

# Mise en valeur des Ferralsols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques : une étude bibliographique

L.C. Balbino<sub>(1)(2)</sub>, M. Brossard<sub>(3)</sub>, J-C Leprun<sub>(4)</sub> et A. Bruand<sub>(5)</sub>

- (1) INRA, Unité de Science du Sol. Centre de Recherche d'Orléans, BP 20619, 45166 Olivet Cedex, France
- (2) EMBRAPA Arroz e Feijão, BP 179, 75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO, Brésil
- (3) IRD/EMBRAPA Cerrados, BP 7091, 71619-970 Brasília, DF, Brésil
- (4) IRD, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex, France
- (5) Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), Université d'Orléans, BP 6759, 45067 Orléans Cedex 2, France

## RÉSUMÉ

Le Cerrado recouvre 206 millions d'hectares et représente environ un quart du territoire Brésilien. Cette région correspond originellement à des écosystèmes de type savane tropicale. Le développement de l'agriculture n'y débute réellement qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, s'accélère au XX<sup>e</sup> siècle durant les années trente et atteint son maximum entre les années 60 et 80. Aujourd'hui, cette région, où les surfaces affectées à l'activité agricole n'augmentent plus que très lentement, voit sa structure foncière évoluer avec le développement des grandes exploitations et le potentiel agricole de ses sols de plus en plus fréquemment dégradé par des pratiques agricoles extractivistes.

Dans ce contexte, les Ferralsols qui couvrent environ la moitié de la surface du Cerrado constituent un modèle très sensible, leurs propriétés chimiques et physiques pouvant être rapidement affectées par les pratiques agricoles. S'il est bien établi que la fertilité chimique est rapidement affectée par la mise en culture, cela apparaît être nettement moins bien établi pour la fertilité physique. En effet, l'analyse détaillée de la littérature montre que si la gestion de la fertilité chimique des Ferralsols pour de nombreuses cultures repose aujourd'hui sur de nombreux travaux, la gestion de la fertilité physique est en revanche moins bien établie. Les études révèlent que la mise en culture s'accompagne d'une importante et rapide évolution de la porosité en surface qui se traduit fréquemment par une augmentation de la masse volumique alors que celle-ci est faible sous végétation naturelle, en particulier dans les Ferralsols argileux. On observe alors une diminution de la stabilité structurale, un accroissement de la proportion d'argile dispersable dans l'eau, une augmentation de la résistance à la pénétration et une plus faible conductivité hydraulique.

Enfin, si un certain nombre d'études ont bien montré comment évoluaient les propriétés physiques en fonction de l'usage des Ferralsols, il n'en reste pas moins que la qualité des résultats obtenus est encore très inégale et que les études sont très partielles. Il en résulte que ces résultats sont difficilement généralisables à l'ensemble des Ferralsols du Cerrado. Par conséquent, le rôle de l'évolution des propriétés physiques dans celle de l'évolution globale de la fertilité de Ferralsols lorsqu'ils sont mis en culture reste difficile à cerner.

## Mots clés

Pastoralisme, masse volumique, stabilité structurale, résistance à la pénétration, conductivité hydraulique, rétention en eau, ruissellement, érosion.

**SUMMARY****DEVELOPMENT OF AGRICULTURE ON FERRALSOLS IN THE CERRADO REGION (BRAZIL) AND CHANGE OF THEIR PHYSICAL PROPERTIES: a review**

The Cerrado region covers 206 millions hectares and corresponds to approximately one fourth of the Brazilian territory. This region was originally occupied by tropical savannahs. Agriculture started at the end of the 19th century, has developed more quickly since 1930 and reached its maximum between 1960 and 1980. Today, this region where land devoted to agriculture only increases slowly has estates that still increase in size but their soils degrade often because of extractivist production systems.

In that context, Ferralsols cover half of the Cerrado surface area and constitute high sensitive model, their chemical and physical properties being easily affected by agricultural practices. If it is well established that chemical fertility is quickly affected by clearing and then cultivation and that this results in a degradation of the soil fertility, possible evolution of the physical fertility is much less surrounded. Detailed analysis of the literature shows that if the decrease in the global fertility following clearing and cultivation is today well established under several soil usages, the role of the evolution of physical properties is on the opposite less clear. Works show that cultivation goes with a significant and quick evolution of the porosity topsoil that results in an increase in the bulk density when it is small under native vegetation, in particular in clayey Ferralsols. We record also a decrease in the structure stability, an increase in the clay fraction dispersible in water, an increase in the resistance to penetration and a smaller hydraulic conductivity.

Finally, if several studies showed clearly how physical properties evolved according to Ferralsols usage, the fact remains that the quality of the results obtained is still very unequal and studies often highly incomplete. It follows that results cannot be generalized to apply to the whole Ferralsols of the Cerrado region. Consequently, the role of the physical properties in the global evolution of Ferralsols fertility when they are cleared and cultivated remains difficult to surround.

**Key-words**

Pastoralism, bulk density, structure stability, resistance to penetration, hydraulic conductivity, water retention properties, runoff, erosion

**RESUMEN****DESARROLLO DE LA AGRICULTURA EN FERRALSOLS DE LA REGIÓN DEL CERRADO (BRASIL) Y EVOLUCIÓN DE SUS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS: una revisión**

La región del Cerrado representa aproximadamente un cuarto del territorio brasileño con 206 millones de hectáreas. Esta región era originalmente cubierta por ecosistemas de tipo sabana tropical. El desarrollo de la agricultura comienza realmente al final del siglo XIX, se aceleró en los años 30 del siglo XX y llegó a su apogeo entre los años 60 y 80. Hoy, en esta región, las superficies dedicadas a las actividades agrícolas aumentan lentamente. La estructura fundiaria evoluciona con el desarrollo de grandes latifundios y el potencial agrícola de los suelos disminuye con prácticas que muchas veces se consideran de extractivistas. En este contexto, los Ferralsols que ocupan aproximadamente la mitad de la superficie del Cerrado, son un modelo sensible, pues sus propiedades químicas y físicas pueden ser rápidamente alteradas por las prácticas agrícolas. Si queda establecido que la fertilidad química es rápidamente modificada por el cultivo, eso no es tan nítidamente mostrado en el caso de la fertilidad física. En efecto, el análisis detallado de la literatura muestra que la gestión de la fertilidad química de los Ferralsols para numerosos cultivos fué bien establecida. En cambio, la gestión de la fertilidad física es menos conocida. En la definición global de la fertilidad de un Ferralsol el límite entre ambas partes, química y física, es menos evidente. Los estudios revelan que el cultivo de estos suelos es acompañado rápidamente por una grande evolución de la porosidad de superficie. Esta se traduce frecuentemente por un aumento de la densidad aparente, siendo que esta es poco elevada bajo vegetaciones naturales, en particular en los suelos arcillosos. Se observa también una disminución de la estabilidad estructural, un aumento de la proporción de arcilla dispersable en agua, un aumento de la resistencia a la penetración y una disminución de la conductividad hidráulica.

Finalmente, si ciertos trabajos mostraron como evolucionan las propiedades físicas en función del uso de los Ferralsols, la calidad de los resultados obtenidos es todavía muy desigual y los estudios son parciales. En consecuencia, la generalización de los resultados es difícil para el conjunto de Ferralsols del Cerrado. Así, el papel de la evolución de las propiedades físicas dentro del conjunto global de evolución de la fertilidad de los Ferralsols, cuando cultivados, es todavía difícil de definir.

**Palabras claves**

Pastizales, densidad aparente, estabilidad estructural, resistencia a la penetración, conductividad hidráulica, propiedades de retención de agua, escorrimiento, eroción

**RESUMO****DESENVOLVIMENTO DA AGRICULTURA NOS LATOSSOLOS DA REGIÃO DO CERRADO (BRASIL) E EVOLUÇÃO DAS SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS: uma revisão**

A região do Cerrado constitui uma área de aproximadamente 206 milhões de hectares, representando cerca de 25 % do território brasileiro. Esta região corresponde originalmente aos ecossistemas do tipo savana tropical. O desenvolvimento da agricultura na região inicia-se no fim do século XIX, tomando vulto no século XX, na década de 30 e atinge seu apogeu entre as décadas de 60 e 80. Atualmente, a expansão de suas fronteiras agrícolas é cada vez mais escassa e sua estrutura fundiária concentra-se em grandes propriedades. O potencial produtivo dos solos, apresenta-se cada vez mais degradado devido à utilização de sistemas agrícolas extrativistas.

Dentro deste contexto, os Latossolos, que cobrem cerca de 50 % da superfície do Cerrado, constituem um modelo bastante sensível. Suas propriedades químicas e físicas podem ser rapidamente transformadas pela utilização de práticas agrícolas inadequadas. As alterações na fertilidade química, devido a utilização agrícola do solo, são conhecidas, o mesmo não ocorre no que se concerne à fertilidade física. Na realidade, uma análise detalhada da literatura mostra que a diminuição da fertilidade global após a utilização do solo é atualmente perceptível sobre a maioria dos agroecossistemas, mas a evolução das propriedades físicas é menos evidente. Os estudos revelaram que a utilização do solo é acompanhada de uma importante e rápida evolução da sua porosidade em superfície, que se traduz frequentemente por um aumento da densidade aparente, a qual sob vegetação natural apresenta valores baixos, particularmente nos Latossolos argilosos. Observa-se, também, diminuição da estabilidade estrutural, aumento do teor de argila dispersa em água, aumento da resistência à penetração e diminuição da condutividade hidráulica.

Finalmente, se muitos trabalhos mostraram como evoluem as propriedades físicas em função da utilização dos Latossolos, a qualidade dos resultados é entretanto desigual e os estudos parciais. Assim, estes resultados não podem ser generalizados para os outros tipos de Latossolos do Cerrado. Conseqüentemente, o papel da evolução das propriedades físicas dos Latossolos cultivados, na sua fertilidade global permanece uma incógnita.

