

Caractérisation structurale de sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) sous différents modes d'utilisation agricole

P.L. de Freitas⁽¹⁾, Ph. Blancaneaux⁽²⁾, R. Moreau⁽³⁾

1 - EMBRAPA / C N P S - Rua Jardim Botânico, 1024; 22460-000, Rio de Janeiro, RJ, Brésil.

2 - ORSTOM / EMBRAPA - C N P S - Rua Jardim Botânico, 1024; 22460-000, Rio de Janeiro, RJ.

3 - ORSTOM- 911, av. Agropolis- B.P. 5045; 34032, Montpellier, France.

RÉSUMÉ

L'évaluation de systèmes de gestion pour la Région des Cerrados Brésiliens doit s'appuyer sur la mise en oeuvre d'approches méthodologiques comme l'analyse morpho-structurale permettant, en particulier, la caractérisation de l'état structural du sol, avec l'identification des différents horizons pédologiques et la caractérisation des unités pédologiques homogènes (UPH), qui résultent de l'activité anthropique et sont directement liées à l'action des outils agricoles. On y considère, sur un même type de sol ferrallitique, quatre situations comprenant une parcelle sous végétation naturelle anthropisée (CER), une parcelle sous pâturage cultivé de longue durée (PAL) et deux parcelles expérimentales sous irrigation (succession maïs/haricot), correspondant l'une à un système de gestion conventionnelle (CCL) et l'autre à un système de gestion par semis direct (PD).

La prise en compte de la différenciation morpho-structurale permet de comprendre et pronostiquer le comportement du sol évoluant sous différents modes d'utilisation agricole et conditions pédo-climatiques. S'agissant de l'espace poral, on constate une augmentation de la densité apparente dans les horizons les plus affectés par le travail du sol pour lesquels, toutefois, grâce aux caractéristiques de micro-agrégation des sols ferrallitiques, la porosité totale se maintient au-dessus de 49 %. C'est surtout la macroporosité grossière qui montre les variations les plus importantes en fonction du système cultural. Ces résultats sont confirmés et précisés par la porosimétrie à mercure.

On observe une correspondance nette entre les courbes de retrait et les caractères morphologiques décrits dans les divers horizons et UPH du sol existant sous différents systèmes. On constate, en effet, une cohésion d'assemblage et une cohésion interne des éléments structuraux très élevées en CCL, élevées en PAL; par contre, si la cohésion interne reste appréciable en PD, la cohésion d'assemblage y est faible. Enfin, en comparant les situations CER et PAL avec les systèmes sous culture annuelle CCL et PD; on constate une stabilité plus faible des macro-agrégats (> 2 mm) dans le dernier cas. La diminution observée entre les deux cas de situation apparaît bien en rapport avec les caractéristiques morphologiques, physiques, chimiques et biologiques des différents systèmes considérés.

Mots clés

Analyse morpho-structurale, Cerrados Brésiliens (Savanes Acides), Systèmes de gestion du sol, Sol ferrallitique, Profil cultural, Pénétrométrie, Porosité, Structure

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B*15561 Ex : 1

SUMMARY

CHARACTERIZATION OF BRAZILIAN ACID SAVANNA (CERRADOS) SOILS UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON MORPHO-STRUCTURAL ANALYSIS.

The evaluation of management systems in the Brazilian Acid Savanna (Cerrado) Region must be based on methodological approaches, such as morpho-structural analysis. This approach allows the characterization of soil structure, with the identification of different pedolo-



gical horizons and the characterization of homogeneous pedological units (HPU), related to the effects of human activity and the action of a range of agricultural implements.

Results obtained from the evaluation of different soil management systems, in the context of morpho-structural analysis are presented. Several situations were considered, in a clayey dark-red oxisol, including : a) an area under natural savanna vegetation, after selective clearing and grazing during the dry season (CER); b) an area under long-term cultivated pasture with *Brachiaria brizantha* submitted to rational management which avoided over-grazing (PAL); c) an experimental plot with five year crop succession of rainfed corn (*Zea mays*) and irrigated bean (*Phaseolus vulgaris*), submitted to a conventional soil tillage system with disk harrow plowing (CCL); and, d) an experimental plot under the same crop succession, submitted to a zero-tillage system planting into residues of the preceding crop (PD).

Soil characterization in the field was carried out on sites chosen according to their representativity, using the morpho-structural analysis approach, which allowed the identification of horizons and the description and characterization of selected HPU (Fig. 1 and Tab. 1). Penetration resistance was measured horizontally with a conical pocket penetrometer (Fig. 2). Soil sampling was carried out in the HPU most representative of each identified soil horizon. Apparent density and pF curve were determined on 100 cm³ cylindrical cores (Fig. 3). Mercury intrusion was measured on oven dried samples of 2 to 3 cm³ (Fig. 4). Soil shrinkage curves were obtained on cylindrical samples of 50 cm³ (Fig. 5 and Tab. 2), (Moreau and Nagumo, 1995; Freitas and Blancaneaux, 1994; Braudeau, 1993).

The influence of different management systems on the evolution of an Oxisol is very well indicated by the morpho-structural modifications observed in the compared management systems. Taking into account the horizons whose morpho-structural characteristics are the most representative, such as surface (A₂, Ap₂ and Ap₂B) and deep horizons, it was possible to establish a precise comparison of evolution of the poral space and the behavior under swelling.

The morpho-structural description of horizons in CER, chosen as a check situation, shows a very-fragile blocky macro-structure, with a clear granular character of the basic structural elements. Surface horizons present a higher soil density, lower macroporosity and a stronger inter-aggregate cohesion, which translates the effect of climatical, biological and human activities. Under cultivated grassland (PAL) soil density is higher, with a weaker inter-aggregate cohesion and a lower penetration resistance. Results suggest appreciable differences in the pedological material, taking into account the slightly lighter texture, where gramineous cover is associated with a structural improvement of the surface horizons.

In a general manner, a better defined structural differentiation is observed in cultivated situations (CCL and PD) due to the higher degree of development of macro-structural elements and a stronger inter-aggregate cohesion. Observed characters in zero-tillage plots (PD) indicate a better structural definition by comparison with the check situation (CER) and translate an improvement in soil structure in relation to CCL which could explain the lower crop yield in the latter.

Key-words

Morpho-structural Analysis, Cerrados (Acid Savannas), Soil Management Systems, Oxisols, Cultural Profile, Penetrometry, Porosity, Structure.

RESUMEN

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS SUELOS DE LOS CERRADOS BRASILEÑOS (SABANAS) EN DIFERENTES MODOS DE UTILIZACIÓN AGRÍCOLA

La evaluación de sistemas de gestión para la Región de los Cerrados Brasileños debe apoyarse en la puesta en práctica de enfoques metodológicos, como el análisis morfoestructural, que permitan en particular la caracterización del estado estructural del suelo, con la identificación de los diferentes horizontes pedológicos y la caracterización de las unidades pedológicas homogéneas (UPH), que resultan de la actividad antrópica y se encuentran directamente vinculadas con la acción de las herramientas agrícolas. En un mismo tipo de suelo ferralítico se consideran cuatro situaciones, que comprenden una parcela con vegetación natural antropizada (CER), una parcela con pasto mediante cultura de larga duración (PAL) y dos parcelas experimentales con riego (sucesión maíz/judías) que corresponden una a un sistema de gestión convencional (CCL) y la otra a un sistema de gestión por siembra directa (PD).

Teniendo en cuenta la diferenciación morfoestructural resulta posible comprender y pronosticar el comportamiento del suelo que evoluciona bajo diferentes modos de utilización agrícola y condiciones pedoclimáticas. En lo que se refiere al espacio poral, se constata un aumento de la densidad aparente en los horizontes más afectados por el trabajo del suelo, para los cuales, no obstante, gracias a las características de microagregación en suelos ferralíticos, la porosidad total se mantiene por encima del 49 %. Es ante todo la macroporosidad la que muestra las variaciones más importantes en función del sistema de cultivo. La porosimetría de mercurio confirma y precisa estos resultados.

