 50 et 20 µm. Après sédimentation et regroupement des agrégats de taille comprise entre 20 et 200 µm, les 4 classes d'agrégats suivantes sont obtenues : Ag 200-2000 µm, Ag 20-200 µm, Ag 5-20 µm, Ag 0-5 µm. L'opération est renouvelée jusqu'à obtenir des agrégats en quantité suffisante pour l'extraction des sucres.

Analyses chimiques

Détermination du carbone. Le carbone (C) est dosé par voie sèche à l'aide d'un analyseur élémentaire Fisons (Carlo Erba) Na-2000.

Détermination des sucres. Les sucres sont extraits par une série d'hydrolyses acides (H₂SO₄), suivant la technique préconisée par Oades *et al.* (1970) ; parmi les différentes méthodes d'extraction, celle-ci offre l'avantage d'extraire le maximum de sucres monomères tout en limitant leur dégradation. La première étape consiste en une hydrolyse rapide à reflux et relargue des monosaccharides qui ne proviennent pas de matières cellulosiques. La seconde étape (deux hydrolyses successives), hydrolyse des sucres cellulosiques d'origine végétale.

Les sucres extraits sont dosés par chromatographie en phase gazeuse (CPG) après silylation (Larré-Larrouy et Feller, 1997). La séparation est effectuée sur un chromatographe

muni d'un injecteur split-splitless et d'un détecteur à ionisation de flamme, équipé d'une colonne capillaire OV1.

RESULTATS

Caractérisation de la matière organique (MO) dans les sols sous prairie (S11) et sous maraîchage (S1), dans leurs fractions granulométriques et classes d'agrégats

Le sol sous prairie (S11) contient 50 g C/kg sol soit 4,3 fois plus que le sol (S1) sous maraîchage (Tableau 1), ce qui est généralement observé dans une situation initiale par rapport à une situation après travail du sol et mise en culture. Cet enrichissement en carbone du sol S11 en comparaison du sol S1 se reflète dans les différences existant entre les rapports C/N de ces 2 sols. Cependant, ces différences sont peu marquées (C/N de 12 pour S11, et 10 pour S1).

Bilans du fractionnement granulométrique (masses, C, C/N). Un bon état de dispersion du sol par le fractionnement granulométrique utilisé est nécessaire pour obtenir une bonne séparation des matières organiques (MO) à caractère végétal ($> 20 \mu\text{m}$) de celles à caractère beaucoup plus amorphe ($< 20 \mu\text{m}$). Cet état de dispersion peut être apprécié dans le Tableau 1, en comparant les masses des fractions obtenues par le fractionnement granulométrique avec celles résultant de l'analyse mécanique après destruction de la MO par H_2O_2 et dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium. On constate que les masses des fractions du sol S11 sont comparables pour le fractionnement granulométrique et l'analyse mécanique. Par contre, il n'en est pas de même pour S1 où la séparation des fractions $5\text{-}20 \mu\text{m}$ et $20\text{-}200 \mu\text{m}$, par exemple, apparaît incomplète par le fractionnement granulométrique : des particules resteraient agrégées au sein de mésoagrégats stables $20\text{-}200 \mu\text{m}$.

D'autre part, les bilans (somme des fractions/sol non fractionné Sol NF ; cf. Tableau 1), en masse et carbone peuvent être considérés comme tout à fait satisfaisants ; en effet :

- les bilans pondéraux varient de 999 à 1002 ‰, la masse de la fraction $0\text{-}5 \mu\text{m}$ étant la plus importante quel que soit le sol, suivie en cela par la fraction $20\text{-}200 \mu\text{m}$,
- pour C et C/N, les différences entre "somme" et "sol non fractionné" ne sont pas significatives ; les bilans des contenus en C sont de 96 et 95 g C/100 g C sol pour S11 et S1, respectivement. Quant aux bilans C/N, les rapports calculés pour la "somme" des fractions sont pratiquement identiques à ceux des sols "NF" (C/N de 11,93 contre 12,41 pour S11 ; C/N de 10,06 contre 9,85 pour S1).

Bilans du fractionnement en agrégats (masses, C, C/N). La comparaison des masses des différentes classes d'agrégats (Tableau 2) et des masses des fractions granulométriques de taille correspondante (Tableau 1), nous conduit aux observations suivantes :

- dans le sol S11, 64 g/100 g des MO associées aux particules $0\text{-}20 \mu\text{m}$ (argile + limon fin) se retrouveraient emprisonnés dans des agrégats de taille supérieure à $20 \mu\text{m}$,
- dans le même ordre d'idée, la moitié des macroagrégats Ag $200\text{-}2000 \mu\text{m}$ du sol S1 (et 27 g/100 g de ses mésoagrégats $20\text{-}200 \mu\text{m}$) serait constituée de MO associées à des particules de taille comprise entre 0 et $5 \mu\text{m}$ (en supposant que la F $5\text{-}20 \mu\text{m}$ est uniquement constituée de particules de taille équivalente). En d'autres termes, 57 g/100 g de la fraction granulométrique $0\text{-}5 \mu\text{m}$ proviendrait de la dispersion d'agrégats $20\text{-}2000 \mu\text{m}$,
- à l'inverse de ce que l'on observe pour les micro- et les mésoagrégats, les taux de

macroagrégats 200-2000 μm sont plus élevés après mise en culture que sous prairie.

Les bilans du fractionnement en classes d'agrégats sont présentés dans le Tableau 2. La qualité d'un tel fractionnement peut être appréciée (comme elle l'a été pour le fractionnement granulométrique), en comparant les valeurs de la "somme" des classes d'agrégats (calculée à partir des données des classes d'agrégats individuelles), et les valeurs de l'échantillon de sol NF. Les bilans pondéraux sont de 989 et 993 g /kg sol pour S11 et S1, respectivement. Les bilans de C et C/N sont tout aussi satisfaisants pour les 2 sols.

Caractérisation de la MO dans les fractions granulométriques. Parmi les fractions granulométriques du sol S11, les fractions "limons grossiers" et "sables" sont les plus riches en C (135 et 47g C/kg fraction pour F 200-2000 et F 20-200 μm , respectivement); la fraction F 200-2000 μm apparaissant plus riche que le sol S11 lui-même. A l'inverse, dans le sol S1, ce sont les fractions 0-5 et 5-20 μm qui présentent les plus fortes teneurs en C (16 et 8 g C /kg fraction, respectivement). Les fractions > 20 μm possèdent ici des teneurs en carbone 2 fois moindres que celle du sol NF.

La fraction 0-5 μm des 2 sols représente la plus forte proportion de C total (42 et 65 g C/100 g C sol pour S11 et S1, respectivement). Les proportions de C contenu dans les autres fractions des sols diminuent ensuite dans l'ordre : F 20-200 μm > F 200-2000 μm > F 5-20 μm > W. Les MO associées à cette dernière fraction (fraction W) et essentiellement localisées dans les F < 20 μm , participent pour 2 à 4% du C total.

Après mise en culture, on observe une diminution des contenus en C (g C /kg sol) de toutes les fractions (de 58 à 92g/100 g). La plus forte variation entre S11 et S1 est due pour l'essentiel aux fractions 20-2000 μm , celle de la F 0-5 μm et de la fraction W étant les plus faibles.

Les rapports C/N diminuent généralement des fractions grossières aux fractions fines dans le sol S11, de 23 pour la F 200-2000 μm à 8 pour la F 0-5 μm . On peut observer la même tendance pour les fractions du sol S1. Avec la mise en culture, on remarque surtout une diminution du rapport C/N des fractions > 200 μm . Il n'y a pas de variation significative pour les autres fractions.

Caractérisation de la MO dans les agrégats. Les macroagrégats du sol sous prairie présentent la plus forte teneur en C (57 g C/kg Ag 200-2000 μm ; cf. Tableau 2) par rapport aux 3 autres classes d'agrégats (de 33 à 39 g C/kg selon la classe d'agrégats). A l'opposé, dans le sol mis en culture, ce sont plutôt les agrégats 0-20 μm qui apparaissent enrichis en C (16 et 13 g C/kg agrégats pour Ag 0-5 et Ag 5-20 μm , respectivement), les Ag 20-200 et Ag 200-2000 μm contenant approximativement les mêmes quantités de carbone.

Dans les 2 sols, les Ag 20-200 et 200-2000 μm incorporent la plus forte proportion de C total (21 et 54 g C/100 g C sol respectivement pour S11 ; 31 et 28 g C/100 g C sol pour S1). Par contre, les mésoagrégats de taille 5-20 μm et la fraction hydrosoluble participent très faiblement au C total des 2 sols.

Après quelques années de culture, on assiste comme pour les fractions granulométriques, à une diminution des contenus en C quelle que soit la classe d'agrégats. Cette diminution touche plus particulièrement les Ag > 20 μm , les agrégats de taille 0-5 μm étant les moins affectés par la mise en culture.

Une diminution des rapports C/N des macro- vers les microagrégats peut ici aussi être observée ; elle est toutefois peu marquée pour S11 et S1.

Distribution des monosaccharides dans le matériel végétal, les sols S11 et S1, leurs fractions granulométriques et agrégats

Dans les Tableaux 3 et 4 sont reportées les concentrations en monosaccharides (MS) extraits par hydrolyses successives de la végétation dominante (*Digitaria decumbens*) couvrant le sol sous prairie, des sols sous prairie et sous maraîchage, de leurs fractions granulométriques et agrégats.

Digitaria decumbens. Nous avons consigné dans le Tableau 3 la teneur des monosaccharides contenus dans les différentes parties de *Digitaria decumbens* étudiées. Ce sont des monosaccharides entrant dans la constitution des carbohydrates ou polyosides de structure, constituants essentiels des parois végétales (cellulose, polyosides non cellulosiques ou hémicelluloses, substances pectiques). En effet, ils représentent ici de 58 à 78 g/100 g du matériel végétal. Si l'on compare ensuite les teneurs, on observe que les racines et les tiges sont les plus riches en MS. Les racines et les parties aériennes vivantes apparaissent plutôt constituées par des MS d'origine cellulosique (66 g/100 g MS totaux dans les 2 cas), alors que tiges, parties aériennes mortes et débris (parties aériennes et tiges en état de décomposition) contiennent à peu près autant de sucres cellulosiques que non cellulosiques.

Sols totaux et fractions granulométriques. Le sol sous prairie (S11) présente par rapport au sol sous maraîchage (S1), une plus forte teneur en monosaccharides (8 fois plus) provenant aussi bien de matières hémicellulosiques que de sucres cellulosiques d'origine végétale (Tableau 4). Ceci est à mettre en parallèle avec une augmentation similaire du carbone organique total (50,3 et 11,7 g C/kg sol pour S11 et S1, respectivement) et du carbone présent sous forme de monosaccharides (18,1 g C-MS/100 g C sol pour S11 et 9,5 g C-MS/100 g C sol pour S1). Ce C-MS est surtout libéré au cours de la 1ère hydrolyse (70,4 g/100 g pour S11 et 78,2 g/100 g pour S1). Après quelques années de mise en culture maraîchère, le sol s'appauvrit en MS, plus particulièrement en MS d'origine cellulosique relargués à la 2ème étape d'hydrolyse.

Une partie de la matière organique est bien présente sous forme de sucres dans toutes les fractions granulométriques des 2 sols étudiés (cf. Tableau 4). Cependant, une comparaison des bilans en sucres du sol total S11 et de l'ensemble de ses fractions fait apparaître pour ces dernières, un contenu en C-MS d'origine hémicellulosique bien inférieur à la teneur du sol en ces mêmes sucres (5100 mg C-MS/kg sol pour la "somme" des fractions de S11, 6389 mg C-MS/kg sol pour S11 NF). A l'opposé, la concentration en C-MS d'origine plutôt cellulosique des fractions, est supérieure à celle du sol (4170 et 2688 mg C-MS/kg sol, respectivement). Il est donc possible que l'attaque chimique du sol non fractionné NF et de ses fractions ait été incomplète pendant l'extraction des sucres. Une plus faible récupération en monosaccharides à partir des fractions pourrait également s'expliquer par une perte de sucres hydrosolubles au cours du fractionnement granulométrique. De toute façon, quelle que soit la raison pouvant expliquer une perte en C-MS (allant de 20 à 55 g/100 g), elle doit être tenue en compte dans l'interprétation des différences existant entre fractions (en terme de contenu en MS), ou d'un effet possible de la mise en culture. Une remarque similaire peut être faite pour le sol S1 mis en culture : en effet, 71 g/100 g seulement des sucres hémicellulosiques et 77 g/100 g des sucres totaux de S1 NF se retrouvent dans les fractions analysées. La 1ère étape d'hydrolyse est donc spécialement concernée dans les bilans déficitaires en sucres, fournis par les fractions granulométriques de S11 et S1.

Malgré cela et à l'exception des fractions F 200-2000 µm, la majorité des sucres

monomères est libérée au cours de la 1ère hydrolyse (de 62 à 83 g C-MS/100 g C-MS fraction), certaines fractions présentant une teneur supérieure à celle du sol brut non fractionné. Dans les 2 sols, la MO associée aux argiles, limons et sables fins apparaît donc enrichie en sucres hémicellulosiques alors que les fractions les plus grossières sont, elles, caractérisées par des sucres typiques de matières cellulosiques. On a ainsi de 2 à 5 fois plus de sucres hémicellulosiques que cellulosiques dans les fractions F 0-5, F 5-20 et F 20-200 μm , quel que soit le sol. Par contre, si la F 200-2000 μm du sol S11 contient près de 12 fois plus de sucres cellulosiques que d'autres sucres, cette proportion diminue par 4 après mise en culture maraîchère.

Comme cela a déjà été observé pour le carbone des fractions granulométriques du sol sous prairie S11, la plus forte concentration de C-MS (mg C-MS/kg fraction) se retrouve dans la fraction 200-2000 μm de ce même sol, la fraction limoneuse 5-20 μm étant la moins riche, ce qui est en accord avec sa teneur en MO (cf. Tableau 1). Cette observation ne se confirme pas après mise en culture : dans le sol S1, c'est la fraction fine 0-5 μm qui présente la plus forte teneur en C-MS, suivie par F > 200, F 5-20 puis F 20-200 μm , comme cela l'était pour leur teneur en matière organique.

Dans les 2 situations étudiées, les fractions 0-5 μm incorporent les plus fortes proportions de C-MS du sol brut dont elles sont issues, les fractions F 20-2000 μm occupant une position intermédiaire entre ces fractions fines et les F 5-20 μm . A la mise en culture, les contenus en C-MS (mg C-MS/kg sol) de toutes les fractions diminuent très fortement (de 80 à 97 g/100 g, des fractions fines vers les fractions grossières). Même si l'on tenait compte des pertes en monosaccharides signalées ci-dessus au cours de la 1ère hydrolyse des fractions, de 76 à 98 g/100 g des sucres cellulosiques seraient perdus après plusieurs années de mise en culture maraîchère. Dans les 2 cas, ce sont surtout les fractions > 20 μm qui apparaissent les plus affectées par la mise en culture.

Agrégats. En ce qui concerne les monosaccharides extraits à partir des différentes classes d'agrégats de S11 et S1, les bilans ("somme" des classes d'agrégats/sol brut non fractionné ; cf. Tableau 4) en C-MS ne peuvent être considérés comme tout à fait satisfaisants. Dans un sol comme dans l'autre, la "somme" des classes d'agrégats présentent un contenu en C-MS plus élevé que le sol NF lui-même. Ceci confirme l'observation précédemment faite : une partie des sucres constitutifs de S11 et S1 bruts (sucres d'origine hémicellulosique aussi bien que cellulosique), n'a pas pu être extraite par la série d'attaques chimiques mises en oeuvre.

Quel que soit le sol considéré, la majorité des sucres extraits de chaque classe d'agrégats, est issue de matières hémicellulosiques (de 63 à 89 g C-MS/100 g C-MS agrégats). Dans les 2 sols, la classe d'agrégats Ag 200-2000 μm se distingue ainsi de la fraction de taille correspondante par une dominance de monosaccharides non cellulosiques (2 et 3 fois plus que de MS cellulosiques pour S11 et S1, respectivement).

Dans les 2 situations, les macroagrégats Ag 200-2000 μm apparaissent enrichis en C-MS par rapport aux autres classes d'agrégats ; ceci est bien en accord avec la teneur en C des agrégats du sol sous prairie ; mais il n'en est de même dans le sol cultivé où ce sont les agrégats Ag 0-5 μm qui présentent la plus forte teneur en C.

Toutefois, le stockage le plus important de C-MS total est bien observé au niveau des macroagrégats (64 et 40 g C-MS/100 g C-MS sol, pour S11 et S1 respectivement) puis dans les mésoagrégats Ag 20-200 μm de ces 2 sols. Comme les fractions de même taille, les Ag 5-20 μm participent le plus faiblement au C-MS total. Après quelques années de culture maraîchère, on observe une diminution des contenus en MS de toutes les classes d'agrégats,

plus particulièrement des méso- et macroagrégats : 89 g/100 g C-MS des Ag 5-200 μm et 86 g/100 g C-MS des Ag > 200 μm disparaissent ainsi.

Composition en monosaccharides du matériel végétal, des sols S11 et S1, de leurs fractions granulométriques et agrégats

Les compositions en MS de *Digitaria decumbens*, des sols et de leurs fractions granulométriques et classes d'agrégats sont reportées dans les Tableaux 5 à 7, et leur distribution illustrée par les Figures 1 à 3.

Digitaria decumbens. Quelle que soit la partie de *Digitaria* considérée, le glucose est toujours le sucre le plus abondant (de 34 à 57 g/100 g totaux), suivi en proportions variables par le xylose (il varie de 13 à 31 g/100 g MS totaux) et le galactose (de 6 à 20 g/100 g MS totaux). Ces 3 monosaccharides représentent de 78 à 89 g/100 g des sucres totaux mis en évidence dans *Digitaria* (Figure 1). A l'exception des tiges où l'on en trouve des quantités identiques à chaque étape d'hydrolyse, le glucose identifié dans les racines, parties aériennes et débris serait plutôt d'origine cellulosique (cf. Tableau 5). Le xylose apparaît lui, impliqué dans des structures de type hémicellulosique ; on le retrouve surtout dans les racines et en plus faibles quantités dans les parties aériennes vivantes. A l'opposé, le galactose est plus présent dans les parties aériennes que dans les racines. Quant au mannose, il varie de 4 g/100 g dans les racines à 8 g/100 g dans les tiges. Ces observations sont confirmées par les valeurs des rapports xylose/mannose : peu élevées dans les tiges et les parties aériennes, elles deviennent plus importantes dans les débris et les racines. A l'inverse, les rapports r (mannose + galactose/arabinose + xylose), sont plus élevés dans les tiges et les parties aériennes. Ces valeurs, ajoutées à celles des rapports hexoses/pentoses, témoignent également des teneurs en hexoses toujours supérieures à celles en pentoses, notamment dans les parties aériennes vivantes et les tiges. En effet, l'arabinose ne représente que 4 à 9 g/100 g des sucres et le ribose (comme les pentoses méthylés, rhamnose et fucose), n'existe qu'en quantités encore plus faibles (< 4 g/100 g MS totaux). Signalons enfin que les pentoses (arabinose, ribose, xylose) sont extraits dans leur grande majorité au cours de la 1ère hydrolyse et peuvent être considérés comme des sucres non cellulosiques ; à l'opposé, les hexoses (mannose, galactose, glucose) prédominent à la seconde étape, après attaque de la cellulose.

Sols totaux et fractions granulométriques. Les hexoses représentent la majorité des monosaccharides des 2 sols étudiés (58 et 70 g/100 g MS totaux pour S11 et S1, respectivement ; cf. Tableaux 6 et 7) et sont surtout libérés par la première hydrolyse. Parmi les MS identifiés (Figures 2 et 3), le glucose est toujours le plus abondant (41 et 43 g/100 g MS totaux dans S11 et S1, respectivement) et peut provenir, de par les quantités qui en sont relarguées à chaque étape, de polymères aussi bien cellulosiques qu'hémicellulosiques. Il est suivi dans le sol sous prairie par le xylose, sucre considéré comme un bon traceur végétal ; le xylose se trouve en effet, en abondance dans *Digitaria decumbens* comme nous l'avons remarqué ci-dessus. Retrouvé presque uniquement dès la 1ère hydrolyse de S11 et S1, il entre dans la constitution de sucres hémicellulosiques. Dans le sol mis en culture maraîchère, le glucose est suivi par le galactose et le mannose en proportions égales. On trouve ensuite pour les 2 sols une composition à peu près similaire où arabinose et ribose représentent de 6 à 9 g/100 g de MS totaux et où rhamnose, fucose varient de 4 à 5 g/100 g MS totaux. Le rapport, r , des teneurs en mannose + galactose/arabinose + xylose, caractérise l'importance de la

décomposition des débris végétaux et de l'accumulation de produits de synthèse microbiens (Oades, 1984). Il est inférieur à 1 dans le sol sous prairie, suggérant ainsi que ce sol contient une plus forte proportion de carbohydrates d'origine végétale. Inversement, dans le sol sous culture, ce rapport est supérieur à 1, et traduirait la présence de polysaccharides d'appartenance microbienne.

Le glucose est toujours le sucre dominant dans les fractions granulométriques des deux sols (Figures 2 et 3) et représente 33 à 86 g/100 g des MS totaux, avec une proportion plus forte dans les fractions F 200-2000 μm ; on le retrouve en proportions plus faibles dans les F 0-5 μm où il est, à l'inverse des fractions plus grossières, surtout relargué à la 1ère hydrolyse. On constate ensuite les mêmes tendances de variation dans les compositions en sucres que celles décrites pour les sols non fractionnés (Tableaux 6 et 7). Les deux sucres aux variations les plus significatives sont le xylose (sucre essentiellement d'origine végétale) et le mannose (plus ou moins considéré comme traceur d'une activité microbienne ; Cheshire, 1979). Ainsi la fraction grossière 200-2000 μm est enrichie en xylose (qui devient le MS le plus important après le glucose), ce qui est en accord avec le caractère figuré végétal de cette fraction. Au contraire, les teneurs moins élevées en xylose et plus fortes en mannose des fractions F 0-5 et F 5-20 μm indiquent que la source directe de matière organique pour les fractions < 20 μm des deux sols pourrait provenir soit du métabolisme microbien soit d'exsudats racinaires. En conséquence, le rapport xylose/mannose augmente des fractions fines vers les fractions grossières. Inversement, le rapport r doit diminuer des fractions fines aux fractions grossières. C'est bien ce que l'on constate pour S11 et S1, si l'on fait abstraction de la fraction 5-20 μm dont le rapport r est ici trop élevé ; ce rapport devrait en effet, être compris entre les valeurs r des fractions de taille immédiatement voisine ($0,60 < r_{F5-20 \mu\text{m}} < 1,49$ pour S11 ; $1,12 < r_{F5-20 \mu\text{m}} < 1,43$ pour S1). En revanche, si l'on regroupe les fractions 0-5 et 5-20 μm en une seule, le rapport r correspondant à cette nouvelle fraction ($r_{F0-20 \mu\text{m}} = 1,55$, pour S11 ; $r_{F0-20 \mu\text{m}} = 1,44$, pour S1) permet bien d'observer une décroissance des rapports r vers les fractions plus grossières. Les autres sucres identifiés représentent moins de 10 g/100 g de sucres totaux, sans différence significative entre les différentes fractions de S11 et S1.

L'ensemble des fractions se caractérise ainsi, comme les sols bruts NF, par des quantités plus importantes d'hexoses (qui, avec les déoxyhexoses et les sucres n'existant qu'en très faibles quantités, sont normalement considérés comme des métabolites microbiens) que de pentoses (sucres d'origine plutôt végétale) ; les valeurs les plus fortes sont obtenues pour les fractions 200-2000 μm dont elles indiquent ici l'origine végétale et confirment la valeur du rapport r : en effet, libérés dans leur grande majorité au cours de la 2ème étape, ces hexoses sont presque uniquement représentés par du glucose issu de la dégradation de la cellulose. A l'inverse, la plus grande partie des hexoses contenus dans les fractions < 200 μm sont extraits dès la 1ère hydrolyse tout comme l'ensemble des pentoses. Une comparaison des bilans en pentoses et hexoses de l'ensemble des fractions et des bilans obtenus pour les sols totaux NF, nous permet de confirmer les pertes en MS déjà signalées. Ainsi, l'hydrolyse des fractions de S11 se traduit par la perte de 30 g/100 g des pentoses existant dans le sol sous prairie ; à l'inverse, le rendement de ces fractions en hexoses est supérieur à celui du sol lui-même. De même, les différentes hydrolyses effectuées sur les fractions granulométriques du sol S1, ne permettent de récupérer que 77 g/100g des pentoses et des hexoses de ce sol.

Agrégats. Les bilans (somme des classes d'agrégats/sol non fractionné) en MS font apparaître des différences qui viennent renforcer l'hypothèse d'une hydrolyse incomplète du sol NF lui-même (cf. Tableaux 6 et 7). En effet, le rendement en hexoses des agrégats, toutes

classes confondues, est 1,2 fois supérieur à celui du sol NF. Ceci étant, on observe encore une prédominance des hexoses par rapport aux pentoses, quelle que soit la classe d'agrégats considérée. Dans les deux sols, cette différence est particulièrement accentuée dans les agrégats 5-20 μm . Ce sont toutefois les macroagrégats Ag 200-2000 μm qui contiennent le plus de pentoses et d'hexoses, les contenus diminuant ensuite dans l'ordre : Ag 20-200 μm > Ag 0-5 μm > Ag 5-20 μm . A l'exception des Ag > 200 μm où les hexoses proviennent autant de la dégradation de la cellulose que des hémicelluloses (ce qui n'est pas le cas des fractions de taille analogue), l'ensemble des pentoses et hexoses sont extraits majoritairement dès la première étape d'hydrolyse.

L'importance des hexoses s'explique par la dominance du glucose (de 31 à 49 g/100 g MS totaux) dans toutes les classes d'agrégats de S11 et S1. Dans le sol sous prairie, le glucose est suivi par le xylose dans les macroagrégats Ag > 200 μm et les Ag 20-200 μm (19 et 17 g/100 g MS totaux, respectivement), et par le mannose dans les agrégats 5-20 μm et les microagrégats 0-5 μm (13 et 14 g/100 g MS totaux, respectivement). On retrouve donc ici ce qui avait été observé au niveau des fractions granulométriques : le mannose augmente systématiquement des macroagrégats aux microagrégats alors que le xylose diminue dans le même sens (cf. Figures 2 et 3). Le rapport xylose/mannose diminue donc fortement des agrégats 200-2000 μm vers les agrégats 0-5 μm . Ces derniers ont un rapport identique à celui des agrégats 5-20 μm . Les rapports r varient comme ceux des fractions granulométriques et montrent également une valeur élevée dans les agrégats 5-20 μm . Leur valeur inférieure à 1 dans les Ag 20-200 μm et les Ag > 200 μm indique bien une plus forte proportion de carbohydrates d'origine végétale, par opposition aux Ag < 20 μm où prédomineraient des carbohydrates synthétisés par les microorganismes.

Le galactose -qui représente de 8 à 13 g/100 g MS totaux-, augmente comme le mannose des Ag > 200 μm aux Ag 0-5 μm . Avec les trois premiers monomères (glucose, xylose, mannose), il constitue de 68 à 81 g/100 g des sucres extraits de S11. Cette proportion varie de 49 à 74 g/100 g dans le sol mis en culture. Le xylose et le mannose y ont moins d'importance, le galactose devenant après le glucose, le sucre le plus abondant ; il devance le mannose dans les agrégats < 200 μm et le xylose dans les macroagrégats. On observe la même variation des rapports xylose/mannose que celle rencontrée pour les agrégats du sol S11 avec cependant des valeurs inférieures. Les rapports r varient bien en sens inverse et montrent une valeur élevée dans les Ag 5-20 μm mais sont supérieurs aux rapports r du sol S11. On peut remarquer dans les macroagrégats Ag 200-2000 μm des sols S11 et S1, que les 4 sucres dominants (glucose, xylose, galactose, mannose) 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 F 200-2000 μm par les teneurs plus importantes en certains sucres. Enfin, parmi les sucres identifiés dans les agrégats des deux sols, arabinose et ribose constituent de 5 à 10 g/100 g de MS totaux, le fucose et le rhamnose étant un peu moins représentés.

CONCLUSION

On assiste bien après quelques années de culture du sol sous prairie à une diminution

de sa teneur en carbone. Un fractionnement granulométrique du sol avant et après mise en culture montre que toutes les fractions sont concernées par la diminution de la teneur en carbone ; la mise en culture s'exprime également par une diminution des rapports C/N des fractions "débris végétaux" $> 200 \mu\text{m}$. Un fractionnement en agrégats montre la même tendance, les méso- et macroagrégats étant les plus affectés par le mode de gestion du sol. Cette diminution du carbone touche spécialement les compartiments saccharidiques du sol et notamment les saccharides d'origine cellulosique. On note plus particulièrement une baisse de leur contenu dans les fractions $F > 20 \mu\text{m}$ et les $Ag > 5 \mu\text{m}$.

Il ne semble pas y avoir d'effet du mode de gestion du sol sur les compositions en sucres des différentes fractions et classes d'agrégats : quelle que soit la fraction ou classe d'agrégats considérée avant et après mise en culture, il y a toujours une très large dominance du glucose puis du xylose, du galactose ou du mannose. Cependant, il est important de noter qu'après quelques années de culture, les proportions de xylose diminuent dans l'ensemble des fractions et agrégats ainsi que les rapports xylose/mannose correspondants. Ceci s'expliquerait par l'absence de restitutions organiques dans le sol cultivé. Là où le xylose dominait le galactose et le mannose (sol NF, Ag 20-200 μm , Ag 200-2000 μm), l'inverse est observé après mise en culture. Les proportions de xylose dans les fractions F 20-200 μm et F 200-2000 μm diminuent elles aussi, mais sans que les proportions xylose/mannose ou xylose/galactose s'inversent. L'étude de *Digitaria*, végétation quasi monospécifique couvrant le sol sous prairie, nous a permis d'isoler deux sucres monomères très abondants dans chaque partie de la graminée étudiée (racines, tiges, parties aériennes, débris) : le glucose et le xylose. Si l'origine du glucose présent dans le sol peut être aussi bien végétale que microbienne, le xylose lui, est principalement retrouvé dans le règne végétal. Il peut donc être considéré comme un bon traceur des sucres provenant des restitutions organiques au sol par *Digitaria*. Sa présence plus ou moins importante et celle du mannose ont permis de plus d'attribuer une origine végétale ou microbienne aux matières organiques associées aux fractions granulométriques ou classes d'agrégats. On peut ainsi opposer les fractions ou agrégats de taille supérieure à 20 μm , d'origine végétale, aux fractions et agrégats $< 20 \mu\text{m}$ où il y aurait partiellement stockage de matière organique par voie microbienne.

REFERENCES

- Cheshire M. V. (1979) *Nature and Origin of Carbohydrates in Soils*. Academic Press, London.
- 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*, pp. 263-307. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Gavinelli E., Feller C., Larré-Larrouy M. 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, 1749-1760.
- 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, 69-78.
- Larré-Larrouy M.C. and Feller C. (1997) Determination of carbohydrates in two ferrallitic

soils : Analysis by capillary gas chromatography after derivatization by silylation. *Soil Biology and Biochemistry* 29, 9-10, 1585-1589.

Oades J. M. (1984) Soil organic matter and structural stability : Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76, 319-337.

Oades J. M., Kirkman M. A. and Wagner G. H. (1970) The use of gas-liquid chromatography for the determination of sugars extracted from soils by sulfuric acid. *Soil Science Society of America Proceedings* 34, 230-235.

Tableau 1 Bilans pondéraux, teneurs en carbone et rapports C/N des sols sous prairie (S11), maraîchage (S1) et de leurs fractions granulométriques*

Sol	Fraction (μm)	Masse		C			C/N
		traitement H2O2	sans traitement H2O2	(g/kg fraction)	(g/kg sol)	(g/100g C sol)	
S11	F 0-5	506	536	39,4	21,1	42	8
	F 5-20	114	120	19,6	2,3	5	14
	F 20-200	173	260	47,4	12,3	25	14
	F 200-2000	73	83	135,1	11,2	22	23
	W		n d	n d	1,2	2	
	MO	86					
	Total**	866	999		48,2	96	12
	Sol NF	1000	1000		50,3	100	12
S1	F 0-5	469	474	16,1	7,6	65	8
	F 5-20	96	88	7,9	0,7	6	13
	F 20-200	200	277	5,0	1,4	12	14
	F 200-2000	178	163	5,5	0,9	8	17
	W		n d	n d	0,5	4	
	MO	20					
	Total***	943	1002		11,1	95	10
	Sol NF	1000	1000		11,7	100	10

* moyenne de trois déterminations

** somme des fractions

n d., non déterminée

W, fraction hydrosoluble

MO, matière organique

Sol NF, sol non fractionné

Tableau 2 Bilans pondéraux, teneurs en carbone et rapports C/N de différentes classes d'agrégats* des sols sous prairie (S11) et maraîchage (S1)

Sol	Classe d'agrégats (μm)	Masse		C		C/N
		(g/kg sol)	(g/kg agrégats)	(g/kg sol)	(g/100g C sol)	
S11	Ag 0-5	162	32,9	5,3	11	8
	Ag 5-20	77	28,8	2,2	4	11
	Ag 20-200	270	39,0	10,5	21	12
	Ag 200-2000	479	56,6	27,1	54	13
	W	n d		0,4	1	
	Total**	989		45,6	91	12
	Sol NF	1000		50,3	100	12
	S1	Ag 0-5	203	15,6	3,2	27
Ag 5-20		87	12,5	1,1	9	10
Ag 20-200		377	9,7	3,7	31	10
Ag 200-2000		325	10,1	3,3	28	11
W		n d		0,1	1	
Total***		993		11,3	97	10
Sol NF		1000		11,7	100	10

* moyenne de trois déterminations

** somme des classes d'agrégats

n d., non déterminé

W, fraction hydrosoluble

MO, matière organique

Sol NF, sol non fractionné

Tableau 3. Distribution des monosaccharides (MS) et du carbone des monosaccharides (C-MS) dans *Digitaria decumbens*

Digitaria decumbens	MS libérés durant hydrolyse			C-MS libéré durant hydrolyse			C-MS libéré durant hydrolyse		
	# 1	# 2 + 3	Total	# 1	# 2 + 3	Total	# 1	# 2 + 3	Total
	(g/kg p a.)			(g/kg p a.)			(g/100 g C-MS total p a.)		
Racines	261	515	776	105	206	311	33,7	66,3	100,0
Tiges	422	327	749	169	131	300	56,4	43,6	100,0
P. aériennes vivantes	217	416	633	87	167	254	34,3	65,7	100,0
P. aériennes mortes	304	324	628	122	130	252	48,5	51,5	100,0
Débris	327	257	584	132	103	234	56,1	43,9	100,0

Débris : parties aériennes, tiges ; le tout étant déjà en état de décomposition

1 : 1ère hydrolyse, avec H₂SO₄ 2,5 M

2 + 3 : 2ème et 3ème hydrolyses, avec H₂SO₄ 12 M puis H₂SO₄ 0,5 M.

p a., partie de *Digitaria decumbens* analysée (racines, tiges, parties aériennes, débris)

Tableau 4 Distribution des monosaccharides (MS) et du carbone des monosaccharides (C-MS) dans les sols sous prairie (S11), maraichage (S1), leurs fractions granulométriques et classes d'agrégats

Sol	Fraction	Agregats (µm)	MS libérés durant hydrolyse			C-MS libéré durant hydrolyse			C-MS libéré durant hydrolyse			C-MS libéré durant hydrolyse			C-MS total libéré (g/100 g C sol)				
			# 1	# 2-3	Total	# 1	# 2+3	Total	# 1	# 2-3	Total	# 1	# 2-3	Total					
			(mg/kg fraction ou agrégats)			(mg/kg fraction ou agrégats)			(mg/kg sol)			(g/100 g C-MS fraction ou agrégats)			(g/100 g C-MS sol)				
S11	F 0-5		12168	2550	14718	4940	1026	5966	2647	550	3196	82,8	17,2	100,0	28,6	5,9	34,5	6,4	
	F 5-20		5602	3507	9110	2253	1403	3657	270	168	438	61,6	38,4	100,0	2,9	1,8	4,7	0,9	
	F 20-200		18625	7401	26026	7501	2967	10469	1951	772	2723	71,7	28,3	100,0	21,0	8,5	29,4	5,4	
	F 200-2000		6883	80831	87714	2801	32341	35142	232	2681	2913	8,0	92,0	100,0	2,5	28,9	31,4	5,8	
	Total								5106	4170	9270				55,0	45,0	100,0	18,4	
		Ag 0-5		8593	1134	9727	3493	455	3948	567	74	641	88,5	11,5	100,0	5,6	0,7	6,3	1,3
		Ag 5-20		8633	2798	11431	3493	1120	4613	270	87	356	75,7	24,3	100,0	2,7	0,9	3,5	0,7
		Ag 20-200		18118	6277	24395	7319	2514	9833	1978	679	2658	74,4	25,6	100,0	19,5	6,7	26,2	5,3
		Ag 200-2000		21266	12384	33650	8582	4962	13544	4111	2377	6487	63,4	36,6	100,0	40,5	23,4	64,0	12,9
		Total								6926	3216	10142				68,3	31,7	100,0	20,2
	Sol NF		15807	6697	22504				6389	2688	9077				70,4	29,6	100,0	18,1	
S1	F 0-5		2600	699	3299	1053	279	1333	499	132	632	79,0	21,0	100,0	58,2	15,4	73,6	5,4	
	F 5-20		698	381	1079	281	153	433	25	13	38	64,8	35,2	100,0	2,9	1,6	4,5	0,3	
	F 20-200		615	165	779	248	66	314	69	18	87	79,0	21,0	100,0	8,0	2,1	10,1	0,7	
	F 200-2000		392	1160	1553	157	464	621	26	76	101	25,3	74,7	100,0	3,0	8,8	11,8	0,9	
	Total								618	240	858				72,0	28,0	100,0	7,3	
		Ag 0-5		3092	448	3540	1253	179	1432	254	36	291	87,5	12,5	100,0	18,4	2,6	21,0	2,5
		Ag 5-20		2382	568	2950	964	200	1164	84	17	101	82,8	17,2	100,0	6,0	1,3	7,3	0,9
		Ag 20-200		2247	638	2884	910	251	1161	343	95	438	78,4	21,6	100,0	24,8	6,8	31,6	3,7
		Ag 200-2000		2863	1392	4256	1158	551	1709	377	179	556	67,8	32,2	100,0	27,2	12,9	40,1	4,7
		Total								1058	328	1386				76,4	23,6	100,0	11,8
	Sol NF		2155	607	2763				871	243	1114				78,2	21,8	100,0	9,5	

1 : 1ère hydrolyse, avec H2SO4 2,5 M.