**Palabras chaves**

Pastagem, densidade aparente, estabilidade estrutural, resistência à penetração, condutividade hidráulica, retenção de água, escoamento superficial, erosão

La région du Cerrado est située entre 2° et 23° Sud et 45° et 63° Ouest. Elle est essentiellement constituée d'écosystèmes de type savane tropicale associés à des formations végétales variées. Cette région correspond en grande partie au Plateau Central brésilien d'où partent les principaux axes de drainage du Brésil. Ce domaine est celui des grandes formations sédimentaires gréseuses, métasédimentaires et marno-calcaires. Le Cerrado recouvre environ 206 millions d'hectares, ce qui représente un peu plus de 24 % du territoire brésilien (figure 1), soit en surface le deuxième biome après l'Amazonie. Cela concerne 1 027 communes réparties dans 12 états (Pereira *et al.*, 1997).

Les plus anciennes traces d'occupation humaine dans le Cerrado sont datées de 11 000 à 12 000 ans BP (Barbosa *et al.*, 1993); elles correspondent à des populations amérindiennes ayant précédé celles rencontrées par les Portugais à partir du XVI<sup>e</sup> siècle (Melatti, 2001). A la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, la région est explorée par les Portugais à la recherche de richesses minérales, de bois et de populations amérindiennes destinées au marché d'esclaves. Les premières mines d'or sont découvertes en 1592. Le peuplement se développe alors dans le Cerrado lors de l'exploration des gisements d'or et de diamant au XVII<sup>e</sup> et début du XVIII<sup>e</sup> siècle. Ces occupations sont néanmoins discontinues dans le temps et l'espace. A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle,

au fur et à mesure que les mines s'épuisent, l'agriculture et l'élevage, jusque-là activités de subsistance, deviennent les principales activités économiques (Taunay, 1951; Abreu, 1975; Bertran, 1994).

Au XX<sup>e</sup> siècle, plus précisément à la fin des années 30, la politique gouvernementale d'intégration nationale ("marche vers l'Ouest") favorise une occupation lente mais régulière de la région qui culmine avec la construction de Brasília en 1960. Cet intérêt porté au Cerrado est à son maximum entre les années 60 et 80 avec le développement de grands projets gouvernementaux (Garcia, 1995; Rocha et Madeira Netto, 1998). Selon Waniez (1992), le Cerrado représentait dans les années 80-90 un "espace frontière" où les surfaces agricoles et pastorales ne cessaient d'augmenter. Selon les données du recensement agro-pastoral de 1985, près de 1,1 10<sup>6</sup> exploitations agricoles sont inventoriées pour une surface de 13,5 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, alors que les deux tiers de la superficie totale de la région sont déjà privatisés. La structure foncière évolue rapidement. Entre 1970 et 1985, la proportion des grandes exploitations (>1 000 ha) dans la superficie agricole de la région augmente de 72 %. C'est ce type d'exploitation qui a le plus augmenté alors que la surface globale ouverte à l'agriculture n'a varié que de 40 %. Les surfaces sont estimées à 49,5 10<sup>6</sup> ha de pâturages cultivés (Sano *et al.*, 1999), 13,4 10<sup>6</sup> ha de cultures annuelles (soja, maïs, haricot, riz,

coton pour ne citer que les plus représentées), 2 10<sup>6</sup> ha de cultures pérennes (canne à sucre, café et citrus) et 4,6 10<sup>6</sup> ha sont déclarées comme réserves (données Embrapa non publiées). Tout porte à croire que l'on s'approche désormais de la limite foncière potentiellement accessible, en particulier pour les terres cultivables.

La question aujourd'hui n'est pas d'obtenir de nouvelles surfaces, mais de maintenir, voire d'améliorer le potentiel des surfaces déjà cultivées en limitant les phénomènes de dégradation du milieu qui sont de plus en plus fréquemment observés (Embrapa Cerrados, 2000). Les Ferralsols (ISSS, 1998 ; Klamt et Van Reeuwijk, 2000), Latossolos de la classification brésilienne (Bennema *et al.*, 1959 ; Embrapa, 1999), sont les sols les plus communément cultivés compte tenu de leur situation topographique (Adámoli *et al.*, 1986) et de l'idée largement répandue selon laquelle ils ne présentent pas de contrainte physique mais en revanche un ensemble de contraintes chimiques qui peuvent être aisément levées par une fertilisation adaptée. Force est de constater aujourd'hui que la non prise en compte du comportement physique de ces sols, tant sous culture pluviale qu'irriguée, pose maintenant des problèmes de gestion des sols. L'objectif de cette contribution est de faire le point sur l'état des connaissances concernant la mise en culture des Ferralsols dans le Cerrado en s'intéressant plus particulièrement à leurs propriétés physiques et à leur évolution sous culture.

## CARACTÈRES GÉNÉRAUX DU CERRADO

### Une végétation naturelle composée de forêts et savanes

Le Cerrado représente l'un des sept grands biomes du Brésil (*figure 1*). Il est intéressant de remarquer que la distribution des phyto-physionomies du Cerrado, à l'échelle de la région, n'est pas induite par la pluviosité, comme c'est le cas dans les savanes africaines (Eiten, 1972 ; Eiten et Sambuchi, 1996). La végétation présente un gradient physiologique déterminé par trois facteurs édaphiques : la profondeur du substrat rocheux, le taux et la durée de la saturation en eau des horizons superficiels des sols (Furley et Ratter, 1988 ; Oliveira Filho *et al.*, 1989) et le taux de saturation en bases déterminé par la nature de la roche-mère (Furley et Ratter, 1988). Dans une synthèse récente, Ribeiro et Walter (1998) montrent que la végétation de cette région présente des physiologies qui comprennent des formations forestières, des savanes arborées et des savanes herbacées. Les formations forestières correspondent à des forêts galeries, des forêts sèches (forêts caducifoliées) et le Cerradão (forêt xéromorphe à strate arborée dominante où les cimes peuvent être jointives ou très légèrement disjointes, la taille des arbres ne dépassant pas, en général, 20 mètres et la strate herbacée étant quasi absente). Les formations de savanes comprennent le Cerrado *stricto sensu* (savane à strates arborée, arbustive et herbacée bien représentées, les arbres et arbustes possèdent des adaptations morphologiques à la sécheresse), les palmeraies sur sols drainés et les

« veredas » (palmeraies associées aux zones hydromorphes) ; les savanes herbacées comprennent le Campo sujo (littéralement « champ sale », où la couverture de la strate arborée ne dépasse jamais 6 %), le Campo rupestre (associations liées aux lithosols) et le Campo limpo (littéralement « champ propre », dans lequel la strate herbacée est dominante). Le Cerrado est caractérisé par une grande richesse floristique. En effet, on compte plus de 1 000 espèces d'arbres et d'arbustes et, dans les formations les plus denses, on peut trouver jusqu'à 150 espèces ligneuses différentes par hectare. Dans cette étude bibliographique, la région du Cerrado correspond au biome comprenant ces différentes phyto-physionomies.

### Un paysage de plateaux disséqués

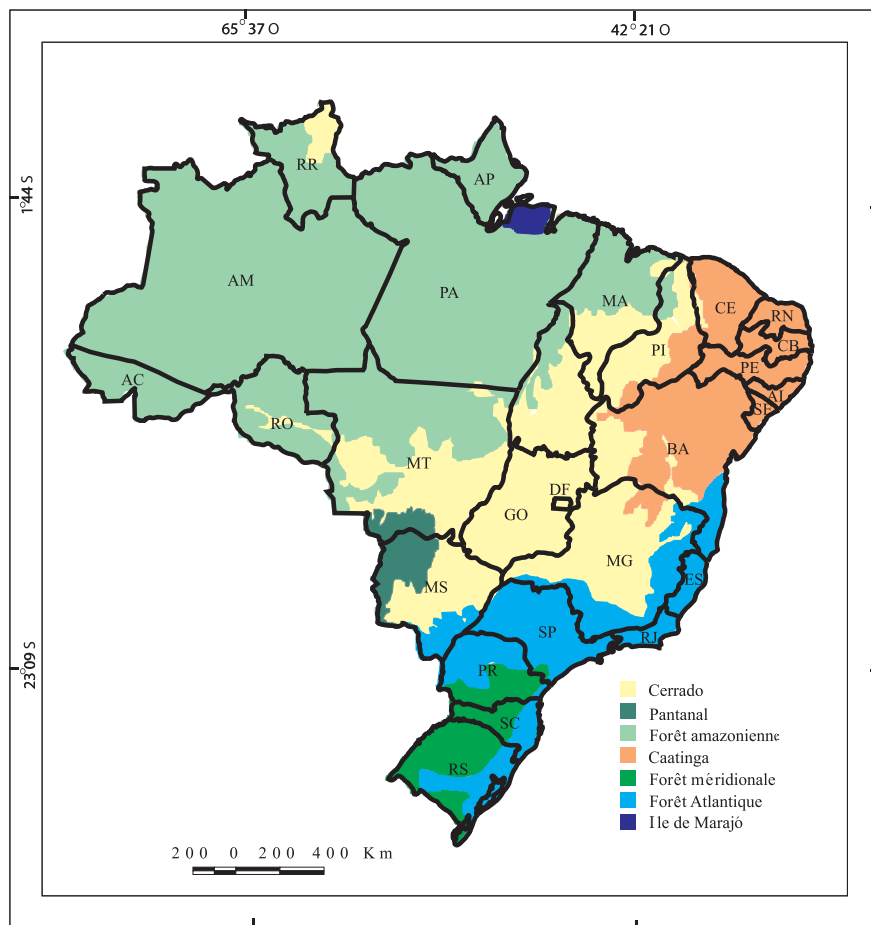
Le craton du socle brésilien date du début du Protérozoïque supérieur (Précambrien) et correspond à l'orogénèse brésilienne, qui s'est produite entre 700 et 550 millions d'années (Guimarães, 1964 ; Petri et Fulfaro, 1983 ; Almeida et Hasui 1984 ; Schobbenhaus *et al.*, 1984). On distingue des zones de craton anciennes, séparées par les chaînes brésiliennes, ensembles plissés et métamorphisés (Del'Arco et Bezerra, 1988). Dans la région, les formations du Précambrien moyen sont peu représentées. Par contre, la couverture du craton est essentiellement du Précambrien supérieur (formations Bambuí). Ce sont des unités lithologiques constituées d'un conglomérat surmonté d'une séquence de quartzites et de métasiltites (formation Paranoá) et des séquences pélitiques et carbonatées, auxquelles peuvent s'associer des siltites, argillites, quartzites, ardoises et arkoses (formation Paraopeba). Ainsi les formations géologiques à l'affleurement sont très anciennes et sédimentaires. De plus, elles ont souvent été affectées par des phénomènes de métamorphisme dans la majeure partie de la région. Au Paléozoïque se développent les bassins de l'Amazone, du Parnaíba (ou Maranhão) et du Paraná. Dès le Siluro-Dévonien, les processus de sédimentation se mettent en place. La région du Cerrado occupe la chaîne de Brasília, une partie des bassins du Parnaíba et du Paraná et la partie ouest du craton de São-Francisco. Les paysages de la région sont influencés par l'existence des trois principaux bassins versants brésiliens : (i) un axe sud-nord qui alimente l'Amazone, (ii) un axe nord-est/sud-ouest qui alimente le Paraná, (iii) et un axe sud puis nord qui alimente le São Francisco. Globalement, la région se présente comme une succession de paysages de plateaux faiblement disséqués et de zones fortement disséquées à la suite d'une phase de rajeunissement avec mise à nu des roches métasédimentaires et ignées.