Se observa una correspondencia clara entre las curvas de retraimiento y los caracteres morfológicos descritos en los diversos horizontes y UHP del suelo existente bajo diferentes sistemas. Se constatan, en efecto, una cohesión de ensamblaje y una cohesión interna de los elementos estructurales muy elevadas en CCL, elevadas en PAL. Por el contrario, si en PD la cohesión interna se mantiene apreciable, la cohesión de ensamblaje es débil. Finalmente, comparando la situación CER y PAL con los sistemas bajo cultivo anual CCL y PD, se constata una estabilidad más escasa de los macroagregados (> 2 mm) en el último caso. La disminución observada entre los dos casos de situación aparece como muy relacionada con las características morfológicas, físicas, químicas y biológicas de los diferentes sistemas considerados.

Palabras claves

Análisis morfoestructural, Cerrados Brasileños (Sabanas Ácidas), Sistemas de gestión del suelo, Suelo ferralítico, Perfil de cultivo, Penetrometría, Porosidad, Estructura.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE SOLOS DOS CERRADOS DO BRASIL SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO.

A avaliação de sistemas de uso e manejo para a região dos Cerrados Brasileiros deve se basear na utilização de procedimentos como análise morfo-estrutural permitindo, em particular, a caracterização do estado estrutural do solo, com a identificação dos diferentes horizontes pedológicos e a caracterização de Unidades Pedológicas Homogêneas (UPH), as quais resultam da atividade antrópica e são diretamente ligadas à ação de implementos agrícolas. Uma série de resultados obtidos a partir de avaliação de diferentes sistemas de uso e manejo do solo no contexto da análise morfo-estrutural são apresentados. Foram consideradas diferentes situações em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso, compreendendo uma parcela com vegetação natural antropizada (CER), uma parcela sob pastagem cultivada de longa duração (PAL), e duas parcelas experimentais sob irrigação (sucessão milho/feijão), correspondendo a um sistema de manejo convencional (CCL) e a um sistema de manejo com plantio direto (PD).

A consideração dos aspectos morfo-estruturais é importante para compreender e prognosticar o comportamento do solo em sua evolução sob diferentes sistemas de uso e manejo e sob diferentes condições pedo-climáticas. No que se refere ao espaço poral, constata-se um aumento da densidade aparente nos horizontes mais susceptíveis ao trabalho do solo, para os quais, no entanto, graças às características de micro-agregação dos latossolos, a porosidade total se mantém acima de 49 %. As variações mais importantes são encontradas especialmente para a macroporosidade grosseira em função do sistema de manejo. Estes resultados são confirmados pela porosimetria a mercúrio.

Observa-se uma relação clara entre as curvas de retração e os aspectos morfológicos descritos nos diversos horizontes e UPHs do solo para os diferentes sistemas considerados. Constata-se uma coesão entre e intra-agregados muito forte em CCL e forte em PAL. Ao contrário, se esta coesão intra-agregados permanece elevada em PD, a coesão entre-agregados é fraca. Finalmente, ao comparar os sistemas CER e PAL com os sistemas sob cultivo anual CCL e PD constata-se uma estabilidade mais fraca dos macro-agregados (> 2 mm) nessas últimas duas situações. A diminuição observada apresenta uma boa correlação com as características morfológicas, físicas, químicas e biológicas dos diferentes sistemas considerados.

Palavras chaves

Análise morfo-estrutural, Cerrados Brasileiros (Savanas Ácidas), Sistemas de uso e manejo do solo, Latossolos, Perfil cultural, Penetrometría, Porosidade, Estructura.

Avec 2 millions de kilomètres carrés, la région des Cerrados du Brésil représente approximativement un quart de la superficie du territoire brésilien. La majeure partie de cette région possède un climat caractéristique d'une région tropicale sub-humide, avec une précipitation moyenne annuelle de 1 500 mm, répartie d'octobre à avril. Les sols ferrallitiques sont les plus fréquemment utilisés dans cette région. Ce sont des sols de faible capacité d'échange cationique (CEC), d'acidité élevée, à fort pouvoir fixateur pour le phosphore et, en conséquence, de faible fertilité naturelle (Blancaneaux *et al.*, 1993). La culture de ces sols est cependant possible après correction des déficiences chimiques par chaulage et fertilisation (N, P, K et oligo-éléments).

Dans les zones non exploitées, ces sols présentent des caractéristiques physiques favorables : profondeur, friabilité, aération et drainage, ce qui, outre le relief peu accentué, leur confèrent une potentialité élevée pour l'agriculture mécanisée intensive. Toutefois, à la suite de la mise en culture, apparaissent des modifications du sol qui se manifestent par une dégradation structurale très importante. Ces modifications conduisent à une augmentation de la susceptibilité à la compaction, au ruissellement et à l'érosion, même sur des surfaces de faible pente (Freitas, 1994).

Les systèmes de culture conventionnels utilisés dans les Cerrados sont tenus comme responsables d'une réduction importante du rendement des cultures installées (Goedert et Lobato, 1986). Cette réduction résulte de l'utilisation intensive et continue des mêmes outils agricoles, souvent inappropriés au travail de ces sols ferrallitiques tropicaux dont l'état physique se dégrade. L'adoption de systèmes de culture alternatifs, comme le semis direct associé à d'autres pratiques agro-écologiques, telles que la rotation des cultures, l'utilisation d'engrais verts ou de cultures de couverture, le contrôle intégré des adventices, a été recommandée afin d'assurer une utilisation agricole durable des sols dans cette région (Freitas et Blancaneaux, 1991). Alors que les études sur l'évolution des sols cultivés réalisées dans la région se limitent généralement aux paramètres chimiques, l'évaluation objective de ces systèmes implique de prendre aussi en compte l'état structural du sol (Freitas *et al.*, 1996a) dont les modifications, avec leurs conséquences sur l'enracinement et le développement des cultures sont encore insuffisamment connues.

Une méthode d'analyse morpho-structurale a été adaptée et proposée pour l'étude des sols des Cerrados Brésiliens par Blancaneaux *et al.* (1991) à partir des méthodes de description du profil pédologique et du profil cultural (Henin *et al.*, 1969; Gautronneau et Manichon, 1987). Elle se fonde sur l'identification des différents horizons (pédologiques ou anthropisés) qui comprennent une ou plusieurs unités pédologiques homogènes⁽¹⁾ (UPH), correspondant chacune à un ensemble bien défini d'éléments structuraux. Ces unités sont caractérisées par examen macro-morphologique de profils représentatifs des

différentes situations de gestion du sol. Les caractéristiques des UPH, notamment l'état structural, l'activité biologique, le développement et l'orientation des racines, résultent de l'activité anthropique et sont liées directement à l'action des divers outils agricoles. La caractérisation morphologique est complétée par des mesures sur le terrain (pénétrométrie, infiltration de l'eau et profil hydrique) et par diverses déterminations physiques, chimiques et biologiques réalisées au laboratoire, sur des échantillons représentatifs des UPH identifiées (Blancaneaux *et al.*, 1994).

Cette approche méthodologique a été utilisée pour préciser et comparer l'influence de quatre modes de gestion sur l'état structural, en considérant deux systèmes de production fourragère et deux systèmes de culture intensive. Ces dernières se distinguent par le mode de travail du sol, et présentent, malgré des caractères de fertilité minérale du sol comparables et une fertilisation semblable, des rendements différents des cultures de maïs et de haricot pratiquées (Blancaneaux et Freitas, 1995; Freitas *et al.*, 1996b); cela conduit à se demander si les différences de rendement observées ne résultent pas de modifications des caractères physiques du sol induites par les pratiques culturales.

Cette étude concerne l'analyse des caractères morpho-structuraux du sol et celle des mesures pénétrométriques, porosimétriques et rétractométriques réalisées sur les UPH les plus importantes, identifiées dans les profils représentatifs des quatre situations comparées.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'étude réalisée dans la région de Goiânia (Brésil), porte sur un sol ferrallitique fortement désaturé, argileux et rouge sombre, développé sur une couverture détrito-latéritique Quaternaire, sous végétation de Cerrado (savane arborée), déjà décrit dans une publication antérieure (Profil LSGO, in Blancaneaux *et al.*, 1993). Il s'agit d'un sol profond, sans grande variation texturale verticale, où la fraction argileuse kaolinique est également riche en oxydes de fer (plus de 10 % de fer total, l'hématite étant largement représentée). Le taux de matière organique est comparable dans les différentes situations considérées. Quatre situations représentatives des systèmes de gestion agricole existant dans les Cerrados et correspondant à différents degrés d'intervention au niveau de la végétation et du sol sont comparées sur les terrains de l'EMGOPA (Entreprise Goïanaise de Recherche Pour l'Agriculture et l'Élevage) à Goiânia et Senador Canedo (Goïàs) :

(1) : équivalents des « unités morphologiques » d'après Gautronneau et Manichon (1987) et des « unités morphologiques homogènes » d'après De Blic (1994).