2 + 3 : 2ème et 3ème hydrolyses, avec H2SO4 12 M puis H2SO4 0,5 M.

Sol NF, sol non fractionné.

Tableau 5 Composition en monosaccharides de *Digitaria decumbens*

<i>Digitaria decumbens</i>	Ara	Rha	Rib	Fuc	Xyl	Man	Gal	Glc	Total	Pentoses	Hexoses	Hexoses / Pentoses	r	Xyl / Man
	(g/kg p.a.)								(g/kg p.a.)					
Racines														
Hydrolyse # 1	24	1	17	5	165	3	11	36	261	0,21	0,05			
Hydrolyses # 2 - 3	10	n.i.	5	n.i.	72	28	35	364	515	0,09	0,43			
Hydrolyses totales	34	1	22	5	237	31	46	400	776	0,29	0,48	1,63	0,28	7,73
Tiges														
Hydrolyse # 1	31	6	14	12	155	6	35	164	422	0,20	0,20			
Hydrolyses # 2 - 3	9	1	n.i.	n.i.	26	54	58	179	327	0,03	0,29			
Hydrolyses totales	39	6	14	12	180	60	93	343	749	0,23	0,50	2,12	0,70	3,00
Parties aériennes vivantes														
Hydrolyse # 1	37	3	13	4	64	3	22	70	217	0,11	0,09			
Hydrolyses # 2 + 3	4	5	3	n.i.	18	21	74	292	416	0,02	0,39			
Hydrolyses totales	41	8	16	4	82	23	96	362	633	0,14	0,48	3,44	0,96	3,52
Parties aériennes mortes														
Hydrolyse # 1	49	8	22	5	129	6	28	58	304	0,20	0,09			
Hydrolyses # 2 + 3	7	3	3	n.i.	21	37	96	158	324	0,03	0,29			
Hydrolyses totales	55	11	25	5	150	43	124	216	628	0,23	0,38	1,66	0,81	3,46
Débris														
Hydrolyse # 1	47	10	17	11	152	5	27	58	327	0,22	0,09			
Hydrolyses # 2 + 3	2	1	n.i.	n.i.	12	19	42	181	256	0,01	0,24			
Hydrolyses totales	49	10	18	12	164	24	68	239	584	0,23	0,33	1,44	0,43	6,94

1 : 1ère hydrolyse, avec H2SO4 2,5 M

2 + 3 : 2ème et 3ème hydrolyses, avec H2SO4 12 M puis H2SO4 0,5 M

Débris : parties aériennes, tiges ; le tout étant déjà en état de décomposition.

n.i., non identifié.

p.a., partie de *Digitaria decumbens* analysée (racines, tiges, parties aériennes, débris)

Ara, arabinose ; Rha, rhamnose ; Rib, ribose ; Fuc, fucose ; Xyl, xylose ; Man, mannose ; Gal, galactose ; Glc, glucose

r, mannose + galactose / arabinose + xylose

Tableau 6. Composition en monosaccharides du sol sous prairie (S1), de ses fractions granulométriques et classes d'agrégats

Fraction ou Agrégats (μm)	Ara	Rha	Rib	Fuc	Xyl	Man	Gal	Glc	Total	Pentoses	Hexoses	Pentoses ($\mu\text{g/kg sol}$)	Hexoses	Hexoses / Pentoses	r	Xyl / Man
	(mg/kg fraction ou agrégats)								(g/kg fraction ou agrégats)			(g/kg sol)				
Fraction																
F 0-5																
Hydrolyse # 1	1289	1208	954	652	1207	1619	1824	3416	12,17	3,45	6,86					
Hydrolyses # 2 + 3	146	75	96	83	65	290	290	1505	2,55	0,31	2,08					
Hydrolyses totales	1436	1283	1049	735	1272	1910	2114	4919	14,72	3,76	8,94	2,01	4,79	2,38	1,49	0,67
F 5-20																
Hydrolyse # 1	309	206	220	116	666	832	1449	1804	5,60	1,20	4,09					
Hydrolyses # 2 + 3	41	11	15	n.i.	30	43	62	3305	3,51	0,09	3,41					
Hydrolyses totales	350	217	235	116	696	875	1511	5110	9,11	1,28	7,50	0,15	0,90	5,85	2,28	0,80
F 20-200																
Hydrolyse # 1	2013	935	1149	384	5404	1940	2390	4411	18,63	8,57	8,74					
Hydrolyses # 2 + 3	262	109	146	67	176	229	192	6219	7,40	0,58	6,64					
Hydrolyses totales	2275	1045	1295	451	5579	2169	2582	10630	26,03	9,15	15,38	2,38	4,00	1,68	0,60	2,57
F 200-2000																
Hydrolyse # 1	738	591	371	639	3394	262	327	560	6,88	4,50	1,15					
Hydrolyses # 2 + 3	1269	62	338	151	2510	1081	368	75051	80,83	4,12	76,50					
Hydrolyses totales	2007	653	709	790	5904	1343	695	75611	87,71	8,62	77,65	0,71	6,44	9,01	0,26	4,40
Agrégats																
Ag 0-5																
Hydrolyse # 1	899	922	638	503	1009	1211	1256	2154	8,59	2,55	4,62					
Hydrolyses # 2 + 3	52	10	47	21	n.i.	106	38	860	1,13	0,10	1,00					
Hydrolyses totales	952	933	685	523	1009	1317	1293	3014	9,73	2,65	5,62	0,43	0,91	2,13	1,33	0,77
Ag 5-20																
Hydrolyse # 1	742	664	800	348	1092	1304	1196	2486	8,63	2,63	4,99					
Hydrolyses # 2 + 3	63	6	33	23	26	135	111	2402	2,80	0,12	2,65					
Hydrolyses totales	805	669	833	372	1118	1439	1307	4888	11,43	2,76	7,63	0,21	0,59	2,77	1,43	0,78
Ag 20-200																
Hydrolyse # 1	1841	1077	1303	781	3924	2057	2394	4739	18,12	7,07	9,19					
Hydrolyses # 2 + 3	254	28	76	38	196	209	204	5272	6,28	0,53	5,69					
Hydrolyses totales	2095	1105	1379	819	4120	2267	2598	10011	24,39	7,59	14,88	2,05	4,02	1,96	0,78	1,82
Ag 200-2000																
Hydrolyse # 1	2476	1118	1590	824	6160	1994	2464	4639	21,27	10,23	9,10					
Hydrolyses # 2 + 3	400	72	260	138	372	416	361	10365	12,38	1,03	11,14					
Hydrolyses totales	2876	1190	1850	962	6532	2410	2825	15005	33,65	11,26	20,24	5,39	9,69	1,80	0,56	2,71
Sol NF																
Hydrolyse # 1	1587	1013	1708	686	3496	1541	1790	3986	15,81			6,79	7,32			
Hydrolyses # 2 + 3	264	106	214	125	248	351	199	5191	6,70			0,73	5,74			
Hydrolyses totales	1851	1119	1922	811	3744	1891	1989	9177	22,50			7,52	13,06	1,74	0,69	1,98

1 : 1ère hydrolyse, avec H2SO4 2,5 M.

2 + 3 : 2ème et 3ème hydrolyses, avec H2SO4 12 M puis H2SO4 0,5 M.

Sol NF: sol non fractionné.

n.i., non-identifié

Ara, arabinose ; Rha, rhamnose ; Rib, ribose ; Fuc, fucose ; Xyl, xylose ; Man, mannose ; Gal, galactose ; Glc, glucose

r, mannose + galactose / arabinose + xylose.

Tableau 7. Composition en monosaccharides du sol sous maraichage (S1), de ses fractions granulometriques et classes d'agrégats

Fraction ou Agrégats (μm)	Ara	Rha	Rib	Fuc	Xyl	Man	Gal	Glc	Total	Pentoses	Hexoses	Pentoses (g/kg sol)	Hexoses (g/kg sol)	Hexoses / Pentoses	r	Xyl / Man
	(mg/kg fraction ou agrégats)								(g/kg fraction ou agrégats)		(g/kg sol)					
Fraction																
F 0-5																
Hydrolyse # 1	300	184	151	148	158	371	504	783	2,60	0,61	1,66					
Hydrolyses # 2 + 3	153	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	546	0,70	0,15	0,55					
Hydrolyses totales	453	184	151	148	158	371	504	1329	3,30	0,76	2,20	0,36	1,04	2,89	1,43	0,43
F 5-20																
Hydrolyse # 1	50	21	33	27	61	114	114	277	0,70	0,14	0,51					
Hydrolyses # 2 + 3	25	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	26	n.i.	330	0,38	0,03	0,36					
Hydrolyses totales	76	21	33	27	61	140	114	607	1,08	0,17	0,86	0,01	0,08	5,07	1,86	0,44
F 20-200																
Hydrolyse # 1	76	23	42	30	88	76	99	182	0,61	0,21	0,36					
Hydrolyses # 2 + 3	3	n.i.	3	n.i.	n.i.	5	8	145	0,16	0,01	0,16					
Hydrolyses totales	79	23	44	30	88	81	107	327	0,78	0,21	0,51	0,06	0,14	2,43	1,12	1,08
F 200-2000																
Hydrolyse # 1	55	n.i.	26	10	71	20	33	176	0,39	0,15	0,23					
Hydrolyses # 2 + 3	30	n.i.	n.i.	n.i.	19	26	23	1063	1,16	0,05	1,11					
Hydrolyses totales	86	n.i.	26	10	89	46	56	1239	1,55	0,20	1,34	0,03	0,22	6,66	0,58	1,94
Agrégats																
Ag 0-5																
Hydrolyse # 1	296	230	356	179	205	338	649	838	3,09	0,86	1,82					
Hydrolyses # 2 + 3	27	n.i.	3	8	n.i.	58	59	293	0,45	0,03	0,41					
Hydrolyses totales	323	230	359	187	205	396	708	1130	3,54	0,89	2,23	0,18	0,45	2,52	2,09	0,52
Ag 5-20																
Hydrolyse # 1	204	156	266	127	159	386	429	655	2,38	0,63	1,47					
Hydrolyses # 2 + 3	13	n.i.	18	n.i.	n.i.	70	68	399	0,57	0,03	0,54					
Hydrolyses totales	218	156	284	127	159	456	496	1054	2,95	0,66	2,01	0,06	0,17	3,04	2,53	0,35
Ag 20-200																
Hydrolyse # 1	266	167	206	118	277	279	344	590	2,25	0,75	1,21					
Hydrolyses # 2 + 3	27	n.i.	10	10	20	56	46	470	0,64	0,06	0,57					
Hydrolyses totales	293	167	215	127	296	336	390	1060	2,88	0,80	1,79	0,30	0,67	2,22	1,23	0,88
Ag 200-2000																
Hydrolyse # 1	280	190	411	144	319	255	333	931	2,86	1,01	1,52					
Hydrolyses # 2 + 3	29	7	14	8	32	92	38	1173	1,39	0,07	1,30					
Hydrolyses totales	309	197	425	152	351	347	371	2104	4,26	1,09	2,82	0,35	0,92	2,60	1,09	1,01
Sol NF																
Hydrolyse # 1	224	122	147	110	198	320	371	662	2,16			0,57	1,35			
Hydrolyses # 2 + 3	19	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	48	18	512	0,60			0,02	0,58			
Hydrolyses totales	243	122	157	110	198	368	389	1174	2,76			0,60	1,93	3,23	1,72	0,54

1 : 1ère hydrolyse, avec H2SO4 2,5 M

2 + 3 : 2ème et 3ème hydrolyses, avec H2SO4 12 M puis H2SO4 0,5 M

Sol NF, sol non fractionné

n.i., non-identifié.

Ara, arabinose ; Rha, rhamnose ; Rib, ribose ; Fuc, fucose ; Xyl, xylose ; Man, mannose ; Gal, galactose ; Glc, glucose

r, mannose + galactose / arabinose - xylose

111

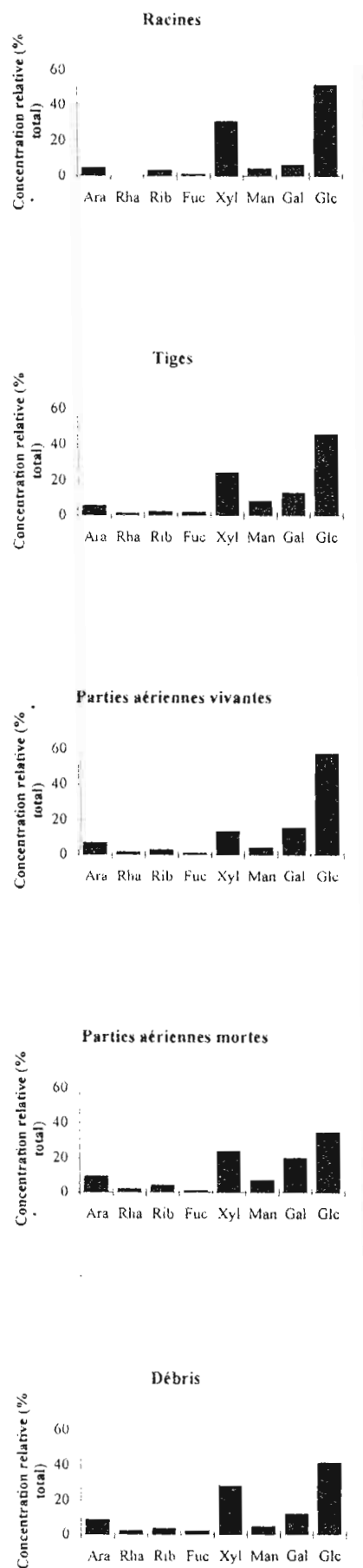


Figure 1 : Distribution des monosaccharides dans les hydrolysats de *Digitaria decumbens* (racines, tiges, parties aériennes, débris)

(Ara, arabinose ; Rha, rhamnose ; Rib, ribose ; Fuc, fucose ; Xyl, xylose ; Man, mannose ; Gal, galactose ; Glc, glucose).

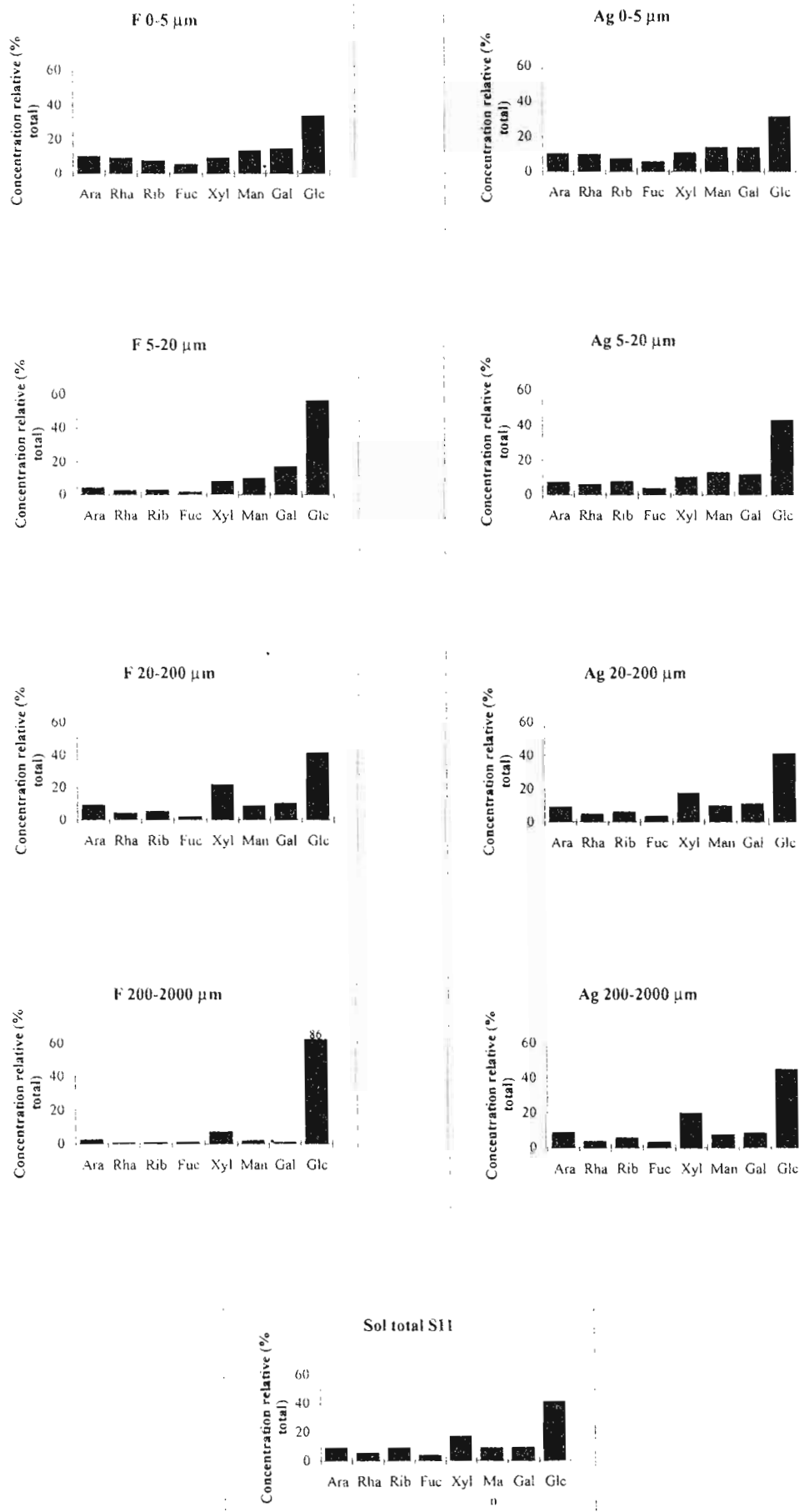


Figure 2 : Distribution des monosaccharides dans les hydrolysats du sol sous prairie S11, de ses fractions granulométriques (F) et classes d'agrégats (Ag)

(Ara, arabinose ; Rha, rhamnose ; Rib, ribose ; Fuc, fucose ; Xyl, xylose ; Man, mannose ; Gal, galactose ; Glc, glucose).

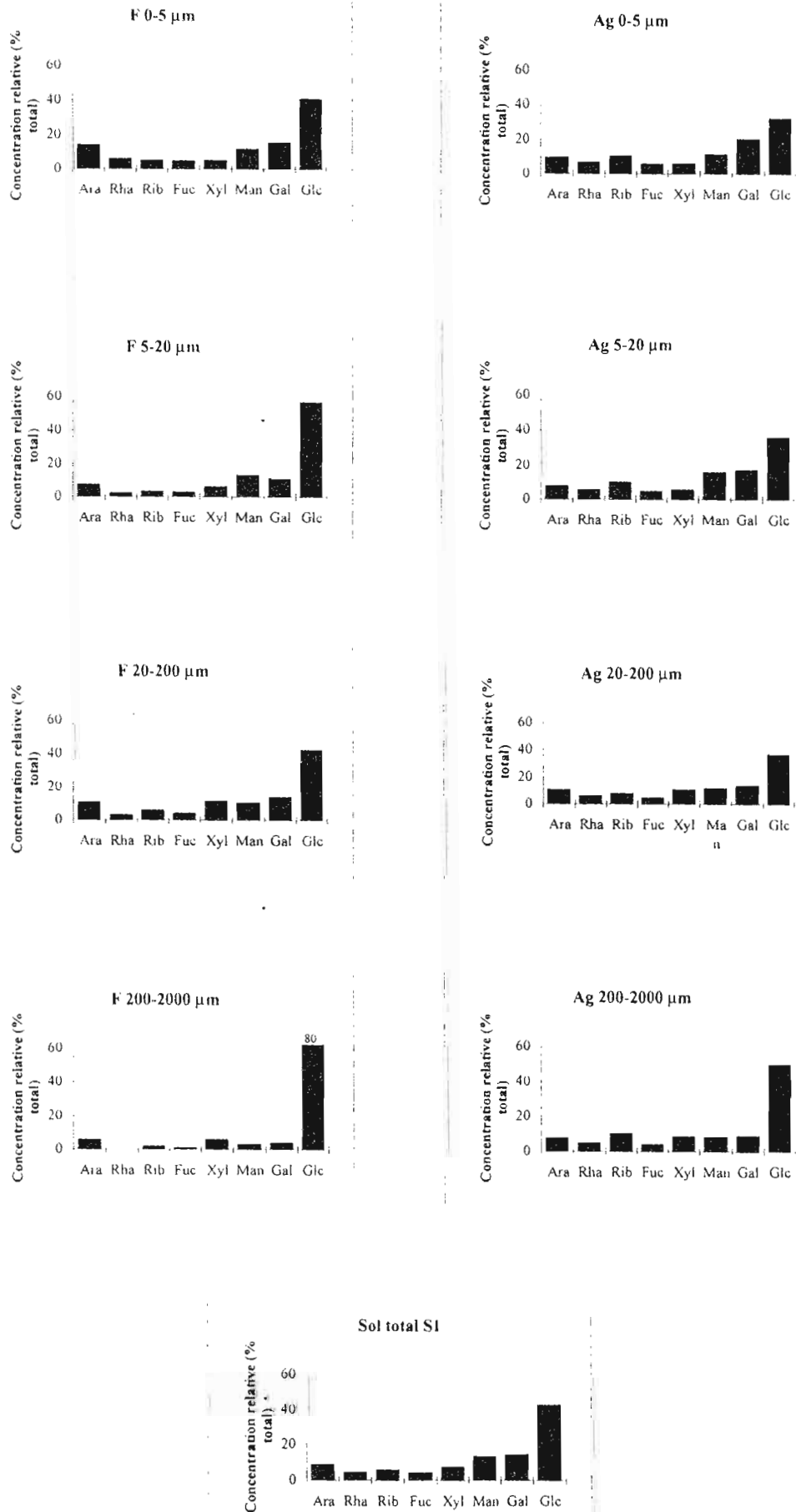


Figure 3 : Distribution des monosaccharides dans les hydrolysats du sol sous maraichage S1, de ses fractions granulométriques (F) et classes d'agrégats (Ag)

(Ara, arabinose ; Rha, rhamnose ; Rib, ribose ; Fuc, fucose ; Xyl, xylose ; Man, mannose ; Gal, galactose ; Glc, glucose).

RAPPORT DU

**LABORATOIRE D'ÉCOLOGIE MICROBIENNE DE LA RHIZOSPHERE
CADARACHE
CNRS**

Diversité des populations bactériennes productrices d'exopolysaccharides dans les microagrégats

Wafa ACHOUAK, Mohamed BARAKAT et Thierry HEULIN

Laboratoire d'Ecologie Microbienne de la Rhizosphère (LEMIR), DSV-DEVM,
UMR 163 CNRS-CEA Cadarache, F-13108 St Paul Lez Durance

INTRODUCTION

L'objectif de cette partie du travail était de mieux comprendre le rôle des microagrégats d'origine bactérienne dans la préservation des vertisols de Martinique et le type d'interaction régissant l'association entre les micro-colonies bactériennes et les argiles. Pour cela nous avons entrepris d'isoler et d'identifier les bactéries productrices d'exopolysaccharides (EPS) présentes dans les microagrégats, afin de caractériser la nature et les propriétés des EPS produits, dans un deuxième temps. Sur la base d'observations effectuées au microscope électronique à transmission par Chotte *et al.* (1993), il avait été montré que la fraction 2-20 μm contenait la plus forte concentration en microagrégats d'origine bactérienne. L'isolement et l'identification des bactéries productrices d'EPS ont donc été réalisés sur la fraction 5-20 μm de vertisols provenant de deux situations bien contrastées : sol sous maraîchage de longue durée (1) et sol sous prairie à *Digitaria decumbens* de longue durée (11).

MATERIEL ET METHODES

Fractionnement du sol (situations 1 et 11)

La fraction 2-20 μm a été préparée comme suit :

- agitation de 100 g de sol dans 1 L d'eau pendant 2 h,
- filtration sur un tamis de 50 μm ,
- sédimentation et récupération de la fraction <20 μm dans le surnageant,
- élimination de la fraction < 20 μm par sédimentation,
- élimination des bactéries libres par filtration à 5 μm .

La fraction 0-5 μm a été éliminée pour éviter d'isoler les bactéries " libres " non incluses, au moment du prélèvement, dans les microagrégats bactériens.

Isolement et identification des bactéries productrices d'exopolysaccharides

Les comptages bactériens ont été réalisés sur différents milieux : TSA (Tryptic Soy Agar, Difco), TSA dilué au 1/10^{ème} (TSA 1/10), PCAT (Hebbar *et al.*, 1992. Soil Biol. Biochem., 24, 999-1007), milieux minéraux enrichis avec différents glucides (20 g/L) (Ahouak *et al.* 1999) en utilisant la méthode classique de suspensions-dilutions. Les isolements ont été effectués sur les milieux enrichis en différents glucides (20 g/L de chaque glucide). Les bactéries ont été ensuite purifiées puis identifiées

phénotypiquement (microplaques Biolog contenant 95 substrats carbonés) et génotypiquement (séquençage et cartographie de l'ADNr 16S, hybridations ADN :ADN) (Achouak et al. 1999).

RESULTATS

1. Comptage des populations bactériennes de la fraction 5-20 µm

Après fractionnement du sol, des observations en Microscopie Electronique à Transmission (MET, DEVM, Cadarache) ont été effectuées. La présence de microagrégats bactériens a ainsi pu être confirmée dans la fraction 5-20 µm du sol sous prairie (Fig. 1B), alors que dans le sol sous maraîchage nous avons observé peu de micro-colonies bactériennes, et de nombreuses bactéries libres dans une matrice minérale (Fig. 1A).

Fig.1

Le comptage de la microflore totale cultivable (TSA et TSA 1/10) n'a pas révélé de différence significative entre les deux situations (respectivement $7,0 \pm 0,5$ et $7,1 \pm 0,5$ log CFU/g de sol sec dans les situations 1 et 11), sauf dans le cas du milieu PCAT (respectivement $6,2 \pm 0,7$ et <3 log CFU/g de sol sec dans les situations 1 et 11). Ce milieu semi-sélectif permet de mettre en évidence les bactéries du genre *Burkholderia*. Nous avons également utilisé des milieux riches en glucides (20 g/L) pour sélectionner et isoler les bactéries produisant des EPS en grande quantité.

2. Isolement et identification des bactéries productrices d'exopolysaccharide

Les bactéries produisant des EPS abondants ont été identifiées, dans un premier temps, par la méthode Biolog. En ce qui concerne les **bactéries à Gram positif**, les populations majoritaires appartenaient aux espèces *Bacillus amyloliquefaciens* et *Bacillus thermoglucosidasius*. Ces populations ont été mises en évidence dans les deux situations (sous prairie et sous maraîchage). Ce résultat permet d'exclure l'hypothèse d'une contribution 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 ont été identifiées phénotypiquement (Biolog) à *Pseudomonas corrugata* et *Pseudomonas fluorescens* et les espèces majoritaires du sol sous prairie à *Burkholderia glathei* et *Burkholderia cepacia*. L'utilisation d'un milieu semi-sélectif pour les bactéries appartenant au genre *Burkholderia* (PCAT) a permis de confirmer la présence de cette espèce dans le sol sous prairie et son absence (limite de détection 3 log CFU/g sol sec) dans le sol sous maraîchage.

3. Description de *Burkholderia caribensis* sp. nov., bactérie productrice d'EPS isolée de microagrégats

Les isolats de *Burkholderia* du vertisol sous prairie ont été identifiés par le système Biolog aux espèces *Burkholderia cepacia* et *Burkholderia glathei*. Cependant la cartographie du gène ADNr 16S par RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphism) avec 12 enzymes de restriction a révélé que les 22 isolats de *Burkholderia* sélectionnés possédaient le même ribotype, lui-même différent de ceux des autres espèces de *Burkholderia* décrites (Achouak et al., 1999). C'est pour cette raison que nous avons procédé au séquençage du gène ADNr 16S de trois isolats (MWAP64, MWAP71 et MWAP84). L'ensemble des

résultats génotypiques (séquençage de l'ADNr 16S et hybridations ADN:ADN) et phénotypiques a conduit à la description d'une nouvelle espèce bactérienne : *Burkholderia caribensis* (*caribensis*, en hommage au peuple des Caribs, les premiers habitants des îles Caraïbes) (Achouak et al., 1999).

Nous avons confirmé l'abondance de cette espèce dans les microagrégats du sol sous prairie (>30% des bactéries poussant sur TSA 1/10) et sa faible fréquence dans la situation sous maraîchage (<2%) par des hybridations sur colonies. 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 (3, 5 et 9), les colonies hybridant avec la sonde nucléotidique anti-*B. caribensis* représentaient moins de 10% des bactéries cultivables contenues dans la fraction 5-20 µm.

CONCLUSION

L'espèce *Burkholderia 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*. 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 (Fig. 1B) 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 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.

REFERENCES

- Chotte J. L., Jocteur Monrozier L., Villemin G. and Albrecht A. 1993. Study of soil microhabitats. Importance of the fractionation method. In : K. Mulongoy and R. Merckx (Eds). Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture. John Wiley, London, pp. 39-45.
- Achouak W., Christen R., Barakat M., Martel M. H. and Heulin T. *Burkholderia caribensis* sp. nov. exopolysaccharide-producing bacterium isolated from vertisol microaggregates in Martinique. Int. J. Syst. Bacteriol. (accepté pour publication en janvier 1999)
- Achouak W., Barakat M., Albrecht A., and T. Heulin. The impact of crop management on the diversity of EPS-producing bacteria isolated from vertisol microaggregates. En préparation.

RAPPORT DU

CENTRE DE PEDOLOGIE BIOLOGIQUE

NANCY

CNRS

**FONCTIONNEMENT BIOLOGIQUE DES SOLS TROPICAUX ET GESTION
DURABLE DES TERRES**

**DETERMINANTS BIOLOGIQUES DE L'AGREGATION ET DE LA POROSITE DES
VERTISOLS DES PETITES ANTILLES - CONSEQUENCES SUR L'ERODIBILITE ET
LA DISPONIBILITE DE L'EAU DU SOL POUR LES PLANTES**

**Contribution du Centre de Pédologie Biologique,
Vandœuvre-lès-Nancy**

Rapport final, Novembre 1998

G. Villemin et F. Watteau

Corrélation avec les résultats :

- du BOST-ORSTOM, Martinique, Eric Blanchart
- du LCSC-ORSTOM, Montpellier, Christine Larré-Larrouy

INTRODUCTION

Les vertisols, qui sont des sols fragiles lorsqu'ils sont exploités en culture intensive, constituent un sujet d'étude bien ciblé pour répondre à la problématique, qui est la gestion durable des terres. Ces sols peuvent être réhabilités par une mise en jachère, ce qui met en évidence l'importance du stock organique dans ce type de sol, mais où la nature minérale des argiles en particulier la garniture ionique doit jouer un rôle dans leur stabilité. Les vertisols étudiés en Martinique et en Guadeloupe sont des situations étudiées depuis un certain nombre d'années par l'ORSTOM. Ils sont magnésio-sodiques en Martinique et calciques en Guadeloupe.

Nous avons pensé, en contribuant à cette étude, pouvoir apporter des éléments de réponse en particulier sur le rôle du stock organique, mais également sur le rôle de la nature minérale dans ce type de sol. Pour cela nous avons proposé une étude comparative des diverses situations de culture intensive et de réhabilitation en Martinique et en Guadeloupe, à l'échelle de l'agrégat compris entre 2 et 20 μm . Les agrégats stables étant obtenus après fractionnement granulodensimétrique, ils seront caractérisés morphologiquement et analytiquement en Microscopie Électronique à Transmission couplés en EDXS et EELS (voir méthodologie de l'article). Cette caractérisation est couplée aux résultats de stabilité structurale obtenus par le BOST de Martinique et aux résultats de caractérisations des sucres obtenus par le LCSC de Montpellier.