### Un climat tropical à deux saisons contrastées

Trois critères essentiels permettent de définir le climat du Cerrado (*figure 2*) : des précipitations moyennes annuelles situées entre 1 200 et 1 800 mm (65 % de la superficie totale du Cerrado), la durée de la saison sèche qui varie entre trois et six mois et l'existence, pendant la saison humide, d'une courte saison sèche de 5 à 25 jours, veranico, dont la probabilité la plus élevée d'apparition se situe entre fin décembre et la première décennie de février (Assad *et al.*,

Figure 1 - Le Cerrado et les principaux biomes du Brésil.

Figure 1 - The Cerrado and the main biomes of Brazil.



1993). La température moyenne annuelle varie selon la localisation entre 22 et 26 °C. Pour environ 60 % de la surface du Cerrado, le climat est de type tropical à saison sèche.

### Des couvertures de sols très différenciés où dominent les Ferralsols

Les principaux types de sols du Cerrado sont des Ferralsols, des Acrisols/Luvisols et des Arenosols qui couvrent respectivement 48,8 %, 15,1 % et 15,2 % de la surface. Les Nitosols n'occupent que 1,7 % de la surface, les Cambisols 3 %, les Lithosols 7,3 %, les sols Hydromorphes à plinthis 6 % et les Gleysols 2 % (Macedo et Madeira Netto, 1981 ; Adamoli *et al.*, 1986) (figure 3).

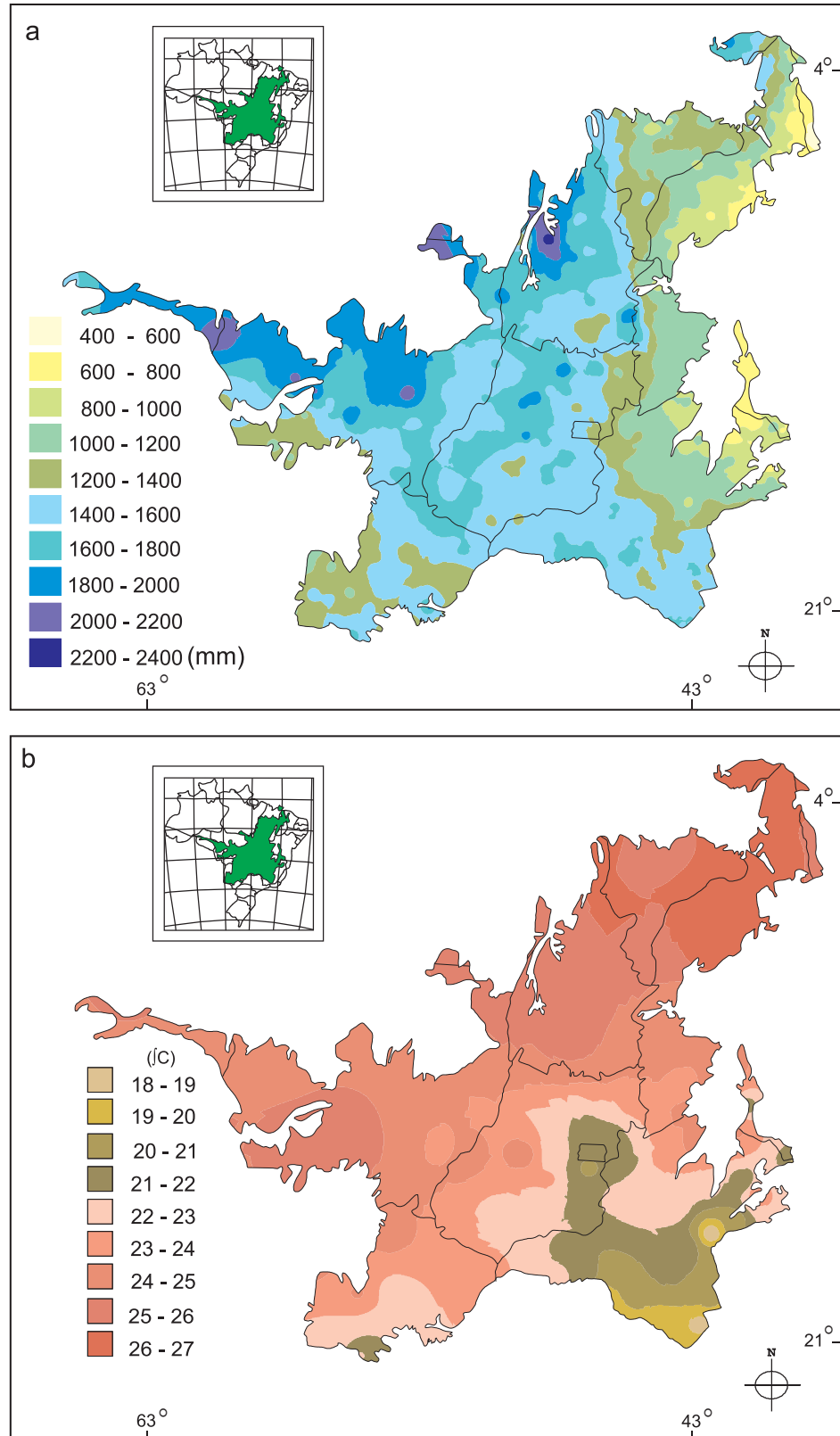
Morphologiquement, les Ferralsols se caractérisent par une

faible différenciation verticale des horizons, la présence d'un horizon fortement microagrégé et une profondeur importante. Selon la nature des roches, ces sols sont sablo-argileux ou argileux. La teneur en argile est en règle générale très peu variable dans le profil, mais en revanche varie largement entre les Ferralsols, de 6 à 83 % dans l'horizon B microagrégé. Les teneurs en limon varient de 1 à 23 % (Lopes, 1984). Si ces sols possèdent une structure microagrégée très stable, la macrostructure est en revanche peu exprimée et fragile. Les microagrégats qui sont de forme subarrondie et de 50 à 300 µm de diamètre résulteraient de l'activité des termites (Eschenbrenner, 1986 ; Oliveira *et al.*, 2000). Dans certains Ferralsols, une macrostructure polyédrique subanguleuse à grumeleuse, peu nette, est cependant observée. Très généralement les masses volumiques sont comprises entre 0,8 et 1,2 g cm<sup>-3</sup>.



**Figure 2** - Précipitations (a) et températures (b) moyennes annuelles du Cerrado.

**Figure 2** -- Mean annual precipitation (a) and temperature (b) in the Cerrado.



L'importance relative des différents constituants minéraux est litho-dépendante (Volkoff, 1985) et fonction de la position topographique (Curi et Franzmeier, 1984). L'association quartz, kaolinite, gibbsite, hématite, goëthite est des plus courantes (Goedert, 1967 et 1973; Motchi, 1977; Rodrigues, 1977; Macedo et Bryant, 1987; Ferreira *et al.*, 1999). Melo *et al.* (2001) ont montré que la fraction argile des sols développés sur des grès et basaltes est effectivement kaolinique et l'hématite domine parmi les oxy-hydroxydes (16–20 %). En revanche, sur d'autres basaltes et des sédiments argileux, des teneurs élevées en gibbsite (15 à 40 % en masse de la fraction argile) ont été enregistrées (Curi et Franzmeier, 1984; Fontes et Weed, 1991). Dans des Ferralsols sur métasédiments, la fraction < 200  $\mu\text{m}$  peut présenter des teneurs en gibbsite comprises entre 50 et 68 % (Chapuis-Lardy, 1997). Mesquita Filho et Torrent (1993) ont montré dans une séquence de sols développés sur grès, que la teneur en gibbsite augmentait de l'amont à l'aval et atteignait 56 % de la fraction argile au point le plus bas du versant. Enfin, le taux de substitutions isomorphiques par l'aluminium est de 15 à 36 % en nombre d'atomes pour la goëthite et de 4 et 17 % pour l'hématite (Kämpf *et al.*, 1988). Les sables et limons sont essentiellement du quartz dans les sols développés sur grès et quartzites, du quartz, des micas et des traces de kaolinite pour les sols dérivés de gneiss, et du quartz, de l'ilmenite et des minéraux ferrimagnétiques gibbsite-goëthite-hématite pour les sols dérivés de roches ultra-mafiques (Fontes *et al.*, 2000; Melo *et al.*, 2001).