Parcelles représentatives des situations en équilibre sous végétation pérenne :

1 - *Cerrado* (C E R) : sous végétation naturelle anthropisée, « *campo-cerrado* » ou savane arborée ouverte après un déboisement sélectif, avec l'introduction de bovins pendant la saison sèche depuis plus de dix ans. Cette situation, la moins influencée par l'activité humaine, est prise comme témoin dans l'étude qui suit.

2 - *Pâturage cultivé de longue durée* (P A L) : *Brachiaria brizantha*, implanté dans les années 1970 et renouvelé en 1989.

Parcelles expérimentales sous cultures, avec deux modes de travail différents du sol ;

succession de deux cycles annuels de maïs pluvial (*Zea mays*) / haricot (*Phaseolus vulgaris*) irrigué par aspersion sur pivot central depuis cinq ans :

1 - *Culture conventionnelle de longue durée* (C C L) : labour à pulvérisateur offset « *cover-crop* » travaillant sur 15 cm, suivi d'un double passage de pulvérisateur à disque niveleur (5 à 10 cm), avec incorporation d'herbicide non-sélectif ;

2 - *Plantio direto* (P D) : semis direct sur résidus de la culture précédente et application d'herbicide non sélectif, avant semis. Ce traitement fournit de meilleurs rendements de maïs et surtout de haricot qu'avec le travail dit conventionnel du sol (Teixeira *et al.*, 1995).

L'analyse morpho-structurale a été réalisée pour CER et PAL en octobre 1994, et pour les parcelles expérimentales CCL et PD, en août 1994, sur culture de haricot. Les horizons pédologiques et les UPH ont été caractérisés sur les profils les plus représentatifs des situations comparées. La résistance à la pénétration a été mesurée horizontalement avec un pénétromètre de poche à aiguille conique de type Yamanaka (DAIKI push-cone, mod. DIK-5551) (Moreau et Nagumo, 1995), avec 5 répétitions pour chaque type d'UPH, dans des conditions d'humidité du sol proches de la capacité au champ.

■ Deux séries d'échantillons ont été sélectionnées pour chaque situation en fonction de la profondeur : d'une part dans les horizons supérieurs (A_2 , Ap_2 et Ap_2B), où l'on s'attend à ce que l'effet des techniques culturales modifie le plus la structure du sol et, d'autre part, dans les horizons plus profonds (BA), où l'on devrait observer la structure caractéristique des sols ferrallitiques de cette zone, protégée des actions anthropiques.

■ Ces échantillons ont été prélevés sur l'UPH la plus représentative de chaque horizon pédologique identifié. Les déterminations suivantes ont été réalisées : densité apparente et répartition des classes porales d'après la courbe de pF (1,78 ; 2,00 ; 2,52 ; 3,00 ; 3,48 et 4,18), déterminées sur cylindres de 100 cm³ (Freitas et Blancaneaux, 1994) ; intrusion de mercure sur échantillons de 2 à 3 cm³, après deshydrata-

tion à l'étuve à 105 °C (Porosimètre Micrométrics - Pore Sizer 9310) ; courbe de retrait du sol, sur échantillons cylindriques de 50 cm³ (Braudeau, 1993).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La différenciation morpho-structurale des profils décrits (*figure 1*) traduit une faible variation verticale des caractères structuraux du sol témoin, sous végétation naturelle (CER) ; on observe une structure grossière (macro-structure) très fragile à la partie supérieure du profil, avec une faible cohésion d'ensemble et une délimitation peu nette des éléments structuraux, et une structure granulaire très nette dans les horizons de profondeur. Il apparaît une meilleure définition macro-structurale (cohésion d'ensemble, netteté et stabilité des éléments structuraux polyédriques sub-anguleux) à la partie supérieure du sol sous pâturage cultivé (PAL).

Le sol cultivé soumis au labour conventionnel (CCL), présente les plus fortes variations verticales de la structure, avec une structure polyédrique anguleuse, au niveau de Ap_2B . Dans le système de semis direct (PD), une hétérogénéité de la structure entre les horizons, intermédiaire entre celle de PAL et celle de CCL. En particulier, les horizons Ap_2 et AB présentent une macro-structure polyédrique sub-anguleuse avec cohésion d'ensemble modérée jusqu'à 32 cm.

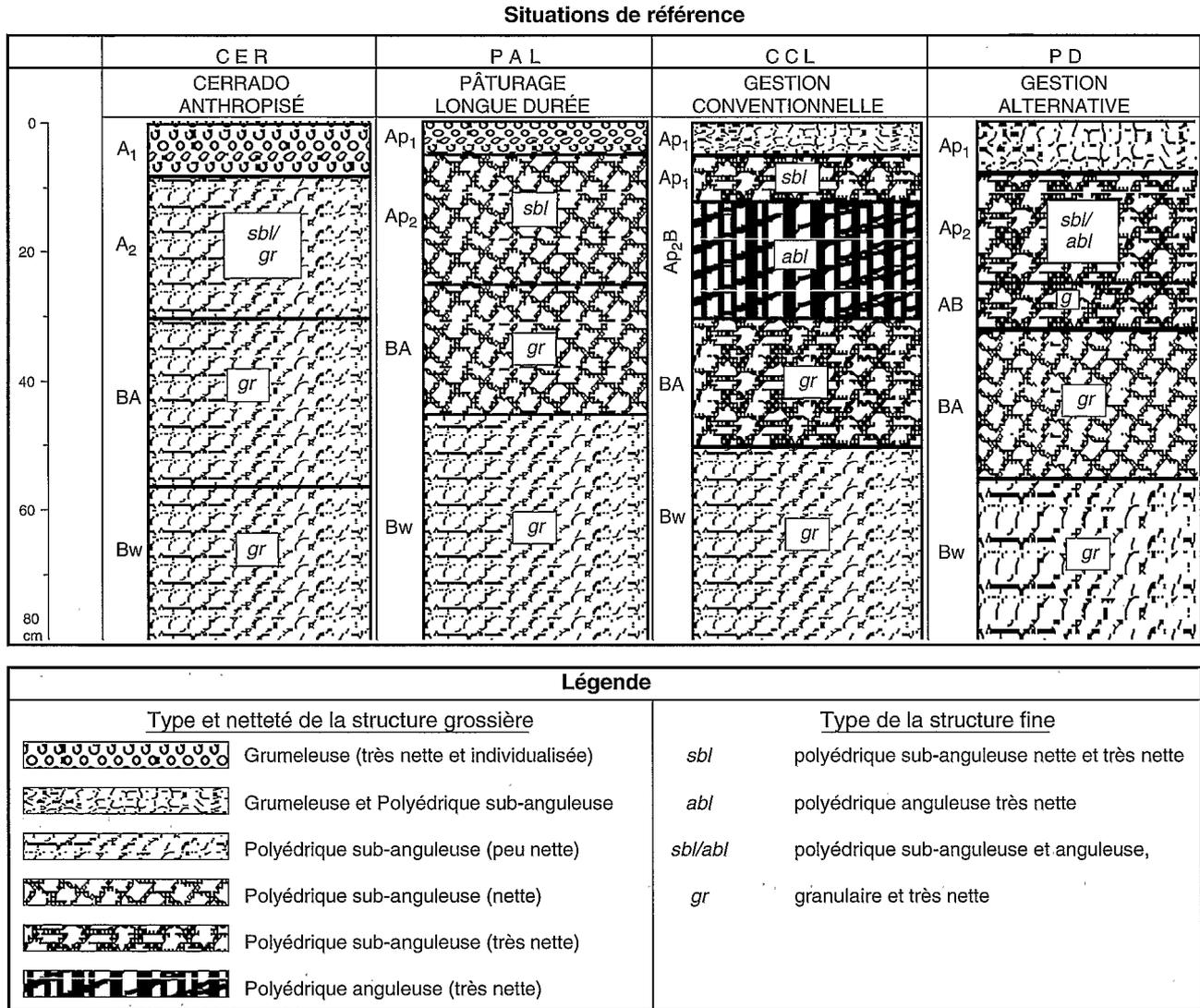
La résistance à la pénétration (*figure 2*) met en évidence une faible résistance pour tous les horizons du sol sous végétation naturelle (CER) et sous pâturage (PAL). Une forte augmentation de la résistance à la pénétration est observée dans l'horizon Ap_2B et, dans une moindre mesure, dans l'horizon BA sous gestion conventionnelle (CCL). Par contre, la résistance reste modérée, avec tout de même une augmentation significative par rapport à CER, dans l'horizon correspondant (Ap_2) sous PD.