Les situations étudiées sont les suivantes :

- en Martinique : situation 1 "maraîchage" pour la situation de culture intensive
situation 11 "prairie" pour la situation de réhabilitation

D'autre part, des turricules ont été prélevés sur ces deux situations pour étudier l'impact de la faune sur l'agrégation.

- en Guadeloupe : situation 7 "canne à sucre" pour la situation de culture intensive
situations 5 "jachère" et 6 "prairie" pour les situations de réhabilitation.
et une situation de référence, situation 1 "sol nu"

RÉSULTATS

I. ÉTUDE DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS L'AGRÉGATION :

Il résulte de cette étude une caractérisation morphologique des agrégats stables des fractions 2-20 μm et la définition de 3 modes d'associations organo-minérales typiques dans ces sols :

1. On distingue un mode d'association constitué par des restes végétaux figurés associés à une fraction minérale argileuse en proportion variable. Au sein de ces associations on localise éventuellement des bactéries.

Ce mode d'association que nous qualifions d'**AGREGATS ORGANO-MINERAUX**, implique dans leur définition la présence de restes végétaux figurant des éléments cellulaires (paroi, cellule ...) (cf. photo).

2. On observe 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'**AGREGATS BACTERIENS** (cf. photo).

3. 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' **AGREGATS PSEUDO-MINERAUX** (cf. photo).

On constate que suivant les situations, les proportions relatives de ces trois types d'agrégats varient. Afin d'évaluer ces variations dans les différentes situations étudiées, il convient de comptabiliser chaque type d'agrégat dans un certain nombre de champs d'observation, ayant une surface déterminée. Considérant que la répartition des agrégats, observés sur les différents champs, répond statistiquement à une loi normale, cette loi impose un minimum de 30 champs à observer. Donc chaque type d'agrégat sera comptabilisé sur 30 champs, de surface unitaire égale à 330 μm^2 .

Le tableau 1 suivant donne le nombre total d'agrégats de chaque type et également le nombre total d'agrégats tous types confondus, pour chaque situation en Martinique et en Guadeloupe.

Situations		Agrégats Organo- minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo- minéraux	Nbre d'agr. tous types confondus
Martinique	Maraîchage	26	18	91	135
	Pâturage	105	132	16	253
Guadeloupe	Canne à sucre	50	17	102	169
	Prairie	162	43	24	229
	Jachère	54	123	141	318
	Sol nu	44	9	234	287

Tableau 1 : Nombre total d'agrégats de chaque type et tous types confondus pour les différentes situations.

Le tableau 2 correspond aux proportions relatives (en %) des 3 classes d'agrégats dans chaque situation.

Situations		Agrégats Organo- minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo- minéraux
Martinique	Maraîchage	19	14	67
	Pâturage	41	52	7
Guadeloupe	Canne à sucre	30	10	60
	Prairie	71	18	11
	Jachère	17	39	44
	Sol nu	16	3	81

Tableau 2 : Proportions relatives (en %) des 3 classes d'agrégats dans chaque situation

La répartition relative entre chaque type d'agrégat montre une grande différence entre les situations de cultures intensives et les situations de réhabilitation, en Martinique comme en Guadeloupe. Il se dégage très nettement dans les deux types de vertisols que le pourcentage des agrégats pseudo-minéraux est nettement plus bas dans chaque situation de réhabilitation, à savoir une différence de 60% entre les deux situations de Martinique, et pour la Guadeloupe 50% entre les situations "canne à sucre" et "prairie" et 16% entre "jachère" et "canne à sucre".

De plus on remarque qu'en Guadeloupe la situation de référence "sol nu" correspond à celle pour laquelle le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux est le plus élevé.

En Martinique où la prairie est à *Digitaria decumbens*, les pourcentages d'agrégats organo-minéraux d'une part et bactériens d'autre part sont nettement plus élevés que ceux obtenus pour la situation maraîchage. Pour le vertisol de Guadeloupe en ce qui concerne la prairie à *Cymodon nemfluensis* : les agrégats organo-minéraux 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.

En ce qui concerne la situation de réhabilitation (jachère), on remarque que le pourcentage d'agrégats organo-minéraux est nettement plus bas que celui de la situation de cultures intensives alors que le pourcentage d'agrégats bactériens est nettement plus élevé comparativement à celui obtenu pour la situation de cultures intensives d'une part et pour l'autre situation de réhabilitation (prairie) d'autre part. Pour le sol nu, situation de référence, les pourcentages d'agrégats organo-minéraux et bactériens sont très bas et les plus faibles obtenus comparativement aux autres situations de Guadeloupe.

Le sol nu de référence présente un nombre total d'agrégats tous types confondus très élevé, ce qui met en évidence que ce paramètre ne peut être pris en compte pour apprécier l'impact des pratiques culturales.

Afin de valider toutes ces remarques, une analyse statistique évaluant le pourcentage de similitude entre ces différentes situations a été effectuée (cf. tableau 3).

Situations comparées	Agrégats organo-minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo-minéraux
Maraîchage/prairie	0 %	0 %	0 %
Prairie/canne à sucre	0 %	0 %	0 %
Jachère/canne à sucre	66 %	0 %	1 %
Prairie/jachère	0 %	0 %	0 %
Prairie/Sol nu	0 %	0 %	0 %
Jachère /sol nu	40,6%	0 %	0 %
Canne à sucre/sol nu	66 %	8,2 %	0 %

Tableau 3 : Pourcentages de similitude calculés pour les différentes comparaisons entre stations.

Ces résultats confirment bien toutes les remarques faites ci-dessus. Pour la Martinique, l'analyse statistique indique des pourcentages de similitude de 0% entre les deux situations étudiées quelque soit le type d'agrégats : la situation "maraîchage" est donc très différente de la situation "pâturage".

En Guadeloupe si l'on considère les agrégats pseudo-minéraux, le degré de similitude est nul quelques soient les situations. Le degré de similitude de 8,2% concernant les agrégats bactériens entre les situations "sol nu" et "canne à sucre" s'explique par les faibles pourcentages de ces associations trouvés (10% et 3% respectivement pour la canne à sucre et le sol nu). En ce qui concerne les agrégats organo-minéraux, les résultats montrent une forte ressemblance entre la situation de réhabilitation "jachère" et la situation de cultures intensives d'une part, entre le sol nu et la situation de cultures intensives d'autre part, ainsi qu'entre le sol nu et la situation de réhabilitation (jachère).

II. ÉTUDE DE L'IMPACT DE LA FAUNE :

Les tableaux 4 et 5 suivant permettent de comparer les nombres totaux d'agrégats trouvés et les proportions relatives des agrégats pour les situations 1 et 11 et pour les turricules trouvés sur ces deux situations.

Situations		Agrégats Organo- minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo- minéraux	Nbre d'agr. tous types confondus
Maraîchage	Sol	26	18	91	135
	Turricules	32	16	39	87
Pâturage	Sol	105	132	16	253
	Turricules	59	21	40	120

Tableau 4 : Nombre total d'agrégats de chaque type et tous types confondus pour les différentes situations.

Situations		Agrégats Organo- minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo- minéraux
Maraîchage	Sol	19	14	67
	Turricules	36	18	44
Pâturage	Sol	41	52	7
	Turricules	48	17	33

Tableau 5 : Proportions relatives (en %) des 3 classes d'agrégats dans chaque situation

Le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux trouvé dans les turricules prélevés sur la situation 1 est nettement plus bas que dans le sol de cette situation, alors que le pourcentage des agrégats organo-minéraux lui augmente.

Étant donné que les vers de terre trouvés dans cette situation ont un comportement épi-endogé, on peut penser qu'ils contribuent ici à la formation d'agrégats organo-minéraux en ingérant la matière organique (s'ils en trouvent !) et d'augmenter très faiblement le potentiel d'agrégats bactériens. Il en résulte au vu de ces résultats une capacité à augmenter la stabilité du sol.

Pour la situation 11 (prairie) on constate au niveau du turricule une progression du pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux, une stabilité du pourcentage d'agrégats organo-minéraux et une forte chute du pourcentage d'agrégats bactériens comparativement au sol de la situation 11. Ceci nous laisse penser que l'espèce *P. elongata* aurait un comportement endogé qui permettrait la remontée d'agrégats pseudo-minéraux à partir d'horizons plus profonds et par conséquent la remontée en surface des smectites chargées en Mg. Toutefois au vu de ces résultats nous pouvons dire que la stabilité globale du sol de prairie est assurée essentiellement par les facteurs biologiques racinaire et bactérien.

III. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA NATURE MINÉRALE :

Nous avons effectué une comparaison morphologique entre les différents types d'agrégats des vertisols de Martinique et de Guadeloupe. On constate que les agrégats pseudo-minéraux des deux vertisols sont très différents : ceux de Martinique sont constitués majoritairement de smectites à l'aspect bouclé (curled), alors que les pseudo-minéraux de Guadeloupe sont composés de smectites qualifiées d'ondulées (cf. photo).

Lorsque les smectites sont adsorbées sur les exopolymères bactériens (agrégats bactériens) ou sur les matières organiques végétales évoluées (agrégats organo-minéraux), que ce soit Martinique ou en Guadeloupe, ces smectites présentent un aspect ondulé (cf. photo).

En Martinique, les analyses effectuées en EDXS et EELS sur les agrégats pseudo-minéraux à l'aspect bouclé ont montré d'une part que ces smectites sont associées à une fraction organique révélée par la présence d'azote (voir spectre) et d'autre part l'analyse EDXS confirme la garniture magnésique de ces smectites, à faible pourcentage d'aluminium, mais associée au fer (voir spectres EDXS). En ce qui concerne les smectites ont l'aspect ondulé, qu'elles soient dispersées en petits paquets phylliteux (779) ou adsorbées sur les matières organiques des agrégats organo-minéraux, leur analyse comparativement aux smectites bouclées révèle, à la

fois un très faible taux de magnésium, un taux d'aluminium trois fois plus élevé et un pourcentage de fer légèrement plus bas.

Par ailleurs, seuls C et N ont été détectés au niveau des exopolymères des agrégats bactériens.

En Guadeloupe, l'analyse effectuée sur les associations de type pseudo-minéraux révèle la présence d'azote donc de matières organiques très fines associées aux smectites, le calcium a aussi été détecté au sein de ces associations. L'analyse EDXS des smectites montre qu'elles ne sont pas associées au magnésium.

Le calcium 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.

IV. CORRELATION AVEC LA CARACTERISATION DES SUCRES (RESULTATS DU RAPPORT 97) :

La forte proportion de mannose trouvé dans les agrégats 5-20 μm se corrèle bien avec le pourcentage élevé d'agrégats bactériens trouvé dans cette fraction, qui est d'ailleurs le pourcentage d'agrégats bactériens le plus élevé de toutes les situations.

DISCUSSION - CONCLUSION

En établissant la relation entre le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux, l'indice de stabilité structurale et les teneurs en C total de l'horizon 0-10 cm, nous pouvons comme le montre la figure 1 mettre en évidence une corrélation étroite entre ces trois paramètres : plus l'indice de stabilité est élevé, plus le taux de C est élevé et plus le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux est faible pour les vertisols de Martinique et de Guadeloupe.

Dans une situation de cultures intensives l'indice de stabilité est bas, le taux de C est bas et le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux est élevé. Inversement dans une situation de réhabilitation l'indice de stabilité structurale indique une stabilité élevée, une teneur en C élevée et un pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux faible. Entre ces deux situations extrêmes, on trouve des situations intermédiaires qui confirment cette corrélation (cf. figure 1). On admettra donc que les pourcentages relatifs d'agrégats pseudo-minéraux calculés pour des vertisols soumis à des pratiques culturales différentes nous renseignent sur leur stabilité et leur devenir.

Le pourcentage relatif d'agrégats pseudo-minéraux est donc un bon indicateur biologique de la stabilité des vertisols en fonction des pratiques culturales.

En précisant une valeur seuil de cet indicateur on pourra diagnostiquer une situation critique correspondant à une mauvaise gestion de ce type de sol.

Nous pouvons donc définir un nouvel indice de stabilité structurale (IS), comme suit :

$$\text{IS} = 1 - (\% \text{ d'agrégats pseudo-minéraux})/100$$

En comparant les courbes reliant l'indice de stabilité IS et la teneur en carbone de l'horizon 0-10 cm pour les différentes situations, de Martinique d'une part, et de Guadeloupe d'autre part (cf. figure 2), on remarque que ces deux courbes n'ont pas la même pente et qu'elles se croisent pour une valeur de teneur en C correspondant à environ 10‰.

Ceci révèle que la progression de la teneur en C au-delà de 10‰ a beaucoup plus d'impact sur la stabilité du sol de Martinique que sur celui de Guadeloupe et donc que l'apport de matière organique dans le vertisol de Martinique permet d'obtenir un vertisol plus stable que celui de Guadeloupe pour une même teneur en C.

En deçà de 10‰ en carbone, c'est-à-dire dans des situations de non renouvellement du stock organique, on constate comme le montre les courbes (cf. fig.2), une inversion de comportement : le vertisol de Martinique est moins stable que celui de Guadeloupe. Il semble donc que la teneur de 10‰ en C total pour les vertisols des Petites Antilles soit le seuil critique en deçà duquel on constate que la teneur en C total n'est plus l'élément prédominant conditionnant la stabilité des vertisols étudiés. On peut penser que les facteurs qui seront alors prépondérants puissent être :

- soit la nature du C impliqué dans ces faibles teneurs
- soit la nature minéralogique des argiles et en particulier la garniture ionique des smectites, qui est la différence minéralogique prédominante entre les vertisols de Martinique et de Guadeloupe.

On a constaté, au cours de la caractérisation des agrégats pseudo-minéraux des situations de Martinique, que la morphologie des smectites est fonction des teneurs en magnésium dans les différents modes d'agrégation, à savoir que lorsque les smectites perdent leur garniture magnésique, elles se dispersent et retrouvent associées aux matières organiques dans les agrégats organo-minéraux et bactériens. Ceci révèle l'importance de ces matières organiques, qui ont la capacité à retenir cette fraction argileuse. Les analyses ont également montré que la dynamique de la capacité d'échange se traduit par une substitution de magnésium par l'aluminium, accompagné d'une perte en fer. Nous pensons que cette dynamique a un rôle important dans le processus d'agrégation organo-minérale du vertisol magnésio-sodique de Martinique.

Dans les résultats analytiques des agrégats du vertisol de Guadeloupe, il faut surtout retenir la présence du calcium au sein des trois types d'associations déterminés et donc le rôle important de cet élément dans l'agrégation des vertisols de Guadeloupe.

Si le nombre total d'agrégats dans la fraction 2-20 μm ne peut être, comme nous l'avons démontré, un paramètre révélateur de la stabilité structurale, la considération des agrégats pseudo-minéraux dans ce compartiment nous a permis de proposer un nouvel indicateur de stabilité (IS) dans l'étude des vertisols, qui peut être utilisé comme un outil de diagnostic de gestion des sols.

Teneur en C total (‰)

% d'agr. pseudo-minéraux

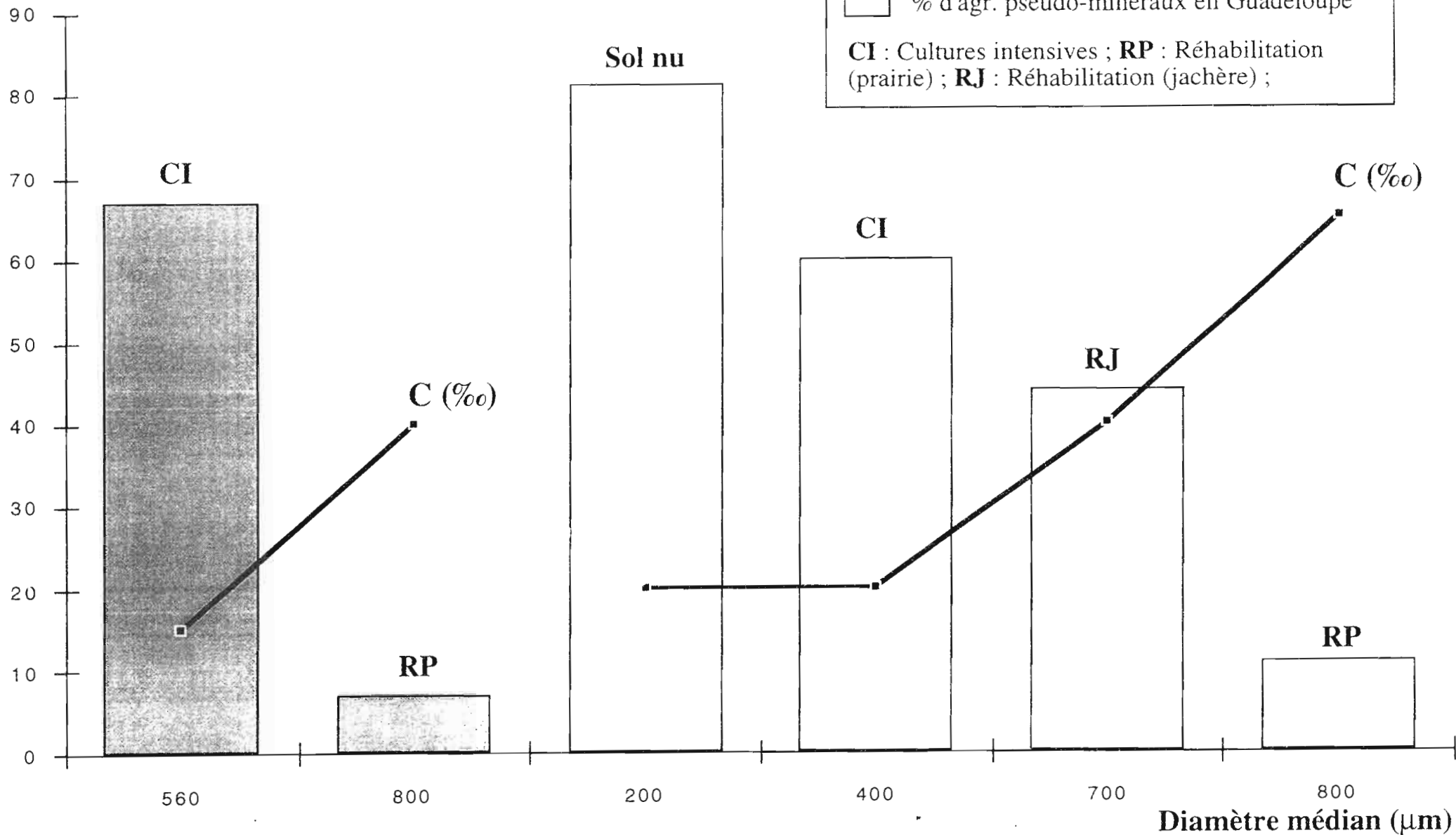


Figure 1

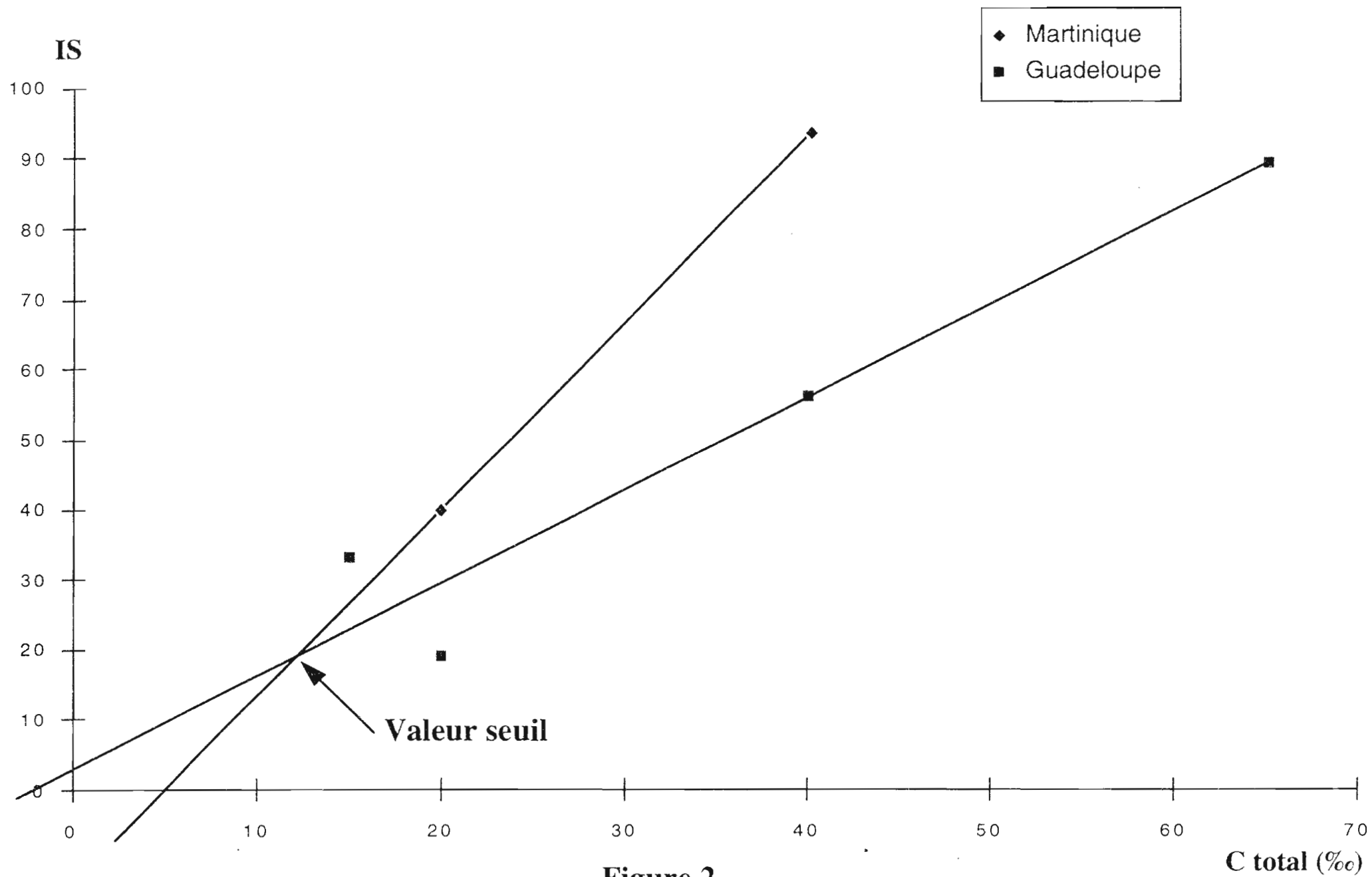


Figure 2

RAPPORT DU

LABORATOIRE ENVIRONNEMENT ET MINERALURGIE

NANCY

CNRS

Action Incitative Interinstitutionnelle
(ORSTOM, CNRS, CIRAD, INRA)

"Fonctionnement biologique des sols tropicaux
et gestion durable des terres"

Projet P3

Déterminants biologiques de l'agrégation des sols
du sud-est Martinique (érodibilité, porosité)

Phénomènes d'agrégation et
d'hydratation
dans les vertisols sous l'effet
des polysaccharides microbiens
rhizosphériques

F. Thomas - I. Bihannic - E. Rose

Laboratoire Environnement et Minéralurgie - UMR 7569 CNRS/INPL
BP 40 - 54501 Vandœuvre Cedex

Novembre 1998

1. Objectifs

Parmi les déterminants biologiques de la stabilité des vertisols, les polysaccharides produits par les bactéries à partir des exsudats racinaires jouent un rôle déterminant dans la structuration locale et l'hydratation des argiles dans le sol rhizosphérique.

L'objectif de cette recherche est de caractériser les interactions polysaccharides-argiles à l'échelle de la macromolécule ou du feuillet, et de déterminer leurs conséquences sur la structure et l'hydratation de l'argile à l'échelle locale.

2. Matériels et méthodes

Phase minérale

L'argile étudiée est la montmorillonite du Wyoming, purifiée et homoionisée Na ou Ca. Des mesures de pression osmotique ont été réalisées sur une suspension de nanoparticules de silice Aerosil 380 Degussa.

Polysaccharides

Plusieurs polysaccharides d'origine microbienne ont été utilisés : le lévane (masse moléculaire 16 millions et constitué de 2,6-anhydro-b-D-fructofuranose), le succinoglycane (masse moléculaire 4 millions, polymère de glucose et de galactose à substitutions succinate, pyruvate et acétate), un moût de fermentation produit au LEMIR à partir d'isolats de *Burkholderia Caribiensis*, originaire de la rhizosphère d'un vertisol sous prairie de Martinique ; le polysaccharide produit (P71) est un hétéroglycane (acétate) comportant du glucose et du rhamnose.

Méthodes analytiques

La quantité d'eau adsorbée sur les échantillons en fonction de la pression relative de vapeur d'eau a été mesurée par gravimétrie d'adsorption de vapeur d'eau.

Le gonflement cristallin de l'argile en présence ou en absence de polysaccharide a été mesuré par diffraction X en fonction de l'humidité comprise entre 0 et 0,95 et contrôlée par la température de la source d'eau.

Afin d'atteindre les distributions de distances jusqu'à 1 μm , des mesures de diffusion X aux très petits angles ont été réalisées sur un équipement de caméra X Bonse et Hart (CEA Saclay).

La cinétique d'agrégation sous l'effet de différents facteurs comme le cation ou le polysaccharide a été mesurée par granulométrie en diffraction laser (Malvern Mastersizer). Le solide est dispersé (50 à 100 mg/l) dans un réacteur muni de chicanes, et brassé par un agitateur à pales, et est acheminé dans la cellule de mesure au moyen d'une pompe péristaltique. Une mesure granulométrique est réalisée à intervalles réguliers (à partir de 0,1 seconde).

Afin de mesurer l'activité de l'eau dans les associations argiles-polysaccharides, nous avons construit un appareil d'osmométrie en phase vapeur, qui permet d'établir la courbe potentiel hydrique/teneur à partir d'une suspension dégazée pas à pas.

3. Résultats

3.1. Adsorption de vapeur d'eau et structure

Sur un mélange montmorillonite Na - lévane à 10% en masse, l'isotherme d'adsorption-désorption d'eau montre des quantités adsorbées moindres que sur la montmorillonite seule. Le lévane semble donc s'opposer à l'hydratation de l'argile. Ce n'est qu'aux fortes pressions relatives que la prise de poids est semblable pour les deux

échantillons. A la désorption, on observe une rétention accrue autour de P/P_0 voisin de 0,2, et une humidité résiduelle due au lévane.

La diffraction X (Figure 1) montre que le gonflement ne se produit qu'aux humidités élevées (0,4 - 0,5). cependant, à la désorption, les feuillets semblent se refermer de la même manière en présence ou en absence de lévane aux pressions relatives supérieures à 0,4. Pour les pressions inférieures, il semble que le lévane induise un fort retard à la fermeture des feuillets, mais nous manquons actuellement de points à des pressions équivalentes pour la montmorillonite seule.

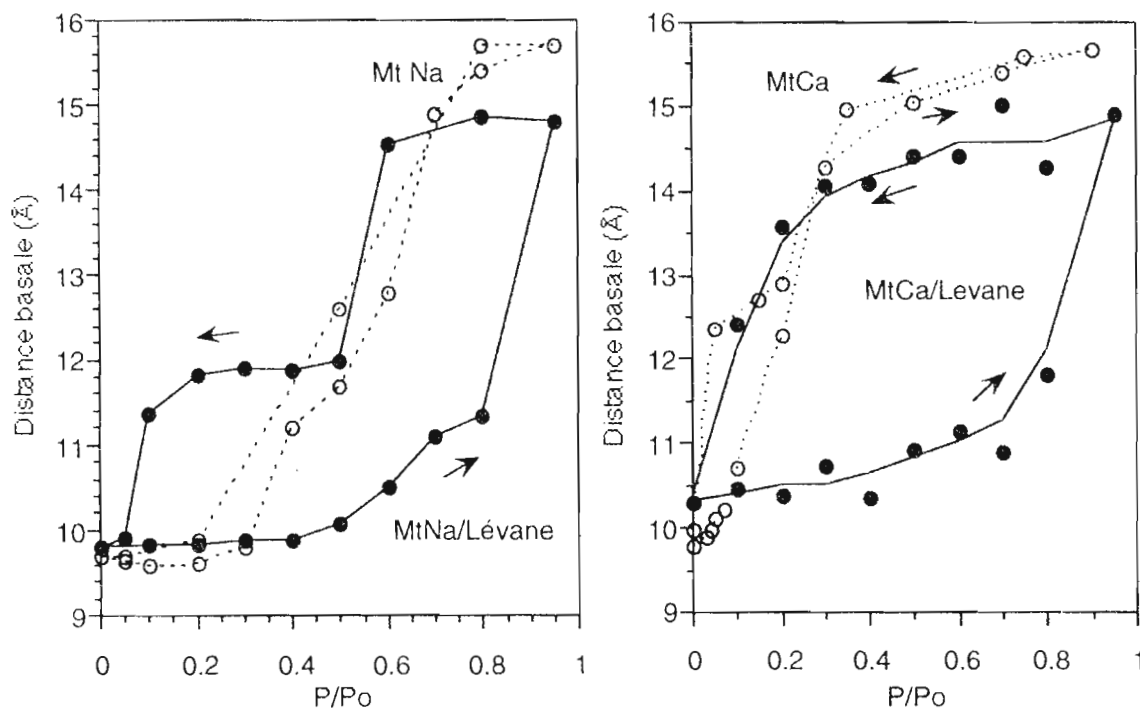


Figure 1 : Gonflement cristallin de la montmorillonite-Na et de la montmorillonite-Ca, et effet du lévane.

Ce phénomène de "retard" au gonflement est particulièrement spectaculaire avec la montmorillonite calcique : alors qu'au départ ($P/P_0 = 0$), la distance basale est légèrement supérieure à celle de l'argile seule (10,3 Å), le gonflement n'est réellement perceptible qu'aux pressions relatives supérieures à 0,8. Comme pour la montmorillonite Na en présence de lévane, la distance basale ne dépasse pas 15 Å, c'est à dire que moins de 2 couches d'eau sont présentes entre les feuillets dans les deux cas. La désorption sur la montmorillonite Ca en présence de lévane ne présente pas de différences notables avec celle sur l'argile seule.

Ces résultats montrent que le lévane semble s'opposer à la pénétration de l'eau entre les feuillets de l'argile (plus particulièrement si le cation est le calcium). Ceci n'est pas dû à sa présence entre les feuillets, puisque la distance basale des associations sèches n'excède pas celle de l'argile seule. En revanche, la désorption d'eau ne semble pas perturbée par le lévane.

Les résultats de diffusion X sur des suspensions de montmorillonite (25 g/l) et de polysaccharide P71 (1 g/l) confirment l'absence d'effet direct du polysaccharide sur la structure.

3.2. Agrégation

L'effet des polysaccharides (lévane, P71 ou succinoglycane) sur l'agrégation de la montmorillonite est inexistant en l'absence de coagulant (calcium, ou sodium à forte concentration), quel que soit l'ordre d'ajout des composants. Sur une montmorillonite préalablement coagulée au calcium (10 CEC) un optimum en concentration de polysaccharide est observé (Figure 2). Cet optimum est situé à 5 mg/l pour la montmorillonite Na et à 8 mg/l pour la montmorillonite Ca. Dans ce dernier cas, la vitesse de croissance est triplée.

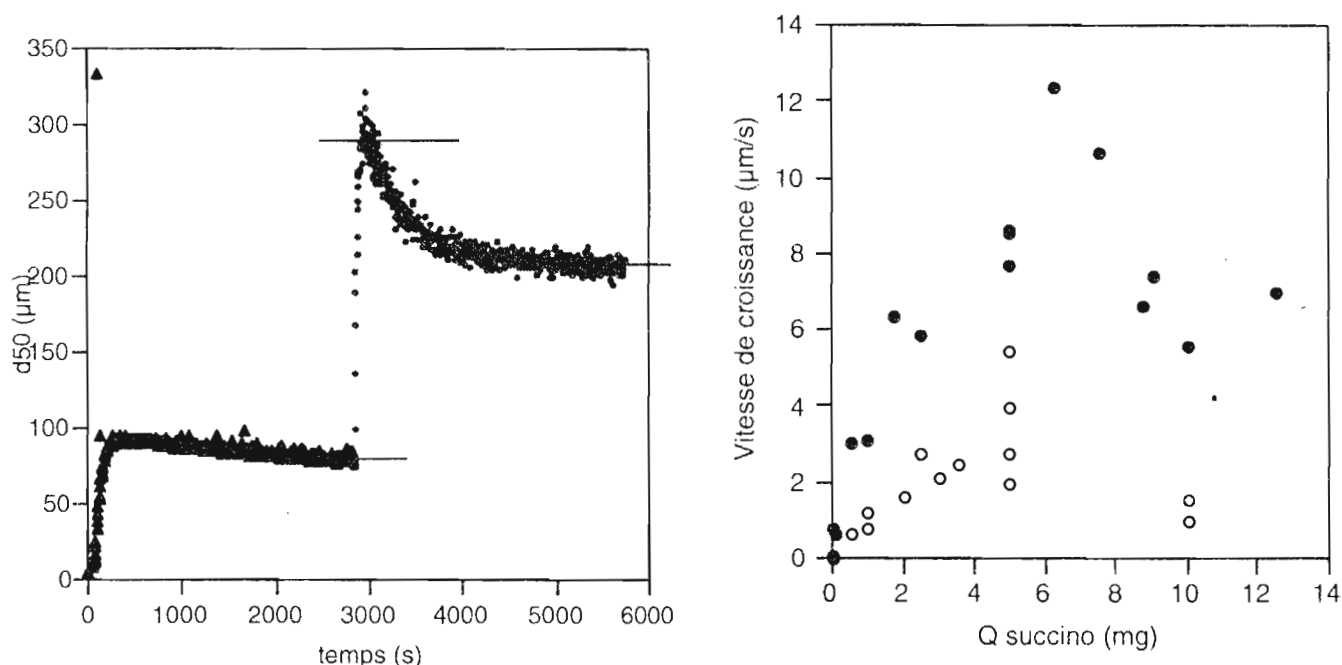


Figure 2 : Croissance des agrégats de montmorillonite sous l'effet du succinoglycane.
 a) : cinétique de croissance. Ordre d'ajout (1L, 40 mg montmo.) : CaCl_2 0,01 mole, puis succino. 2.5 mg. b) : Evolution de la vitesse de croissance avec la teneur en succinoglycane. Cercles blancs : Montmo. coagulée Na ; Cercles noirs : Montmo. coagulée Ca

Le succinoglycane possède donc une capacité de floculation des agrégats de montmorillonite préalablement coagulés par le Ca (et dans une moindre mesure le Na). Le Ca joue probablement un rôle de coagulant aussi pour le succinoglycane. En effet, la quantité à ajouter à la montmorillonite pour obtenir une coagulation dans ces conditions est de l'ordre de 200 CEC. Il reste donc suffisamment de Ca pour coaguler également le succinoglycane.

Il faut noter que ces mesures sont réalisées à vitesse d'agitation strictement constante. En effet, la faible cohésion de ces agrégats fait que leur taille finale est déterminée essentiellement par l'énergie mécanique dissipée.