Les propriétés physico-chimiques des Ferralsols sont étroitement dépendantes des charges de surface de la phase solide. Celles-ci sont peu nombreuses et correspondent aux charges électriques permanentes négatives de la phase argileuse et aux charges électriques variables de la phase argileuse, des constituants organiques et des oxy-hydroxydes métalliques. Plus de 95 % des Ferralsols du Cerrado sont désaturés et acides, avec de faibles valeurs de capacité d'échange cationique : 7,5  $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$  en moyenne dans les horizons A et seulement 3,0  $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$  dans les horizons B. Le pH est généralement compris entre 4,0 et 5,5. La plupart des Ferralsols présentent des taux de saturation en bases inférieurs à 50 % avec une large proportion d'aluminium échangeable (Macedo et Madeira Netto, 1981). Enfin, du point de vue de la croissance racinaire des plantes cultivées, les Ferralsols les plus désaturés présentent fréquemment une barrière chimique liée à l'aluminium échangeable et au manque de calcium à partir de 50 cm de profondeur (Lopes, 1984; Goedert, 1987).

## DÉVELOPPEMENT DE L'AGRO-PASTORALISME

Le type de distribution des précipitations au cours de l'année et les contraintes chimiques naturelles des sols limitent la production fourragère naturelle, aussi bien en terme de qualité que de quantité. À partir des années soixante-dix, la surface des pâturages cultivés dans le Cerrado passe de 10  $10^6$  ha à plus 45  $10^6$  ha (Macedo,

1995). Elle serait aujourd'hui voisine de 49,5  $10^6$  ha (Sano *et al.*, 1999). Le remplacement de la végétation naturelle par des pâturages cultivés a représenté une alternative pour augmenter la production de viande de la région avec l'introduction d'espèces végétales fourragères d'origine africaine à forte capacité d'adaptation aux sols et au climat. On peut citer essentiellement les différentes espèces des genres *Brachiaria* (près de 80 % des pâturages cultivés dans le Centre-Ouest), *Panicum* et *Andropogon* (Savidan *et al.*, 1985). Par comparaison avec la charge animale existant sur les pâturages naturels, cela a permis de multiplier par un facteur 5 à 10 (Zimmer et Correa, 1993). Les pâturages natifs sont aujourd'hui limités à des aires protégées. Une loi a d'ailleurs été adoptée, stipulant que chaque nouvelle exploitation devait conserver au moins 20 % de sa superficie en végétation naturelle ("Reserva Legal"- code Forestier selon la Loi n° 4771 du 07/09/1965).

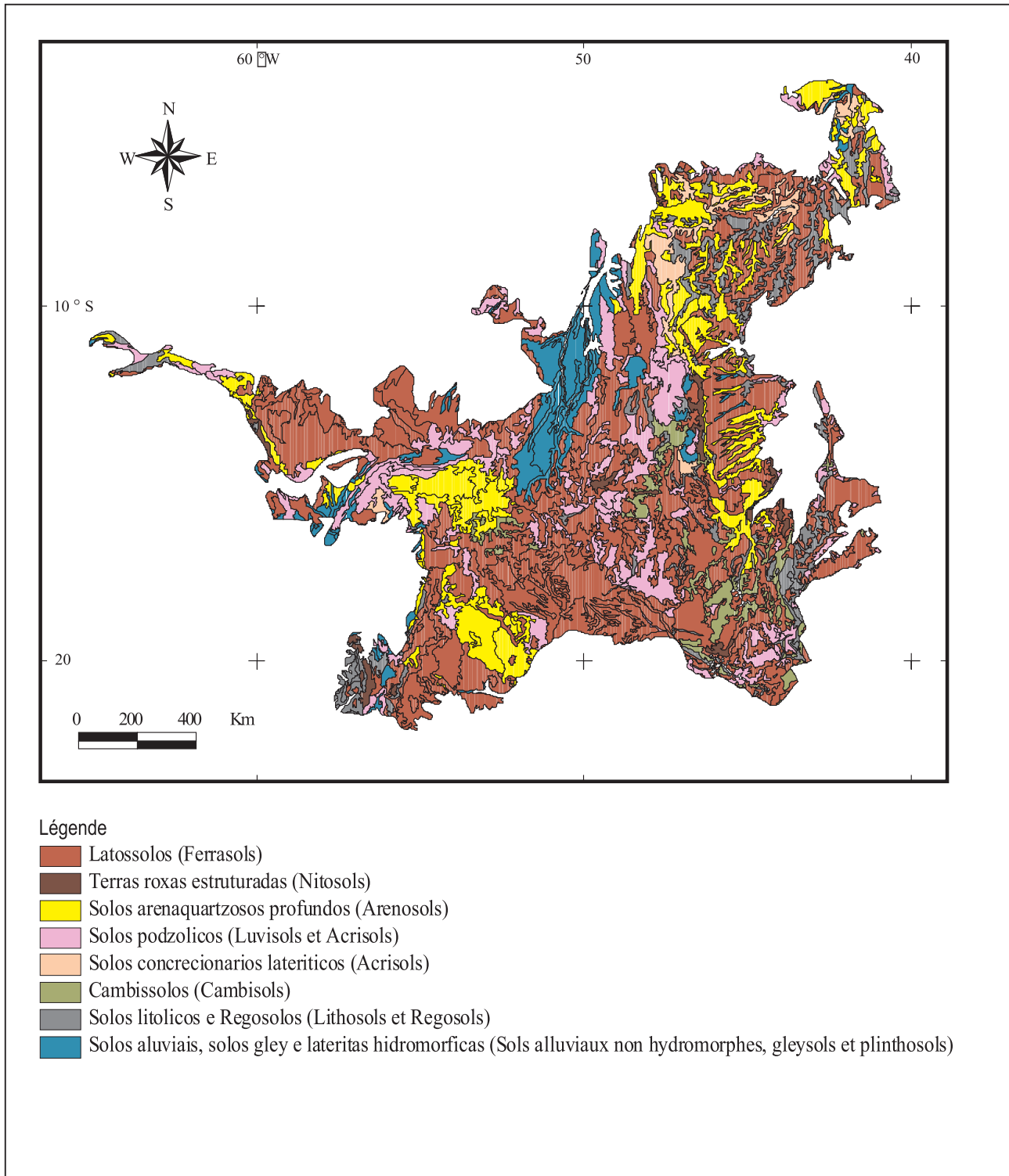
L'élevage bovin est essentiellement destiné à la boucherie, la production laitière ne représentant que 16 % de la valeur totale de la production du Cerrado (Waniez, 1992). L'élevage bovin du Cerrado constitue 40 % du cheptel total du Brésil (Barcellos, 1996), contribuant à hauteur de 33 % à la production de viande brésilienne (Carvalho *et al.*, 1990; Macedo, 1995). Une baisse de productivité des pâturages est enregistrée depuis plusieurs années. Elle concernerait aujourd'hui près de 80 % des surfaces pâturées (Kluthcouski *et al.*, 1999). Le surpâturage serait l'une des causes du déclin des pâturages (Costa et Rehman, 1999) mais les systèmes actuels « sol / plante / bovin » étant extractivistes (Barcellos *et al.*, 2001), l'offre minérale du sol pour la plante est à moyen terme un facteur limitant qui expliquerait aussi les baisses de productivité enregistrées. Une évolution de l'état physique des sols par compactage lors du défrichage ou lors du piétinement par le bétail est aussi à prendre en compte pour expliquer ces baisses de productivités.

Si la question de la baisse de productivité des prairies cultivées est institutionnellement prise en compte (programmes de renouvellement, diffusions techniques, etc.), peu d'études ont concerné l'état physique des sols du Cerrado lorsqu'ils sont cultivés. Or, si l'on en juge par l'évolution des surfaces cultivées « conventionnelles » transformées en semis direct ces dernières années (2,2  $10^6$  hectares) (Séguy *et al.*, 1996), les systèmes de production céréales, soja et coton rencontrent suffisamment de problèmes sérieux pour contraindre les producteurs à changer de stratégie. Les contraintes physiques des sols sont fréquemment citées comme étant des éléments à prendre en compte lors de la mise en culture, en particulier lorsqu'il s'agit de Ferralsols.

Pour limiter la dégradation des pâturages qui se caractérise par une couverture végétale très discontinue et de faible productivité et par l'apparition de phénomènes d'érosion (Séguy et Bouzinac, 1999), le système agro-pastoral *Barreirão* (Oliveira *et al.*, 1996) a été proposé. Ce système offre la possibilité d'intégrer culture et élevage sur les mêmes surfaces grâce à l'implantation simultanée d'une céréale destinée à la production de grains lors de la première année et d'une graminée destinée au pâturage après récolte. Une autre stratégie consiste à transformer peu à peu les unités de pro-

**Figure 3** - Les principaux types de sols du Cerrado (d'après EMBRAPA, 1981).

**Figure 3** - The main soils of the Cerrado region (after EMBRAPA, 1981).





duction bovine en des unités mixtes agriculture / élevage avec des rotations pâturages/cultures à cycles courts (Rippstein *et al.*, 1996; Spain *et al.*, 1996; Ayarza *et al.*, 1998; Balbino et Di Stefano, 1999). Une autre option intéressante consiste à associer une légumineuse à la graminée (Kornelius *et al.*, 1978; Balbino et Di Stefano, 1999; Barcellos *et al.*, 2000). L'utilisation de légumineuses offre en effet une haute valeur nutritive toute l'année, par comparaison aux monocultures de graminées, et une forte restitution azotée au système sol plante (Andrade et Karia, 2000).

Quelles que soient les causes des diminutions de productivité observées, il est aujourd'hui difficile d'avoir une idée claire des processus qui en sont responsables et de leur importance relative. Dans ce qui suit, nous précisons, tout en nous appuyant sur les données de la littérature, comment évolue la structure des Ferralsols lorsqu'ils sont mis en culture et dans quelle mesure les propriétés physiques sont affectées.