Avec une résistance à la pénétration élevée, les éléments structuraux polyédriques anguleux observés en Ap_2B/CCL caractérisent donc une structure de plus forte cohésion d'ensemble que la structure polyédrique sub-anguleuse observée en Ap_2/PD . Un enracinement réduit, une activité biologique faible, une faible présence de matière organique identifiable sont également associés à l'horizon Ap_2B de CCL (*tableau 1*).

Les transformations morpho-structurales observées sur le terrain suggèrent des modifications de l'arrangement des particules du sol devant notamment toucher les caractères de l'espace poral, qui conditionne la dynamique de l'eau et la croissance des racines. Pour préciser ces observations, l'espace poral des UPH a été caractérisé selon différentes méthodes, afin de pouvoir corroborer les mesures porosimétriques qui ne se trouvaient pas toujours en accord avec l'analyse morpho-structurale et les mesures pénétrométriques.

Figure 1 - Différenciation morpho-structurale des profils représentatifs des quatre situations considérées, avec description des types et de la netteté de la structure.

Figure 1 - Morpho-structural differentiation of the representative profiles under the four situations studied showing structure type and degree of development.

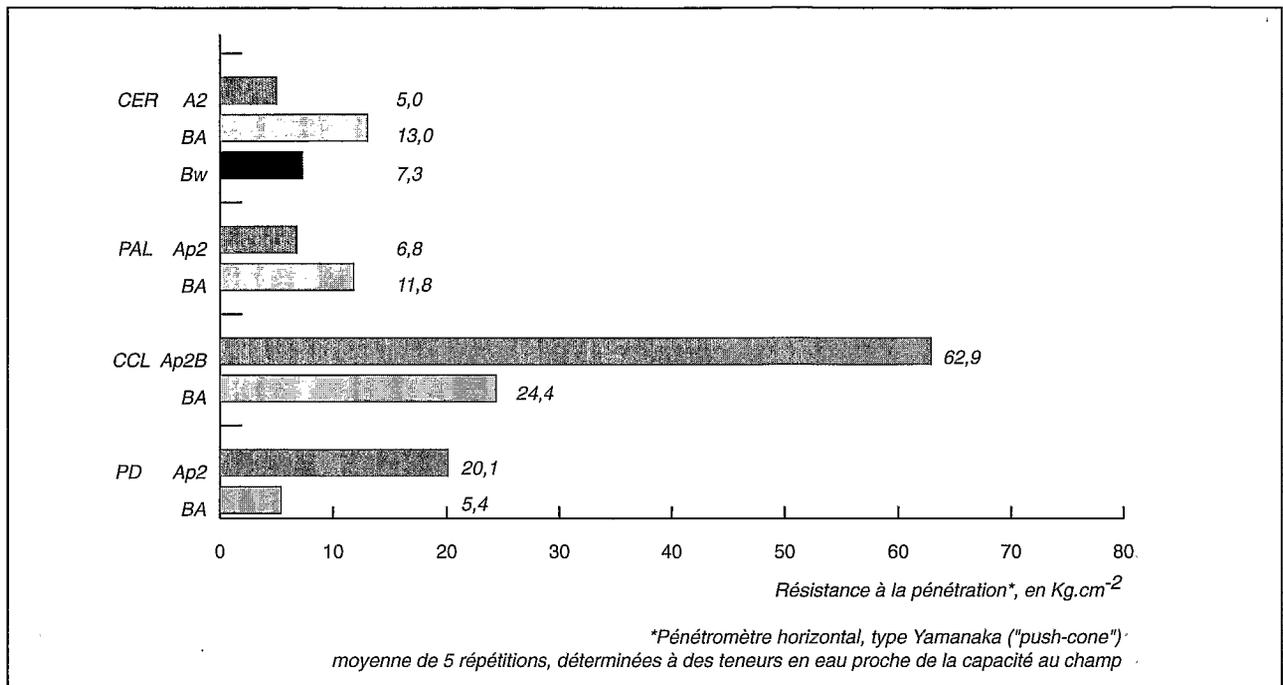


Densité apparente et répartition des classes porales d'après la courbe pF

On observe, pour CER, une augmentation de densité apparente de la profondeur vers la surface du sol (figure 3), en concordance avec les modifications observées pour la structure, granulaire en BA et Bw et sub-anguleuse et granulaire en A₂. Cette augmentation traduirait un effet de densification peut-être causé par l'action anthropique et par le piétinement des animaux sur le site, pendant la saison sèche, sans augmentation de cohésion. Les horizons du sol sous pâturage (PAL) sont plus denses, ce qui peut s'expliquer par la texture légèrement

plus sableuse sur cette parcelle, comme on l'observe généralement avec les sols ferrallitiques microagrégés (Humbel, 1976). Dans les situations cultivées CCL et PD, où il n'y a pas de différence de texture du sol avec CER, on constate une augmentation de la densité des horizons les plus affectés par le travail du sol (Ap₂B en CCL et Ap₂ en PD).

Il n'existe pas entre ces deux situations, en particulier entre Ap₂B/CCL et Ap₂/PD, de différence de densité apparente et de porosité, contrairement à ce à quoi on aurait pu s'attendre d'après l'observation de terrain et les résultats de pénétrométrie. Ce résultat original serait à relier aux caractéristiques de

Figure 2 - Résistance à la pénétration des horizons Ap_2 et BA sous différents systèmes de gestion.**Figure 2** - Mechanical resistance of Ap_2 and BA horizons under different management systems.

micro-agrégation des sols ferrallitiques qui permettent de maintenir, dans les horizons apparaissant compacts, une porosité totale supérieure à 49 % avec une microporosité représentant 20 à 30 % du volume du sol.

Les spectres poraux déduits des courbes pF, d'après les diamètres de pore équivalents aux valeurs de pF 4,18, 2,52 et 1,78 (figure 3), montrent que la microporosité (pores < 0,2 μm) est en général plus importante dans les horizons supérieurs (A_2/CER ; Ap_2/PAL ; Ap_2B/CCL et Ap_2/PD) qu'en profondeur (horizon BA). Cependant, la différence n'excède pas 5 % en volume du sol. La mésoporosité et la macroporosité fine (pores de 0,2-9 μm et 9-50 μm) représentent les classes de porosité les plus réduites (10 à 15 %) et ne varient que faiblement; on relève toutefois une tendance à l'augmentation de la surface vers la profondeur, en particulier pour les situations CCL et PD. La macroporosité grossière (pores > 50 μm), qui occupe 10 à 20 % du volume du sol (30 % en CER), montre les variations les plus importantes, avec une augmentation de 5 à 15 % en passant des horizons supérieurs aux horizons profonds; toutefois, cette augmentation est plus réduite en PAL (2,5 %).

S'agissant des différents systèmes de gestion, on note, pour les horizons de profondeurs équivalentes, que les volumes de porosité totale et de macroporosité sont supérieurs dans la situation témoin CER, par rapport aux situations PAL, CCL et PD; tandis que les résultats sont à l'inverse pour la densité apparente

et la microporosité. On constate aussi que la macroporosité est la plus réduite dans les horizons supérieurs de CCL et PD où les valeurs sont comparables, respectivement 14,4 et 14,1 %; ce qui ne s'accompagne, toutefois, d'aucunes marques de restriction d'aération et de ruissellement sur le terrain. En définitive, ces horizons présentent des spectres poraux peu différents alors que le développement racinaire se trouve, par contre, très réduit en Ap_2B/CCL et plus satisfaisant en Ap_2/PD .