3.3. Activité de l'eau

L'évolution du potentiel hydrique en fonction de la concentration solide a été mesurée sur une suspension de silice (prise comme modèle d'une argile) en présence de concentrations croissantes de succinoglycane (Figure 3). Dans le domaine exploré, le potentiel est sensible à la pression osmotique engendrée essentiellement par le polysaccharide et aux interactions interparticulaires répulsives de la silice. Dans le domaine des fortes teneurs en solide (> 40%), les particules sont au contact et c'est de l'eau interstitielle qui est extraite. Ici, le polysaccharide ne joue pas de rôle prédominant en désorption, comme il a été montré ci-dessus (Figure 2). C'est aux faibles teneurs en solide (< 30%) que l'effet du succinoglycane

est visible. Les potentiels mesurés sur les associations succinoglycane/silice sont inférieurs à la somme pondérée des potentiels individuels (sauf pour 80% de succinoglycane à $S/L > 0,2$). Ceci montre une adsorption du polysaccharide sur la silice, qui réduit le nombre d'objets présents et/ou diminue les répulsions interparticulaires.

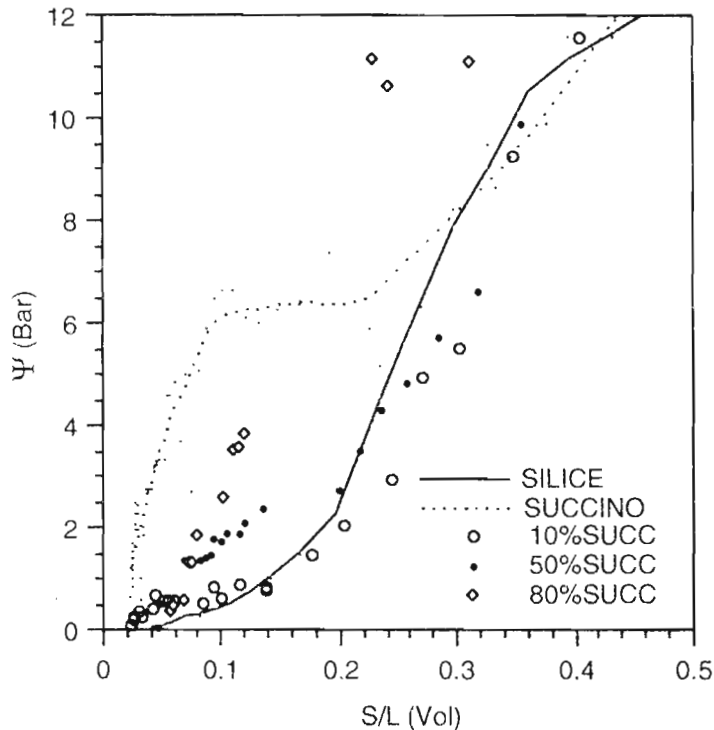


Figure 3 : Evolution du potentiel hydrique de mélanges de silice et de succinoglycane en fonction de la teneur totale en matière sèche.

4. Discussion et conclusion

Les résultats ci-dessus suggèrent les commentaires suivants :

- les interactions des polysaccharides (neutres ou anioniques) avec les argiles sont de faible énergie, comme le montre la faible cohésion des agrégats en milieu très dilué. Elles existent néanmoins à condition que le système contienne également du Ca (ou dans une moindre mesure du Na) en large excès par rapport à la CEC de l'argile. Dans le système silice/succinoglycane, seule une adsorption peut expliquer les résultats d'osmométrie.

- les conséquences des interactions dans le système montmorillonite / Ca / polysaccharide sont de nature structurale dans la mesure où se forment des agrégats même en suspension diluée et agitée. La localisation du polysaccharide reste à déterminer. Dans des mélanges concentrés montmorillonite/polysaccharide, ce dernier n'est pas localisé dans l'espace interfoliaire, mais entre les tactoïdes.

- la présence de polysaccharide dans une matrice de montmorillonite influence considérablement le statut de l'eau. Lors de l'humectation d'un mélange sec, l'intrusion de la vapeur d'eau est décalée vers les fortes humidités. En revanche, la deshydratation est peu modifiée, voire favorisée comme le montre la mesure du potentiel hydrique en désorption sur le modèle silice/succinoglycane.

COPIES D'ARTICLES

PUBLIES, ACCEPTES POUR PUBLICATION OU EN PREPARATION

Liste des travaux réalisés dans le cadre du Projet P3-Antilles

Action Incitative Interinstitutionnelle

« Fonctionnement biologique des sols tropicaux et gestion durable des terres »

Publications

Cabidoche Y.M. & Guillaume P. (1998). A casting method for the three-dimensional analysis of the intra-prism structural pores in Vertisols. *European Journal of Soil Science*, 49 : 187-196.

Hartmann C., Blanchart E., Albrecht A., Bonneton A., Parfait F., Mahieu M., Gaullier C. & Ndandou J.F. (1998) Nouvelles techniques de préparation des vertisols en culture maraîchère à la Martinique. Incidences pédologiques et agro-économiques. *Agriculture et Développement*, 18 : 81-89.

Ruy S. & Cabidoche Y.M. (1998) Matric unsaturated conductivity of a Vertisol: a field and laboratory comparison. *European Journal of Soil Science*, 49 : 175-185.

Publications sous presse

Albrecht A. (1998) Rôle de la matière organique et des bases échangeables dans la stabilité de l'agrégation de vertisols des Petites Antilles. *Canadian Journal of Soil Science*.

Achouak W., Christen R., Barakat M., Martel M.H. & Heulin T. *Burkholderia caribensis* sp. nov., exopolysaccharide-producing bacterium isolated from vertisol microaggregates in Martinique. *Intl. J. Syst. Bacteriol.*

Publications soumises

Cabidoche Y.M. & Ruy S. Field shrinkage curves of a swelling clay soil : analysis of multiple structural swelling and shrinkage phases in the prisms of a Vertisol. Soumis à *Australian Journal of Soil Research*.

Ndandou J.F., Albrecht A., Blanchart E., Hartmann C., Kulesza V. & Feller C. Modification du stock organique d'un vertisol sous prairie par la mise en culture : effet du type de travail du sol. Soumis à *European Journal of Soil Science*.

Ndandou J.F., Albrecht A., Blanchart E., Hartmann C. & Feller C. Evolution à court terme de la stabilité structurale d'un vertisol sous prairie après la mise en culture selon deux modes de travail du sol. Soumis à *European Journal of Soil Science*.

Publications en cours de rédaction

Equipe AII. Déterminants biologiques de l'agrégation des Vertisols des Petites Antilles: Conséquences sur l'érodibilité. A soumettre à Etude et Gestion des Sols. Rapport de synthèse du projet AII.

Equipe AII. Déterminants biologiques de la porosité des Vertisols des Petites Antilles. Conséquences sur la disponibilité en eau des plantes. A soumettre à Etude et Gestion des Sols. Rapport de synthèse du projet AII.

Achouak W., Barakat M., Albrecht A. & Heulin T. The impact of crop management on the diversity of EPS-producing bacteria isolated from vertisol microaggregates.

Larré-Larrouy C., Albrecht A. & Chevallier T. Contribution des sucres simples associés aux fractions granulométriques de vertisols au processus d'agrégation.

Villemin G., Watteau F. & Blanchart E. Characterization of microaggregates (2-20 μm) in vertisols (Martinique). An aggregation mode revealed as indicator of vertisol evolution according to cultural practices.

Communications dans colloques, congrès

Achouak W., Barakat M., Albrecht A. & Heulin T. (1996) Effet de la pratique culturale sur la diversité des populations bactériennes productrices d'EPS dans les microagrégats d'un vertisol de Martinique. Colloque " Biodiversité et Fonctionnement des Sols ", Société Française de Microbiologie. Lyon, 12-13 décembre 1996 (Résumé).

Blanchart E. (1998) Earthworms and soil structure and physical properties in kaolinitic and smectitic tropical soils. 16e Congrès AISS, Montpellier, France, 20-26 août

Cabidoche Y.M., Ozier-Lafontaine H. & Guillaume P. (1997) Des outils d'analyse de la disponibilité de l'eau dans la rhizosphère des sols argileux gonflants. Colloque Rhizosphère Aix'97, Aix-en-Provence, 26-27 novembre 1997, LEMIR/DEVM CNRS-CEA, Cadarache (Résumé).

Guillaume P. & Cabidoche Y.-M. (1998). Moulage des pores structuraux de vertisols : relations entre formes et disponibilité de l'eau. Actes du 16e Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, 20-26 août 1998, Symposium n°1, CD-ROM, CIRAD, Montpellier, 7p.

Hartmann C., Blanchart E., Louri J., Rangon L. & Bernard J. (1998) Rehabilitation processes under fallow and pasture of a compacted vertisol in Martinique (FWI). 16e Congrès AISS, Montpellier, France, 20-26 août

Ndandou J.F. & Albrecht A. (1998) Dynamique précoce de la matière organique et l'agrégation d'un vertisol sous prairie (Martinique) selon le type de travail du sol. 16e Congrès AISS, Montpellier, France, 20-26 août

Villemin G., Watteau F. & Blanchart E. (1999) Les modes d'association organo-minérales (microagrégats 2-20 μm) dans les vertisols en fonction des pratiques culturales : un indicateur de leur stabilité. Séminaire « Le sol, milieu vivant : fonctionnement et gestion », Versailles, 10-11 février 1999.

Thèses et rapports

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. Rapport de maîtrise, UAG, 30 pages (Direction E. Blanchart).

Guillaume P. (1998) Analyse tridimensionnelle directe de la porosité structurale de vertisols. Relation entre formes et fonctionnement hydrique. Thèse de l'ENSA Montpellier (Direction Y.M. Cabidoche)

Lescanne E. (1998) Mesure de l'activité de l'eau dans les milieux complexes. Rapport de projet 3e année Ecole Nationale de Géologie nancy (Direction F. Thomas et J.L. Bersillon).

Ndandou J.F. (1998) Dynamiques de la matière organique et de l'état structural d'un evertisol sous cultures maraîchères (Martinique) selon le type de travail du sol. Thèse de l'Univ. Montpellier (Direction A. Albrecht et C. Feller).

Hydraulic conductivity of the matric porosity of an unsaturated vertisol: a field and laboratory comparison

S. RUY & Y. M. CABIDOCHÉ

Unité Agropédoclimatique de la Zone Caraïbe, INRA, BP 515, 97 165 Pointe-à-Pitre Cedex, Guadeloupe, French West Indies

Summary

In many swelling clay soils several types of porosity can be defined: matric, structural and crack porosities. Measuring the hydraulic conductivity associated with the matric porosity is of major interest because soil movements are governed by matric water flows. Our purpose was to determine the matric conductivity of a vertisol from Guadeloupe (French West Indies) under laboratory and field conditions. We used an Eulerian flow description to measure the conductivity of natural vertisol clods in the laboratory with a drying method. In order to take into account soil movements in every direction, we introduced a tensorial analysis of soil deformations and hydraulic conductivity. The instantaneous profile method was used in the field under wetting conditions. Using soil layer thickness transducers we described water flows in a material coordinate system that can deal with volumetric soil deformations. For wet soil the ratio between the hydraulic conductivity measured in the field and that measured at the laboratory was around 10. However, because the spatial variation of the water content was large, no final conclusion could be drawn to explain this discrepancy. We showed that the gradient of the overburden potential was smaller than that of the matric potential in the field experiment.

Mesure de la conductivité hydraulique matricielle d'un vertisol: comparaison laboratoire-terrain

Résumé

Dans de nombreux sols argileux gonflants, tels que les vertisols de Guadeloupe, coexistent des compartiments de porosité (matricielle, structurale, fissurale) au sein desquels les vitesses de transfert d'eau diffèrent fortement et entre lesquels les échanges sont fortement limités. La connaissance de la courbe de conductivité hydraulique de la matrice du sol est de première importance car elle va déterminer la vitesse d'ouverture et de fermeture des fissures. Nous utilisons une approche eulérienne au laboratoire pour obtenir la courbe de conductivité hydraulique matricielle au sens de Darcy sur des échantillons de vertisol non-remaniés, en utilisant la méthode des profils instantanés en dessiccation. L'écriture de la conductivité hydraulique apparente sous forme tensorielle non-diagonale permet de prendre en compte un retrait tridimensionnel de l'échantillon. Nous mesurons ensuite la courbe de conductivité matricielle au champ par un suivi en réhumectation. L'utilisation de transducteurs d'épaisseurs de couches nous conduit à utiliser un repère matériel. Les équations développées dans ce repère permettent de prendre en considération les mouvements du sol dans les trois directions de l'espace. Pour de fortes teneurs en eau, le rapport entre la conductivité hydraulique mesurée *in situ* et celle mesurée au laboratoire est de l'ordre de 10. Nos résultats obtenus au champ, entachés d'une forte variabilité spatiale de la teneur en eau, ne permettent pas de conclure de façon définitive sur la cause de cette différence. Nous avons montré que l'influence du potentiel pédostatique au champ était nulle sur les propriétés du sol mesurées, et mineure sur le calcul de la conductivité, à cause de faibles gradients en comparaison des gradients du potentiel matriciel.

Correspondence: S. Ruy, Unité de Science du Sol, INRA, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84 914 Avignon Cedex 9, France.
E-mail: ruy@avignon.inra.fr

Received 27 January 1997; revised version accepted 22 December 1997

Introduction

In swelling clay soils, and especially in vertisols, successive cycles of wetting and drying induce volumetric deformation and changes of porosity. These movements can be followed by subsidence or collapse of the soil's surface and crack formation. On the basis of hydraulic criteria, three kinds of porosities can be defined. These are as follows.

1 A network of vertical cracks, which delimits the continuous peds or prisms containing a system of fine pores and a system of larger structural pores (Stirk, 1954). This network is more or less regular, and water flows inside these cracks rapidly.

2 The matric porosity. A system of fine pores, hereafter called matric porosity, is formed by the arrangement of clay particles. It remains saturated during structural and normal shrinkage (as defined by Stirk, 1954) and thus contains the water responsible for soil movement.

3 The structural porosity is formed by macropores and mesopores (McIntyre & Sleeman, 1982). It is formed by the soil mesofauna, microbial activity and root paths. Structural water does not induce any deformation of the soil (Ritchie *et al.*, 1972b).

Because cracks are present, it is difficult to measure the hydraulic conductivity of the whole unsaturated soil and to determine its significance. The representative elementary volume should represent several cubic metres, and naturally occurring water flow inside these cracks cannot be described by Darcy's law. When dealing with the conductivity of the prisms other difficulties arise. As emphasized by Cabidoche & Ozier-Lafontaine (1995), structural and matric flows are almost independent. The structural porosity can be filled with water at any matric water content, and water moves from structural to matric porosity very slowly. Thus, water potentials can be horizontally heterogeneous inside the prisms. It is therefore necessary to separate matric and structural water flows.

Few investigators have measured the conductivity of an unsaturated vertisol in the field. Tension infiltrometers were successfully used for swelling soils (Jarvis *et al.*, 1987). Nevertheless, the range of suctions made it possible to obtain the conductivity of the structural porosity only (Jarvis & Messing, 1995). Douglas *et al.* (1980) used the internal drainage method in a material coordinate system, assuming that soil deformation was only vertical.

Ritchie *et al.* (1972b) determined the hydraulic conductivity of undisturbed, unsaturated vertisol cores in the laboratory. They used the pressure plate outflow method to measure the water diffusivity in the soil without taking into account soil movement. This method was approximate. Many other authors worked on clay pastes using a material coordinate system which assumes that soil deformation occurs in one direction only (e.g. Smiles & Harvey, 1973; Douglas & McKyes, 1978). Garnier (1996) used an inverse modelling method to determine the hydraulic conductivity of a remodelled vertisol: water

fluxes were described in a Lagrangian coordinate system (Raats & Klute, 1968, 1969), and the soil deformed in every direction. Nakano *et al.* (1986) and Angulo *et al.* (1990a) used a fixed (Eulerian) coordinate system to describe water and solid flows. By relating solid and water potentials, they could measure the Darcian hydraulic conductivity (Nakano *et al.*, 1986; Angulo *et al.*, 1990b), but deformation was only one-dimensional.

When determining the hydraulic conductivity of undisturbed unsaturated swelling soils in the laboratory one must do so as the soil dries. Indeed, when the soil rewets and swells, it can be laterally limited by the rigid sides of the core sampler, thus inducing a bias in the determination of the soil's characteristics (Bronswijk, 1990). In this respect, the method used by Kim *et al.* (1992a) is questionable. They used the falling head method on a saturated clay paste with different moisture ratios, but the core was not allowed to swell. Kim *et al.* (1992b) recorded tensiometer pressure profiles and elevation changes of a remodelled clay soil as it dried. The distances between tensiometers were corrected based on measurements of height, as were the cross-sections of the core, because of a differential shrinkage between the surface and the bottom of the core.

In our study we measured the matric hydraulic conductivity of an undisturbed unsaturated vertisol from Guadeloupe in the laboratory and in the field. In the laboratory we determined this conductivity under drying conditions by using an Eulerian coordinate system taking into account soil movements in every direction. In such a coordinate system, water and solid flows must be described. We defined the initial conditions so that the structural porosity was filled with air and water flowed only in the matric pores. In the field matric flow was described in a material or Lagrangian coordinate system using transducers that measured thickness variations of soil layers as the soil rewetted. In both theories water and solid flows are related to a unit cross-section of prism and not of soil. This is justified in two ways.

1 From a continuum point of view, the continuity of local variables (water and solid contents, water potential) is interrupted by the crack walls.

2 The soil behaviour (the appearance and disappearance of cracks) depends only on the matric flow, which is governed by the matric potential and matric hydraulic conductivity.

As the two methods are independent, we first present the theory and methods used in the laboratory and then those for the field.

Theory, materials and methods

Soil

The soil is a chromic vertisol from Guadeloupe (French West Indies) at la Simonière in St François (16°7'57''N, 61°19'03''W, 34 m elevation). Based on the results of Cabidoche & Ozier-Lafontaine (1995), we supposed that there was no water exchange from structural to matric porosities.

Laboratory measurements: theory

The soil is considered as a three-phase system: water, air and solid particles, each phase being in motion. The air flow is neglected. As water and solid are both in motion, we can describe water and solid flows in a fixed Eulerian coordinate system (subscript /o) or in a moving coordinate system linked to the solid flow (subscript /s). Hereafter, subscript w refers to water and subscript s to solid. The following hypotheses are supposed to be satisfied:

- 1 the matric porosity is homogeneous and isotropic;
- 2 solid particles are incompressible and chemically inert;
- 3 water is incompressible and pure;
- 4 water flow is isothermal and hydrodynamically stable;
- 5 the flow of water vapour and the phase transition of water are not significant;
- 6 a unique representative elementary volume can be defined for all the variables and parameters;
- 7 there are no sinks and sources;
- 8 Darcy's law is valid for water flow;
- 9 the solid flow is described by the following phenomenological transfer equation:

$$\mathbf{q}_{s/o} = -\mathbf{K}_{s/o} \cdot \vec{\nabla} \psi_s, \quad (1)$$

where $\mathbf{q}_{s/o}$ is the solid flow, $\mathbf{K}_{s/o}$ is the tensorial apparent solid conductivity, ψ_s is the solid potential which depends on the solid content only, and $\vec{\nabla}$ is the vector differential operator. Hypotheses 1 to 8 originate from Vauclin (1988), and hypothesis 9 originates from Nakano *et al.* (1986) and Angulo *et al.* (1990a).

From hypotheses 2 to 6 it can be deduced that the total water potential ϕ is the sum of the matric potential ψ_m (the opposite of the suction), the gravimetric potential $-z$ (assuming the vertical axis to be positive downward) and the overburden potential Ω (Philip, 1969). Hereafter, gravimetric and overburden potential will be neglected because of their small values (a few centimetres) compared with that of the matric potential (several hundreds of centimetres). If we suppose that the water content is uniform in the horizontal plane then both solid and water potentials are uniform in the plane. Thus Darcy's law in both a fixed and moving coordinate system and Equation (1) for solid particles can be written as

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{q}_{w/o} &= -\mathbf{K}_{w/o} \cdot \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} \cdot \mathbf{e}_z \right) & (2a) \\ \mathbf{q}_{w/s} &= -\mathbf{K}_{w/s} \cdot \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} \cdot \mathbf{e}_z \right) & (2b) \\ \mathbf{q}_{s/o} &= -\mathbf{K}_{s/o} \cdot \left(\frac{\partial \psi_s}{\partial z} \cdot \mathbf{e}_z \right), & (2c) \end{aligned} \right.$$

where \mathbf{q} is the flux and \mathbf{e}_z is the unit vector of the vertical axis. Symmetrical tensorial conductivities are written:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K^{xx} & K^{xy} & K^{xz} \\ K^{xy} & K^{yy} & K^{yz} \\ K^{xz} & K^{yz} & K^{zz} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

If we suppose that the soil is not stratified (hypothesis 1), then the hydraulic conductivity $\mathbf{K}_{w/s}$ is isotropic and reduces to a scalar $K_{w/s}$. On the contrary, it is worth pointing out that the soil behaves as if it were stratified in the Eulerian coordinate system: the potential gradients are only vertical, but the movements of water and solid occur in every direction (for instance, see the cracks opening following a vertical evaporation). This leads us to consider the apparent hydraulic conductivity $\mathbf{K}_{w/o}$ and the apparent solid conductivity $\mathbf{K}_{s/o}$ as a tensorial property.

From hypothesis 1 it can be deduced that the water flow with respect to the fixed coordinate system is related to the water flow relative to the soil particles and to the flow of soil particles by the following equation:

$$\mathbf{q}_{w/o} = \mathbf{q}_{w/s} + \frac{\theta}{\sigma} \cdot \mathbf{q}_{s/o}, \quad (4)$$

where θ and σ are the water and solid contents. According to Nakano *et al.* (1986) and Angulo *et al.* (1990a), the relation between solid and water potentials is assumed to be:

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial z} = -v \cdot \frac{\partial \psi_w}{\partial z}, \quad v \in [0,1]. \quad (5)$$

The negative sign indicates that $(\partial \psi_s / \partial z)$ and $(\partial \psi_w / \partial z)$ act in opposite directions. In a saturated porous medium ψ_s and ψ_w are analogous to the effective mechanical stress and to the pore water pressure, respectively, and v is equal to 1 (Angulo *et al.*, 1990a). By combining Equations (2), (4) and (5) we have in the vertical direction:

$$K_{w/o}^{zz} = K_{w/s} - v \cdot \frac{\theta}{\sigma} \cdot K_{s/o}^{zz}. \quad (6)$$

The aim is now to eliminate v .

Instead of using the hydraulic conductivities in Equation (2), we can use the diffusivity tensors that are related to conductivities by the usual relation:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{D}_{w/o} &= \mathbf{K}_{w/o} \cdot \frac{d\psi_w}{d\theta} \\ \mathbf{D}_{s/o} &= \mathbf{K}_{s/o} \cdot \frac{d\psi_s}{d\sigma} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Thus, the combination of Equations (2), (7) and (5) implies

$$\frac{D_{s/o}^{zz}}{D_{w/o}^{zz}} = \frac{K_{s/o}^{zz}}{K_{w/o}^{zz}} \cdot \frac{d\psi_s}{d\psi_w} \cdot \frac{d\theta}{d\sigma} \quad (8)$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{D_{s/o}^{zz}}{D_{w/o}^{zz}} = -v \cdot \frac{K_{s/o}^{zz}}{K_{w/o}^{zz}} \cdot \frac{d\theta}{d\sigma}$$

By introducing Equation (8) in Equation (6) and thus eliminating v , we have

$$K_{w/s} = K_{w/o}^{zz} \cdot \left(1 - \frac{\theta}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\theta} \cdot \frac{D_{s/o}^{zz}}{D_{w/o}^{zz}} \right) \quad (9)$$

According to Equation (9), we can calculate the hydraulic conductivity $K_{w/s}$ from the apparent conductivity $K_{w/o}^{zz}$, the measurements of water and solid contents θ and σ , the apparent diffusivities, and the shrinkage curve, which gives $(d\sigma/d\theta)$.

Suppose water evaporates from a cylindrical saturated clod by its open face and that its base is impervious. The water balance calculated for a clod layer extending from depth z_0 to the base of the clod for a Δt time increment is

$$\frac{\Delta V_w}{\Delta t} = - \iint_{\Sigma = \Sigma_{bot} + \Sigma_{up} + \Sigma_{lat}} \mathbf{q}_{w/o} \cdot \mathbf{n} \cdot d\Sigma \quad (10)$$

where \mathbf{n} is the unitary vector pointing outside the elementary surface $d\Sigma$. Σ is the outside surface of the clod layer. It is formed by the circular base Σ_{bot} , the upper circular surface Σ_{up} and the lateral surface Σ_{lat} . The water fluxes across Σ_{bot} and Σ_{lat} are nil and consequently are $\iint_{\Sigma_{bot} + \Sigma_{lat}} \mathbf{q}_{w/o} \cdot \mathbf{n} \cdot d\Sigma$. The water balance becomes

$$\frac{\Delta V_w}{\Delta t} = q_{w/o}^{zz}(z_0, t) \cdot \Sigma_{up} = -D_{w/o}^{zz}(\theta(z_0, t)) \cdot \left(\frac{d\theta}{dz} \right)_{z_0, t} \cdot \Sigma_{up} \quad (11)$$

and we can then determine the apparent water diffusivity. A solid balance would give the same results for the solid apparent diffusivity. Having determined the diffusivities, we can calculate $K_{w/s}$ with Equation (9).

Laboratory measurements: experimental procedure

An undisturbed cylindrical soil core (45 cm in height and 8.5 cm in diameter) was sampled in the subsoil inside the prism delimited by cracks. The sampling was done after continued ponding followed by a little drying to allow cracks to open slightly in the prismatic layer. Two gravimetric water content profiles were determined, and small undisturbed aggregates were sampled in the immediate vicinity of the core. The water content, volume and structural porosity of these aggregates were measured and plotted on the shrinkage curve. Once in the laboratory, the 45-cm high core was cut into 10 small cylindrical cores, each 4.5 cm in height and 8.5 cm in

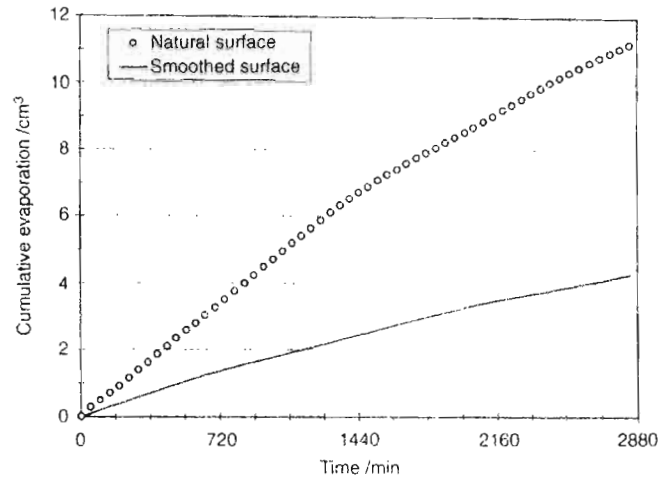


Figure 1 Smoothing effect upon drying of a small clod of vertisoi. In the first case (open circles) the surface of the clod is not smoothed, whereas in the second case (continuous line) it is. The cumulative evaporation from a core with a smoothed surface always represents about one-third of the cumulative evaporation from a core with a natural surface.

diameter. Figure 1 shows that the evaporation rate decreases considerably when the open face was smoothed. In order to avoid this smoothing when preparing the small cores, hot air was applied at the upper surface of each small core for about 20 s before starting the experiment. This created a mulch formed by millimetre-sized aggregates that closed the hydraulic path so water could not move vertically any more. The microaggregates were then chipped away with the tip of a flexible knife. In this way, the natural pores at the surface remained open, and the water content was still homogeneous inside the core.

Water was then allowed to evaporate from the upper surface of each core under laboratory conditions (conditioned atmosphere at 24°C). The base of each core was sealed to prevent downward fluxes. As the core dried it shrank, and shrinkage was greater at the top than at the bottom. The shape of the core became a frustrum of a cone, and this allowed evaporation from the sides. To prevent this evaporation the sides of the core were smoothed during sampling in the field and we put silicon grease between the core and cylindrical walls. By measuring the water content at different distances of the sample wall for two different clods, we made sure that the water content did not vary horizontally (see Figure 2). Each core was then studied at different time intervals. For a given core and a given time interval 13 measurements of the total vertical shrinkage were first made with a vernier. The number of measurement locations was chosen to obtain a good accuracy of the mean height of the core (standard error less than 0.5 mm), the total time required for the measurement being less than 1 min. The diameter of the core was measured at the bottom, at 20 mm from the bottom, and at the surface. The cross-sectional areas could thus be calculated. The core was

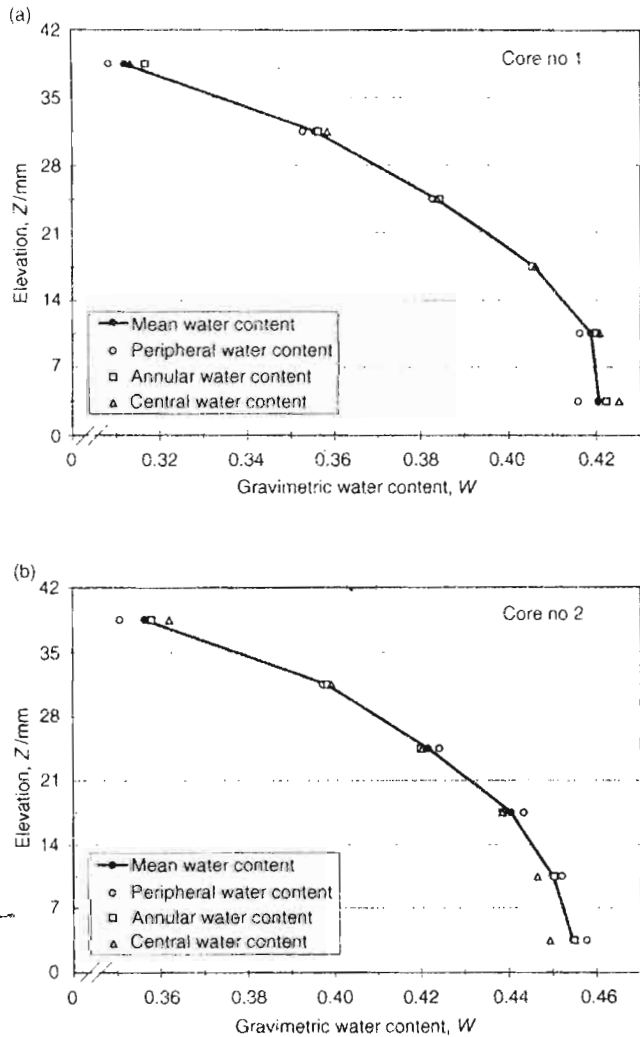


Figure 2 Gravimetric water content profiles of two cores subjected to drying in the laboratory atmosphere: W is the gravimetric water content (kg kg^{-1}) and Z the elevation (mm). The first core was sampled after 2780 min, and the second after 2400 min.

then cut into six thin layers of about 7 mm to measure gravimetric water content profiles. Volumetric water and solid contents and the matric potential could be deduced from the shrinkage and retention curves.

The water retention curve was determined by using the ultrafiltration apparatus of Tessier & Berrier (1979) for pressures less than 100 kPa, and the pressure plate apparatus for pressures between 100 kPa and 1600 kPa. Samples were initially saturated. The shrinkage curve was determined from small aggregates of a few cm^3 . Some of the aggregates were sampled in the field at different moisture contents. They were thus subjected to the natural field overburden potential. Other aggregates came from those used for the water retention curve. The overburden potential was consequently removed from these aggregates. The volumes were obtained from buoyancy measurements in petroleum, the aggregates having been saturated in petroleum (Monnier *et al.*, 1973).

At specific instants, water and solid content profiles and matric potential profiles were obtained. The apparent diffusivities were calculated according to Equation (11), and the apparent hydraulic conductivity $K_{w/o}^{zz}$ was obtained from the water balance and Equation (2). Equation (9) gave the Darcian hydraulic conductivity $K_{w/s}$.

Field measurements: theory

Material coordinates (subscript m) as described by Raats & Klute (1968, 1969) are used. The water balance on an elementary volume of a continuous ped without sinks and sources of water is

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_m = -\vec{\nabla}_m \cdot \mathbf{q}_{w/s}, \quad (12)$$

where $\vec{\nabla}_m$ is the vector differential operator expressed in the material coordinates of the solid phase and θ is the moisture ratio. Introducing Darcy's law into Equation (12), we get

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_m = \vec{\nabla}_m \cdot (K_{w/s} \cdot \vec{\nabla} \phi), \quad (13)$$

where ϕ is the total potential of water and $\vec{\nabla}$ the vector differential operator expressed in a fixed coordinate system.

The deformation gradient tensor relating $\vec{\nabla}_m$ to $\vec{\nabla}$ is

$$\vec{\nabla}_m = \mathbf{J} \cdot \vec{\nabla}, \quad \text{with} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial x_m} & \frac{\partial y}{\partial x_m} & \frac{\partial z}{\partial x_m} \\ \frac{\partial x}{\partial y_m} & \frac{\partial y}{\partial y_m} & \frac{\partial z}{\partial y_m} \\ \frac{\partial x}{\partial z_m} & \frac{\partial y}{\partial z_m} & \frac{\partial z}{\partial z_m} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Combining Equation (14) with Equation (13) we obtain

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_m = \vec{\nabla}_m \cdot (\mathbf{K}_m \cdot \vec{\nabla}_m \phi), \quad (15)$$

with

$$\mathbf{K}_m = K_{w/s} \cdot \mathbf{J}^{-1}. \quad (16)$$

Equation (15) is the same as equation (20) of Raats & Klute (1968). When deformation and flow occur in the vertical direction only, Raats & Klute (1969) wrote \mathbf{J} as

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\rho_{d0}}{\rho_d} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

where ρ_d is the dry bulk density and ρ_{d0} is the dry bulk density in an initial state. In general cases, deformation occurs in every direction, and \mathbf{J} is difficult to calculate (Raats & Klute, 1968; Vauclin, 1988). We propose calculating this matrix in the case of three-dimensional, but not necessarily equidimensional, soil movements by formulating some hypotheses.