## ÉVOLUTION DE L'ÉTAT STRUCTURAL ET STABILITÉ DE LA STRUCTURE

### Morphologie de la structure

La structure du sol est profondément transformée dès la mise en culture (Grohmann, 1975; Tavares Filho et Tessier, 1997), en particulier lors de l'utilisation d'équipements lourds à disques. En peu de temps, on observe la formation d'une semelle de labour alors que les outils provoquent une fragmentation élevée de la couche travaillée qui peut aller jusqu'à une pulvérisation de la structure et une prise en masse (Castro Filho et Logan, 1991; Freitas *et al.*, 1998; Neufeldt *et al.*, 1999). La structure microagrégée a alors disparu et l'on observe la formation d'horizons compacts (Silva *et al.*, 2000, Fregonezi *et al.*, 2001). Blancaneaux *et al.* (1993) ont étudié un Ferralsol sous une végétation de jachère de graminées âgée de cinq ans, antérieurement travaillée avec un pulvérisateur à disques. Ils ont observé sur ce profil que la structure microagrégée en profondeur se transforme en agrégats polyédriques subanguleux fins à moyens dans les horizons superficiels. Sous pâturages, la structure en surface est fréquemment moins microagrégée et moins grumeleuse que celle des sols sous végétation naturelle et se transforme en polyèdres subanguleux (Freitas *et al.*, 1998; Fregonezi *et al.*, 2001). Oliveira *et al.* (2000) ont observé une réorganisation microstructurale qui résulte de la coalescence de microagrégats granulaires entre 15 et 30 cm de profondeur. Il en résulte une structure massive et compacte que l'on observe au champ après dix années de cultures intensives de plantes à cycle court.

Il ressort de ces études que la mise en culture des Ferralsols conduit à la formation dans les premiers décimètres d'horizons compacts dans lesquels la structure microagrégée a pratiquement totalement disparu, alors qu'elle était largement développée sous végétation naturelle. La continuité de la phase solide qui en résulte conduit au développement d'une macrostructure liée aux phases

d'humectation–dessiccation alors qu'elle était généralement absente sous végétation naturelle en raison très vraisemblablement de l'activité de fragmentation et de réorganisation par les termites. En effet, dans un milieu organisé en microagrégats de quelques centaines de micromètres de diamètre, les variations de volume liées aux phases d'humectation–dessiccation ne peuvent conduire au développement d'une macrostructure. Les variations de volume des microagrégats sont en effet compensées par une variation du volume poral entre les microagrégats sans qu'il n'y ait de répercussion à l'échelle macroscopique.

### Masse volumique des horizons

Nous avons déjà souligné que les masses volumiques des Ferralsols sont faibles sous végétation naturelle (Moraes *et al.*, 1985; Sans, 1986; Camargo *et al.*, 1988; Brossard *et al.*, 1997). Dans les sols ayant une teneur en argile supérieure ou égale à 70 % et développés sur roches métasédimentaires ou tuffites, la masse volumique est très généralement inférieure à  $1 \text{ g cm}^{-3}$ ; Celle-ci est de surcroît relativement constante dans le profil. En revanche, les sols de teneur en argile inférieure à 70 % présentent des masses volumiques supérieures et variables dans le profil (*figure 4*).

Une augmentation de la masse volumique est très généralement observée à la suite de la mise en culture, en particulier dans les horizons compacts dépourvus de microagrégats (Moraes, 1984; Stone et Silveira, 1978; Kondo et Dias Junior, 1999a) (*tableau 1*). Des valeurs de  $1,19$  à  $1,24 \text{ g cm}^{-3}$  sont enregistrées dans des profils sous Cerrado après un déboisement sélectif et pâturé depuis dix ans (Freitas *et al.*, 1998). La macroporosité est la première à être affectée par ces transformations, avec une évolution marquée dans les horizons superficiels (Borges *et al.*, 1999). Volpe (1998) étudie un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-escuro* sous un pâturage de faible productivité et observe des masses volumiques de  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  alors qu'elles sont inférieures à  $1,1 \text{ g cm}^{-3}$  sous Cerrado (0–10 cm). Des résultats similaires ont été observés par Lilienfein *et al.* (1999) dans des Ferralsols de type *Latossolo Vermelho-amarelo*.

L'évolution de la structure concerne aussi les horizons sous-jacents non travaillés. Ainsi, Freitas *et al.* (2000) enregistrent des masses volumiques plus élevées sous un pâturage de productivité élevée ( $1,32$  et  $1,33 \text{ g cm}^{-3}$  dans les horizons 10–20 cm et 20–40 cm, respectivement) que sous un pâturage de faible productivité ( $1,23 \text{ g cm}^{-3}$  aux deux mêmes profondeurs). Sous un système intensif de cultures irriguées, Silveira *et al.* (1994) observent une diminution de la masse volumique entre 0 et 30 cm; en revanche, plus en profondeur la masse volumique augmente de  $1,18$  à  $1,31 \text{ g cm}^{-3}$ . Il semble bien que les transformations ne soient pas immédiates mais nécessitent plusieurs cycles culturaux (Corsini et Ferrauto, 1999). Les valeurs observées peuvent être élevées; Frizzone et Sobrinho (1982) enregistrent sous culture (Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-escuro*) une masse volumique de  $1,44 \text{ g cm}^{-3}$  entre 0 et 20 cm, et de  $1,22 \text{ g cm}^{-3}$  entre 80 et 100 cm. Cette évolution de la masse volumique ne serait pas indépendante de la minéralogie de la phase argileuse des Ferralsols. Les Ferralsols kao-

**Tableau 1** - Masse volumique de Ferralsols du Cerrado (LVA = Latossolo Vermelho amarelo, LE = Latossolo Vermelho escuro, LU = Latossolo Una, LR = Latossolo Roxo).

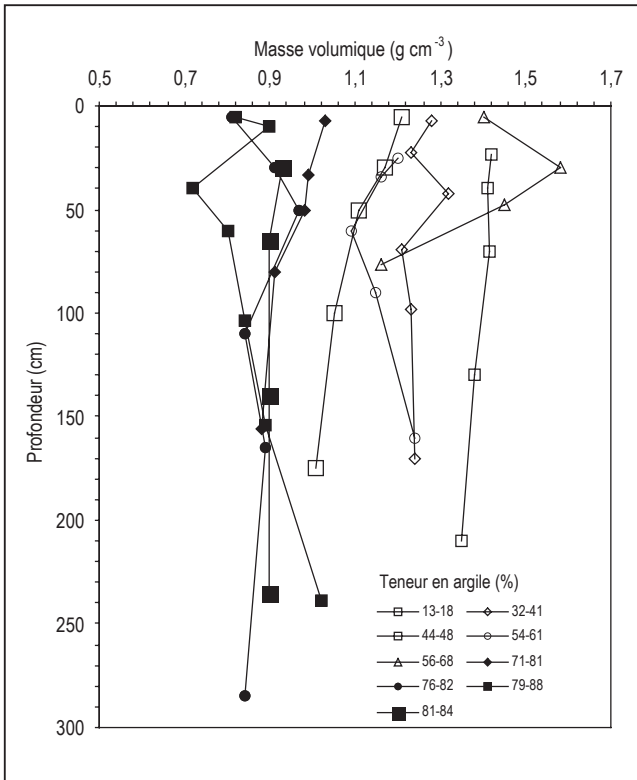
**Table 1** - Bulk density of Ferralsols of the Cerrado (LVA = Latossolo Vermelho amarelo, LE = Latossolo Vermelho escuro, LU = Latossolo Una, LR = Latossolo Roxo).

Sol	Horizon cm	Argile g 100 g <sup>-1</sup>	Cerrado g cm <sup>-3</sup>	Pâturage	Culture	Semis direct	Référence
LVA	0-60	31-36	-	-	1,16-1,23	-	Stone et Silveira (1978)
LVA	2-8	46-60	0,66	-	0,84	0,92	Kato (1995)
LVA	-	66-67	0,84	0,89	0,93	-	Neufeldt et al.(1999)
LVA	-	15-17	1,15	1,23	1,38	-	
LR	0-80	65-73	0,97-1,19 <sup>1</sup>	-	-	-	Sales et al. (1999)
LE	0-200	70-81	0,87-1,00	-	0,89-1,10	0,90-0,97	Moraes (1984)
LE	0-40	79-83	0,94-1,01	-	1,04-1,08 <sup>2</sup>	-	Stoner et al. (1991)
LE	0-40	64-82	0,86-1,02	-	0,94-1,08 <sup>3</sup>	-	
LE	0-40	51-68	1,06-1,10	-	1,12-1,18 <sup>4</sup>	-	
LE	10-50	-	-	-	1,20-1,35 <sup>5</sup>	-	Silveira et al. (1994)
LE	10-50	-	-	-	1,17-1,34 <sup>6</sup>	-	
LE	10-50	-	-	-	1,12-1,31 <sup>7</sup>	-	
LE	0-60	41-44	-	-	1,16-1,38 <sup>2</sup>	-	Stone et al. (1994)
LE	0-60	41-44	-	-	1,16-1,45 <sup>8</sup>	-	
LE	0-40	48-51	0,88-0,99	-	-	-	Santos (1997)
LE	0-40	49-62	-	0,90-1,03	-	-	
LE	0-40	55-57	-	-	0,91-1,07	-	
LE	0-40	39-43	-	-	-	0,90-1,07	
LE	0-40	49-62	1,09-1,21	1,17-1,23	-	-	Volpe (1998)
LE	0-20	68-72	0,94-0,99	-	0,96-1,00 <sup>9</sup>	-	Carvalho (1998)
-	0-225	32-41	1,21-1,32 <sup>10</sup>	-	-	-	Camargo et al. (1988)
-	0-239	79-88	0,72-1,02 <sup>10</sup>	-	-	-	
-	0-90	56-68	1,16-1,62	-	-	-	
-	0-285	76-82	0,81-0,97	-	-	-	
-	0-235	81-84	0,90-0,93	-	-	-	
-	0-400	13-18	1,35-1,42 <sup>11</sup>	-	-	-	
-	0-156	71-81	0,88-1,03 <sup>11</sup>	-	-	-	
-	0-205	44-48	1,01-1,21 <sup>11</sup>	-	-	-	
-	30-180	54-61	1,09-1,36 <sup>11</sup>	-	-	-	
LE	0-100	65-72	-	-	1,22-1,44	-	Frizzone et Sobrinho (1982)
LE	0-200	71-76	0,88-1,00	-	-	-	Moraes et al. (1985)
LE	0-200	72-75	-	-	0,89-1,10	-	
LE	0-200	72-81	-	-	-	0,90-0,97	
LE	0-195	69-79	0,70-0,84	-	-	-	Sans (1986)
LE	0-187	67-78	-	-	0,70-0,82	-	
LE	0-40	79-83	0,94-1,01	-	1,04-1,08	-	Stoner et al. (1994)
LE	0-40	64-82	0,86-1,02	-	0,94-1,08	-	
LE	0-40	51-68	1,06-1,10	-	1,12-1,18	-	
LE	0-100	-	0,99-1,24	1,31-1,33	1,23-1,34	1,09-1,36	Freitas et al. (1998)
LE	0-20	55-58	0,88-1,10	-	-	-	Spera et al. (2000)
LE	0-20	58-61	0,85-1,07 <sup>12</sup>	-	-	-	
LE	0-40	46-50	1,12-1,19 <sup>10</sup>	-	-	-	Freitas et al.(2000)
LE	0-40	51	-	-	-	1,15-1,36	
LE	0-40	48-52	-	-	1,10-1,29	-	
LE	0-40	36-41	-	1,10-1,33	-	-	
LE	0-40	43-49	-	1,10-1,23 <sup>13</sup>	-	-	
LE	0-30	58	0,83-0,85	-	0,94-1,12	0,83-1,06	Beutler et al.(2001a)
LE	0-200	59-71	0,91-1,17	-	-	-	Chagas et al. (1997)
LE	0-210	41-59	0,95-1,16	-	-	-	
LU	0-200	58-67	0,95-1,10	-	-	-	
LU	0-180	50-53	1,07-1,22	-	-	-	
-	0-200	68-82	0,82-0,99	0,92-1,00	0,82-1,10	0,83-0,99	Lillienfein et al. (1999)