Porosimétrie au mercure

La technique d'intrusion de mercure permet de caractériser la totalité de l'espace poral jusqu'à 400 μm à partir des courbes du spectre de porosité dérivé (figure 4). Une première apogée, existant pour tous les échantillons, avec un mode de diamètre équivalent de 0,022 μm , varie uniquement en intensité. Une deuxième apogée apparaît dans la gamme de diamètre entre 11 et 60 μm , avec une intensité très variable. En CER on trouve un spectre bimodal bien marqué pour les horizons de profondeur (BA et Bw), très caractéristiques des sols micro-agrégés ou finement agrégés, tandis que le deuxième mode est très atténué pour les horizons supérieurs. Cette distribution se retrouve aussi en CCL et PD. En PAL, par contre, on trouve une distribution avec un deuxième mode d'apogée basse pour les deux horizons (Ap_2 et BA).

Tableau 1 - Description complémentaire de la porosité, de l'enracinement, de la matière organique identifiable et de l'activité biologique dans les UPH les plus importantes des horizons identifiés pour les différents systèmes considérés.

Table 1 - Complementary description of porosity, root growth, identifiable organic matter and biological activity for the more important HPU in the identified horizons of considered management systems.

Situation de référence	CER	PAL	CCL	PD
	CERRADO ANTHROPISE	PÂTURAGE LONGUE DUREE	GESTION CONVENTIONNELLE	GESTION ALTERNATIVE
Couverture	Végétation Naturelle Anthropisée	<i>Brachiaria brizantha</i>	Haricot irrigué (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Haricot Irrigué (<i>Phaseolus vulgaris</i>)
Désignation et Epaisseur des Horizons Considérés	A_1 : 0 - 8 cm A_2 : 8 - 30 cm BA : 30 - 56 cm Bw : 56 - 100 cm	Ap_1 : 0 - 5 cm Ap_2 : 5 - 25 cm BA : 25 - 45 cm Bw : 45 - 100 cm	Ap_1 : 0 - 5 cm Ap_2 : 5 - 12 cm Ap_2B : 12 - 30 cm BA : 30 - 50 cm Bw : 50 - 100 cm	Ap_1 : 0 - 8 cm Ap_2 : 8 - 25 cm AB : 25 - 32 cm BA : 32 - 55 cm Bw : 55 - 100 cm
Porosité	très poreux; fins/moyens dans A_1 et A_2 ; fins dans BA et Bw (racines et act. biologique)	très poreux; pores fins/moyens dans Ap_2 (racines) et BA ; fins dans Bw	très poreux en Ap_1 et Ap_2 ; poreux dans Ap_2B (fins/moyens dus à l'act. biolog.); très poreux dans BA et Bw	très poreux; fins/moyens jusqu'à 32 cm (activ. biologique); fins en-dessous
Racines	nombreuses et horizontales jusqu'à 30 cm; communes, fines/moyennes et verticales en-dessous	très nombreuses, verticales/horizontales jusqu'à 25 cm; communes, fines et verticales en-dessous	nombreuses et horizontales jusqu'à 12 cm (concentrées sur la ligne de semis); peu, fines et verticales dans Ap_2B (fissures)	nombreuses et verticales jusqu'à 25 cm; communes, fines et verticales en-dessous (nodulation forte)
Matière Organique	abondante, détrit (racines) et humifiée jusqu'à 30 cm; commun, humifiée et localisée au-dessous	abondante, humifiée ou détrit (racines) jusqu'à 25 cm; humifiée et localisée au-dessous	abondante, détrit et humifiée jusqu'à 12 cm; très peu et humifiée au-dessous	abondante (détrit) en surface; abondante humifiée jusqu'à 32 cm
Activité Biologique	très forte jusqu'à 8 cm; forte jusqu'à 56 cm et moyenne en-dessous	très forte jusqu'à 25 cm; forte et localisée en-dessous	moyenne/forte jusqu'à 12 cm; faible en-dessous	très forte jusqu'à 70 cm
Observations:				
sur la compacité	horizons peu compacts	horizons peu compacts	forte compacité et forte cohésion dans Ap_2B (12 à 30 cm)	peu compact; cohésion modérée dans AB (25 à 32 cm)
sur l'enracinement	concentration dans A_1 et A_2	chevelue dans Ap_1	concentration sur la ligne de semis	nodulation forte
sur la variation latérale	sans variation latérale	sans variation latérale importante	variation latérale due à la ligne de semis	variation latérale due à la ligne de semis
générales	macro-structure très fragile dans le profil.	macro-structure dans BA et Bw très fragile	mottes tassées dans Ap_2B	

L'analyse de ces courbes, fait apparaître trois classes de taille de pores, délimitées par les valeurs de diamètre poral 0,1 et 6 μm , et qui coïncident avec la classification établie par Stengel (1990) et Bruand et Cousin (1995) :

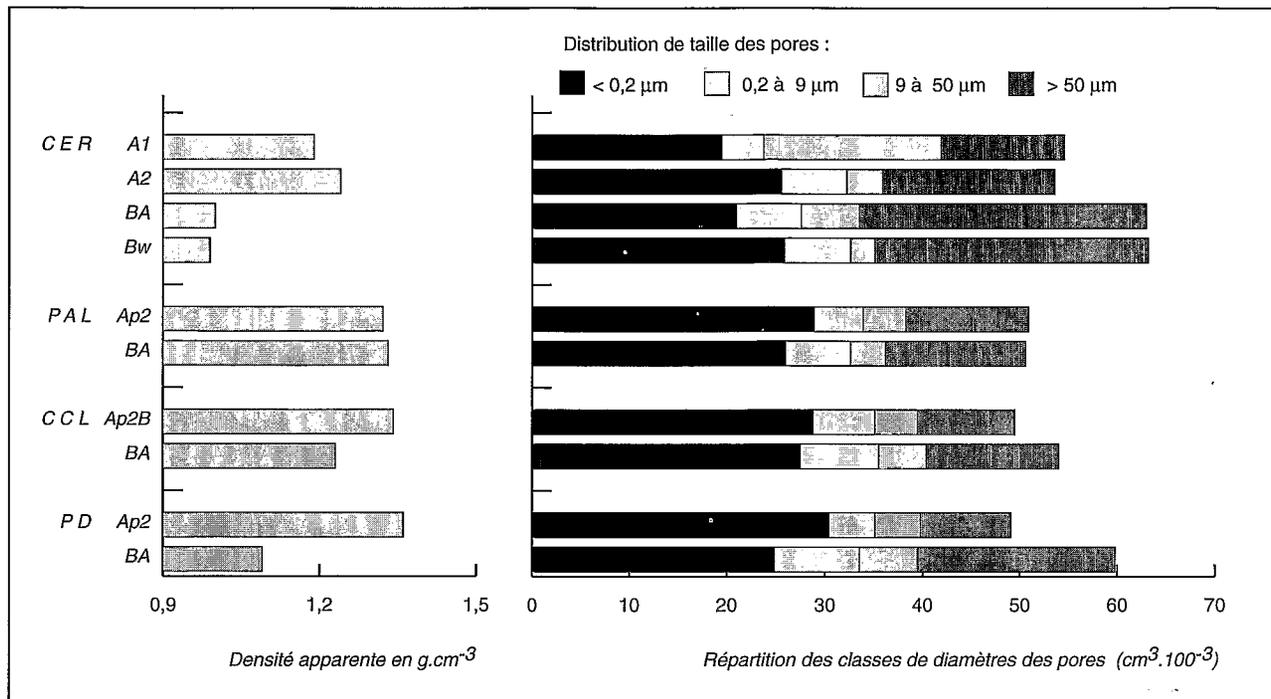
1 - microporosité ou porosité texturale : pores de diamètre inférieur à 0,1 μm , qui correspondent aux pores de la phase argileuse du sol dus à l'assemblage des constituants fins (argiles, oxydes et constituants organiques);

2 - mésoporosité ou porosité structurale argileuse : pores de

0,1 à 6 μm , dus à l'assemblage des éléments grossiers et des micro-agrégats;

3 - macroporosité fine ou porosité structurale lacunaire : pores de 6 à 400 μm , qui comprennent les pores dus à l'assemblage des macro-agrégats et à l'occurrence des cavités, fissures et canaux de l'activité biologique, responsables du drainage et de l'aération.