Hypothesis 1. Soil moves without shearing: in which case the matrix \mathbf{J} becomes diagonal and can be written:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dx_m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dy}{dy_m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dz}{dz_m} \end{bmatrix} \quad (18)$$

For an elementary volume $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$, the corresponding material volume is

$$\Delta V_m = \frac{\Delta V}{1+e} = \Delta x_m \cdot \Delta y_m \cdot \Delta z_m, \quad (19)$$

where e is the void ratio. In the material coordinate system, the material volume is constant. By differentiating Equation (19) we have:

$$\frac{d(\Delta V_m)}{\Delta V_m} = 0 = \frac{d(\Delta x_m)}{\Delta x_m} + \frac{d(\Delta y_m)}{\Delta y_m} + \frac{d(\Delta z_m)}{\Delta z_m} \quad (20)$$

Hypothesis 2. As for the one-dimensional flow and deformation where the material coordinate is related to the fixed coordinate by the ratio $(1/(1+e))$, we introduce β so that

$$\begin{cases} \Delta x_m = \frac{\Delta x}{(1+e)^\beta} \\ \Delta y_m = \frac{\Delta y}{(1+e)^\beta} \\ \Delta z_m = \frac{\Delta z}{(1+e)^{1-2 \cdot \beta}} \end{cases} \quad (21)$$

Hypothesis 3. The soil deforms equidimensionally in the horizontal plane. Voltz & Cabidoche (1995) defined the anisotropic ratio k as the ratio between vertical and horizontal elongation rates:

$$k = \frac{(d(\Delta x)/\Delta x)}{(d(\Delta z)/\Delta z)} = \frac{(d(\Delta y)/\Delta y)}{(d(\Delta z)/\Delta z)} \quad (22)$$

Hypothesis 4. We look for β so that

$$\frac{d(\Delta x_m)}{\Delta x_m} = \frac{d(\Delta y_m)}{\Delta y_m} = \frac{d(\Delta z_m)}{\Delta z_m} = 0. \quad (23)$$

Equation (23) is different from Equation (20), which comes from the mass conservation of solid particles. Now, from Equation (21) we have

$$d(\Delta x_m) = \frac{d(\Delta x)}{(1+e)^\beta} - \beta \cdot \frac{\Delta x}{(1+e)^\beta} \cdot \frac{de}{1+e} \quad (24)$$

By definition, we have

$$\frac{de}{1+e} = \frac{d(1+e)}{1+e} = \frac{d(\Delta V)}{\Delta V} = \frac{d(\Delta x)}{\Delta x} + \frac{d(\Delta y)}{\Delta y} + \frac{d(\Delta z)}{\Delta z} \quad (25)$$

Equation (25) becomes by using Equation (22):

$$\frac{de}{1+e} = (1+2 \cdot k) \cdot \frac{d(\Delta z)}{\Delta z} = \frac{(1+2 \cdot k)}{k} \cdot \frac{d(\Delta x)}{\Delta x} = \frac{(1+2 \cdot k)}{k} \cdot \frac{d(\Delta y)}{\Delta y} \quad (26)$$

Thus, when we put Equation (26) into Equation (24) and then Equation (24) into Equation (23), the fourth hypothesis becomes

$$\beta = \frac{k}{1+2 \cdot k} \quad (27)$$

and putting Equation (27) into Equation (16) the material hydraulic conductivity tensor \mathbf{K}_m can be written

$$\mathbf{K}_m = \begin{bmatrix} K_m^h & 0 & 0 \\ 0 & K_m^h & 0 \\ 0 & 0 & K_m^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{w/s}}{(1+e)^\beta} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{w/s}}{(1+e)^\beta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{w/s}}{(1+e)^{1-2 \cdot \beta}} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Equation (15) and the above-mentioned material conductivity tensor are equivalent to the results of Garnier (1996). This tensor can be written as a scalar if $K_m^h = K_m^v$, which is equivalent to

$$\beta = 1 - 2 \cdot \beta \Leftrightarrow \beta = \frac{1}{3} \Leftrightarrow k = 1, \quad (29)$$

i.e. when soil deformation is isotropic. For the vertisol studied, Cabidoche & Ozier-Lafontaine (1995) found an anisotropic ratio of 0.85: vertical movements were more important than horizontal ones. With this value, Equation (27) implies $\beta < 1/3$, and thus $K_m^h < K_m^v$.

In the case of vertical one-dimensional soil movement and

water flow the ratio k is nil – see Equation (22) – as is β according to Equation (27). Equation (15) becomes

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{\text{m}} = \frac{\partial}{\partial z_{\text{m}}} \left(K_{\text{m}} \cdot \frac{\partial(\Psi_{\text{m}} - z + \Omega)}{\partial z_{\text{m}}} \right), \quad (30)$$

with

$$K_{\text{m}} = \frac{K_{\text{w/s}}}{1+e}. \quad (31)$$

Equations (30) and (31) are equivalent to the relation (9) of Philip (1969), relations (12) and (13a) of Angulo *et al.* (1990a), and (14) of Kim *et al.* (1992a). Hence, our theory reduces to the existing theory for one-dimensional fluxes.

If the matric potential is uniform in a horizontal plane then the water flows only vertically but soil deforms three-dimensionally still. In that case we get Equation (30) from Equation (15), but Equation (31) is now

$$K_{\text{m}} = \frac{K_{\text{w/s}}}{(1+e)^{1-2 \cdot \beta}}. \quad (32)$$

Field measurements: experimental procedures

We used a transducer named THERESA that measures thickness changes of soil layers. It was designed by taking into account the intrinsic properties of vertisols. Its conditions of use are described in Cabidoche & Voltz (1995) and in Cabidoche & Ozier-Lafontaine (1995). The model relating thicknesses and the gravimetric water content is described in Voltz & Cabidoche (1995). We supposed a constriction of the structural porosity along the normal phase of shrinkage proportional to matric shrinkage (McGarry & Daniells, 1987; Cabidoche & Voltz, 1995). Thirty transducers were set up in the experimental parcel during three periods between 1993 and 1996. Five soil layers were investigated with six replicates for each depth. This led to a good accuracy of 0.02 kg kg^{-1} for the calculation of the mean water content (Cabidoche & Ozier-Lafontaine, 1995). We supposed that the average water content profile changes were caused by vertical matric flow only. No exchange was supposed to occur from either structural to matric porosity or from cracks to matric porosity. The experimental parcel was drained by a network of pipes 16 m apart and 1.1 m deep. Hydrographs were installed at triangular weirs to record overland flow and drainage. We studied rewetting of the profile during and after each rainfall event not followed either by drainage or by runoff. At the bottom of the profile (1.20 m in depth) an impervious layer prevented downward water fluxes. A water balance was made from the impervious base to the depth of 80 cm and 50 cm. By using the instantaneous profile method, the vertical material hydraulic conductivity could be calculated from Equations (30) and (32), assuming vertical water flow and three-dimensional deformation of the soil.

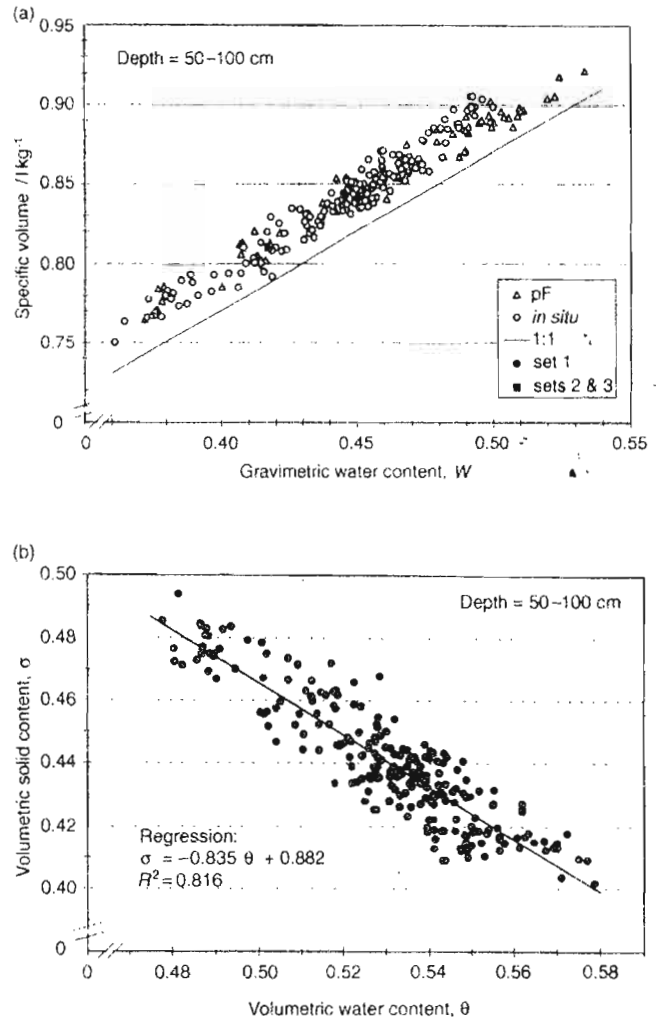


Figure 3 Shrinkage curves of aggregates: specific volume against gravimetric water content (Figure 3a) and volumetric solid content against volumetric water content (Figure 3b). In Figure 3(a), the continuous line is the saturation line; the *in situ* samples (open circles) were subjected to the overburden potential, while this potential was removed in the samples used for the retention curve (open triangles). In Figure 3(b) the continuous line is the regression given by the equation written in the figure; the slope of this line, $(d\sigma/d\theta)$, is used in Equation (9).

Results and discussion

The shrinkage curve is plotted in Figure 3(a) (W against v) and in Figure 3(b) (θ against σ). No difference can be observed between the aggregates sampled in the field and subjected to the overburden and the other aggregates in which the overburden was removed. This result and the uniform value of 0.85 of the ratio k with depth (Cabidoche & Voltz, 1995) show that the overburden potential does not influence soil properties. It contrasts with the results of Bronswijk (1990) who investigated unripe wet marine clay soil.

The retention curve is plotted in Figure 4 and fitted with the model of Van Genuchten (1980). In the laboratory studies,

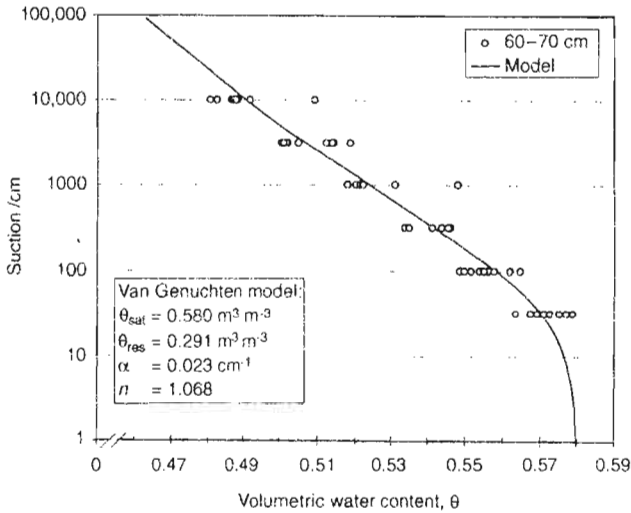


Figure 4 Retention curve of aggregates fitted with the model of Van Genuchten:

$$\frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \frac{1}{\{1 + (\alpha \cdot |\psi_m|)^n\}^{1/n}}$$

The clods were sampled at a depth of 60–70 cm.

three sets of cores were sampled. We plotted on the shrinkage curve the initial conditions of each set at the beginning of the experiment (Figure 3a). The initial conditions of each set were measured on the small aggregates sampled near the core (see *Laboratory measurements: experimental procedure*, first paragraph). This shows that structural porosity does not contain water and that water fluxes are only matric fluxes. The instantaneous profiles for these sets are plotted in Figure 5(a,b,c) for the water content, and in Figure 6(a,b,c) for the solid content. The ratio between the apparent conductivity $K_{w/o}^{zz}$ and $K_{w/s}$ is plotted in Figure 7. This ratio ranges from 1 for dry soil to 5 when wet, the discrepancy being larger for the wetter soil. Nakano *et al.* (1986) and Angulo *et al.* (1990b) found a ratio ranging from 1 to 3 for bentonite pastes.

In the field the model of Voltz & Cabidoche (1995) was used to calculate the gravimetric water content and specific volume of peds, and thus the volumetric water content. In Figure 8 we plotted the $K_{w/s}$ obtained in laboratory experiments and in the field.

The Darcian conductivity results show little variation when the soil is dry, but they are more variable for wet soil. The polynomial adjustment of degree 3 gives a conductivity value of 0.2 cm day⁻¹ for a water content of 0.570 m⁻³ m⁻³ (matric potential of -3 kPa). Ritchie *et al.* (1972a) found an apparent conductivity of 0.03 cm day⁻¹ at the same matric potential in vertisols from Texas and a field saturated conductivity of 0.1 cm day⁻¹ (Ritchie *et al.*, 1972b). Douglas & McKyes (1978) measured a material conductivity of 0.08 cm day⁻¹ for a matric potential of -0.1 kPa in a remodelled clay soil. The field measurements are more variable, but our experimental plot could be partly responsible for it. During the three

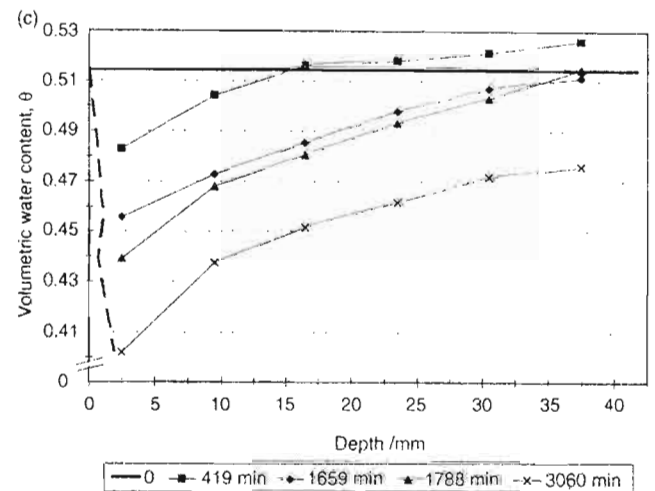
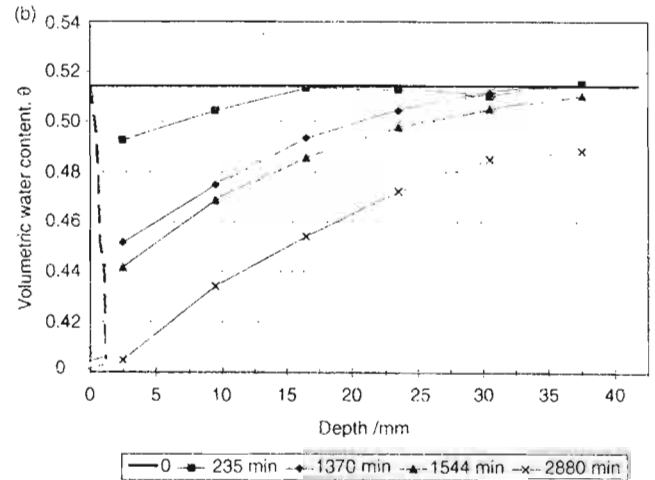
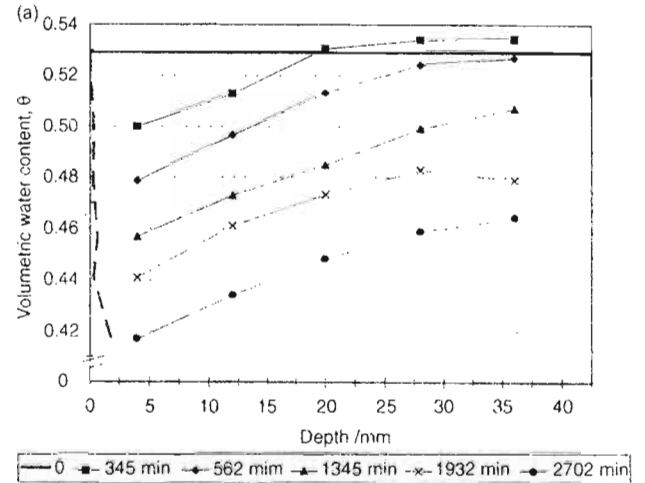


Figure 5 Instantaneous profiles of the volumetric water content for the three sets of cores. The dashed line represents the total vertical shrinkage of the core with time.

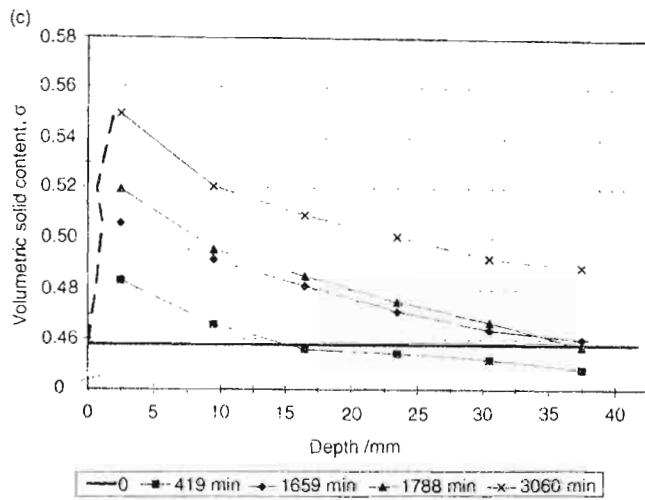
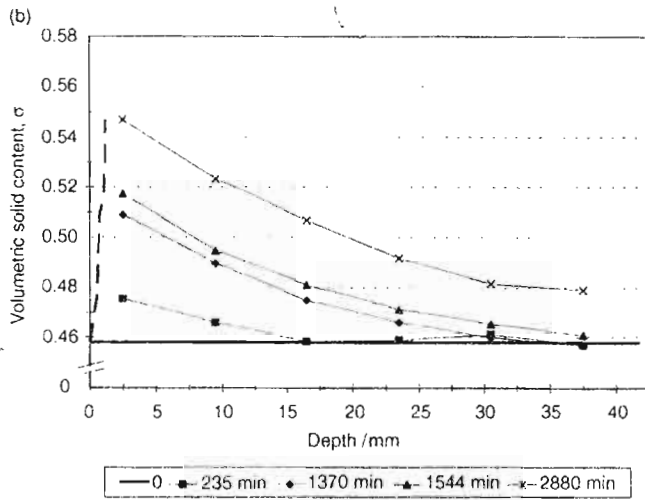
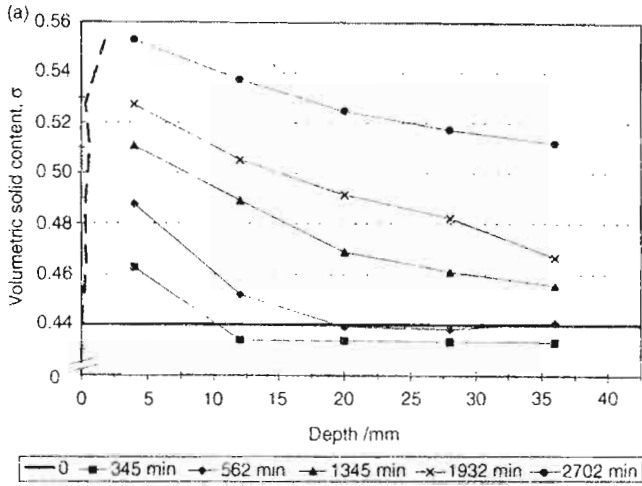


Figure 6 Instantaneous profiles of the volumetric solid content for the three sets of cores. The dashed line represents the total vertical shrinkage of the core with time.

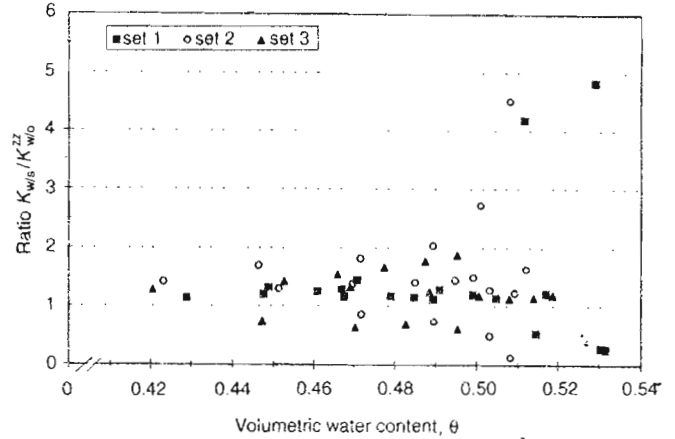


Figure 7 Ratio (K_{ws}/K_{w0}^{22}) against volumetric water content.

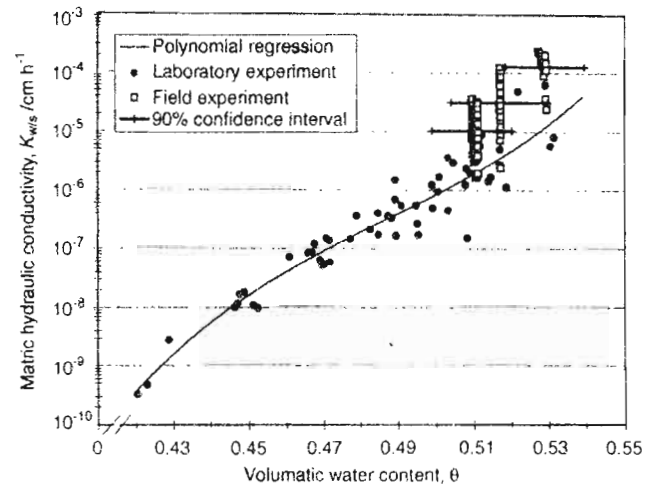


Figure 8 Darcian unsaturated hydraulic conductivity of the matric porosity measured in the field and in the laboratory. The polynomial regression was performed upon laboratory results. Horizontal bars represent the 90% confidence interval of the estimation of the mean water content due to spatial variation in the field experiment.

measurement periods during several months we could retain the rain on only three occasions to satisfy our assumptions about vertical water flow. Moreover, these events were quickly followed (several hours later) either by more heavy rain that caused drainage or runoff, or by water absorption by plant roots. The changes in thickness and water contents were then small. Indeed, the water content changes were of the same order of magnitude as the experimental accuracy. Nevertheless, despite this variation, the conductivities calculated from the field experiment are always one order of magnitude greater than the conductivities obtained in the laboratory. Some authors (Flühler *et al.*, 1976) found significant differences between the *in situ* hydraulic conductivity and the conductivity determined in the laboratory, especially for fine-textured swelling soils. In our case, as *in situ* and laboratory measurements were made under wetting and drying conditions respectively, we can

consider that a physical hysteresis is responsible for this discrepancy. We discuss this hypothesis below.

This hysteresis cannot be caused by bypass flow in the structural pores because exchange of water from structural porosity to matric porosity is almost nil. Moreover, the transducers make it possible to measure the matric water content only. Preferential flow paths along slickensides must also be rejected because, in the soil we studied, the slickensides are just failure planes and have negligible volume. It seems questionable to explain this hysteresis by bypass flow in the biggest matric pores: on the one hand these pores are saturated as far as the flow occurs in the normal phase of the shrinkage curve, and on the other the size of these pores is less than 2 μm . The larger value of conductivity measured during wetting could be caused by microcracks along the wetting front. Stengel (1983) observed this phenomenon in the field at the surface of the soil. In our experiments, as cracks remained open in the deep layers, the volume of these cracks enabled microcracks to appear when the peds rewetted. Lastly, our hypothesis concerning vertical water flow could be wrong. Owing to the spatial variation of the network of cracks and soil characteristics, water can enter cracks in a part of the field plot even if no drainage is recorded. This water can then wet the peds horizontally. Consequently some of the transducers near the axes of the prisms measured variations in thickness due to vertical flow only and elsewhere those near crack walls measured changes caused by both vertical and horizontal flow.

For the three periods that we studied we plotted the 90% confidence interval of the estimates of the mean water content (Figure 8). Taking into account this spatial variation, we can see that the field conductivities are in the same range as those recorded at the laboratory. Thus, we cannot conclude that physical hysteresis is responsible for the discrepancy between field and laboratory measurements.

We made calculations by both incorporating and not incorporating the overburden potential in the total potential for the field experiment. The conductivities calculated with the overburden potential were found to be not significantly different (at a 5% level) from the conductivities calculated without taking into account the overburden potential. This is because the gradients of overburden potential (about 1 m m^{-1}) are smaller than those of matric potentials (about 70 m m^{-1}).

Conclusions

We have presented a laboratory method to measure the apparent and Darcian hydraulic conductivity of the matric porosity of a vertisol as a function of the water content under drying conditions. The theory deals with solid deformation and water flow in every direction and describes water flow in an Eulerian coordinate system. In our experiments we restricted to vertical water flow only and we ensured that water flowed only in the matric porosity. Millimetre-sized aggregates were removed from the side of the core so that the natural pores at the surface

remained open and water could evaporate from them. Thus smoothing effects on the evaporation rate were avoided. Under rewetting conditions, the Darcian conductivity was measured in the field using a material coordinate system. The equations developed for that take into account vertical and horizontal soil movements and water flow. The deformations were not assumed to be equidimensional. Nevertheless, even if we suppose in our theory that soil movements are free of shear, which is probably not true, nothing more satisfactory can be used to describe three-dimensional water fluxes and soil movement.

We showed that the overburden potential did not influence soil properties and that its gradient was smaller than the gradient of the matric potential. The ratio between field conductivity and laboratory conductivity was about 10. This discrepancy may be explained by a hysteresis caused by a network of fine cracks that develops during the rewetting of the peds, but our results did not allow us to draw a final conclusion.

Acknowledgements

We are grateful to Claire Gay from the translation department of INRA for improving the English of this paper. We are also indebted to the two anonymous reviewers whose comments helped to improve an earlier version.

References

- Angulo, R., Gaudet, J.P., Thony, J.L. & Vauclin, M. 1990a. Conductivité hydraulique d'un milieu poreux partiellement saturé, déformable. I. Principes de détermination. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II*, **310**, 161–164.
- Angulo, R., Gaudet, J.P., Thony, J.L. & Vauclin, M. 1990b. Conductivité hydraulique d'un milieu poreux partiellement saturé, déformable. II. Résultats expérimentaux. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II*, **310**, 341–345.
- Bronswijk, J.J.B. 1990. Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses. *Soil Science Society of America Journal*, **54**, 1500–1502.
- Cabidoche, Y.-M. & Ozier-Lafontaine, H. 1995. THERESA: I. Matric water content measurements through thickness variations in vertisols. *Agricultural Water Management*, **28**, 133–147.
- Cabidoche, Y.-M. & Voltz, M. 1995. Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil: II. A field study on a Vertisol. *European Journal of Soil Science*, **46**, 345–355.
- Douglas, E. & McKyes, E. 1978. Compaction effects on the hydraulic conductivity of a clay soil. *Soil Science*, **125**, 278–282.
- Douglas, E., McKyes, E., Taylor, F., Negi, S. & Raghavan, G.S.V. 1980. Unsaturated hydraulic conductivity of a tilled clay soil. *Canadian Agricultural Engineering*, **22**, 153–161.
- Fühler, H., Germann, P., Richard, F. & Leuenberger, J. 1976. Bestimmung von hydraulischen Parametern für die Wasserhaushaltsuntersuchungen im natürlichen gelagerten Boden. Ein Vergleich von Feld- und Laboratoriumsmethoden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **139**, 329–342.

- Garnier, P. 1996. *Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols déformables par la méthode inverse*. Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I, Nancy.
- Jarvis, N.J. & Messing, I. 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, **59**, 27–34.
- Jarvis, N.J., Leeds-Harrison, P.B. & Dosser, J.M. 1987. The use of tension infiltrometers to assess routes and rates of infiltration in a clay soil. *Journal of Soil Science*, **38**, 633–640.
- Kim, D.J., Diels, J. & Feyen, J. 1992a. Water movement associated with overburden potential in a shrinking marine clay soil. *Journal of Hydrology*, **133**, 179–200.
- Kim, D.J., Vereecken, H., Feyen, J., Boels, D. & Bronswijk, J.J.B. 1992b. On the characterization of properties of an unripe marine clay soil II. A method on the determination of hydraulic properties. *Soil Science*, **154**, 59–71.
- McGarry, D. & Daniells, I.G. 1987. Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a Vertisol. *Soil Science Society of America Journal*, **51**, 1575–1580.
- McIntyre, D.S. & Sleeman, J.R. 1982. Macropores and hydraulic conductivity in a swelling soil. *Australian Journal of Soil Research*, **20**, 251–254.
- Monnier, G., Stengel, P. & Fiès, J.-C. 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques*, **24**, 533–545.
- Nakano, M., Amemiya, Y. & Fujii, K. 1986. Saturated and unsaturated hydraulic conductivity of swelling clays. *Soil Science*, **141**, 1–6.
- Philip, J.R. 1969. Hydrostatics and hydrodynamics in swelling soils. *Water Resources Research*, **5**, 1070–1077.
- Raats, P.A.C. & Klute, A. 1968. Transport in soils: the balance of mass. *Soil Science Society of America Proceedings*, **32**, 161–166.
- Raats, P.A.C. & Klute, A. 1969. One-dimensional, simultaneous motion of the aqueous phase and the solid phase of saturated and partially saturated porous media. *Soil Science*, **107**, 329–333.
- Ritchie, J.T., Burnett, E. & Henderson, R.C. 1972a. Dryland evaporation flux in a subhumid climate: III. Soil water influence. *Agronomy Journal*, **64**, 168–173.
- Ritchie, J.T., Kissel, D.E. & Burnett, E. 1972b. Water movement in undisturbed swelling clay soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, **36**, 874–879.
- Smiles, D.E. & Harvey, A.G. 1973. Measurement of moisture diffusivity of wet swelling systems. *Soil Science*, **116**, 391–399.
- Stengel, P. 1983. Cracks formation during swelling: effects on soil structure regeneration after compaction. In: *Proceedings Tillage and Traffic in Crop Production, Vol. 1*. pp. 147–152. International Soil Tillage Research Organization, Haren.
- Stirk, G.B. 1954. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, **5**, 279–290.
- Tessier, D. & Berrier, J. 1979. Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. *Science du Sol*, **17**, 67–82.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892–898.
- Vauclin, M. 1988. Hydrodynamique des sols partiellement saturés déformables. In: *Les phénomènes de transfert dans les milieux poreux déformables*. pp. 62–113. INRA Edition, Paris.
- Voltz, M. & Cabidoche, Y.-M. 1995. Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil: I. Theoretical analysis. *European Journal of Soil Science*, **46**, 333–343.

A casting method for the three-dimensional analysis of the intraprism structural pores in vertisols

Y.-M. CABIDOCHÉ^a & P. GUILLAUME^b

^aINRA, Unité Agropédo-climatique de la Zone Caraïbe, B.P. 515, 97165 Pointe-à-Pître Cedex, Guadeloupe, French Antilles, and

^bCIRAD-CA, Station de Roujoul, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, French Antilles

Summary

The structural voids in vertisols contain easily available water for plants and their volume can be calculated from the shrinkage curve. Access by plants to that water depends also on the geometric arrangement of the pores so that the water can flow through them. We have devised a method for studying the structural porosity by casting the pores in resin. The intraprism pore space of wet soil clods is impregnated with a UV fluorescent polyester resin under vacuum. When this has set we use the swelling properties of the clay to separate the clay matrix from the resin. A cast so obtained is the real three-dimensional solid reproduction of the structural porosity. This representation of the pore system is easier to study than results from computerized reconstitution of the three-dimensional space from two-dimensional images of soil in thin sections. Channels, packing pores and planar voids can be observed directly in three dimensions as the method saves the integrity and continuity of pores as small as 10 µm in diameter. The geometry of the cast shapes agrees with the interpretation of shrinkage and moisture characteristic curves. The method offers direct qualitative observation of pore organization and volume measurements of the intraprism structural porosity in vertisols.

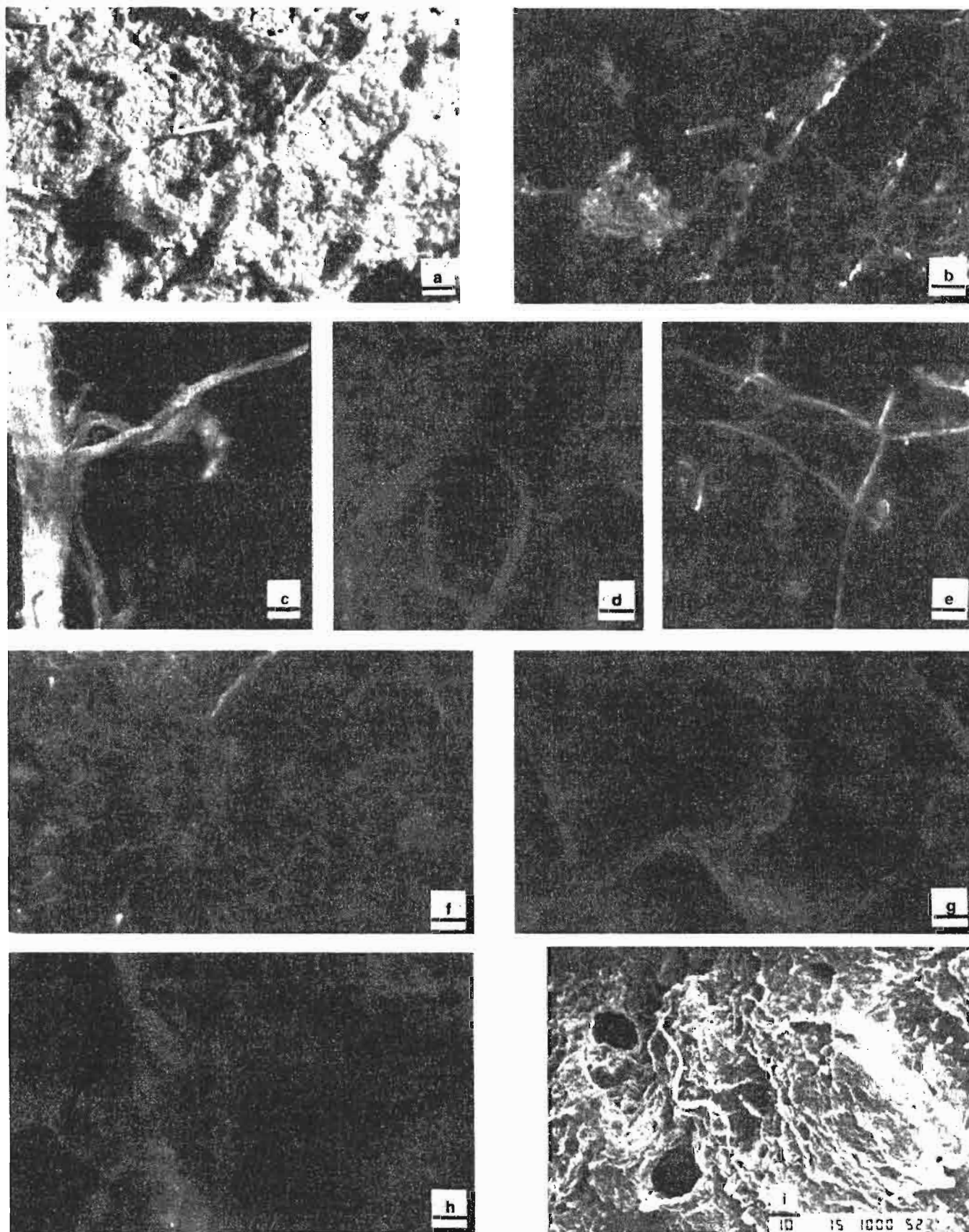
Introduction

Vertisols swell and shrink in three dimensions as the clay reorganizes in response to changes in water content. On drying, large approximately vertical cracks open, and the soil subsides. These macrocracks delimit prisms of soils. Shrinkage curves are commonly used to describe the relations between bulk volume of clods or cores, which are necessarily sampled from prisms, and their water content during desiccation. These shrinkage curves do not take macrocracks into consideration (Berndt & Coughlan, 1976; Yule & Ritchie, 1980; Bronswijk, 1988; Cabidoche & Ozier-Lafontaine, 1995). The desiccation of a saturated clod or aggregate starts with structural shrinkage (Stirk, 1954) when only small changes in volume are noticeable. This is interpreted as the emptying of geometrically stable structural pores. Then begins the normal shrinkage during which any loss of water results in an equal decrease of the bulk volume as the clay matrix deforms. Further drying results in residual shrinkage when air enters the clay matrix. However, residual shrinkage is never observed in field conditions below 20 cm, and the clay matrix remains permanently saturated with water in vertisols containing much swelling clay (Cabidoche & Voltz, 1995). The pore system of a vertisol can be subdivided

into four compartments, which are (i) the vertical macrocracks which open and close to compensate for the horizontal shrinking and swelling of the clay matrix, (ii) the subsidence or heave which compensates for the vertical shrinking or swelling of the clay matrix, (iii) the matric pores of the clay which change in shape and volume with changes in the matric water content, and (iv) the structural pores within prisms which have a relatively stable geometry.