<sup>1</sup>campus UFLA, <sup>2</sup>Cultivé depuis 13 ans, <sup>3</sup>Cultivé depuis 9 ans, <sup>4</sup>cultivé depuis 10 ans, <sup>5</sup>avant l'expérimentation, <sup>6</sup>après 8 cultures avec le labour à 15 cm, <sup>7</sup>après 8 cultures avec le labour à 30 cm, <sup>8</sup>après 7 cultures avec le labour à 30-35 cm intercalé avec le labour à 15-20 cm, <sup>9</sup>cultivé depuis 30 ans, <sup>10</sup>anthropisé, <sup>11</sup>végétation herbacée naturelle, <sup>12</sup>Cerrado avec feu, <sup>13</sup>pâturage « dégradé »

**Figure 4** - Exemples de profils de masse volumique dans des Ferralsols sous végétation naturelle (d'après Camargo *et al.*, 1988).

**Figure 4** - Examples of bulk density profiles of Ferralsols under native vegetation (after Camargo *et al.*, 1988).



linitiques atteindraient plus facilement des masses volumiques élevées que les Ferralsols riches en gibbsite (Ferreira *et al.*, 1999).

Globalement, on peut retenir de ces études que la mise en culture s'accompagne d'une augmentation de 10 à 20 % de la masse volumique dans les horizons travaillés par rapport à la situation sous végétation naturelle. Cette augmentation est observée dans des Ferralsols argileux et elle est particulièrement nette dans les horizons compacts où la structure microagrégée a disparu. L'absence de données publiées pour les Ferralsols de texture sableuse est à relever (*tableau 1*) alors qu'ils représentent des surfaces cultivées importantes, en particulier à l'ouest, dans l'état de la Bahia et à l'est dans le Mato Grosso do Sul.

## Résistance à la pénétration

La résistance mécanique à la pénétration est souvent utilisée au Brésil comme un outil d'aide au diagnostic pour discuter l'état structural. Toutefois, les valeurs rapportées dans la littérature sont difficilement comparables. En effet, les données sont commentées sans que les seuils de limite de croissance des racines aient été systématiquement vérifiés. Généralement, on considère qu'à partir de 2 MPa la croissance racinaire

est réduite de moitié. Stoner *et al.* (1991) ont examiné un Ferralsol cultivé sous irrigation depuis 10 ans avec un labour avec charrue à disques et pulvériser à disques lourds. Lors de la 11<sup>e</sup> année, le sol est soumis à différents traitements : (i) semis direct, (ii) travail du sol avec un pulvériser à disques léger, (iii) travail du sol avec un pulvériser à disques lourds, (iv) travail du sol avec une charrue à disques, (v) travail du sol avec un scarificateur et (vi) travail du sol avec deux passages de scarificateur à 90°. La résistance à la pénétration la plus élevée est enregistrée avec le « pulvériser à disques lourds » (1,84 MPa à 15–20 cm). La résistance à la pénétration décroît ensuite dans l'ordre « pulvériser à disques léger » (1,39 MPa à 15–20 cm), « charrue à disques » (1,22 MPa à 20–30 cm), « semis direct » (1,19 MPa entre 10 et 15 cm), « scarificateur » (0,81 MPa à 20–25 cm) et « deux passages de scarificateur » (0,69 MPa à 30–35 cm). Précisons que sous Cerrado, la valeur maximum était de 0,39 MPa entre 15 et 20 cm de profondeur (*figure 5a*).

Volpe (1998) étudiant un Ferralsol sous pâturage a observé des valeurs de résistance à la pénétration de 3,14 MPa en surface et 1,67 MPa à 40–45 cm de profondeur, à des teneurs en eau de respectivement 0,17 et 0,18 g g<sup>-1</sup>. L'année suivante, il obtient des valeurs de 1,86 et 1,37 MPa, dans les mêmes horizons. Cette fois les teneurs en eau du sol étaient de 0,23 et 0,19 g g<sup>-1</sup>, respectivement (*figure 5b*). Beutler *et al.* (2001a) étudient la résistance mécanique à la pénétration horizontale entre 5 et 30 cm de profondeur dans un Ferralsol argileux et obtiennent des valeurs de 0,16 à 0,29 MPa sous Cerrado, de 1,23 à 1,31 MPa sous traitement « pulvériser à disques lourds », de 0,47 à 1,2 MPa sous traitement « charrue à disques » et de 1,00 à 1,3 MPa sous semis direct. Pour la résistance à la pénétration verticale (jusqu'à 30 cm), ils ont obtenu des valeurs de 0,84 à 1,6 MPa, de 1,61 à 2,1 MPa, de 1,80 à 2,2 MPa et de 2,54 à 3,0 MPa, pour respectivement les mêmes traitements. Le semis direct présente une valeur maximum de résistance à la pénétration verticale, à la profondeur de 15–20 cm, en relation avec les valeurs les plus importantes de masses volumiques du sol et avec le volume total de pores.

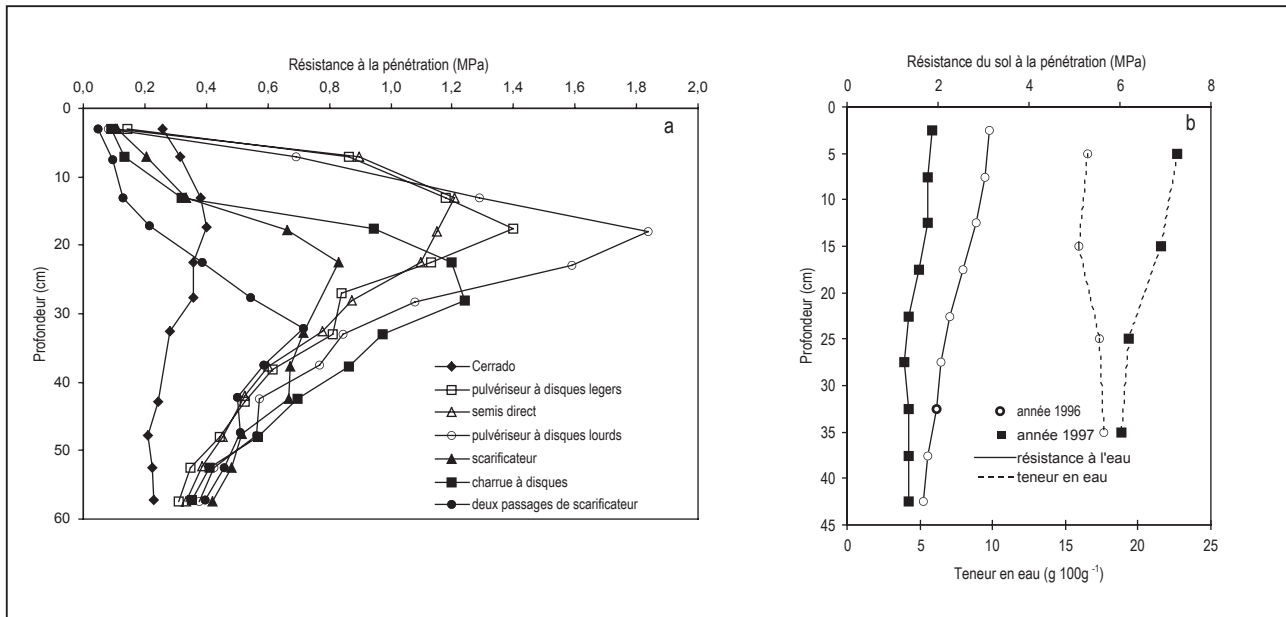
Ces études montrent une large gamme de variation de la résistance à la pénétration en fonction des techniques culturales employées. Les valeurs publiées sont cependant fréquemment des valeurs moyennes sans que la variabilité attachée à chacune d'elles soit précisée. Le caractère significatif des différences reste par conséquent difficile à discuter. De surcroît, la résistance à la pénétration dépend étroitement de la teneur en eau et les mesures ont le plus souvent été effectuées pour des domaines de teneur en eau très restreints. Il en résulte que les comparaisons possibles entre études demeurent très limitées.