En considérant la répartition de ces trois classes de taille de pores, on constate (figure 4) la prédominance des micro

Figure 3 - Densité apparente et répartition des classes porales d'après la courbe pF.**Figure 3** - Soil bulk density and pore size distribution based on the pF curve.

(< 0,1 μm) et des macropores (> 6 μm). La microporosité est du même ordre de grandeur dans tous les horizons où elle occupe un volume important (15 à 20 %); on observe, toutefois, une diminution des valeurs entre la surface (A/Ap/Ap₂B) et la profondeur (BA/Bw), en relation avec la densité apparente (figure 3) et l'état d'agrégation (mode d'assemblage des particules en agrégats). La mésoporosité est la plus faible; elle est comparable dans toutes les situations et se réduit aussi avec la profondeur. La macroporosité est la plus variable en fonction de la profondeur, très importante dans les horizons de profondeur et réduite dans les horizons supérieurs. Cette réduction de macroporosité dans les horizons supérieurs peut traduire l'effet de contraintes, liées au système de gestion du sol, sur l'assemblage des éléments structuraux de base.

Sans être identiques, les résultats obtenus par porosimétrie à mercure aboutissent à des conclusions en bonne concordance avec celles ressortant de l'utilisation des courbes pF. On remarquera, en particulier, la faible différence dans la répartition des classes porales apparaissant entre Ap₂B/CCL et Ap₂/PD, comme cela a été souligné précédemment. La macroporosité est d'environ 30 % supérieure en PD par rapport à CCL (horizon Ap₂) et de 15 % supérieure en PD par rapport à CCL dans l'horizon BA.

Courbe de retrait du sol

Les courbes de retrait du sol sont présentées à la figure 5, à partir de la variation des volumes massiques basée sur

les valeurs mesurées au point de retrait maximum (tableau 2). On observe une bonne correspondance entre les caractéristiques des courbes de retrait et les caractères morphologiques décrits à la figure 1 pour les différents horizons considérés.

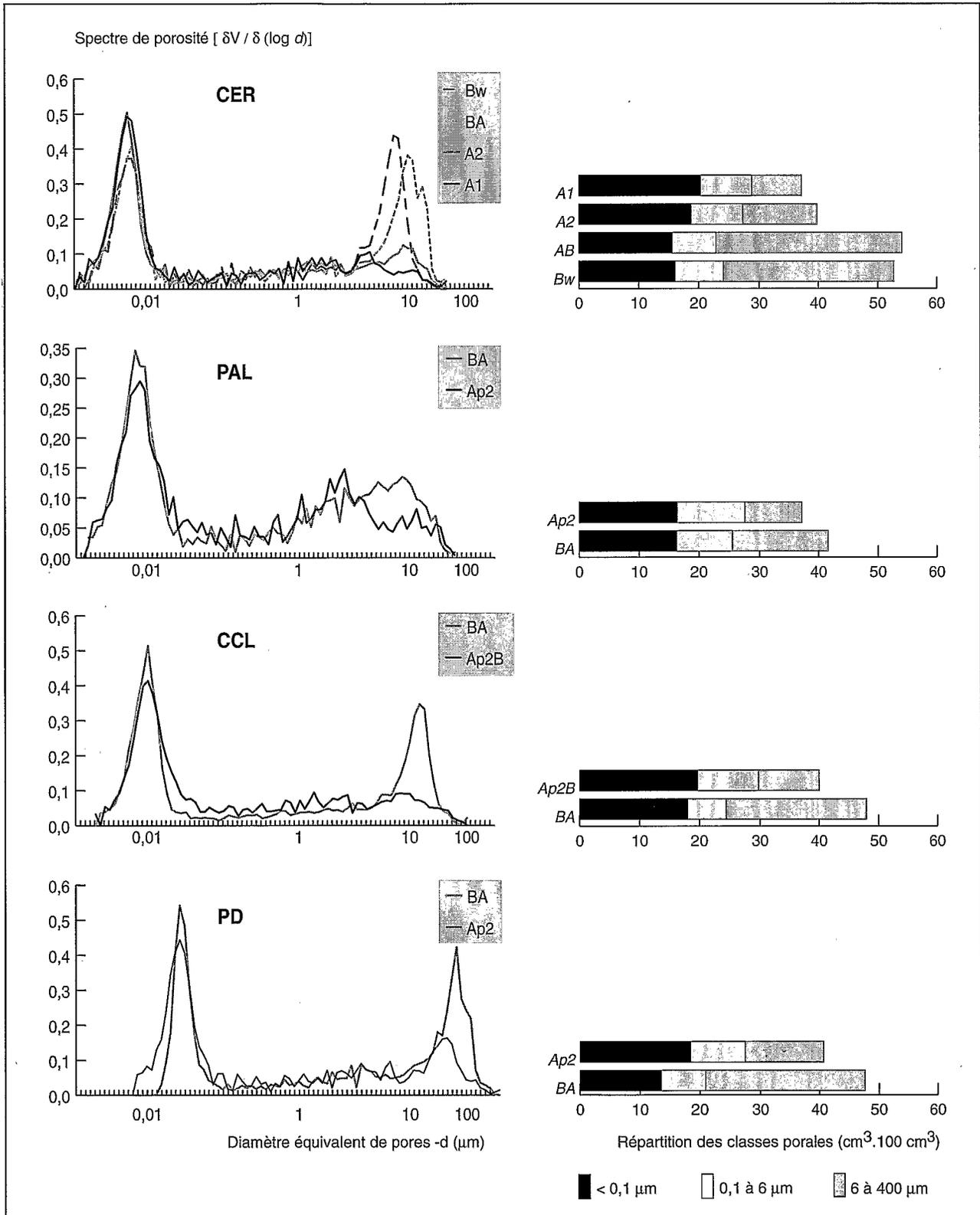
Les principales caractéristiques du sol déduites des courbes de retrait (tableau 2) permettent de dégager les observations suivantes :

- la constante de retrait structural (K_0), fonction de la stabilité de la structure en cours de vidange de la macroporosité et indicatrice de la cohésion d'assemblage des éléments structuraux, présente des valeurs très faibles en CER; ce qui est en accord avec la fragilité macro-structurale observée (description morpho-structurale); en Ap₂B/CCL, par contre, K_0 est très élevée, en relation avec la cohésion et la résistance à la pénétration élevées du sol;

- la constante de retrait principal (K_r), qui indique le mode d'assemblage et la cohésion interne des éléments structuraux, présente des valeurs faibles en CER (0,17 à 0,27) et plus importantes en CCL (0,41 à 0,46);

- le retrait global (dV/V %) est un indicateur de retrait du volume microporal et macroporal, d'une part, et d'accroissement du volume macroporal par fissuration, d'autre part. Les valeurs du retrait global des horizons supérieurs de CER et PD (2,3 et 2,8 % respectivement) sont sensiblement plus élevées

Figure 4 - Caractérisation de l'espace poral (spectre de porosité et répartition des classes porales) obtenue par intrusion de mercure
Figure 4 - Pore-space characterization (porosity spectrum and pore size distribution) obtained by mercury intrusion.