These four compartments behave differently when water flows. The macrocracks open wide in the dry season, roots do not grow in them, they do not store water, and they are too wide for capillary flow (Beven & Germann, 1981). On flooding or after heavy rain, water penetrates deep into the soil where the clay matrix re-wets near the cracks (Jaillard & Cabidoche, 1984). When the soil wets the matrix expands, the macrocracks close, and the only remaining structural pores are the former pores within the prisms. Subsidence and heave can be measured using transducers such as THERESA (Cabidoche & Ozier-Lafontaine, 1995). These measurements make it possible to calculate the matric water content, i.e. the volume of the matric porosity as long as the soil remains saturated. The study of water extraction by sugar cane in vertisols using THERESA showed that matric water is not easily accessible to plant roots. Water stored in the structural pores within the prisms preferentially satisfies plants' demands for water, and consumption does not involve any variation in soil thickness

Correspondence: Y.-M. Cabidoche. E-mail: cabidoch@antilles.inra.fr
Received 17 December 1996; revised version accepted 22 December 1997



(Ozier-Lafontaine & Cabidoche, 1995). After the structural intraprism water reserve has been used, plants start to use the matric water and then the soil starts to shrink.

The volume of the intraprism structural porosity can be calculated from the shrinkage curve as the distance between normal and saturation lines (McGarry & Malafant, 1987). However it is likely that equal volumes of structural porosity do not provide the plants with equal access to the water reserve because the latter is affected by shape and connectivity of pores. Therefore, a morphological approach to the intraprism structural porosity, focusing on pore shapes, interconnections between pores and their consequences for hydraulic behaviour, should be of value.

Since the 1960s, several pedologists have studied the micro-morphology of the structural pore space by analysing thin sections of undisturbed soil samples impregnated with resin. Brewer (1964) recognized four major pore types: channels, planar voids, packing pores, and vughs. Channels, essentially cylindrical but tortuous, are created by roots and soil fauna. They appear in two dimensions as circles or ellipses. They are trans-structural in the sense that they do not define structural units but may pass through or between them (Ringrose-Voase, 1987). Planar voids or fissures are sheet-like pores of varying width, which appear as long lines in two-dimensional sections. They originate from shrinkage and swelling processes and mechanical stresses. Packing pores have irregular shapes and are highly interconnected. They result from loose packing of grains, aggregates or peds. Vughs, similar in shape to packing pores, are disconnected pores (Ringrose-Voase & Bullock, 1984). It is difficult to distinguish vughs from packing pores in two-dimensional sections (Ringrose-Voase, 1987).

Bouma *et al.* (1977), using methylene blue as a tracer, showed that channels, vughs and planar voids play a major role in saturated water flow. Bouma *et al.* (1979) also showed the sensitivity of calculated saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) for very small differences in the sizes of voids of clay soils. K_{sat} depends greatly on the width of planar 'necks' accounting for interaction between tubular and planar voids. These authors emphasized the difficulty of characterizing the specific part played by various types of macropores in conducting water by analysing thin sections, because this technique does not provide sufficient information about connectivity of pores in the three dimensions.

Advances in the stereological estimation of three-dimensional parameters from measurements on thin sections using sophisticated image analysis helped Ringrose-Voase & Nortcliff (1987) to elucidate the organization of macropores in homogeneous and isotropic soil. They attempted to reconstruct the

pore space from a series of two-dimensional images of resin-impregnated thin sections. The smallest spacing generally reached between sections, 50 μm , is sufficient to estimate the connectivity of cracks in clay soils (Scott *et al.*, 1988), but part of the information concerning the continuity of tubular or packing pores is lost (Cousin *et al.*, 1996). This can result in a topological misunderstanding, as De Hoff *et al.* (1972) demonstrated that the maximum spacing between sections should not exceed one-third of the length of the smallest studied object to allow pore continuity to be accurately established. Only very expensive techniques enable the three-dimensional reconstruction of a porous medium with a high precision such as X-ray synchrotron microtomography which provides non-destructive serial sections in 10- μm steps, but it can be used only on small samples of about 1 mm^3 (Spanne *et al.*, 1994).

Moreover, studies aimed at characterizing the hydraulic function of macropores during saturated flow do not describe pores smaller than 30 μm (Bouma *et al.*, 1979), whereas in vertisols in which structural water is consumed to a potential of -50 kPa (Ozier-Lafontaine, 1992) the equivalent pore diameter is about 6 μm according to Laplace's law.

Here we describe a new method of obtaining three-dimensional resin casts of the intraprism structural porosity of vertisols. We impregnated wet soil during normal shrinkage. Only the intraprism structural porosity, initially full of air at this shrinkage stage, was impregnated. The swelling and dispersion properties of clay were used to separate the intraprism structural porosity resin cast from the clay matrix. The method preserves the three-dimensional connectivity of the pores with diameters smaller than 10 μm , and the pore system can be directly observed under a stereomicroscope.

Materials and methods

Soil

The soil used for our study is a Chromic Vertisol (FAO-UNESCO, 1974) under sugar cane on the Gardel Estate (Guadeloupe), 16°18'N, 61°18'W, 32 m above sea level. Its clay content (< 2- μm fraction) is 80–85%. The clay fraction itself contains more than 70% beidellite, the specific surface of which reaches 600 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ (Robert *et al.*, 1991). The silt and sand contents are about 10% and 5%, respectively. The cation exchange capacity of 50 cmol kg^{-1} is almost saturated with Ca^{2+} , which prevails over Mg^{2+} and Na^+ . The brownish black A1 tilled layer (0–20 cm deep) has a subangular polyhedral structure at the centimetre scale. Earthworm casts

Figure 1 Photographs of impregnated (a–h) and natural (i) intraprism structural pores of vertisols. (a) F15 clod under natural light. (b) Same F15 clod as (a) under UV A. (c) Resin tube around root in F55 clod. (d) Interconnected cylinders and filaments in F25 clod. (e) Cylinders and filaments in F105 clod. (f) Tangled network of filaments in F25 clod. (g) Wall-shaped voids in K10 clod. (h) Spongiform structure in F15 clod. (i) SEM photograph of small tubular pores in F55 clod. Horizontal bar is 1 mm in (a), (b) and (e); 0.5 mm in (c), (d), (f), (g) and (h); 10 μm in (i).

are present. A greyish yellow-brown to yellowish brown B horizon (below 20 cm) consists of large continuous vertical prisms which appear during the dry season. The contact depth between the B horizon and the underlying coral reef limestone undulates between 60 cm and 150 cm. The only visible voids in these massive prisms are tubular pores from 0.1 to 5 mm in diameter created by roots and mesofauna. There are numerous slickensides. Scanning electron micrography reveals the presence of tubular pores of 6–15 μm diameter (Figure 1i). In this type of vertisol the clay matrix in untilled soil remains saturated at any water content in the field (Cabidoche & Voltz, 1995).

We treated the soil in two ways as follows.

1 Soil under 3-year-old sugar cane was implanted with THERESA thickness transducers in layers 10–20, 20–40, 40–60, 60–80 and 80–120 cm according to Ozier-Lafontaine & Cabidoche (1995). Undisturbed 25–40-cm³ clods of this soil were detached from prisms taken at the following depths: base of the A1 horizon at 15 cm, referred to as F15, and the B horizon at 20–25, 50–55 and 100–105 cm, referred to as F25, F55 and F105, respectively. Sampling was carried out after shrinkage had been recorded by the THERESA transducers, which indicated that intraprism structural porosity was filled with air.

2 Artificially prepared soil was obtained by kneading soil taken from the base of the A1 horizon beyond its liquid limit. The paste was then fragmented by alternate drying and wetting. This treatment simulated the result of repeated tillage carried out in wet conditions. The polyhedral aggregates of 2–10 mm thereby obtained were placed in a 30-dm³ container in which one maize plant was grown for 70 days. Irrigation kept the soil close to saturation for the first 60 days and was then stopped for the last 10 days. THERESA transducers were installed in the 0–15 and 15–30-cm layers. Undisturbed 25–40-cm³ clods were extracted from the container at 5–10 and 15–20-cm depths after shrinkage had been recorded. They are called kneaded and referred to as K10 and K20.

Shrinkage and air against water potential curves

The shrinkage curves were constructed from 10–40-cm³ undisturbed clods taken at the final stage of the kneading experiment (K10, K20) and under various moisture conditions in the field (F15, F55). The bulk specific volumes were determined by dipping the clods in petroleum by the technique of Monnier *et al.* (1973). Specific volumes of water were measured after desiccation at 105°C for 48 h in an oven.

Curves of specific volume of air against water potential curves were obtained on 4–20-cm³ undisturbed clods F55 and F105 using the ultrafiltration apparatus of Tessier & Berrier (1979) for pressures less than 10² kPa, with a 1-week equilibration time, and by pressure plate apparatus for pressures between 320 and 1000 kPa with a 3-week equilibration time.

Impregnation of soil clods

Intraprism samples featured a waterless structural porosity while the clay matrix remained humid and saturated with water. The usual impregnation methods to obtain thin sections involve first desiccating the soil by cryo-desiccation (Jongerius & Heintzberger, 1975), or by exchange of water with acetone (Miedema *et al.*, 1974). Despite these precautions it is difficult to avoid creating microcracks in strongly swelling soils. As our goal was to obtain casts only of the structural pore space, we did not attempt to replace the matric water. A polyester resin with low viscosity invaded the interconnected structural pores as soon as air was sucked out. It was then necessary to separate the resin-filled pores, visually, and if possible, physically.

The impregnation method was adapted from Murphy (1986). The resin used was a polyester resin (SODY 33/3 manufactured by the ESCIL company, Lyon) diluted with 12% acetone, 1% catalyst and 0.05% accelerator (SODY 33 C and 33 A) by volume. This mixture had sufficiently low viscosity to penetrate the smallest air-filled pores, but had sufficient flexibility and strength after polymerization and hardening not to break during the separation of the soil solids from the cast. Chromous oxalate (CrC₂O₄), 0.1% by weight, was added to the resin to make it fluoresce when excited by UV A (365 nm) (Murphy *et al.*, 1977), after it had been checked that there were no minerals or organic materials naturally present in the soil that fluoresce in UV A.

Each sample was placed in a 5 cm × 5 cm wide and 4 cm high container of rigid polypropylene. Resin was added so as to cover the sample by at least 0.5 cm. The container was enclosed in a desiccator, and vapour was removed by vacuum pump at an absolute pressure of 5 kPa. As soon as the resin ceased to bubble, i.e. after 5–20 h, the container was removed and the resin left to harden at 25°C. The block of impregnated soil was taken off the mould after 48 h.

Separation of soil solids from resin and observations

Here the goal was to separate the soil solids from the resin cast of the structural voids without damaging the resin architecture. We sawed each block of impregnated soil with a diamond saw into two 2-cm thick parallelepipeds. Each parallelepiped was made of one shell of resin surrounding on five faces an \approx 1-cm thick parallelepiped of impregnated soil. The cut face which gave direct access to the impregnated soil was cleaned as follows. A 30% H₂O₂ solution was spread over the side with a pipette. The H₂O₂ was left to attack the organic matter for 1 h, which helped to disperse the clay. The shells were then rinsed by immersion for 1 h in 0.5 l of sodium hexametaphosphate solution (7.5 g dm⁻³) with pH > 9 obtained by adding one 0.12-g NaOH tablet. The natural swelling properties of the clay helped it to separate from the resin before it dispersed. The cycle was then repeated. The rinsing solution

was filtered after each cycle on a 50- μm mesh sieve to recover any detached fragments of resin. We checked that the filtrate did not contain resin. After 5–7 cleaning cycles, no more solid could be detached from the resin cast without seriously damaging its architecture, and no improvement of the image could be obtained. Observations and photography were carried out using a stereomicroscope under UV A lighting at each step of the cleaning. Finally, the resin cast was freed to a depth of 0.5–1 cm below the initial soil face. The resulting collection of images showed the resin cast of the structural pores in place and enabled qualitative description of the shapes, interconnections, and spatial organization of the pores.

The shells were then totally emptied using a scalpel to extract the resin casts and the remaining clay, silt and sand. The classic sedimentation and siphoning method for granulometric analysis of soils (the bottle being filled with the dispersing solution prepared as above) was used to separate soil and resin totally. Sand settled before clay, silt and resin fragments, which were siphoned off after 15 s and filtered on the same 50- μm mesh sieve. The filtrate was poured again into the refilled sedimentation bottle, shaken, and siphoned onto the sieve after 15 s. This was repeated until all the resin had been extracted. UV light was used to check that the remaining filtrate did not contain resin particles. After collecting all the fragments of resin obtained during the cleaning cycles and after observations, the volume of the whole resin cast was determined from the weight and the density of the resin retained (1.25 kg dm⁻³). This made it possible to compare the volume of structural porosity as calculated from the shrinkage curve with the volume of the resin cast.

Results

Highlighting the resin cast structural porosity by UV A

The above process whereby we impregnated wet soil samples without filling the matrix pores by the resin enabled us to impregnate only structural pores, the smallest of which are about a few micrometres in diameter. Figure 1(a,b) illustrates how the method reveals the casts of the pores invaded by resin under UV A lighting. The two pictures show the same F15 impregnated clod during an intermediate cleaning cycle under (a) white or natural light and (b) UV light. The clay matrix disappears and leaves the fluorescent casts of structural voids. In image (a) one cannot identify any porosity; black areas are shaded because of obliquely lit surface irregularities. On the upper right of (b) one can see a flat, thin coat of resin covering the matrix. In the centres of the two images a tubular pore of 200 μm diameter is visible (probably a pore left by a dead root). In the upper left of image (b) a tangled network of thread-like pores of about 25 μm diameter is visible. In the diagonal of image (b) one can see a long, narrow strip of resin connected to filaments of resin.

Observation under stereo microscope gives a three-

dimensional view of the porosity. The reader should keep in mind that this cannot be reproduced in the two-dimensional photographs presented here.

Shapes and spatial organization of structural pores

Resin tubes and cylinders. This group of pore shapes and organization is found mostly in F25, F55 and F105 clods. It can be subdivided into three classes of increasing occurrence frequency, as follows.

- 1 Resin tubes fill the space located between roots and clay matrix. In a F55 clod shown in Figure 1(c), they are found around roots with diameters ranging from 200 to 600 μm . Short, thin branches are connected to the tubes.
- 2 Full cylinders often bearing ramifications with diameters of the order of 200 μm are visible in the field clods F25 to F105 shown in Figure 1(d) and (e), respectively.
- 3 Thin, tangled filaments are visible in all F15, F25, F55 and F105 clods. They are predominant in the prisms of the B layer, more numerous in the upper part of the prisms, F25 (Figure 1d,f) than in the lower part, F105 (Figure 1e). They are connected to the cylinders and form a very dense network in their vicinity. The diameters of these small, fuzzy filaments range from less than 10 μm to 25 μm . The tangled network of resin filaments not only appears in the vicinity of cylinders but can be distributed throughout the clay matrix, as shown in Figure 1(f) taken from an F25 clod. Most of these filaments do not extend in a straight line into the clay matrix, but develop a helicoidal shape (Figure 1f,h). The dimensions of these filaments cannot easily be measured *in situ*, but fragments of them collected on the sieve after final separation of clay and resin cast are 200–1500 μm in length and 10–25 μm in diameter. Where cylinders and filaments of various sizes are interconnected, the organization of the pore space can be described as a fuzzy, tangled network, evoking a 'shock of hair'.

Resin cellular walls. Cast voids prevalent in the samples of kneaded soil are quite different from the structural pores described above and can be illustrated by Figure 1(g), taken from a K10 clod. The voids resemble walls and have a cellular pattern. The sides range in length from 1000 to 2500 μm with a wall thickness of about 50–100 μm . Some secondary dihedral walls that penetrate the cells are connected to primary walls, which delineate the cells. These walls are the predominant pore shape found in the kneaded soil, while filaments and cylinders are rare.

Spongiform resin shapes. This subset of structural pores cast by resin is characterized by more diffuse shapes which cannot be described as easily as the two previous groups, and it is illustrated by Figure 1(h) taken from F15. The main pores make clusters of curved wedges or plates. These shapes evoke a diffuse network of irregular pores between aggregates and are filled by the resin rather than the regular cellular organization

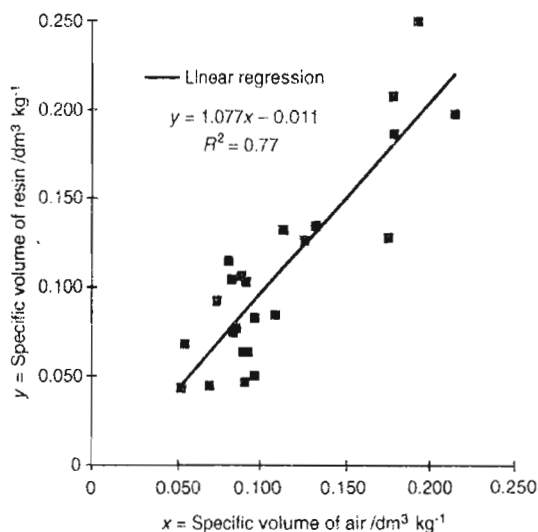


Figure 2 Comparison between the specific volume of the resin cast of intraprism structural pores and the specific volume of air measured on adjacent clods.

described above. These voids are oriented in all directions, and their organization recalls the structure of a sponge. There are also helicoidal filaments of resin clearly connected to these pores.

Volume of structural porosity: comparison between the specific volume of air given by the shrinkage curve and the volume of resin cast of structural pores

Twenty-four pairs of adjacent clods were taken to measure first the specific volume of air, as a classical estimation of the structural porosity volume in vertisols, and second the specific volume of resin collected. The comparison is given in Figure 2. The linear regression of the specific volume of resin on the specific volume of air gives a slope of 1.077 and an intercept of $-0.011 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$, with an R^2 of 0.77. Variance analysis indicates that the two variables are closely linked, as the probability for observing the results obtained if the variables were not linked is less than 0.01. The analysis of the reduced differences (Tomassone, 1987) between calculated and measured values shows that they follow a normal law which validates the linear model describing the relation between volume of resin and volume of air. This result indicates that the resin did indeed cast the intraprism structural pores.

Discussion

Efficiency of the structural pore space casting method

The easy separation of the clay matrix from the resin cast and the absence of fluorescent resin fragments in the filtrates at each cleaning step showed that no resin invaded the matrix porosity which, as assumed, was saturated with water. We can

also conclude that no exchange between matrix water and the mixture of resin plus acetone occurred. Resin impregnated only the structural pores within the prisms.

Figure 2 shows that the specific volume of resin is equivalent to the specific volume of air. Some pairs of clods have a smaller specific volume of resin than the specific volume of air. A possible explanation is that as impregnation using this method fills only interconnected pores, air can be trapped inside isolated pores, where the resin does not enter. Moreover, no filaments smaller than $10 \mu\text{m}$ were found in our clods, while the SEM (Figure 1i), showed that some structural pores are as narrow as $6 \mu\text{m}$. However, since samples are dried for SEM observation such small pore diameters could result from their constriction with shrinkage, as assumed by McGarry & Daniells (1987). Therefore the diameter of the smallest intraprism structural pores in wet conditions, i.e. the conditions of our impregnation method, could be larger than $6 \mu\text{m}$. This range of pore diameter might not be fully accessible to the impregnation by our method or might be partly lost during the cleaning. Other pairs have a resin specific volume greater than the air specific volume. This discrepancy might result from a few large pores not being taken into account when determining the specific volume of air by buoyancy in petrol. Another source of imprecision is the difficulty of exactly separating the resin cast from the shell of resin with a scalpel. Anyhow, due to their spatial variation, the structural porosity volumes of two adjacent clods, one used for impregnation and the other for bulk volume measurement, are different. Despite these limitations, one can consider that the resin casting method captures the structural pores and therefore exhibits most of the structural porosity.

Classification scheme based on organizational units and origin of structural porosity, related to micromorphological terminology of structural pores

The terminology used above to describe the three-dimensional objects cast by the resin can be related to the classification of shapes of the macropores in two dimensions according to Brewer (1964).

The cylinders include the channels created by roots and soil fauna. The voids cast by the resin clearly evoke the three-dimensional network of holes left by decayed roots and root hairs, whereas tangled thin filaments recall the shapes of helicoidal mycelia or actinomycete hyphae the pathways of which are filled by the resin (F15, F25, F55 and F105 clods). An important feature of the method is that it gives direct access to the three-dimensional continuity of these pores, avoiding equivocal identification and three-dimensional reconstruction from two-dimensional images of such narrow channels. The preservation of the integrity and connectivity of pores as thin as $10 \mu\text{m}$ might help further study on the origin, organization and functions of these biogenic trans-structural pores.

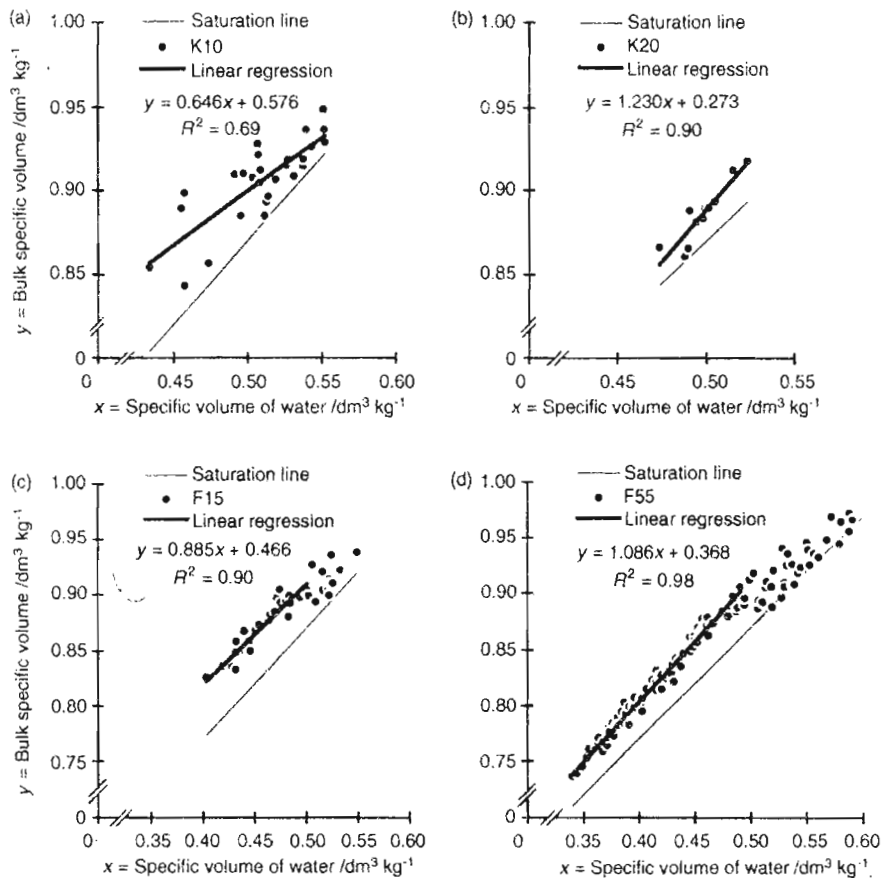


Figure 3 Shrinkage curves obtained from 10–40-cm³ clods extracted at different depths from kneaded (K) vertisol and from prisms of the field (F) vertisol. (a) K10; (b) K20; (c) F15; (d) F55.

The patterns of cellular walls appear as planar voids more or less connected in two-dimensional images. The cellular network delimits aggregates in a face-to-face arrangement, and thin, narrow secondary fissures develop from the walls into the aggregates. The observations from the kneaded clods show that the cells delimited by the network of primary walls are approximately the same size as the initial aggregates. They probably originate from the arrangement of the aggregates, and they can be considered as packing voids, though they would have been described as planar voids in two-dimensional thin sections. The narrow walls probably originate from the fissures, possibly initiated when irrigating the dry aggregates placed in the container, which widened when the aggregates dried as the water was extracted by the maize.

The plate- and wedge-shaped pores correspond to the packing pores described in two dimensions. Indeed, as resin cannot penetrate isolated pores in the wet matrix, our method cannot reveal vughs, strictly speaking. This is confirmed by the absence of isolated objects inside the clay matrix when checking the filtrates at all steps of the cleaning. This method would make it possible to remove the ambiguity concerning packing pores and vughs, as stressed by Ringrose-Voase (1987) and

implied by Bouma *et al.* (1977), who used the term vughs to describe voids, whose shapes were 'intermediate between rounded and elongated', and who did not mention the interpretative term of packing pores. Moreover, because the total specific volume of resin cylinders, walls, plates and wedges are equal to the air specific volume, it is likely that vughs are rare in the vertisol we studied.

Relation with shrinkage curves

The shrinkage curve plots the bulk specific volume of undisturbed clods against their specific volume of water. The bulk specific volume is the sum of the specific volumes of solid, water and air. The specific volume of air, and consequently the bulk specific volume, are random, and their distributions follow a normal law. The specific volume of water is measured with a negligible error. The normal shrinkage corresponds to a constant specific volume of air, and then is described by the linear part of the curve, the slope of which is 1. Therefore, both model and variables satisfy the conditions of application of the linear regression method (Webster, 1997). The normal shrinkage line was searched by applying a linear regression

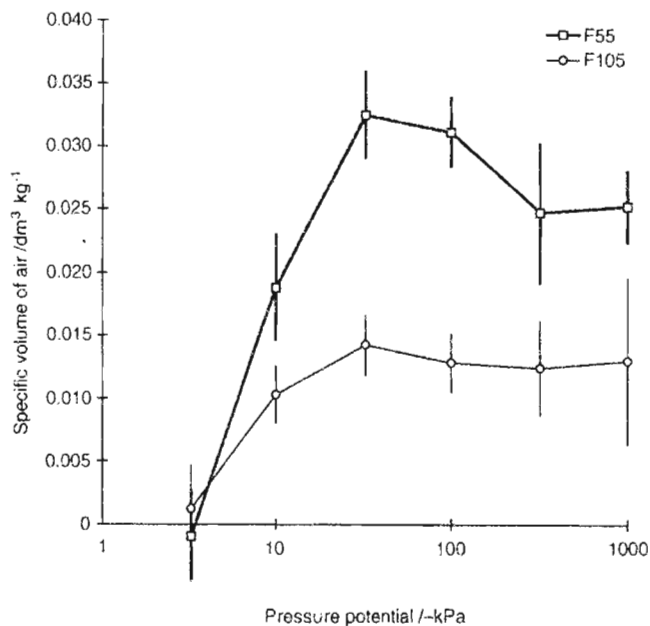


Figure 4 Relationship between specific volume of air and pressure potential in 4–20-cm³ undisturbed clods extracted from F55 and F105 layers of the field vertisol, showing a fuzzy tangled filaments cast of intraprism structural pores. Vertical bars indicate the confidence interval at $P = 0.95$.

of bulk specific volume on specific volume of water. We eliminated step by step the points of greatest water contents, corresponding to structural shrinkage, until the regression coefficient was maximized. The resulting slope of the regression line was then compared with the theoretical slope of 1.

Our sampling was destructive, and so we could not observe a wider range of water contents in the kneaded treatment than that due to spatial variability. Figure 3(a) shows the shrinkage line of K10 clods. In the 5–10 cm layer, there is a fairly large scatter about any straight line ($R^2 = 0.69$), and the regression of bulk specific volume on specific volume of water has a slope of 0.64, indicating heterogeneous air entry. The shrinkage is not normal, but residual. As drying occurs, microcracks corresponding to the secondary walls soon appear inside the aggregates, and the total volume of air-filled structural porosity increases. Figure 3(b) shows the shrinkage curve of K20 clods. The regression line of bulk specific volume on specific volume of water of the 15–20 cm layer ($R^2 = 0.90$) shows a small average specific volume of air ($0.02 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$) and a slope of 1.23, greater than 1 with a probability of 90%. These results accord with a contraction of wall-shaped pores, as the matrix shrinks, before air enters the aggregates.

Figure 3(c) gives the shrinkage curve of the F15 clods where both structural and normal shrinkage are visible. The regression applied to the normal shrinkage part ($R^2 = 0.90$) gives a slope of 0.885 which is not significantly different from 1, with a probability greater than 95%. The specific volume of air,

$0.05 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$, is large. This accords with the hypothesis that the spongiform organization of plate- and wedge-shaped pores results from the packing of stable aggregates with irregular shapes.

Figure 3(d) shows the shrinkage curves of the F55 clods where both structural and normal shrinkage can clearly be identified. The normal shrinkage regression line ($R^2 = 0.98$) has a slope of 1.086 which is significantly greater than 1, with a probability greater than 95%. This accords with shrinkage of tubular pores as the matrix deforms, according to the assumption of McGarry & Daniells (1987).

These observations suggest that a normal shrinkage curve, with a slope strictly equal to 1, would result by chance from simultaneous contraction of packing voids or channels, the geometry of which remains similar, and expansion of planar voids related to secondary cracks, during shrinkage.

Relation between air entry and water potential curves

It was possible to interpret the curves constructed from field clods only in terms of the relation between air entry and pore size. The other clods were more variable in water and air contents at all potentials, making any interpretation impossible... Figure 4 shows the relation between the specific volume of air and the pressure potential of F55 and F105 clods. The normal shrinkage phase begins where the volume of air is constant, with potentials ranging from -32 kPa to -1 MPa . The initial structural shrinkage phase can easily be marked out, as the air content follows a steep rising slope in the range of -3.2 to -32 kPa . This can be interpreted as the emptying of the structural voids in both layers. According to Laplace's law, the maximum diameter of pores filled with water varies from $90 \mu\text{m}$ at -3.2 kPa to $9 \mu\text{m}$ at -32 kPa . These values are therefore consistent with the diameters of the resin cylinders that we observed. Structural porosity is greater in the upper layer than in the bottom of the profile, in keeping with a smaller number of filaments found in the deep layer.

Conclusion

The structural porosity of vertisols is twofold, comprising (i) the macrocracks, where non-capillary water flows quickly and which define prismatic peds as major structural units, and (ii) the intraprism structural pores, which contain easily available water for plants and where capillary flow applies. The resin casting method described above is designed to study the structural pores within prisms. Clods of swelling clay soil are impregnated, without removing any water from the matrix. As the matric pores remain saturated, only structural pores can be filled by the resin. Most of the structural voids can be impregnated, as the specific volume of the resin cast is equal to the initial specific volume of air contained in identical samples. Due to its swelling properties, the clay matrix is detached from the resin cast. The method offers a direct view

of the three-dimensional organization of the structural porosity within the prisms. One can see several architectures, including (i) fuzzy tangled filaments from the intra-aggregate channels of roots and hyphae pathways, (ii) cellular patterns of planar voids resulting from packing and microcracking of polyhedral aggregates, and (iii) spongiform patterns resulting from the juxtaposition of irregular aggregates. These observations accord with the interpretation of shrinkage curves and air entry characteristics. Tubular pores, which are physically stable, are associated with a shrinkage line slope greater than 1, which suggests that they experience a similar contraction to the matrix. By contrast, wall-shaped pores seem to be unstable since they could contract, without being exclusively related to matrix shrinkage, then propagate during residual shrinkage. Further research is needed on the deformation dynamics of the different shapes of pore. The resin casting method might be helpful for studying the origin and the stability of structural pores in vertisols during drying and wetting under different cropping systems.

Acknowledgements

We thank Dr J.-C. Fiès for his advice on soil impregnation with resins, J. André and A. Mulciba for their technical help, and A. Guyon for SEM observations.

References

- Berndt, R.D. & Coughlan, K.J. 1976. The nature of changes in bulk density with water content in a cracking clay. *Australian Journal of Soil Research*, **15**, 27–37.
- Beven, K. & Germann, P. 1981. Water flow in soil macropores: II. A combined flow model. *Journal of Soil Science*, **32**, 15–29.
- Bouma, J., Jongerius, A., Boersma, O., Jager, A. & Schoonderbeek, D. 1977. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. *Soil Science Society of America Journal*, **41**, 945–950.
- Bouma, J., Jongerius, A. & Schoonderbeek, D. 1979. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data. *Soil Science Society of America Journal*, **43**, 261–264.
- Brewer, R. 1964. *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. John Wiley & Sons, New York.
- Bronswijk, J.J.B. 1988. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of Hydrology*, **97**, 199–212.
- Cabidoche, Y.-M. & Ozier-Lafontaine, H. 1995. THERESA: I. Matrix water content measurements through thickness variations in Vertisols. *Agricultural Water Management*, **28**, 133–147.
- Cabidoche, Y.-M. & Voltz, M. 1995. Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil: II. A field study on a Vertisol. *European Journal of Soil Science*, **46**, 345–355.
- Cousin, I., Levitz, P. & Bruand, A. 1996. Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and solid chord distributions. *European Journal of Soil Science*, **47**, 439–452.
- De Hoff, R.T., Aigeltinger, E.H. & Craig, K.R. 1972. Experimental determination of the topological properties of three-dimensional microstructures. *Journal of Microscopy*, **95**, 69–91.
- FAO-UNESCO. 1974. *Soil Map of the World. Vol. 1. Legend*. UNESCO, Paris.
- Jaillard, B. & Cabidoche, Y.-M. 1984. Etude de la dynamique de l'eau dans un sol argileux gonflant: Dynamique hydrique. *Science du Sol*, **22**, 239–251.
- Jongerius, A. & Heintzberger, G. 1975. *Methods in Soil Micromorphology. A Technique for the Preparation of Large Thin Sections*. Soil Survey Papers No 10. Netherlands Soil Survey Institute, Wageningen.
- McGarry, D. & Daniells, I.G. 1987. Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a Vertisol. *Soil Science Society of America Journal*, **51**, 1575–1580.
- McGarry, D. & Malafant, K.W.J. 1987. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Science Society of America Journal*, **51**, 290–297.
- Miedema, R., Van Pape, T. & de Waal, G.J. 1974. A method to impregnate wet soil samples producing high quality thin sections. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **22**, 37–39.
- Monnier, G., Stengel, P. & Fiès, J.-C. 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques*, **24**, 533–545.
- Murphy, C.P. 1986. *Thin Section Preparation of Soils and Sediments*. A B Academic Publishers, Berkhamsted, UK.
- Murphy, C.P., Bullock, P. & Turner, R.H. 1977. The measurement and characterisation of voids in soil thin sections by image analysis Part I. Principles and techniques. *Journal of Soil Science*, **28**, 498–508.
- Ozier-Lafontaine, H. 1992. *Disponibilité de l'eau dans un système sol argileux gonflant-canne à sucre-atmosphère. Application à la recherche d'indicateurs de l'état hydrique*. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris – Grignon, Paris.
- Ozier-Lafontaine, H. & Cabidoche, Y.-M. 1995. THERESA: II. Thickness variations of Vertisols for indicating water status in soil and plants. *Agricultural Water Management*, **28**, 149–161.
- Ringrose-Voase, A.J. 1987. A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. *Journal of Soil Science*, **38**, 343–356.
- Ringrose-Voase, A.J. & Bullock, P. 1984. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *Journal of Soil Science*, **35**, 673–684.
- Ringrose-Voase, A.J. & Nortcliff, S. 1987. The application of stereology to estimation of soil structural properties: a preview. In: *Soil Micromorphology* (eds N. Fedoroff, L.M. Bresson & M.A. Courtney), pp. 81–88. Association Française pour l'Etude du Sol, Ardon, France.
- Robert, M., Hardy, M. & Elsass, F. 1991. Crystallochemistry, properties and organization of soil clays derived from major sedimentary rocks in France. *Clay Minerals*, **26**, 409–420.
- Scott, G.J.T., Webster, R. & Nortcliff, S. 1988. The topology of pore structure in cracking clay soil. II. Connectivity density and its estimation. *Journal of Soil Science*, **39**, 315–326.
- Spanne, P., Thovert, J.F., Jacquin, C.J., Lindquist, W.B., Jones, K.W. & Adler, P.M. 1994. Synchrotron computed microtomography of porous media: Topology and transport. *Physical Review Letters*, **73**, 2001–2004.