## Stabilité structurale

Deux principales méthodes sont utilisées en routine. La première, qui a été normalisée au Brésil (Vettori, 1969), utilise une énergie mécanique importante de dispersion des agrégats par

**Figure 5** - Résistance à la pénétration d'un Ferralsol sous différents modes de gestion (d'après Stoner *et al.*, 1991) (a) et dans un Ferralsol sous pâturage pour deux années successives (d'après Volpe, 1998) (b).

**Figure 5** - Resistance to penetration in a Ferralsol under several soil managements (after Stoner *et al.*, 1991) (a) and in a Ferralsol under pasture for two successive years (after Volpe, 1998) (b).



agitation dans l'eau à l'aide d'un barreau. La seconde consiste en un test de stabilité des agrégats par voie humide, cette méthode est dérivée de la méthode Yoder (1936). Le rôle de la nature des constituants minéraux est à de nombreuses reprises mis en avant dans la formation des agrégats et leur stabilité. Il a en effet été montré que l'hématite et la goéthite pouvaient former des microagrégats très stables avec la gibbsite, la kaolinite et le quartz (Pinheiro-Dick et Schwertmann, 1996). Ferreira *et al.* (1999) montrent que les agrégats de Ferralsols à kaolinite dominante ont une stabilité structurale supérieure à celle d'agrégats issus de Ferralsols gibbsitiques. Les mécanismes mis en jeu concernent les charges électriques de surface des oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium. Les conditions de pH, les concentrations et compositions ioniques de la phase liquide jouent alors un rôle déterminant dans la stabilité des microagrégats (de Brito Galvão et Schulze, 1996; Hingston *et al.*, 1974; Sawhney, 1974; Lima *et al.*, 2000). De plus, une grande partie de la garniture ionique de ces sols est associée à la matière organique qui se trouve elle-même stabilisée dans les microagrégats (Shang et Tiessen, 1997). D'autres auteurs soulignent d'ailleurs l'importance de la matière organique associée au fer dans la formation des microagrégats (Muggler *et al.*, 1999) ainsi qu'une relation linéaire positive entre la matière organique associée aux agrégats de taille supérieure à 200  $\mu\text{m}$  et leur stabilité structurale (Kouakoua *et al.*, 1999). Testant l'effet de l'oxalate et du mélange citrate-bicarbonate-dithionite (CBD), Lima et Anderson (1997) montrent que les agrégats les plus grossiers (1–2 mm) présentent une plus grande

stabilité que les fins (0,125–0,25 mm) lors des deux traitements. Si le faible taux de mise en solution du fer par l'oxalate est attendu compte tenu de la cristallinité des oxy-hydroxydes dans les Ferralsols, le résultat obtenu avec le CBD montre que l'accessibilité aux surfaces des oxy-hydroxydes est en partie limitée par des revêtements organiques.

En règle générale, la quantité d'argile dispersable dans l'eau augmente après mise en culture. Par ailleurs, la fragmentation mécanique par les instruments aratoires est aussi mise en avant pour expliquer la désagrégation importante des horizons de surface (Blancaneaux *et al.* 1993; Carvalho *et al.* 1999; Westerhof *et al.*, 1999). Dans l'horizon 0–23 cm d'un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-escuro*, Moraes (1984) a observé une stabilité d'agrégats plus importante des agrégats > 2 mm sous Cerrado que sous culture. Cette stabilité plus importante n'apparaît pas être en relation avec la matière organique; il l'explique par l'action mécanique des outils de labour. Beutler *et al.* (2001b) ont quant à eux étudié un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho*; la stabilité des agrégats de taille > 2 mm dans l'horizon 0–5 cm est liée à la teneur en matière organique. Cependant, ils énoncent que le labour du sol serait à l'origine de la fragmentation des mottes en agrégats plus petits, de la diminution de la teneur en matière organique et de l'activité microbienne accompagnant en général la mise en culture.

La composition granulométrique est un élément important à prendre en considération. Neufeldt *et al.* (1999) travaillant sur deux



Ferralsols, l'un argileux et l'autre sableux sous différents modes de gestion, ont clairement montré que la teneur en argile exerce une influence positive sur la stabilité des agrégats de taille supérieure à 250  $\mu\text{m}$ , en particulier ceux de classe de taille 1–8 mm. Ces auteurs observent des teneurs plus élevées en agrégats appartenant à la classe d'agrégats 250–50  $\mu\text{m}$  pour le sol sableux, par rapport au sol argileux. La mise en culture a une tendance à réduire la taille et la quantité de macroagrégats, néanmoins c'est le système de culture avec labour qui a les plus faibles teneurs en macroagrégats, ceux-ci étant fragmentés et participant aux fractions de tailles < 250  $\mu\text{m}$ .

Ainsi, la mise en culture entraîne une diminution de la stabilité structurale dans l'horizon superficiel. Cette évolution est sans doute autant le résultat d'une fragmentation due au travail du sol, que celui de l'affaiblissement des forces entre les constituants minéraux et organiques suite à l'évolution de l'ambiance physico-chimique lors de la mise en culture (CastroFilho et Logan, 1991 ; Castro *et al.*, 1999 ; Fontes *et al.*, 1995). Les microagrégats ne seraient pas aussi stables que ne le considèrent généralement de nombreux auteurs. Ainsi s'expliquerait que des horizons compacts où les microagrégats ont disparu, puissent apparaître après quelques années de culture.

## Propriétés mécaniques

Les évolutions qui ont été rapportées dans les paragraphes précédents indiquent que les Ferralsols présenteraient une forte susceptibilité au compactage. La connaissance des domaines de teneur en eau pour lesquels le travail du sol n'entraîne pas de compactage ainsi que celle des pressions pouvant être supportées par les Ferralsols sans que la structure ne soit trop affectée, constituent autant d'éléments qui sont maintenant pris en compte dans les études. Les premiers essais ont reposé sur la détermination des limites de liquidité et de plasticité. Ils ont été essentiellement révélateurs de différences liées à la composition du sol. Ainsi, Moraes (1984) étudie un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-escuro* (71 à 81 % d'argile) et mesure des valeurs de limite de liquidité variant entre 0,43 et 0,52  $\text{kg kg}^{-1}$  sous culture conventionnelle, semis direct et Cerrado. Pour les mêmes traitements, les limites de plasticité étaient comprises entre 0,38 et 0,40  $\text{kg kg}^{-1}$ . Selon cet auteur, il existerait une relation entre le mode de gestion et les valeurs de limite de liquidité et de plasticité. Les différences enregistrées par Moraes (1984) sont néanmoins faibles. Plus récemment, Kondo et Dias Junior (1999a) étudient des Ferralsols de types *Latossolo Vermelho-escuro* (33 à 70 % d'argile), *Latossolo Vermelho-amarelo* (24 à 46 % d'argile) et *Latossolo Roxo* (59 et 76 % d'argile, teneur en hématite élevée) qui sont soumis à différents modes de gestion. Ces auteurs enregistrent des valeurs qui varient entre 0,41 et 0,58  $\text{kg kg}^{-1}$ , 0,28 et 0,44  $\text{kg kg}^{-1}$  pour respectivement les limites de liquidité et de plasticité. Ces deux limites sont corrélées positivement avec les teneurs en argile et en matière organique indépendamment du mode de gestion du sol. L'intervalle de teneur en eau pour lequel le sol peut être travaillé, sans provoquer de dégradation structurale, décroît dans le sens Ferralsol

de type *Latossolo Roxo*, *Latossolo Vermelho-escuro*, *Latossolo Vermelho-amarelo*.

Une autre voie pour étudier les propriétés mécaniques d'un sol consiste à étudier sa courbe de compression. Kondo et Dias Junior (1999b) montrent ainsi que la limite de plasticité peut être utilisée comme valeur de teneur en eau maximale au-dessus de laquelle des dommages irréversibles se produisent pour la structure du sol. Au-delà de cette limite de teneur en eau, la dégradation de la structure est la plus marquée pour le Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-amarelo* et la moins marquée pour celui de type *Latossolo Vermelho-escuro*.

Au total, très peu d'études ont été réalisées à ce jour sur les propriétés mécaniques dans le Cerrado. Des études couplant l'analyse des déformations sous contrainte mécanique en fonction du potentiel de l'eau et de la teneur en eau à l'analyse des variations d'état structural, en particulier la dynamique micro- et macrostructurale, permettraient de connaître les conditions dans lesquelles les évolutions structurales observées au champ se produisent.

## PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES

### Propriétés de rétention en eau

Compte tenu des contraintes climatiques précédemment exposées, on comprend que les relations sol-eau jouent un rôle majeur dans les propriétés physiques de ces sols. En effet, ils sont soumis à de fortes alternances de dessiccation-humectation, en particulier lors des petites saisons sèches et lors de la fin de la saison des pluies. L'évapotranspiration sous végétation de Cerrado est de 576  $\text{mm an}^{-1}$  (Lima *et al.*, 1990). On sait que dans les systèmes cultivés, le taux de transpiration dépend de l'espèce et de la productivité. Le coefficient de transpiration (biomasse sèche/pertes en eau par transpiration) du soja représente plus de 700  $\text{kg eau kg}^{-1}$  de MS et celui du maïs de 300 à 400  $\text{kg eau kg}^{-1}$  de MS. Franco *et al.* (1996) montrent que sous végétation native, le potentiel de l'eau dans le sol décroît au-delà du point de flétrissement en seulement un mois après l'arrêt des pluies (fin des saisons des pluies) et cela dans les 50 premiers centimètres.