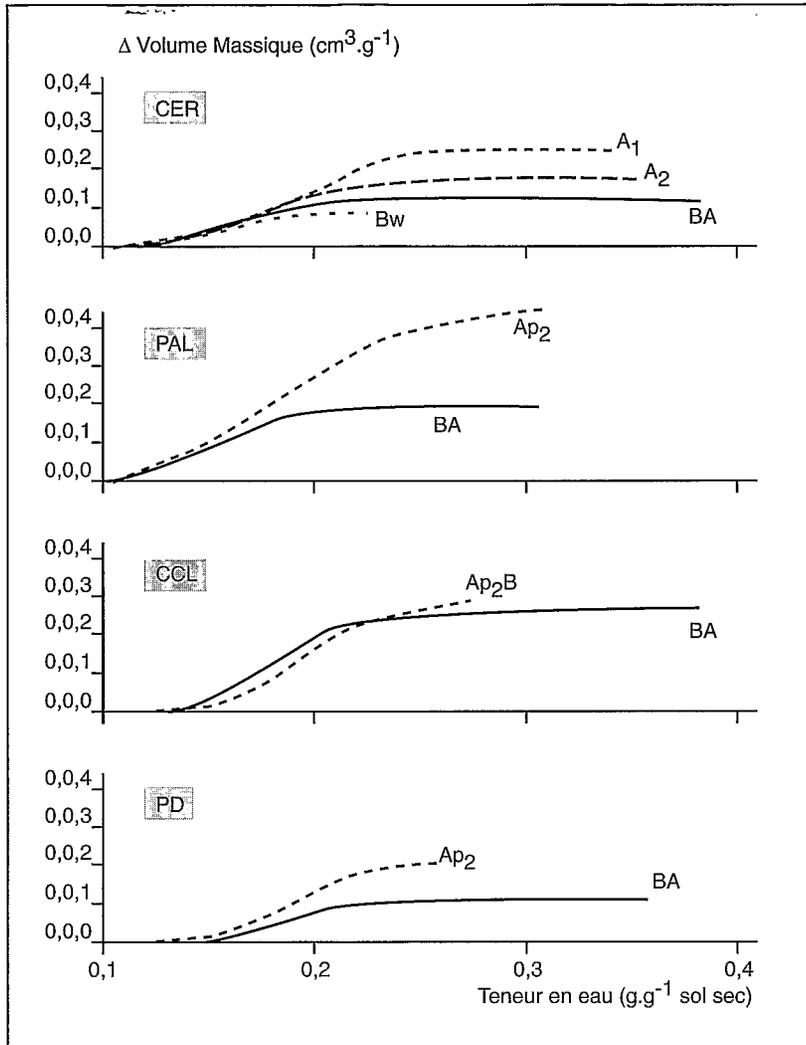


Figure 5 - Variation des volumes massiques, basée sur le point de retrait maximum (point SL)

Figure 5 - Bulk volume variation based on the maximum shrinkage point (SL)

Tableau 2 - Caractéristiques du sol (Volume massique, constantes de Retrait structural (Ko) et principal (Kr), Retrait global (dV/V %), Porosité et Capacité de Gonflement/Retrait d'après la courbe de Retrait

Table 2 - Main soil characteristics (Bulk volume, structural (Ko) and main (Kr) Shrinkage constants, global net Shrinkage (dV/V %), porosity and Shrinkage-Swelling potential) based on the Shrinkage curve

Système /Horizon	Vol. massique au point SL cm ³ .g ⁻¹	Caractéristiques principales			Porosité à MS ¹			Porosité à SL ²			Cap. gonflement/ retrait cm ⁻³ .g ⁻¹ argile	
		Ko	Kr	δ V/V %	Totale	Macro	Micro	Totale	Macro	Micro		
CER	A1	0,829	0,000	0,271	3,750	55,7	27,2	28,5	54,3	36,1	18,2	0,185
	A2	0,819	0,002	0,252	2,290	55,1	29,8	25,2	54,1	36,5	17,6	0,136
	BA	0,954	0,003	0,237	1,300	61,7	41,8	19,9	61,2	46,4	14,8	0,100
	Bw	0,936	0,003	0,166	0,980	60,7	40,5	20,2	60,3	45,7	14,7	0,104
PAL	Ap 2	0,724	0,023	0,331	5,950	50,9	19,3	31,6	48,1	30,7	17,5	0,268
	BA	0,720	0,007	0,242	2,960	49,8	23,2	26,6	48,5	31,4	17,1	0,166
CCL	Ap2 B	0,774	0,045	0,411	4,150	53,4	26,1	27,3	51,6	32,1	19,5	0,120
	BA	0,815	0,006	0,456	3,310	55,6	32,0	23,6	54,2	36,5	17,7	0,089
PD	Ap 2	0,771	0,011	0,310	2,770	53,1	25,8	27,3	51,8	32,3	19,5	0,117
	BA	0,917	0,014	0,242	1,120	60,2	38,5	21,7	59,8	42,3	17,5	0,070

¹ Point MS : Début du retrait micro

² Point SL : Limite de retrait

que dans les horizons de profondeur de ces mêmes sols. Ces valeurs sont nettement plus élevées dans les horizons supérieurs de CCL et PAL où elles atteignent respectivement 4,2 et 6 %.

Les caractéristiques de retrait du sol mettent donc en évidence, d'après les valeurs de K_r et K_o , une cohésion d'assemblage et une cohésion interne des éléments structuraux très élevées en Ap_2B/CCL et élevées en Ap_2/PAL , une cohésion interne élevée et une cohésion d'assemblage faible en Ap_2/PD .

Le volume microporal, déduit des courbes de retrait et défini comme la porosité du milieu déformable (particules fines, inférieures à 20 μm , et composants organiques), se réduit avec le dessèchement et montre une faible tendance à la diminution en profondeur (tableau 2). A l'inverse, le volume macroporal, défini comme la porosité d'assemblage ou inter-agrégats, augmente de façon importante avec la rétraction, probablement à cause de la fissuration du sol lors du dessèchement. Les variations les plus importantes concernent les horizons supérieurs, probablement en relation avec la cohésion interne des éléments structuraux.

Les valeurs de macroporosité et microporosité obtenues conduisent aussi à des conclusions recoupant celles que l'on peut tirer de la porosimétrie à mercure et des courbes pF, au sujet des modifications de l'espace poral. Les différences de cohésion d'assemblage et de cohésion interne des éléments structuraux que font apparaître ces constantes, s'accordent tout à fait avec les formes structurales plus anguleuses, la compacité et la résistance à la pénétration plus élevées qui caractérisent Ap_2B/CCL par rapport à Ap_2/PD .

La capacité de gonflement-retrait de la phase argileuse (Bruand *et al.*, 1990; Braudeau et Bruand, 1995) est très faible, voisine de 0,1 cm^3/g d'argile (tableau 2); toutefois, les horizons de la situation PAL ont des valeurs plus importantes (0,27 et 0,17), qui pourraient être reliées aux densités plus élevées, et à une quantité relativement moindre d'oxydes de fer observés dans cette situation.

CONCLUSIONS

L'influence des modalités de gestion du sol se manifeste à différents niveaux de perception, par des modifications structurales que nous avons pu mettre en évidence par une stratification des observations et des déterminations réalisées en fonction de l'état d'organisation du sol, dans le cadre de l'analyse morpho-structurale. La prise en compte des aspects morpho-structuraux nous paraît indispensable pour comprendre et pronostiquer le comportement du sol évoluant sous différents systèmes de gestion et de conditions climatiques.

D'une façon générale, la mise en culture se traduit par une différenciation structurale mieux définie du sol, du fait d'une

netteté plus grande des éléments structuraux grossiers et aussi d'une cohésion d'ensemble plus forte que dans le sol sous végétation de cerrado (CER). Sous pâturage artificiel (PAL), la couverture de graminées est associée à une amélioration relative de la structure limitée aux horizons supérieurs Ap_1 et Ap_2 , jusqu'à 25 cm. La culture avec labour conventionnel (CCL) a des conséquences plutôt défavorables sur l'état structural du sol où Ap_2B/CCL avec sa compacité forte s'oppose à la croissance des racines au-dessous de 12 cm. Ce type de contrainte n'existe pas dans le sol soumis au semis direct (PD). La cohésion d'ensemble reste modérée au niveau de Ap_2/PD qui se trouve bien exploité par les racines, et les traces d'activité biologique sont visibles dans l'ensemble du profil. Ces caractères plus favorables du sol se trouvent bien en concordance avec la supériorité des rendements culturaux obtenus en PD par rapport à CCL.

Les différentes données obtenues se recoupent généralement bien; les résultats acquis au laboratoire vérifiant et précisant les caractérisations réalisées sur le terrain à propos des caractères de transformation du sol. Il convient toutefois de s'interroger sur les difficultés d'évaluation du comportement du sol et sur les caractères qui définissent le mieux la qualité optimale de la structure du sol. Il faut aussi mieux analyser les relations existant entre les résultats des différentes déterminations possibles afin de préciser les caractérisations les plus pertinentes et les plus aisément praticables dans ce type d'approche.