- Stirk, G.B. 1954. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, **5**, 279–290.
- Tessier, D. & Berrier, J. 1979. Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. *Science du Sol*, **17**, 67–82.
- Tomassone, R. 1987. *Comment interpréter les résultats d'une régression linéaire?* Institut Technique des Céréales et des Fourrages, Paris.
- Webster, R. 1997. Regression and functional relations. *European Journal of Soil Science*, **48**, 557–566.
- Yule, D.F. & Ritchie, J.T. 1980. Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 1285–1295.

1 ***Burkholderia caribensis* sp. nov., exopolysaccharide-producing bacteria isolated from**
2 **vertisol microaggregates in Martinique.**

3
4 Wafa Achouak¹, Richard Christen², Mohamed Barakat¹, Marie-Helene Martel³,
5 and Thierry Heulin¹

6 1 DSV-DEVM, Laboratoire d'Ecologie Microbienne de la Rhizosphère, UMR 163 CNRS-
7 CEA, CEA Cadarache; F-13108 Saint Paul-lez-Durance, France

8 2 CNRS URA 2077 & Université Pierre et Marie Curie, Observatoire Océanologique,
9 Station Zoologique, F-06230 Villefranche-sur-mer, France

10 3 Centre de Pédologie Biologique du CNRS, UPR 6831 Associée à l'Université de Nancy I,
11 B.P. 5, F-54501 Vandoeuvre-les-Nancy-Cedex, France.

12
13
14
15 Corresponding author: Wafa Achouak. Tel: + 33 4 42 25 49 61. Fax: + 33 4 42 25 66 48.

16 E-mail: wachouak@cea.fr.
17
18
19

20 **Keywords:** *Burkholderia caribensis* sp. nov., vertisol, microaggregate, *rrs* analysis, DNA-
21 DNA hybridisation, phenotypic analysis.

22
23 **Running title:** *Burkholderia caribensis* sp. nov. from vertisol microaggregate

1 **ABSTRACT**

2 Twenty-one exopolysaccharide-producing strains were isolated from the 5-20 μm fraction
3 of a vertisol in the Southeast of Martinique (French Island in the West Indies). Although
4 these strains were phenotypically identified as *Burkholderia cepacia* or as *Burkholderia glathei*
5 using BiologTM microplates, they did not cluster genotypically by amplified ribosomal
6 DNA restriction analysis (ARDRA) with any described *Burkholderia* species. A
7 phylogenetic analysis revealed that the *rrs* (16S rDNA) sequences of 3 representative
8 strains clustered in a single branch within the genus *Burkholderia*, and distantly from all of
9 the previously described species of *Burkholderia* for which *rrs* sequences were available.
10 DNA-DNA hybridisation data as well as phenotypical analyses indicated that the twenty-
11 one isolates represented a single and new species for which the name of *Burkholderia*
12 *caribensis* sp. nov. is proposed (type strain MWAP64, LMG 18531^T).

1 INTRODUCTION

2 Almost eighty years after the first description of the genus *Pseudomonas* (Migula, 1894),
3 this genus was divided into five groups (Palleroni *et al.*, 1973). This division was based
4 mainly on extensive phenotypic studies, DNA-rRNA, and DNA-DNA hybridisation
5 experiments (De Vos *et al.*, 1985; Palleroni *et al.*, 1973; Palleroni, 1984; Palleroni, 1992). In a
6 recent review on analysis of *rrs* (16S rDNA) sequences, it was shown that several
7 sequences of species formerly described as *Pseudomonas* must be distributed to three of the
8 five divisions of *Proteobacteria* (Kerstens *et al.*, 1996). The gamma division includes the
9 authentic genus *Pseudomonas* that contains the type species *Pseudomonas aeruginosa* and
10 some related species such as *Pseudomonas fluorescens*. The alpha division includes several
11 misnamed *Pseudomonas* species. Two of these species were transferred to the new genus
12 *Brevundimonas* (Segers *et al.*, 1994), (*Brevundimonas diminuta* and *Brevundimonas vesicularis*),
13 and *Pseudomonas paucimobilis* was transferred to the genus *Sphingomonas* (Yabuuchi *et al.*,
14 1990). The family *Comamonadaceae*, including the genera *Acidovorax*, *Comamonas*, and
15 *Hydrogenophaga*, belongs with the new genera *Burkholderia* (Yabuuchi *et al.*, 1992) and
16 *Ralstonia* (Yabuuchi *et al.*, 1995) to the beta division.

17 Using a polyphasic taxonomy approach (Brett *et al.*, 1998; Gillis *et al.*, 1995; Urakami *et al.*,
18 1994; Vandamme *et al.*, 1997; Viallard *et al.*, 1998; Yabuuchi *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 1995),
19 the genus *Burkholderia* was recently restricted to seventeen species including a newly
20 described root-associated nitrogen-fixing species, *Burkholderia vietnamiensis* (Gillis *et al.*,
21 1995), other root-associated species *Burkholderia vandii* (Urakami *et al.*, 1994), and
22 *Burkholderia graminis* (Viallard *et al.*, 1998), the recently described *Burkholderia multivorans*
23 (Vandamme *et al.*, 1997), and *Burkholderia thailandensis* (Brett *et al.*, 1998). The *Burkholderia*
24 genus is clearly separated from the genus *Ralstonia*, which includes *Ralstonia pickettii* (type
25 species), *Ralstonia* (formerly *Pseudomonas*) *solanacearum*, and *Ralstonia* (formerly
26 *Alcaligenes*) *eutropha* (Yabuuchi *et al.*, 1995).

1 During the last ten years, several laboratories focused their attention on *Burkholderia*
2 *cepacia*, (type species of *Burkholderia*) due to its abundance in soils, in the plant
3 rhizosphere, and in clinical habitats (Hebbar *et al.*, 1992a; Yohalem & Lorbeer, 1994). These
4 studies were stimulated by a semi-selective medium (PCAT) (Lumsden & Sasser, 1986)
5 which facilitates the screening of strains for their ability to degrade polycyclic aromatic
6 hydrocarbons (Mueller *et al.*, 1997) or for their potency to antagonise soil-borne
7 phytopathogens (Hebbar *et al.*, 1992b). Besides the ability to grow on this PCAT medium
8 and phenotypical identification (e.g. by GC-FAME, Biolog™ microplates), genotypic
9 identification (e.g. by *rrs* sequencing and/or DNA-DNA hybridisation) are needed to
10 clarify the taxonomic position of many strains which were grouped with *B. cepacia*
11 (Mueller *et al.*, 1997).

12 The objective of the present work was to identify bacterial populations that are
13 responsible for the formation of microaggregates in a vertisol (Martinique, French West
14 Indies). Vertisols are characterised by very high clay content. In these soils,
15 microaggregation results mainly from the fact that bacterial colonies embedded in their
16 exopolysaccharides (EPS) are covered with clay particles (Tisdall, 1994). To isolate these
17 microaggregate-forming bacteria, we prepared a soil fraction rich in microaggregates (5-20
18 μm), and selected bacteria for their EPS production. The phylogenetic position of the
19 major EPS-producing bacterial species isolated from this soil fraction was determined
20 according to *rrs* sequence analysis. To address the question of their taxonomic position,
21 ARDRA, DNA-DNA hybridisation, and phenotypical analysis were performed.

22

1 MATERIAL AND METHODS

2 **Strain isolation.** Samples from bulk vertisol were collected from a vertisol in the
3 Southeast of Martinique (French Island in the West Indies). The site has been under
4 permanent grassland (*Digitaria decumbens*) vegetation.

5 EPS-producing bacteria were isolated from the 5-20 μm fraction, on sugar enriched media.
6 Physical soil fractionation was done as described by Kabir *et al.* (1994). Several
7 carbohydrates (glucose, sucrose, mannitol, sorbitol, xylose, mannose, arabinose and
8 maltose) were used at high concentration (20 g/l) as carbon source for bacterial growth
9 and EPS synthesis. The strains investigated in this study and their origin are listed in
10 Table 1. The type strain of the new species *Burkholderia graminis* C4D1M was provided by
11 J. Balandreau (Viallard *et al.*, 1998).

12 **Growth conditions and biochemical characterisation.** The strains were purified on
13 trypticase soy agar (TSA, Difco). They were grown overnight on modified LB medium
14 (10 g Tryptone, 5 g yeast extract and 5 g NaCl per litre) at 28 °C, and phenotypically
15 identified with Biolog™ GN microplates and the Microlog 3.5 release Software. In order to
16 increase the number of biochemical characters, Biolog™ GP microplates for Gram positive
17 bacteria, and API 20 NE strips (bioMérieux, France) were additionally used.

18 **DNA amplification.** Ten μl of water-washed suspension of cultures (OD 0.5 at 590 nm)
19 were used for PCR amplification. The *rrs* (16S rDNA) genes were amplified using a pair
20 of universal primers (*fd1* and *rd1*) corresponding to positions 8 to 27 and 1524 to 1540 on
21 the *Escherichia coli rrs* sequence. The reaction mixture containing bacterial cells was heated
22 at 95 °C for 4 min before the addition of thermoresistant DNA polymerase. The PCR
23 reaction consisted of 30 cycles (denaturation at 94 °C for 1 min, annealing at 55 °C for 1
24 min and extension at 72 °C for 2 min). The final extension was at 72 °C for 3 min.

25 **Amplified ribosomal DNA restriction analysis (ARDRA).** The amplified *rrs* genes were
26 analyzed by restriction digestion with 12 restriction enzymes (*AluI*, *CfoI*, *DdeI*, *HinfI*, *Taq I*,
27 *HaeIII*, *MspI*, *RsaI*, *NdeII*, *NciI*, *Sau96I*, and *ScrFI*). The restriction profiles were compared to

1 those of the type strains of *Burkholderia cepacia* (ATCC 25416^T), *Burkholderia glathei* (LMG
2 14190^T), *Burkholderia vietnamiensis* (LMG 10929^T), *Burkholderia pyrrocinia* (LMG14191^T),
3 *Burkholderia caryophylli* (LMG 2155^T), *Burkholderia glumae* (LMG 2196^T), *Burkholderia gladioli*
4 (LMG 2216^T), *Burkholderia plantarii* (LMG 9035^T), *Burkholderia cocovenenans* (LMG 11626^T),
5 *Burkholderia andropogonis* (LMG 2129^T), and *Burkholderia graminis* C4DIM^T.

6 **PCR product-direct sequencing.** The PCR products were purified on a 1% low-melting-
7 point-agarose gel and directly sequenced with the protocol of Anderson *et al.* (1992).
8 Seven primers were used in the sequencing reaction. These primers corresponded to the
9 following positions in *Escherichia coli rrs* sequence: primer S3 (positions 242 to 262), primer
10 S6 (518 to 534), primer S8 (684 to 702), primer S10 (906 to 925), primer S12 (1099 to 1114),
11 primer S15 (1384 to 1400), and primer S17 (1493 to 1509). Sequence reaction mixtures were
12 subjected to electrophoresis on a 6% (wt/vol) polyacrylamide sequencing gel in a
13 Beckman Genomyx DNA sequencer .

14 **Phylogenetic analysis.** *rrs* sequences from the three strains (MWAP64, MWAP71 and
15 MWAP84) were aligned and analysed by comparison to a personal database of already
16 aligned and classified sequences (about 7 000). The new sequences were manually aligned
17 over more and more divergent domains as successive phylogenetic analyses (neighbor-
18 joining) assigned these sequences to more precise clades. When a definitive identification
19 to *Burkholderia* was obtained, three phylogenetic methods were used to assess very
20 precisely the exact phylogenetic position of these sequences: the neighbor joining of
21 Saitou & Nei (1987), the maximum likelihood method (options QFYG, fdnaml program of
22 G. J. Olsen, University of illinois, Urbana) and the maximum-parsimony method (*PAUP*
23 3.0s for the Macintosh, heuristic search (Swofford, D. 1990. *PAUP*: phylogenetic analysis
24 using parsimony, version 3.0. Computer program distributed by the Illinois. Natural
25 History Survey, Champaign, Illinois). The robustness of each topology was checked with
26 the neighbor-joining method and 500 bootstrap replications using a Kimura two

1 parameters correction for computing distances. Trees were drawn with the *njplot* program
2 for the Macintosh computer (M. Gouy, CNRS UMR 5558, Université Claude Bernard,
3 Lyon, France). Because all sequences of Figure 1 are closely related, almost the entire
4 sequences could be used to construct the dendrogram (positions 115-1376 corresponding
5 to the *rrs* sequence of *E. coli*)

6 Nucleotide sequence accession numbers. The *rrs* sequences determined in this study
7 have been deposited in the (EMBL or Genbank) database under accession numbers
8 Y17009: strain MWAP64, Y17010: strain MWAP71, Y17011: strain MWAP84, and Y17052:
9 *Burkholderia glathei* strain LMG 14190^T.

10 DNA-DNA hybridisation. Genomic DNAs were extracted from the isolates and purified
11 (Brenner *et al.*, 1982). Measuring absorbency at 230, 260, and 280 nm (Genequant,
12 Pharmacia) monitored DNA purity. Genomic DNAs were sheared by sonication to
13 produce an average fragment size of 0.4 kb. DNA was labelled with [1',2',5-³H]dATP
14 (Amersham International PLC) by nick translation with a commercial kit as recommended
15 by the manufacturer (Amersham International PLC). Labelled DNAs were prepared from
16 strain MWAP64. DNA reassociation experiments were performed in triplicate in 300 μ l of
17 0.42 M NaCl containing 75 μ g of sheared, denatured unlabelled DNA and 0.07 μ g of
18 denatured labelled DNA, under stringent conditions (70 °C) according to the S1 nuclease-
19 trichloro-acetic method (Crosa *et al.*, 1973; Grimont *et al.*, 1980).

20 DNA base composition. The guanine-plus-cytosine (G+C) content of strain MWAP 71
21 was determined by the thermal denaturation temperature (Marmur & Doty, 1962) and
22 was calculated by using the equation of Owen & Lapage (1976).

1 RESULTS AND DISCUSSION

2 Localization and phenotypical identification of the major exopolysaccharide-producing 3 MWAP strains

4 After soil fractionation of the vertisol, total cultivable bacteria were counted on tenfold
5 diluted TSA medium in different fraction sizes: < 5 μm , 5-20 μm , 20-50 μm , 50-250 μm , and
6 > 250 μm . The 5-20 μm fraction was previously described as the bacteria-enriched fraction
7 in this soil (Kabir *et al.*, 1994). This was confirmed in this work, and the cultivable bacterial
8 population was estimated to 5.10^7 C.F.U./g dry soil of the fraction 5-20 μm . The 21 MWAP
9 strains that were isolated from the 5-20 μm fraction of vertisol were identified as *B. cepacia*
10 or as *B. glathei* by using the BiologTM Gram-negative microplates.

11 Amplified ribosomal DNA restriction analysis (ARDRA)

12 The *rrs* gene of the 21 MWAP strains and the 11 type strains of *Burkholderia* species were
13 mapped with 12 restriction enzymes (ARDRA). The 21 MWAP strains provided exactly
14 the same profiles with the tested restriction enzymes and belonged to a single ARDRA
15 group. However, differences were observed with the previously described species of
16 *Burkholderia* genus (*B. cepacia* ATCC 25416^T, *B. glathei* LMG 14190^T, *B. vietnamiensis* LMG
17 10929^T, *B. pyrrocinia* LMG 14191^T, *B. caryophylli* LMG 2155^T, *B. glumae* LMG 2196^T,
18 *B. plantarii* LMG 9035^T, *B. cocovenenans* LMG 11626^T, *B. andropogonis* LMG 2129^T,
19 *B. phenazinium* LMG 2247^T, and *B. graminis* C4DIM^T), and at least five different profiles
20 corresponding to five restriction enzymes were obtained for the closest species *B. graminis*.

21 *rrs* sequences and phylogenetic analyses

22 In order to perform a phylogenetic identification, *rrs* sequences of the three MWAP strains
23 (MWAP64, MWAP71, and MWAP84) were analysed. The results of broad phylogenetic
24 analyses clearly showed that these strains belonged to the phylum *Proteobacteria* of the
25 Eubacteria (data not shown) and, more precisely, to the beta subgroup. More detailed
26 analyses showed that they were included in the *Burkholderia* genus. Three phylogenetic

1 methods were then used (neighbor joining, maximum likelihood and maximum-
2 parsimony) that all grouped all of the *Burkholderia* sequences in a monophyletic taxon. All
3 three MWAP strains formed a robust monophyletic unit (Figure 1). Although we did not
4 perform extensive DNA/DNA hybridisation with each recognised *Burkholderia* species,
5 such analyses have been done for the most closely related species (Table 2). MWAP strains
6 can be considered as a new species, different from the other *Burkholderia* species for the
7 following reasons: (i) they constitute a line of descent that cannot be grouped with any
8 recognised species and, (ii) they show *rrs* divergences of more than 3% with the sequence
9 of any recognised species (Stackebrandt & Goebel, 1994) and (iii) they have a very low level
10 of DNA/DNA similarity with type strains of the phylogenetically related species.
11 Phylogenetically, *B. caribensis* is included in a robust clade containing two recognised
12 species (*B. phenazinium* and *B. graminis*) and several strains not yet recognised as species,
13 among which *Burkholderia* sp. strain LB400 (U86373), a polychlorinated biphenyl-
14 degrading strain (Lau & Bergeron, 1997), *Burkholderia* sp. strains N3P2 (U37344) and N2P5
15 (U37342), phenanthrene-degrading bacteria (Mueller *et al.*, 1997). The robustness of the
16 clade suggests that other strains of this cluster may have similar degrading properties.
17 Finally, excepted for strains N2P5 and SAP II (AF052387) and for *B. caribensis* strains, not
18 two of the other sequences could be grouped in a robust subclade, suggesting that they
19 may all be different species (Figure 1).

20 DNA-DNA hybridisation

21 Values for DNA-DNA reassociation data are shown in Table 2. High levels of DNA
22 homology were detected between strains MWAP64, MWAP84, MWAP53 and MWAP71
23 (ranging from 75 to 100%). On the contrary, the DNA hybridisation values between
24 MWAP strains and the type strains *B. cepacia*, *B. graminis* and *B. glathei* were low and
25 ranged from 1 to 20% (Table 2).

26
27

1 **Phenotypic and physiologic characteristics of MWAP strains.**

2 The 21 MWAP strains were Gram-negative, pleimorphic rods that were 1-2 μm long and
3 0.5 μm in diameter. They formed smooth white colonies with regular edges when
4 overnight grown on TSA medium at 28 °C, and mucoid colonies due to EPS production on
5 sugar-enriched media. No production of diffusible or fluoescent pigment on TSA and
6 *Pseudomonas* F agar medium was observed. On PCAT medium, these strains formed white
7 and smaller colonies than those of *B. cepacia*. Optimal growth was observed at 28°C.

8 Table 3 shows the biochemical characters tested on Biolog™ GN and GP microplates
9 which differentiated MWAP strains from the following closely related *Burkholderia* species
10 (as defined according to *rrs* sequencing, and ARDRA data): *B. glathei*, *B. graminis*,
11 *B. phenazinium*, *B. caryophylli*, and *B. andropogonis*

1 CONCLUSION

2 Besides the proposal of a new bacterial species (*Burkholderia caribensis* sp. nov.), two major
3 conclusions on habitat and activity of this species can be given: i) because of the physical
4 fractionation of soil samples and the selection of the 5-20 μm fraction for isolation steps, it
5 can be concluded that strains of this species were present in the core of microaggregates,
6 and ii) it constituted the dominant cultivable population in this soil fraction as revealed on
7 carbon rich medium. Unlike most of the *Burkholderia* strains isolated from various
8 environments, the *Burkholderia* strains described in this work were not isolated on PCAT
9 medium. Actually the main objective of this work was to isolate the dominant EPS-
10 producing bacterial species and not especially *Burkholderia* strains. However, these strains
11 were able to grow on PCAT medium as most of the *Burkholderia* species did. The capacity
12 of each strain of this species to produce high amounts of EPS on carbon rich medium was
13 confirmed in pure cultures supplemented with various carbohydrates.

14 Several phenotypic characteristics differentiated the MWAP isolates from the most closely
15 phylogenetically related *Burkholderia* species (*B. glathei*, *B. graminis*, *B. phenazinium*,
16 *B. caryophylli*, and *B. andropogonis*). The MWAP isolates were unable to oxidise malonic
17 acid in BiologTM GN microplates, in contrast to the five tested *Burkholderia* species.
18 According to *rrs* sequence analyse, *B. graminis* was the most related species (97%
19 similarity), and 8 biochemical characters enabled to differentiate this species further from
20 MWAP strains, such as oxidation of sucrose, D-raffinose, α -keto-valeric-acid, N-acetyl-
21 mannosamine, lactamide, adenosine-5'-monophosphate, L-ornithine and lactose (Table 3).
22 The data from *rrs* sequences, ARDRA, and DNA-DNA hybridisation revealed that these
23 EPS-producing bacteria formed a monophyletic unit in the genus *Burkholderia*. *rrs*
24 sequence divergences, DNA-DNA hybridisation data, and biochemical characters allow
25 the description of a new species for which we propose the name of *Burkholderia caribensis*.

1 Description of *Burkholderia caribensis* sp. nov. *Burkholderia caribensis* (ca.ri.ben'sis M.L.
2 adj. pertaining to the isolation place Caribbean Islands that were once named after their
3 indigenous population, the Caribe Indians). Gram negative. Motile cells. Short rods (2- by
4 0.5 μm) and pleiomorphic in actively growing cultures (LB medium). When the bacteria
5 are grown on sugar-enriched agar media (2 % glucose, xylose, fructose, sorbitol,
6 arabinose, xylose, mannitol, or inositol) they produce high amount of an
7 exopolysaccharide. Colonies are about 3 mm in diameter after 24 h of incubation on
8 tenfold-diluted TSA medium at 28°C. They are white, smooth and mucoid. No diffusible
9 or fluorescent pigment was observed. They produce oxidase, catalase, urease, arginine
10 dihydrolase, and β -galactosidase. They do not produce protease.

11 They were able to oxidise Tween 40, Tween 80, N-acetyl-D-galactosamine, adonitol, L-
12 arabinose, D-arabitol, D-fructose, L-fucose, D-galactose, α -D-glucose, m-inositol, α -
13 lactose, lactulose, maltose, D-mannitol, D-mannose, psicose, L-rhamnose, D-sorbitol, D-
14 trehalose, xylitol, methyl pyruvate, mono-methyl succinate, cis-aconitic acid, citric acid,
15 formic acid, D-galactonic acid lactone, D-galacturonic acid, D-gluconic acid, D-
16 glucosaminic acid, D-gluconic acid, α -hydroxybutyric acid, β -hydroxybutyric acid, p-
17 hydroxyphenyl acetic acid, α -keto butyric acid, α -keto glutaric acid, α -keto valeric acid, D-
18 L-lactic acid, quinic acid, D-saccharic acid, sebacic acid, succinic acid, bromo succinic acid,
19 succinamic acid, glucoronamide, alaninamide, D-alanine, L-alanine, L-alanyl-glycine, L-
20 asparagine, L-aspartic acid, L-glutamic acid, glycyl L-glutamic acid, L-histidine, hydroxy
21 L-proline, L-ornithine, L-phenyl alanine, L-proline, L-pyroglutamic acid, D-serine, L-
22 threonine, D,L-carnitine, γ -amino butyric acid, urocanic acid, inosine, 2-amino ethanol, 2,
23 3-butanediol, glycerol, D, L- α -glycerol phosphate, glucose-6-phosphate, N-acetyl-D-
24 gluconic acid, lactulose, palatinose, D-ribose, salicin, D-tagatose, D-xylose, lactamide, D-
25 lactic acid methyl ester, D-malic acid, L-malic acid, pyruvic acid, N-acetyl L-glutamic acid,
26 adenosine, 2'-deoxy adenosine, adenosine-5'-phosphate, fructose-6-phosphate, N-acetyl-

1 glucosamine, gluconate, caprate, malate, citrate, and phenyl-acetate. They were also able
2 to produce arginine dihydrolase, urease, and β -galactosidase.

3 They were not able to oxidise α -cyclodextrin, N-acetyl-D-galactosamine, cellobiose, i-
4 erythritol, gentiobiose, α -lactose, melibiose, β -methyl D-glucoside, D-raffinose, sucrose,
5 turanose, malonic acid, glycy-L-aspartic acid, inulin, amygdalin, arbutin, α -D-lactose,
6 maltotriose, D-melezitose, 3-methyl glucose, α -methyl D-glucoside, β -methyl D-
7 mannoside, palatinose, stachyose, thymidine-5'-monophosphate, uridine-5'-
8 monophosphate, NO_3^- , tryptophane, esculine, and adipate. The G+C content was 63.1
9 mol%.

10 The type strain of *Burkholderia caribensis* is MWAP64 which has been deposited in
11 BCCMTM/LMG Culture Collection as LMG 18531^T. The characteristics of this strain are
12 identical with those described above for the species.

1 Acknowledgements

2 This work was supported by a grant from ORSTOM, CNRS, INRA, and CIRAD in a
3 framework of " Action Incitative InterInstitutionnelle " entitled " Biofonctionnement des
4 sols tropicaux et gestion durable des terres ". We gratefully acknowledge Dr. L. Sutra for
5 GC content determination, and, Dr. G. Bochner and J. Young from Biolog INC for
6 providing BiologTM data on *Burkholderia* species.

1 REFERENCES

- 2 Anderson, R. D., Bao, C.-Y. , Minnick, D. T., Veigel, M., & Sedwick, W. D. (1992).
3 Optimization of double-stranded DNA sequencing for polymerase chain reaction
4 products. *USB Editorial comments* 19,39-40 and 57-58.
- 5 Azegami, K., Nishiyama, K., Watanabe, Y., Kadota, I., Ophuchi, A., & Fukazawa, C.
6 (1987). *Pseudomonas plantarii* sp. nov., the causal agent of rice seedling blight. *Int J Syst*
7 *Bacteriol* 37, 144-152.
- 8 Ballard, R. W., Palleroni, N. J., Stanier, R. Y., & Mandel, M. (1970). Taxonomy of aerobic
9 Pseudomonads *Pseudomonas cepacia*, *P. marginata*, *P. alliicola* and *P. caryophylli*. *J Gen*
10 *Microbiol* 60, 199-214.
- 11 Bell, S. C. & Turner, J. M. (1973). Iodinine biosynthesis by a pseudomonad. *Biochem Soc*
12 *Trans* 1, 751-753.
- 13 Boouchan, S., Serafica, M.D.E., Britz, M.L. & Stanley, G.A. Identification and
14 differentiation of PAH-degrading bacteria based on 16S rRNA sequence analysis.
15 Unpublished (Quoted in GenBank).
- 16 Brenner, D. J., McWorter, A. C., Leete Knutson, J. K., & Steigerwalt, A. G. (1982).
17 *Escherichia vulneris*: a new species of *Enterobacteriaceae* associated with human wounds. *J*
18 *Clin Microbiol* 15,1133-1140.
- 19 Brett, P. J., DeShazer, D., & Woods, D. E. (1997). Characterization of *Burkholderia*
20 *pseudomallei* and *Burkholderia pseudomallei*-like strains. *Epidemiol Infect* 118, 137-148
- 21 Brett, P. J., DeShazer, D., & Woods, D. E. (1998). *Burkholderia thailandensis* sp. nov., a
22 *Burkholderia pseudomallei*-like species. *Int J Syst Bacteriol* 48, 317-320.
- 23 Crosa, J. M., Brenner, D. J., & Falkow, S. (1973). Use of a single strand-specific nuclease
24 for analysis of bacterial and plasmid deoxyribonucleic acid homo- and heteroduplexes. *J*
25 *Bacteriol* 115,904-911
- 26 De Vos, P., Goor, M., Gillis, M., & De Ley, J. (1985). Ribosomal ribonucleic acid cistron
27 similarities of phytopathogenic *Pseudomonas* species. *Int J Syst Bacteriol* 35, 169-184.

- 1 Floro, G., Buzzelli, J. A., Griffin, W., & Stolz, P. J. (1997). Aerobic degradation of soy
2 diesel by *Burkholderia* sp. Unpublished (Quoted in GenBank).
- 3 Gillis, M., Tran Van, V., Bardin, R., Goor, M., Hebbar, P., Willems, A., Sergers, P.,
4 Kersters, K., Heulin, T., & Fernandez, M. (1995). Polyphasic taxonomy in the genus
5 *Burkholderia* leading to an emended description of the genus and proposition of
6 *Burkholderia vietnamiensis* sp. nov. for N₂-fixing isolates from rice in Vietnam. *Int J Syst*
7 *Bacteriol* 45, 274-289.
- 8 Grimont, P. A. D., Popoff, M. Y., Grimont, F., Coynault, C., & Lemelin, M. (1980).
9 Reproducibility and correlation study of three deoxynucleic acid hybridization procedure.
10 *Curr Microbiol* 4,325-330.
- 11 Hebbar, K. P., Davey, A. G., & Dart, P. J. (1992a). *Rhizobacteria* of maize antagonistic to
12 *Fusarium moniliforme*, a soil-borne fungal pathogen: identification and isolation. *Soil Biol*
13 *Biochem* 24, 989-997
- 14 Hebbar, K. P., Davey, A. G., Merrin, J., & Dart, P. J. (1992b). *Pseudomonas cepacia*, a
15 potential suppresser of maize soil-borne diseases: seed inoculation and maize root
16 colonization. *Soil Biol Biochem.*24, 999-1007
- 17 Imanaka, H., Kousaka, M., Tamura, G. & Arima K. (1965). Studies on pyrrolnitrin, a new
18 antibiotic. Taxonomy studies on pyrrolnitrin-producing strain. *J Antibiot* 18, 205-206.
- 19 Kabir, M., Chotte, J. L., Rahman, M., Bally, R., & Jocteur-Monrozier, L. (1994).
20 Distribution of soil fractions and location of soil bacteria in a vertisol under cultivation
21 and perennial grass. *Plant Soil* 163, 243-255.
- 22 Kersters, K., Ludwig, W., Vancanneyt, M., De Vos, P., Gillis, M., & Schleifer, K.-H.
23 (1996). Recent changes in the classification of the *Pseudomonas*: an overview. *Syst Appl*
24 *Microbiol* 19, 645-477.
- 25 Lau, P. C. K., & Bergeron, H. (1997). 16S rDNA of *Pseudomonas* sp. LB400, a prototype
26 biphenyl/ polychlorinated biphenyl degrader. Unpublished (Quoted in GenBank).

- 1 Lumsden, R. D., & Sasser, M. (1986). Medium for the isolation of *Pseudomonas cepacia*
2 biotype from soil and the bacterial biotype. U.S. Patent N- 4.588.584.
- 3 Marmur, J., & P. Doty. (1962). Determination of the base composition of deoxyribonucleic
4 acid from its thermal denaturation temperature. *J Mol Biol* 5, 109-118.
- 5 Migula, W. (1894). Arbeiten aus dem Bacteriologischen Institut der Technischen
6 Hochschule zu Karlsruhe. 1, 235-238.
- 7 Mueller, J. G., Devereux, R., Santavy, D. L., Lantz, S. E., Willis, S. G., & Pritchard, P. H.
8 (1997). Phylogenetic and physiological comparisons of PAH-degrading bacteria from
9 geographically diverse soils. *Antonie Van Leeuwenhoek* 71, 329-343.
- 10 Owen, R. J., & S. P. Lapage. (1976). The thermal denaturation of partly purified bacterial
11 deoxyribonucleic acid and its taxonomic implications. *J Appl Bacteriol* 41, 335-340.
- 12 Palleroni, N. J., Kunisawa, R., Contopoulou, R., & Doudoroff, M. (1973). Nucleic acid
13 homologies in the genus *Pseudomonas*. *Int J Syst Bacteriol* 23, 333-339.
- 14 Palleroni, N. J. (1984). Genus *Pseudomonas* Migula 1894. 237AL. In N. R. Krieg and J. G.
15 Holt (ed.), *Bergey's manual of systematic bacteriology*, The Williams and Wilkins Co.,
16 Baltimore. 1, 141-199.
- 17 Palleroni, N. J. (1992). Present situation in the taxonomy of aerobic Pseudomonads. In
18 *Pseudomonas: Molecular Biology and Biotechnology*. Gali, E., S. Silver, and B. Wit (eds).
19 Washington D.C.: American Society for Microbiology, pp. 105-115.
- 20 Saitou, N., & Nei, M. (1987). The Neighbor-Joining method: a new method for
21 reconstructing phylogenetic trees. *Mol Biol Evol* 4, 406-425.
- 22 Segers, P., Vancanneyt, M., Pot, B., Torck, U., Hoste, B., Dewettinck, D., Falsen, E.,
23 Kersters, K. & De Vos, P. (1994). Classification of *Pseudomonas diminuta* Leifson and Hugh
24 1954 and *Pseudomonas vesicularis* Büsing, Döll, and Freytag 1953 in *Brevundimonas* gen.
25 nov. as *Brevundimonas diminuta* comb. nov. and *Brevundimonas vesicularis* comb. nov.,
26 respectively. *Int J Syst Bacteriol* 44, 499-510.

- 1 Severini, G. (1913). Una bacteriosi dell'*Ixia maculata* e del *Gladiolus coluilli*. *Ann Bot (Rome)*
2 11, 413-424.
- 3 Springael, D., van Thor, J., Goorissen, H., Ryngaert, A., De Baere, R., Van Hauwe, P.,
4 Commandeur, L.C., Parsons, J.R., De Wachter, R., & Mergeay, M. (1996). RP4::Mu3A-
5 mediated in vivo cloning and transfer of a chlorobiphenyl catabolic pathway. *Microbiology*
6 142, 3283-3293.
- 7 Stackebrandt, E., & Goebel, B. M. (1994). A place for DNA-DNA reassociation and 16S
8 rRNA sequence analysis in the present species definition in bacteriology. *Int J Syst*
9 *Bacteriol* 44, 846-849.
- 10 Stapp, C. (1935). Contemporary understanding of bacterial plant diseases and their causal
11 organisms. *Bot Rev* 1, 405-418.
- 12 Tisdall, J. M. (1994). Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil*
13 159, 115-121.
- 14 Urakami, T., Ito-Yoshida, C., Araki, H., Kijima, T., Suzuki, K. I., & Komagata, K. (1994).
15 Transfer of *Pseudomonas plantarii* and *Pseudomonas glumae* to *Burkholderia* as *Burkholderia*
16 spp. and description of *Burkholderia vandii* sp. nov. *Int J Syst Bacteriol* 44, 235-245.
- 17 Vandamme, P., Johannes, A. G., Cox, H. C. & Berends, W. (1960). On toxoflavin, the
18 yellow poison of *Pseudomonas cocovenenans*. *Recl trav Chim Pays-Bas Belg* 79, 255-267.
- 19 Vandamme, P., Holmes, B., Vancanneyt, M., Coenye, T., Hoste, B., Coopman, R., Revets,
20 H., Lauwers, S., Gillis, M., Kersters, K., & Govan, J. R. W. (1997). Occurrence of multiple
21 genomovars of *Burkholderia cepacia* in cystic fibrosis patients and proposal of *Burkholderia*
22 *multivorans* sp. nov. *Int J Syst Bacteriol* 47, 1188-1200.
- 23 Viallard V., Poirier, I., Cournoyer, B., Haurat, J., Wiebkin, S., Ophel-Keller, K., &
24 Balandreau, J. (1998). *Burkholderia graminis* sp. a novel species of rhizospheric *Burkholderia*
25 species and reassessment of [*Pseudomonas*] *phenazinium*, [*Pseudomonas*] *pyrrocinia*, and
26 [*Pseudomonas*] *glathei* as *Burkholderia* *Int J Syst Bacteriol* 48, 549-563.

- 1 Whitman, W.B., Kim, W., Bedingfield, J. & Clements, A. Unpublished (Quoted in
2 GenBank).
- 3 Yabuuchi, E., Yano, I., Oyaizu, H., Hashimoto, Y., Ezaki, T., & Yamamoto, H. (1990).
4 Proposal of *Sphingomonas paucimobilis* gen. nov. and comb. nov., *Sphingomonas*
5 *parapaucimobilis* sp. nov., *Sphingomonas yanoikuyae* sp. nov., *Sphingomonas adhaesiva* sp. nov.
6 *Sphingomonas capsulata* comb. nov., and two genospecies of the genus *Sphingomonas*. *Int J*
7 *Syst Bacteriol* **34**, 99-119.
- 8 Yabuuchi, E., Kosako, Y., Oyaizu, H., Yano, I., Hotta, H., Hashimoto, Y., Ezaki, T., &
9 Arakawa, M. (1992). Proposal of *Burkholderia* gen. nov. and transfer of seven species of the
10 genus *Pseudomonas* homology group II to the new genus, with the type species
11 *Burkholderia cepacia* (Palleroni and Holmes 1981) comb. nov. *Microbol Immunol* **36**, 1251-
12 1275.
- 13 Yabuuchi, E., Kosako, Y., Yano, I., Hotta, H., & Nishiuchi, Y. (1995). Transfer of two
14 *Burkholderia* and an *Alcaligenes* species to *Ralstonia pickettii* (Ralston, Palleroni and
15 Doudoroff 1973) comb. nov., *Ralstonia solanacearum* (Smith 1896) comb. nov. and *Ralstonia*
16 *eutropha* (Davis 1969) comb. nov. *Microbiol Immunol.* **39**, 897-904.
- 17 Yohalem, D. S., & Lorbeer, J. W. (1994). Intraspecific metabolic diversity among strains of
18 *Burkholderia cepacia* isolated from decayed onions, soils, and the clinical environment.
19 *Antonie van Leeuwenhoek* **65**, 111-131.
- 20 Zhao, N. X., Qu, C. F., Wang, E. T., & Chen, W. X. (1995). Phylogenetic evidence for the
21 transfer of *Pseudomonas cocovenenans* (van Damme et al. 1960) to the genus *Burkholderia* as
22 *Burkholderia cocovenenans* (van Damme et al. 1960) comb. nov. *Int J Syst Bacteriol* **45**, 600-
23 603.
- 24 Zolg, W & Ottow, J. C. G. (1975). *Pseudomonas glathei* sp. nov. A new nitrogen scavenging
25 rod isolated from acid lateritic relicts in Germany. *Z Allg Mikrobiol* **15**, 287-299.

1 Legends of Figures

2 Figure 1: Unrooted phylogenetic tree of *Burkholderia* 16S rDNA sequences . This topology
3 was obtained using all known complete or almost complete sequences from *Burkholderia*
4 strains (see Table 1). The topology shown was obtained by neighbor-joining, % indicating
5 the results of a bootstrap analysis (500 replications, only % above 50% are indicated).
6 Congruences with maximum likelihood and maximum parsimony analyses are shown
7 respectively by * (P<0.01 for ML) and +.

8

9

10

11

12

13

14

15

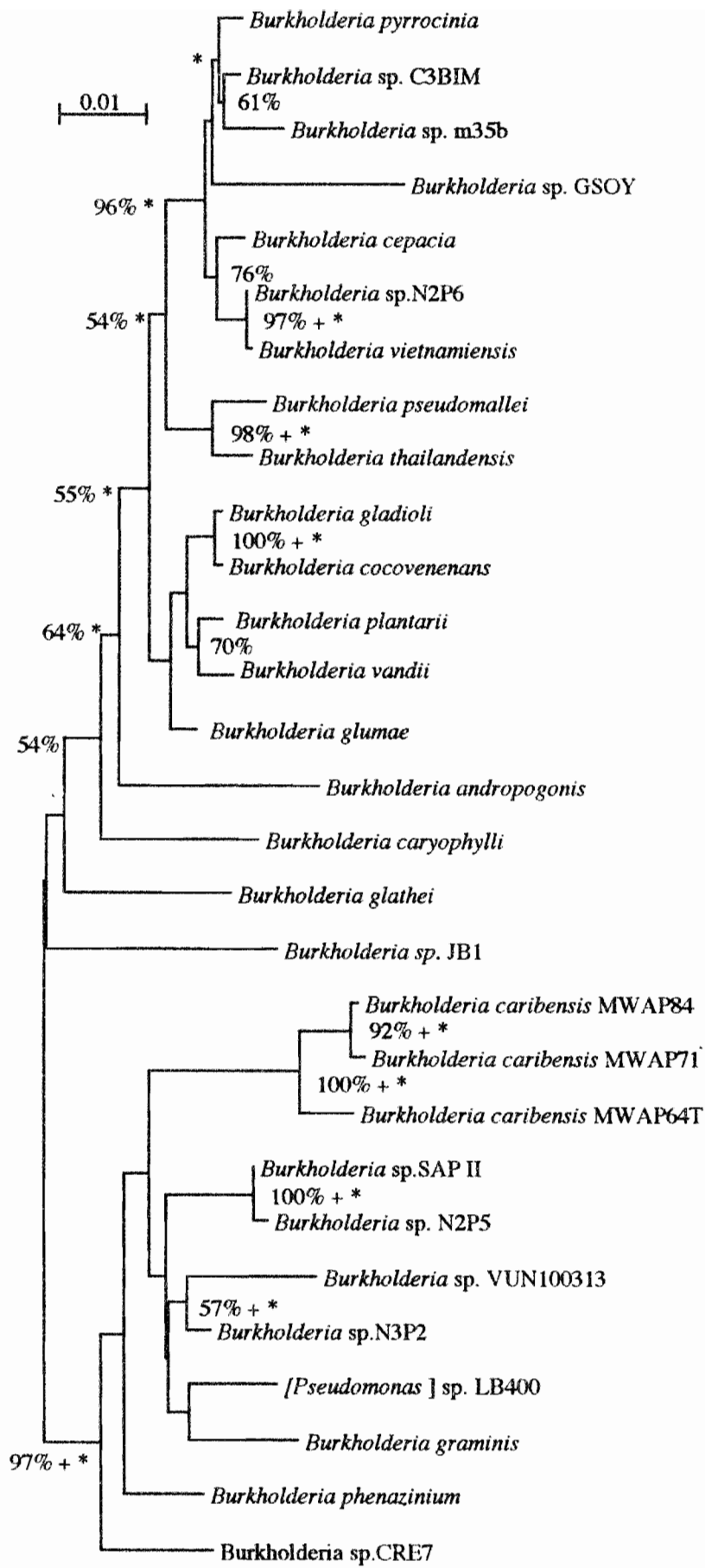
16

17

18

19

20



21 Fig. 1

TABLE 1. Strains investigated in this study, their origin and *rrs* sequence accession number

Strain	Other designation	Origin (reference)	GenBank no.
New isolates to be included in <i>Burkholderia caribensis</i>			
MWAP53		Vertisol (Martinique)*	
MWAP54		Vertisol (Martinique)*	
MWAP55		Vertisol (Martinique)*	
MWAP62		Vertisol (Martinique)*	
MWAP64 ^T	LMG 18531 ^T	Vertisol (Martinique)*	Y17009#
MWAP65		Vertisol (Martinique)*	
MWAP67		Vertisol (Martinique)*	
MWAP70		Vertisol (Martinique)*	
MWAP71		Vertisol (Martinique)*	Y17010#
MWAP74		Vertisol (Martinique)*	
MWAP75		Vertisol (Martinique)*	
MWAP76		Vertisol (Martinique)*	
MWAP77		Vertisol (Martinique)*	
MWAP78		Vertisol (Martinique)*	
MWAP81		Vertisol (Martinique)*	
MWAP82		Vertisol (Martinique)*	
MWAP83		Vertisol (Martinique)*	
MWAP84	LMG 18532	Vertisol (Martinique)*	
MWAP85		Vertisol (Martinique)*	Y17011#
MWAP86		Vertisol (Martinique)*	
MWAP87		Vertisol (Martinique)*	
Reference strains			
[<i>Pseudomonas</i>] sp. LB400		(Lau & Bergeron, unpublished)	U86373
<i>Burkholderia</i> sp. N3P2		Phenanthrene enriched soil (Mueller <i>et al.</i> , 1997)	U37344
<i>Burkholderia</i> sp. N2P5		Phenanthrene enriched soil (Mueller <i>et al.</i> , 1997)	U37342
<i>Burkholderia</i> sp. N2P6		Phenanthrene enriched soil (Mueller <i>et al.</i> , 1997)	U37340
<i>Burkholderia</i> sp. CRE7		Phenanthrene enriched soil (Mueller <i>et al.</i> , 1997)	U37343
<i>Burkholderia</i> sp. GSOY		(Floro <i>et al.</i> , unpublished)	U16140
<i>Burkholderia</i> sp. VUN100313		(Boouchan <i>et al.</i> , unpublished)	AFO68011
<i>Burkholderia</i> sp. SAP II		(Whitman <i>et al.</i> , unpublished)	AF052387
<i>B. glathei</i> LMG 14190 ^T		(Germany) (Zolg & Ottow, 1975)	Y17052#
<i>B. cepacia</i> ATCC 25416 ^T		<i>Allium cepa</i> (Ballard <i>et al.</i> , 1970)	U96927
<i>B. vietnamiensis</i> LMG 10929 ^T		Rice rhizosphere (Vietnam) (Gillis <i>et al.</i> , 1995)	U96928
<i>B. pyrrocinia</i> LMG 14191 ^T		Unknown (Imanaka <i>et al.</i> , 1965)	U96930
<i>B. caryophylli</i> LMG 2155 ^T		<i>Dianthus caryophyllus</i> (Ballard <i>et al.</i> , 1970)	X67039
<i>B. glumae</i> LMG 2196 ^T		<i>Oryza sativa</i> (Japan) (Lau & Bergeron, 1997)	U96931
<i>B. gladioli</i> LMG 2216 ^T		<i>Gladiolus</i> sp. (United states) (Severini, 1913)	X67038
<i>B. plantarii</i> LMG 9035 ^T		<i>Oryza sativa</i> (Japan) (Azegami <i>et al.</i> , 1987)	U96933
<i>B. cocovenenans</i> LMG 11626 ^T		Fermented coconut (Java) (Vandamme <i>et al.</i> , 1960)	U96934
<i>B. andropogonis</i> LMG 2129 ^T		<i>Sorghum bicolor</i> (Stapp, 1935)	X67037
<i>B. phenazinium</i> LMG 2247 ^T		Soil (Bell & Turner, 1973)	U96936
<i>B. graminis</i> C4DIM ^T		Maize rhizosphere (France) (Viallard <i>et al.</i> , 1998)	U96939
<i>Burkholderia</i> sp. m35b		Maize rhizosphere (France) (Viallard <i>et al.</i> , 1998)	U96937
<i>Burkholderia</i> sp. C3B1M		Maize rhizosphere (France) (Viallard <i>et al.</i> , 1998)	U96938
<i>B. thailandensis</i> E264		Environmental isolate (Brett <i>et al.</i> , 1997)	U91838
<i>B. pseudomallei</i> 1026b		Environmental isolate (Brett <i>et al.</i> , 1997)	U91839
<i>B. vandii</i> LMG 16020 ^T		Orchid rhizosphere (Urakami <i>et al.</i> , 1994)	U96932
<i>Burkholderia</i> sp. JB1		Garden soil (Springael <i>et al.</i> , 1996)	X92188

- * strains isolated in the present study
- # sequences determined in the present study
- LMG : Laboratorium Microbiologie Gent Culture Collection, Univeristeit Gent, Ghent, Belgium)
- ATCC : American Type Culture Collection, Rockville, MD, USA)

TABLE 2. DNA-DNA reassociation values between vertisol microaggregate MWAP isolate DNA and DNA of *B. cepacia*, *B. glathei* and *B. graminis* type strains

Strains ^a	% DNA relatedness with	
	<i>B. caribensis</i>	MWAP64 ^b
MWAP64	100	
MWAP 84	105 ± 2	
MWAP 53	80 ± 1	
MWAP 71	74 ± 3	
<i>B. glathei</i> LMG 14190 ^T	11 ± 7	
<i>B. cepacia</i> ATCC 25416 ^T	2 ± 1	
<i>B. graminis</i> C4DIM ^T	18 ± 13	

^aDNA used as template.

^bDNA used as the probe. DNA reassociation values are mean ± standard deviation values obtained from two independent experiments.

TABLE 3. Biochemical characters that differentiate *B. glathei*, *B. andropogonis*, *B. caryophylli*, *B. phenazinium*, and *B. graminis* from MWAP isolates. + all strains positive; - all strains negative; (+) 50-90% strains positive; (-) 8-25% strains positive.

Characteristic	<i>B. caribensis</i> (n=21)	<i>B. graminis</i> (C4DIM ¹)	<i>B. phenazinium</i> (n=3)	<i>B. caryophylli</i> (n=12)	<i>B. andropogonis</i> (n=16)	<i>B. glathei</i> (n= 16)
D-Trehalose	+	+	-	(+)	-	-
Sucrose	-	+	+	+	-	-
D-Raffinose	-	+	-	-	-	-
a-Keto-valeric acid	+	-	+	-	-	+
Malonic acid	-	+	(+)	+	+	+
N-Acetyl mannosamine	+	-	ND	ND	ND	ND
Lactamide	+	-	ND	ND	ND	ND
Adenosine-5'-monophosphate	+	-	ND	ND	ND	ND
Glycil-L-aspartic acid	-	-	+	(+)	-	(+)
Glucoronamide	+	+	-	(-)	(+)	(+)
D,L-Carnitine	+	+	-	-	-	(+)
L-Ornithine	(-)	+	(+)	(+)	-	(-)
Lactose	-	+	-	-	(-)	+

Biolog data of *B. glathei*, *B. andropogonis*, *B. caryophylli*, and *B. phenazinium* were provided by Dr. G. Bochner and Dr. J. Young from Biolog INC.

n = number of strains

**LES MODES D'ASSOCIATIONS ORGANO-MINÉRALES
(MICROAGREGATS 2-20 μ M) DANS LES VERTISOLS EN
FONCTION DES PRATIQUES CULTURALES :
UN INDICATEUR DE LEUR STABILITÉ**

VILLEMEN G., WATTEAU F. et BLANCHART E.

Adresses :

INTRODUCTION

Le stock et la qualité des matières organiques du sol sont fortement impliqués dans son évolution. Dans les vertisols, l'agriculture intensive provoque leur érosion dont l'origine est due à leur fragilité physique naturelle mais surtout à la diminution du stock organique. Par contre la mise en jachère de ces sols permet une restitution organique et ainsi leur réhabilitation.

Les vertisols des Petites Antilles (Guadeloupe, Martinique) constituent un modèle d'étude concernant l'évolution de ce type de sol ; en effet, que ce soit en Guadeloupe ou en Martinique, on trouve à la fois des situations de cultures intensives et des situations de mise en jachère. D'autre part, ces deux vertisols ont une nature minérale différente à savoir, dans le cas de la Martinique, les smectites ont une garniture magnésio-sodique et dans le cas de la Guadeloupe elles ont une garniture calco-magnésio-sodique.

Notre objectif est, à partir de l'étude des modes d'associations organo-minérales, de définir un indicateur révélateur de la stabilité des vertisols, permettant premièrement de mettre en évidence l'impact du stock organique et deuxièmement de préciser si la garniture ionique influe sur cet impact.

Les associations organo-minérales du stock organique concernant en particulier la matière organique à turn over moyen et long terme se situent dans la fraction 2-20 μ m obtenue après fractionnement granulo-densimétrique (Guggenberger et *al.*, 1996). Cette fraction granulo-densimétrique est également révélatrice de l'activité microbienne (Chotte et *al.*, 1992). Nous avons donc choisi de caractériser morphologiquement et analytiquement à l'échelle ultrastructurale les agrégats stables de ce compartiment granulo-densimétrique (2-20 μ m) et afin de valider l'indicateur mis en évidence dans cette étude, il sera corrélé au taux de C total et aux indices de stabilité structurale trouvés dans ces sols.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

MATÉRIELS : LES SOLS

Les sols étudiés sont :

A. UN VERTISOL DE MARTINIQUE DIT MAGNESO-SODIQUE, dont les caractéristiques minérales sont comme le montre le tableau 1, une forte teneur en argiles gonflantes (smectites), à forte teneur en magnésium échangeable.

Horizon	Granulo	Bases échangeables
???	???	???

Tableau 1 : Caractéristiques minérales du vertisol magnésio-sodique de Martinique

Deux situations concernant les pratiques culturales sont considérées :

- UNE SITUATION DE CULTURES INTENSIVES :

un maraîchage de longue durée, à savoir 1 à 3 cultures par an (melon et ?). Le travail du sol est traditionnel et consiste en un labour profond avec plusieurs reprises.

- UNE SITUATION DE REHABILITATION DU SOL :

une prairie de longue durée (? années) à *Digitaria decumbens*.

B. UN VERTISOL DE GUADELOUPE DIT CALCIQUE, dont les caractéristiques minérales sont indiquées dans le tableau 2.

Horizon	Granulo	Bases échangeables
???	???	???

Tableau 2 : Caractéristiques minérales du vertisol calcique de Guadeloupe

Diverses situations de pratiques culturales sont étudiées :

- UNE SITUATION DE CULTURES INTENSIVES :

une culture de canne à sucre de 50 ans.

- DEUX SITUATIONS DE REHABILITATION DES SOLS :

une prairie âgée (*Cymodon nemfluensis*) (âge ?)

une jachère âgée (plante et âge ?).

- UNE SITUATION DE REFERENCE :

un sol nu obtenu selon la méthode killSOM qui consiste à détruire la matière organique par travail du sol et ajout d'herbicide depuis 1987.

Le tableau 3 suivant récapitule les différentes stations étudiées :

Situations	Vertisol Mg-Na de Martinique	Vertisol Ca de Guadeloupe
Cultures intensives	Maraîchage de longue durée	Canne à sucre
Réhabilitation des sols	Pâturage	Prairie âgée Jachère âgée
Situation de référence		Sol nu "killSOM"

Tableau 3 : Récapitulatif des différentes stations étudiées

MÉTHODES

1. LE FRACTIONNEMENT GRANULO-DENSIMETRIQUE DU SOL :

La fraction de sol étudiée est une fraction granulo-densimétrique obtenue après fractionnement de l'horizon 0-10 cm d'après la méthode suivante :

.....

Les agrégats entrant dans cette fraction peuvent être considérés comme des **agrégats stables à l'eau**.

2. METHODES PREPARATIVES DES FRACTIONS GRANULO-DENSIMETRIQUES EN VUE DE LEUR OBSERVATION ET DE LEUR ANALYSE A L'ECHELLE ULTRASTRUCTURALE EN MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE A TRANSMISSION (MET) :

Les fractions des différentes situations sont traitées (fixation, inclusion) par une méthode permettant de préserver l'organisation des agrégats initiaux isolés dans ce compartiment (Villemin et Toutain, 1987).

Les coupes ultrafines (100 nm) sont réalisées à l'aide d'un ultramicrotome UltracutS (Leica). Elles sont colorées à l'acétate de plomb et au citrate d'uranyl en vue de leur observation. Volontairement les observations sont effectuées à un grandissement faible (x 3 400) afin de

couvrir la surface d'observation la plus grande et d'avoir une vision globale des modes d'associations organo-minérales pouvant être caractéristiques à cette échelle. Les coupes destinées aux micro-analyses EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy) et EDXS (Energy Dispersive XRays Spectroscopy) ne sont pas colorées. Le microscope utilisé est un microscope Philips CM20 réglé à 120 kV équipé d'un spectromètre Gatan (modèle 666) pour les analyses EELS.

3. DOSAGE DU CARBONE TOTAL :

Le dosage du carbone est effectué selon la méthode

4. DETERMINATION DE L'INDICE DE STABILITE STRUCTURALE :

Donné par la méthode suivante

RÉSULTATS

1. DOSAGE DU CARBONE TOTAL :

Le tableau 4 suivant rassemble les teneurs en carbone (en %) des horizons 0-10 cm de chaque situation.

Situations	Vertisol Mg-Na de Martinique	Vertisol Ca de Guadeloupe
Cultures intensives	Maraîchage de longue durée 15	Canne à sucre 20
Réhabilitation des sols	Pâturage 40	Prairie âgée Jachère âgée 65 40
Situation de référence		Sol nu "killSOM" 20

Tableau 4 : Teneurs en C (en %) de l'horizon 0-10 cm pour les différentes situations.

On peut remarquer que les sols de cultures intensives présentent les teneurs de C les plus basses et que les situations de réhabilitation ont des teneurs en C deux à trois fois supérieures.

2. RESULTATS EN MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE A TRANSMISSION :

2.1. CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES AGREGATS DES FRACTIONS 2-20 µM :

D'une manière générale, l'observation des fractions 2-20 µm obtenues, révèle que ces fractions sont constituées par des unités stables micrométriques de taille effectivement comprises entre 2 et 20 µm. Toutefois et particulièrement dans les vertisols de Martinique, une fraction argileuse est présente dans ce compartiment des limons fins (cf. photos : vues d'ensemble des fractions 2-20 µm de Martinique et Guadeloupe). Seules ont été considérées dans cette étude les associations organo-minérales de tailles supérieures ou égales à 2 µm.

A cette échelle et dans ce type de sol, on peut dégager nettement 3 modes d'associations typiques :

1. On distingue un mode d'association constitué par des restes végétaux figurés associés à une fraction minérale argileuse en proportion variable. Au sein de ces associations on localise éventuellement des bactéries.

Ce mode d'association que nous qualifions d'**AGREGATS ORGANO-MINERAUX**, implique dans leur définition la présence de restes végétaux figurant des éléments cellulaires (paroi, cellule ...) (cf. photo).

2. On observe 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'**AGREGATS BACTERIENS** (cf. photo).

3. 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'**AGREGATS PSEUDO-MINERAUX** (cf. photo).

On constate que suivant les situations, les proportions relatives de ces trois types d'agrégats varient. Afin d'évaluer ces variations dans les différentes situations étudiées, il convient de comptabiliser chaque type d'agrégat dans un certain nombre de champs d'observation, ayant une surface déterminée. Considérant que la répartition des agrégats, observés sur les différents champs, répond statistiquement à une loi normale, cette loi impose un minimum de 30 champs à

observer. Donc chaque type d'agrégat sera comptabilisé sur 30 champs, de surface unitaire égale à 330 μm^2 .

Le tableau 5 suivant donne le nombre total d'agrégats de chaque type et également le nombre total d'agrégats tous types confondus, pour chaque situation en Martinique et en Guadeloupe.

Situations		Agrégats Organo- minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo- minéraux	Nbre d'agr. tous types confondus
Martinique	Maraîchage	26	18	91	135
	Pâturage	105	132	16	253
Guadeloupe	Canne à sucre	50	17	102	169
	Prairie	162	43	24	229
	Jachère	54	123	141	318
	Sol nu	44	9	234	287

Tableau 5 : Nombre total d'agrégats de chaque type et tous types confondus pour les différentes situations.

Le tableau 6 correspond aux proportions relatives (en %) des 3 classes d'agrégats dans chaque situation.

Situations		Agrégats Organo- minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo- minéraux
Martinique	Maraîchage	19	14	67
	Pâturage	41	52	7
Guadeloupe	Canne à sucre	30	10	60
	Prairie	71	18	11
	Jachère	17	39	44
	Sol nu	16	3	81

Tableau 6 : Proportions relatives (en %) des 3 classes d'agrégats dans chaque situation

La répartition relative entre chaque type d'agrégat montre une grande différence entre les situations de cultures intensives et les situations de réhabilitation, en Martinique comme en Guadeloupe. Il se dégage très nettement dans les deux types de vertisols que le pourcentage des agrégats pseudo-minéraux est nettement plus bas dans chaque situation de réhabilitation, à savoir une différence de 60% entre les deux situations de Martinique, et pour la Guadeloupe 50% entre les situations "canne à sucre" et "prairie" et 16% entre "jachère" et "canne à sucre".

De plus on remarque qu'en Guadeloupe la situation de référence "sol nu" correspond à celle pour laquelle le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux est le plus élevé.

En Martinique où la prairie est à *Digitaria decumbens*, les pourcentages d'agrégats organo-minéraux d'une part et bactériens d'autre part sont nettement plus élevés que ceux obtenus pour la situation maraîchage. Pour le vertisol de Guadeloupe en ce qui concerne la prairie à *Cymodon nemfluensis* : les agrégats organo-minéraux 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.

En ce qui concerne la situation de réhabilitation (jachère), on remarque que le pourcentage d'agrégats organo-minéraux est nettement plus bas que celui de la situation de cultures intensives alors que le pourcentage d'agrégats bactériens est nettement plus élevé comparativement à celui obtenu pour la situation de cultures intensives d'une part et pour l'autre situation de réhabilitation (prairie) d'autre part. Pour le sol nu, situation de référence, les pourcentages d'agrégats organo-minéraux et bactériens sont très bas et les plus faibles obtenus comparativement aux autres situations de Guadeloupe.

Le sol nu de référence présente un nombre total d'agrégats tous types confondus très élevé, ce qui met en évidence que ce paramètre ne peut être pris en compte pour apprécier l'impact des pratiques culturales.

Afin de valider toutes ces remarques, une analyse statistique évaluant le pourcentage de similitude entre ces différentes situations a été effectuée (cf. tableau 7).

Situations comparées	Agrégats organo-minéraux	Agrégats bactériens	Agrégats pseudo-minéraux
Marâchage/prairie	0 %	0 %	0 %
Prairie/canne à sucre	0 %	0 %	0 %
Jachère/canne à sucre	66 %	0 %	1 %
Prairie/jachère	0 %	0 %	0 %
Prairie/Sol nu	0 %	0 %	0 %
Jachère /sol nu	40,6%	0 %	0 %
Canne à sucre/sol nu	66 %	8,2 %	0 %

Tableau 7 : Pourcentages de similitude calculés pour les différentes comparaisons entre stations.

Ces résultats confirment bien toutes les remarques faites ci-dessus. Pour la Martinique, l'analyse statistique indique des pourcentages de similitude de 0% entre les deux situations

étudiées quelque soit le type d'agrégats : la situation "maraîchage" est donc très différente de la situation "pâturage".

En Guadeloupe si l'on considère les agrégats pseudo-minéraux, le degré de similitude est nul quelques soient les situations. Le degré de similitude de 8,2% concernant les agrégats bactériens entre les situations "sol nu" et "canne à sucre" s'explique par les faibles pourcentages de ces associations trouvés (10% et 3% respectivement pour la canne à sucre et le sol nu). En ce qui concerne les agrégats organo-minéraux, les résultats montrent une forte ressemblance entre la situation de réhabilitation "jachère" et la situation de cultures intensives d'une part, entre le sol nu et la situation de cultures intensives d'autre part, ainsi qu'entre le sol nu et la situation de réhabilitation (jachère).

Nous avons effectué une comparaison morphologique entre les différents types d'agrégats des vertisols de Martinique et de Guadeloupe. On constate que les agrégats pseudo-minéraux des deux vertisols sont très différents : ceux de Martinique sont constitués majoritairement de smectites à l'aspect bouclé (curled), alors que les pseudo-minéraux de Guadeloupe sont composés de smectites qualifiées d'ondulées (cf. photo).

Lorsque les smectites sont adsorbées sur les exopolymères bactériens (agrégats bactériens) ou sur les matières organiques végétales évoluées (agrégats organo-minéraux), que ce soit Martinique ou en Guadeloupe, ces smectites présentent un aspect ondulé (cf. photo).

2.2. CARACTERISATION ANALYTIQUE DES AGREGATS DES FRACTIONS 2-20 μM :

A. MICROANALYSES EFFECTUEES SUR LES DIFFERENTS TYPES D'AGREGATION DE MARTINIQUE :

Les analyses effectuées en EDXS et EELS sur les agrégats pseudo-minéraux à l'aspect bouclé ont montré d'une part que ces smectites sont associées à une fraction organique révélée par la présence d'azote (voir spectre) et d'autre part l'analyse EDXS confirme la garniture magnésique de ces smectites, à faible pourcentage d'aluminium, mais associée au fer (voir spectres EDXS). En ce qui concerne les smectites ont l'aspect ondulé, qu'elles soient dispersées en petits paquets phylliteux (779) ou adsorbées sur les matières organiques des agrégats organo-minéraux, leur analyse comparativement aux smectites bouclées révèle, à la fois un très faible taux de magnésium, un taux d'aluminium trois fois plus élevé et un pourcentage de fer légèrement plus bas.

Par ailleurs, seuls C et N ont été détectés au niveau des exopolymères des agrégats bactériens.

B. MICROANALYSES EFFECTUEES SUR LES DIFFERENTS TYPES D'AGREGATION DE GUADELOUPE :

L'analyse effectuée sur les associations de type pseudo-minéraux révèle la présence d'azote donc de matières organiques très fines associées aux smectites, le calcium a aussi été détecté au sein de ces associations. L'analyse EDXS des smectites montre qu'elles ne sont pas associées au magnésium.

Le calcium 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.

3. RESULTATS CONCERNANT LA DETERMINATION DES INDICES DE STABILITE STRUCTURALE :

...

...

DISCUSSION - CONCLUSION

En établissant la relation entre le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux, l'indice de stabilité structurale et les teneurs en C total de l'horizon 0-10 cm, nous pouvons comme le montre la figure 1 mettre en évidence une corrélation étroite entre ces trois paramètres : plus l'indice de stabilité est élevé, plus le taux de C est élevé et plus le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux est faible pour les vertisols de Martinique et de Guadeloupe.

Dans une situation de cultures intensives l'indice de stabilité est bas, le taux de C est bas et le pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux est élevé. Inversement dans une situation de réhabilitation l'indice de stabilité structurale indique une stabilité élevée, une teneur en C élevée et un pourcentage d'agrégats pseudo-minéraux faible. Entre ces deux situations extrêmes, on trouve des situations intermédiaires qui confirment cette corrélation (cf. figure 1). On admettra donc que les pourcentages relatifs d'agrégats pseudo-minéraux calculés pour des vertisols soumis à des pratiques culturales différentes nous renseignent sur leur stabilité et leur devenir.

Le pourcentage relatif d'agrégats pseudo-minéraux est donc un bon indicateur biologique de la stabilité des vertisols en fonction des pratiques culturales.

En précisant une valeur seuil de cet indicateur on pourra diagnostiquer une situation critique correspondant à une mauvaise gestion de ce type de sol.

Nous pouvons donc définir un nouvel indice de stabilité structurale (IS), comme suit :

$$\text{IS} = 1 - (\% \text{ d'agrégats pseudo-minéraux})/100$$

En comparant les courbes reliant l'indice de stabilité IS et la teneur en carbone de l'horizon 0-10 cm pour les différentes situations, de Martinique d'une part, et de Guadeloupe d'autre part (cf. figure 2), on remarque que ces deux courbes n'ont pas la même pente et qu'elles se croisent pour une valeur de teneur en C correspondant à environ 10‰.

Ceci révèle que la progression de la teneur en C au-delà de 10‰ a beaucoup plus d'impact sur la stabilité du sol de Martinique que sur celui de Guadeloupe et donc que l'apport de matière organique dans le vertisol de Martinique permet d'obtenir un vertisol plus stable que celui de Guadeloupe pour une même teneur en C.

En deçà de 10‰ en carbone, c'est-à-dire dans des situations de non renouvellement du stock organique, on constate comme le montre les courbes (cf. fig.2), une inversion de comportement : le vertisol de Martinique est moins stable que celui de Guadeloupe. Il semble donc que la teneur de 10‰ en C total pour les vertisols des Petites Antilles soit le seuil critique en deçà duquel on constate que la teneur en C total n'est plus l'élément prédominant conditionnant la stabilité des vertisols étudiés. On peut penser que les facteurs qui seront alors prépondérants puissent être :

- soit la nature du C impliqué dans ces faibles teneurs
- soit la nature minéralogique des argiles et en particulier la garniture ionique des smectites, qui est la différence minéralogique prédominante entre les vertisols de Martinique et de Guadeloupe.

On a constaté, au cours de la caractérisation des agrégats pseudo-minéraux des situations de Martinique, que la morphologie des smectites est fonction des teneurs en magnésium dans les différents modes d'agrégation, à savoir que lorsque les smectites perdent leur garniture magnésique, elles se dispersent et retrouvent associées aux matières organiques dans les agrégats organo-minéraux et bactériens. Ceci révèle l'importance de ces matières organiques,

qui ont la capacité à retenir cette fraction argileuse. Les analyses ont également montré que la dynamique de la capacité d'échange se traduit par une substitution de magnésium par l'aluminium, accompagné d'une perte en fer. Nous pensons que cette dynamique a un rôle important dans le processus d'agrégation organo-minérale du vertisol magnésio-sodique de Martinique.

Dans les résultats analytiques des agrégats du vertisol de Guadeloupe, il faut surtout retenir la présence du calcium au sein des trois types d'associations déterminés et donc le rôle important de cet élément dans l'agrégation des vertisols de Guadeloupe.

Si le nombre total d'agrégats dans la fraction 2-20 μm ne peut être, comme nous l'avons démontré, un paramètre révélateur de la stabilité structurale, la considération des agrégats pseudo-minéraux dans ce compartiment nous a permis de proposer un nouvel indicateur de stabilité (IS) dans l'étude des vertisols, qui peut être utilisé comme un outil de diagnostic de gestion des sols.

Bibliographie

Chotte J.L., Jocteur-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/ *Effect of the soil dispersion on the location of the microbial biomass. Example of a vertisol*. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XXVII, 1.

Guggenberger G., Thomas R. J. and Zech W., 1996. Soil organic matter within earthworm casts of an anecic-endogeic tropical pasture community, Colombia. *Applied Soil Ecology*, 3, 263-274.

Villemin G et Toutain F 1987. Method to stabilize organo-mineral soil samples for transmission microscopy. *Soil micromorphology*, 43-48.