Les résultats de l'analyse de l'espace poral montrent, par exemple, l'intérêt de réaliser des études comparatives plus approfondies des différentes méthodes de caractérisation du spectre poral et de l'organisation du sol en relation avec son fonctionnement, notamment avec le fonctionnement hydrique et le développement racinaire. Nous avons constaté que la caractérisation de l'espace poral ne permet pas d'établir de distinction entre les deux horizons Ap_2B/CCL et Ap_2/PD , qui montrent pourtant, par ailleurs, des caractères bien différents; et cela quelle que soit la méthode d'évaluation des classes porales considérée parmi les trois ayant été utilisées (courbe pF, porosimétrie à mercure, rétractométrie). Ce constat de similitude du spectre poral ressortant des trois méthodes appliquées sur des prélèvements de monolithes différents ne peut guère être attribué à l'effet fortuit d'un échantillonnage restreint. Il conviendrait d'approfondir cette étude de l'état poral, en particulier en s'appuyant sur l'analyse micro-morphologique, pour préciser la configuration de l'espace poral et mieux comprendre pourquoi les mesures porosimétriques ne s'accordent pas avec les paramètres morpho-structuraux, pénétrométriques et rétractométriques qui sont différents pour les deux horizons considérés.

Il s'avère, en conclusion, que l'analyse morpho-structurale peut être un outil de diagnostic très utile pour appréhender l'impact des systèmes de gestion et identifier les processus de

dégradation structurale du sol. Elle constitue un moyen approprié et indispensable à l'étude des indicateurs de durabilité des systèmes agro-sylvo-pastoraux, en particulier dans les régions de mise en valeur agricole récente.

Cette approche ouvre des possibilités pour mieux évaluer et comparer les systèmes de gestion du sol, en réalisant directement les recherches chez les agriculteurs. Et même lorsqu'il s'agit d'études en station expérimentale, l'analyse morpho-structurale peut beaucoup enrichir l'analyse et l'interprétation des résultats des essais expérimentaux, si elle peut être appliquée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'EMBRAPA et l'ORSTOM pour la possibilité de réalisation d'un stage de post-doctorat à P. FREITAS.

Les auteurs remercient aussi pour leur collaboration les chercheurs et techniciens qui ont participé aux déterminations analytiques : Hélio Afonso de Menezes (EMGOPA, Senador Canedo, GO); Dalmiron Pereira de Oliveira (Boursier, Etudiant Ing. Agronome, UFG/EA, Goiânia, GO), au Brésil. J. Fardoux; E. Gavinelli; M.C. Larré-Larrouy et J-C. Marcourel (LCSC/ORSTOM, Montpellier); M. Fortier (Lab. Physique du Sol/CIRAD, Montpellier); G. Bellier et J. L. Delarivière (LFS / Hydrophysique / ORSTOM, Bondy), France.

BIBLIOGRAPHIE

- Blancaneaux Ph., Freitas P.L. de, Amabile R.F. 1991 - Sistematização e adaptação da metodologia para caracterização do perfil cultural. In : Reunião de Trabalho para Correlação dos Estudos em Perfil Cultural. Londrina, UEL/CCA.
- Blancaneaux Ph., Freitas P.L. de, Amabile R.F., Carvalho A.M. de. 1993 - Le semis direct comme pratique de conservation des sols des Cerrados du Brésil central. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol. XXVIII, n. 2 : 253-275.
- Blancaneaux Ph., Freitas P.L. de, Carvalho A. M. de; Correia, J.R. 1994 - Approche méthodologique utilisée pour les recherches agropédologiques dans les Cerrados du Brésil Central et premiers résultats. In : Structure et Fertilité des Sols Tropicaux. Montpellier, ORSTOM, C.R. 1^{ère} Réunion du Groupe Thématique, 1993. pp. 19-26.
- Blancaneaux Ph., Freitas P.L. de. 1995 - Utilisation de l'analyse morpho-structurale dans les recherches agropédologiques développées dans les Cerrados du Brésil Central. Un exemple d'application : Le semis direct sur la paille comme système cultural alternatif viable. In : Structure et Fertilité des Sols Tropicaux. Montpellier, ORSTOM, C.R. 2^{ème} Réunion du Groupe Thématique, 1994. pp. 49-56.
- Braudeau E., 1993 - Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. Sci. du Sol, 25 (2) : 85-93.
- Braudeau E., Bruand A., 1993 - Détermination de la courbe de retrait pour la phase argileuse à partir de la courbe de retrait établie sur échantillon de sol non remanié. Application à une séquence de sols de Côte-d'Ivoire. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 316, série II : 685-92.
- Bruand A., Braudeau E., Fritsch E. 1990 - Évolution de la géométrie de l'espace poral des sols lors du passage du domaine ferrallitique au domaine ferrugineux et hydromorphe. Exemple du Bassin de Booro-Borotou (Côte-d'Ivoire). In : Structure et fonctionnement hypodéologique d'un petit bassin versant de savane humide. Coll. Études et Thèses. ORSTOM, Paris, pp. 137-145.
- Bruand A., Cousin I., 1995 - Variation of textural porosity of a clay-loam soil during compaction. European Jo. of Soil Science, vol. 46 : 377-385.
- De Blic Ph., 1994 - L'organisation macrostructurale du sol : intérêt et limites d'une approche morphologique, méthodes d'étude. In : Structure et Fertilité des Sols Tropicaux. Montpellier, ORSTOM, C.R. 1^{ère} Réunion du Groupe Thématique, 1993. pp. 5-18.
- Freitas P.L. de, 1994 - Aspectos físicos e biológicos do solo. In : Landers, J.N. (ed.), Fasciculos sobre experiências em plantio direto nos Cerrados. Uberlândia, A. P. D. C., Cap. IX.
- Freitas P.L. de, Blancaneaux Ph., 1991 - Condição estrutural do solo para plantio direto (resumo de palestra). Informativo AEAGO, Goiânia, 1(1), pág. 04.
- Freitas P.L. de, Blancaneaux Ph., 1994 - Estrutura e Porosidade do Solo. In : Puignau, J. (ed.). Metodologias para investigação en manejo de suelos. Montevideo, IICA - PROCISUR, (Diálogo/IICA-PROCISUR, 39). pp. 25 - 42.
- Freitas P.L. de, Blancaneaux Ph., Moreau R. 1996a - A análise morfo-estrutural como uma ferramenta para a avaliação da sustentabilidade de sistemas agrossilvipastoris nos Cerrados. In : VIII Simpósio Sobre o Cerrado, Brasília, DF, Brasil.
- Freitas P.L. de, Blancaneaux Ph., Moreau M. 1996b - Caractérisation des sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) dans le cadre de l'analyse morpho-structurale. In : Structure et Fertilité des Sols Tropicaux. Montpellier, ORSTOM, C.R. 3^{ème} Réunion du Groupe Thématique, 1995. pp. 6-23.
- Gautronneau Y., Manichon H., 1987 - Guide méthodologique du profil cultural. Paris, Gera et Ceref. 71 p.
- Goedert W.J., Lobato E., 1986 - Agro-economic considerations of modern agriculture on Oxisols. s.n.t. In : International Soil Classification Workshop, VIII. Brasília, DF.
- Henin, S. *et al.*, 1969 - Le profil cultural. Paris, Masson ed., (2^{ème} édition).
- Humbel F.X., 1976 - L'espace poral des sols ferrallitiques au Cameroun. Caractéristiques et comportement en relation avec les régimes hydriques et les bioclimats. Trav. et Doc. ORSTOM Paris. n° 54, 306 p.
- Moreau R., Nagumo F., 1995 - Le pénétromètre Yamanaka et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés. In : Structure et Fertilité des Sols Tropicaux. Montpellier, ORSTOM, C.R. 2^{ème} Réunion du Groupe Thématique, 1994. pp. 85-91.
- Stengel P., 1990 - Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In : Boiffin J., Marin-Lafleche A. (eds.). La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Laon, France, 1990. Ed. INRA, Paris, pp 15-36.
- Teixeira S.M., Freitas P.L. de, Landers J.N., Blancaneaux Ph., Milhomen A. 1995 - Les effets économiques et pédologiques du semis direct dans les savanes brésiliennes (« Cerrados »). Une technique agricole qui améliore la durabilité d'un système cultural. In : L'environnement Humain de L'érosion. Montpellier, ORSTOM/Réseau Érosion, 1995. Bull. 15, pp. 300-316.