Les deux tiers de l'eau disponible dans les Ferralsols sont accessibles pour des potentiels matriciels compris entre  $-0,1$  et  $-1,0$  MPa (Wolf, 1975 ; Lopes, 1977). La quantité d'eau dans les sols et la disponibilité pour les plantes sont intimement liées aux caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol. Lilienfein *et al.*, (1999) ont observé que les réserves en eau dans les deux premiers mètres du sol étaient comprises entre 429 et 620 mm pour plusieurs modes de gestion des sols. Ils remarquent que sous pâturage productif les potentiels matriciels des sols sont similaires à ceux de la savane arborée. Moraes (1984) compare les effets de plusieurs systèmes de gestion et montre que les différences de quantité d'eau utile s'expliquent par des différences de composition des Ferralsols et non par leur mode de gestion (tableau 2). Stone *et al.* (1994) étudient



un Ferralsole de type *Latossolo Vermelho-escuro* après sept cultures consécutives et constatent une augmentation de la quantité d'eau retenue à tous les potentiels matriciels. Cependant, l'eau disponible pour les plantes est plus faible de 25 % pour la couche 0–20 cm et de 20 % pour la couche 20–40 cm par rapport à ce qu'elle était au départ.

D'autres auteurs ont abouti à des résultats opposés. Par exemple, Kato (1995) et Santos (1997) qui utilisent la méthode par centrifugation et Carvalho (1998) qui lui utilise des dispositifs pneumatiques montrent une augmentation de la réserve en eau disponible dans l'horizon 0–20 cm après mise en culture. Par ailleurs des travaux de récupération de pâturages n'ont pas mis en évidence de variation d'eau disponible, par rapport à l'état initial (Volpe, 1998). L'effet de feux répétés qui est souvent invoqué comme cause possible de dégradation des propriétés de rétention d'eau du sol apparaît être en fait sans effet dans l'étude réalisée par Spera *et al.* (2000). Enfin, Ohba (1999) montre que la courbe de rétention en eau de Ferralsoles de types *Latossolo Vermelho-escuro* et *Latossolo Vermelho-amarelo* peut être décrite par un polynôme de degré 3, la teneur en eau volumique était aussi reliée à la valeur du potentiel.

La quantité d'eau utile des Ferralsoles varie de 4,8 à 18,9 g 100g<sup>-1</sup> suivant les études (tableau 2). Cette variation n'est liée ni à la teneur en argile, ni à la masse volumique (figure 6). L'analyse des teneurs en eau aux valeurs de potentiel de -0,1, -0,33 et -1,5 MPa montre une étroite relation avec la teneur en argile (figure 7). Cette relation est d'ailleurs d'autant plus étroite que le potentiel est faible. On note aussi qu'il existe une différence en fonction de la méthode employée pour fixer la teneur en eau, les teneurs en eau obtenues avec la méthode par centrifugation étant plus élevées que celles obtenues avec la méthode utilisant une pression pneumatique (figure 7). La différence de teneur en eau entre les deux méthodes apparaît néanmoins être proche aux trois valeurs de potentiel. Ces méthodes seraient par conséquent sans grande influence sur la détermination de la quantité d'eau utile.

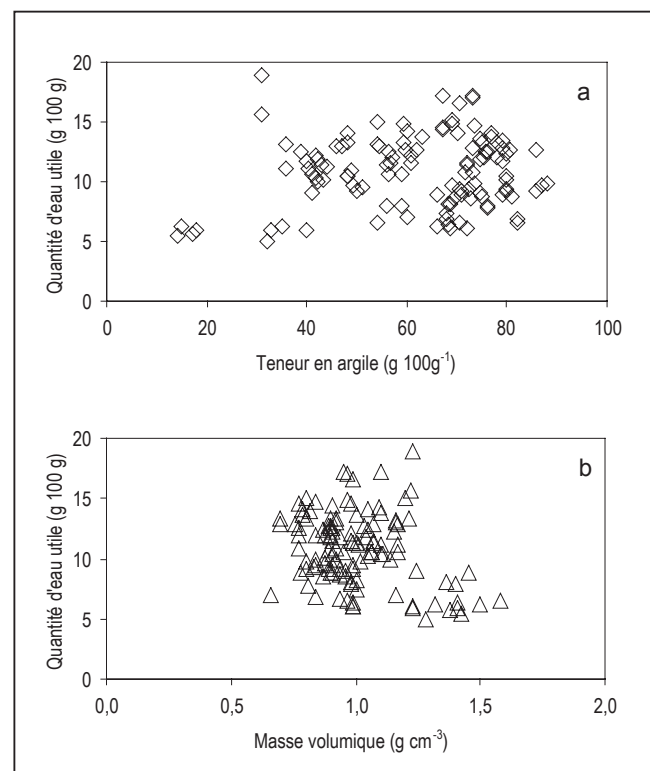
Les propriétés de rétention en eau sont dépendantes de la nature des constituants minéraux et organiques et de la façon dont ils sont assemblés. Dans le cas qui nous intéresse ici, des variations de composition peuvent à elles seules expliquer certaines des variations observées. De plus, l'évolution de la structure sous culture ne consisterait essentiellement qu'en la disparition des microagrégats avec le développement d'horizons compacts. Or, une telle transformation concerne des pores qui sont vraisemblablement pour la plupart de diamètre équivalent supérieur à 100  $\mu\text{m}$  et qui par conséquent ne retiennent de l'eau que dans la gamme des potentiels très élevés (potentiel supérieur à -33 hPa). Les études ayant été réalisées pour des gammes de potentiel plus faibles, il n'est guère surprenant qu'aucune différence nette n'en ressorte.

## Conductivité hydraulique

Les Ferralsoles présentent généralement des valeurs élevées de conductivité hydraulique à l'état saturé ( $K_s$ ) en raison de leur structure microagrégée, et ceci même lorsqu'ils sont très argileux (Resende, 1985; Resende *et al.*, 1999 cités par Ferreira *et al.*, 1999). Les auteurs font état de variations en fonction du type de sol. Chagas *et al.* (1997) étudient deux Ferralsoles très argileux, l'un de type *Latossolo Vermelho-amarelo* et l'autre de type *Latossolo Una*, et enregistrent des valeurs de  $K_s$  variant de 44 à 72 mm h<sup>-1</sup> dans les horizons A et des valeurs inférieures en profondeur (140 cm) pour les horizons B (0,14 à 3,3 mm h<sup>-1</sup>). Ces faibles valeurs enregistrées en profondeur sont inattendues pour des horizons microagrégés. Des valeurs de  $K_s$  de 199 à 619 mm h<sup>-1</sup> sont en effet observées en profondeur pour des horizons de Ferralsoles très argileux (Ferreira *et al.*, 1999).  $K_s$  décroît très généralement en surface après mise en culture (Stone et Silveira, 1978). Stone *et al.* (1994) enregistrent une diminution de  $K_s$  de 40 à 5 mm h<sup>-1</sup> et de 55 à 12 mm h<sup>-1</sup> dans respective-

**Figure 6** - Quantité d'eau utile des Ferralsoles en fonction de la teneur en argile (a) et de la masse volumique (b) (d'après Stone *et al.*, 1978; Moraes, 1984; Kato, 1985; Sans, 1986; Camargo *et al.*, 1988; Chagas *et al.*, 1997; Santos, 1997 et Carvalho, 1998).

**Figure 6** - Available water capacity in Ferralsoles as a function of clay content (a) and bulk density (b) (after Stone *et al.*, 1978; Moraes, 1984; Kato, 1985; Sans, 1986; Camargo *et al.*, 1988; Chagas *et al.*, 1997; Santos, 1997 and Carvalho, 1998)



**Tableau 2** - Quantité d'eau utile de Ferralsols du Cerrado (LVA = Latossolo Vermelho-amarelo, LE = Latossolo Vermelho-escuro, LU = Latossolo Una).

**Table 2** - Available water capacity of Ferralsols in the Cerrado (LVA = Latossolo Vermelho-amarelo, LE = Latossolo Vermelho-escuro, LU = Latossolo Una).

Sol	Horizons cm	Argile g 100g <sup>-1</sup>	Quantité d'eau utile (g 100g <sup>-1</sup> )				Référence
			Cerrado	Pâturage	Culture	Semis direct	
-	-	<18	4,9	-	-	-	Lopes (1977)
-	-	18-35	8,5	-	-	-	
-	-	35-60	9,8	-	-	-	
-	-	>60	9,1	-	-	-	
LVA	0-60	31-36	-	-	11,1-18,9	-	Stone et Silveira (1978)
LE	0-200	71-81	11,9-16,6	-	8,7-17,2	9,4-17,0	Moraes (1984)
LE	0-200	71-76	11,9-16,6	-	-	-	Moraes et al. (1985)
LE	0-200	72-75	-	-	8,70-17,2	-	
LE	0-200	72-81	-	-	-	9,4-17,0	
LE	0-195	69-79	10,8-15,1	-	-	-	Sans (1986)
LE	0-187	67-78	-	-	12,0-14,6	-	
-	0-225	32-41	5,0-9,0 <sup>1</sup>	-	-	-	Camargo et al. (1988)
-	0-239	79-88	9,7-12,7 <sup>1</sup>	-	-	-	
-	0-90	56-68	6,2-8,9	-	-	-	
-	0-285	76-82	6,5-12,3	-	-	-	
-	0-400	13-18	5,4-6,3 <sup>2</sup>	-	-	-	
-	15-156	71-81	7,9-10,1 <sup>2</sup>	-	-	-	
-	0-205	44-48	10,4-14,1 <sup>2</sup>	-	-	-	
-	30-180	54-61	12,2-15,0 <sup>2</sup>	-	-	-	
LE	0-60	41-44	-	-	9,0-10,6 <sup>3</sup>	-	Stone et al. (1994)
LE	0-60	41-44	-	-	7,2-8,0 <sup>4</sup>	-	
LE	0-40	49-62	-	6,5-9,2	-	-	Volpe (1998)
LE	0-20	68-72	6,1-6,6	-	7,4-8,6 <sup>5</sup>	-	Carvalho (1998)
LVA	2-8	46-60	7,0	-	12,0	13,0	Kato (1995)*
LE	0-40	48-51	9,2-10,9	-	-	-	Santos (1997)*
LE	0-40	49-62	-	11,5-14,9	-	-	
LE	0-40	55-57	-	-	10,6-12,9	-	
LE	0-40	39-44	-	-	-	10,2-12,5	
LE	0-118	59-67	10,6-14,4	-	-	-	Chagas et al. (1997)*
LU	0-106	63-67	13,8-17,2	-	-	-	

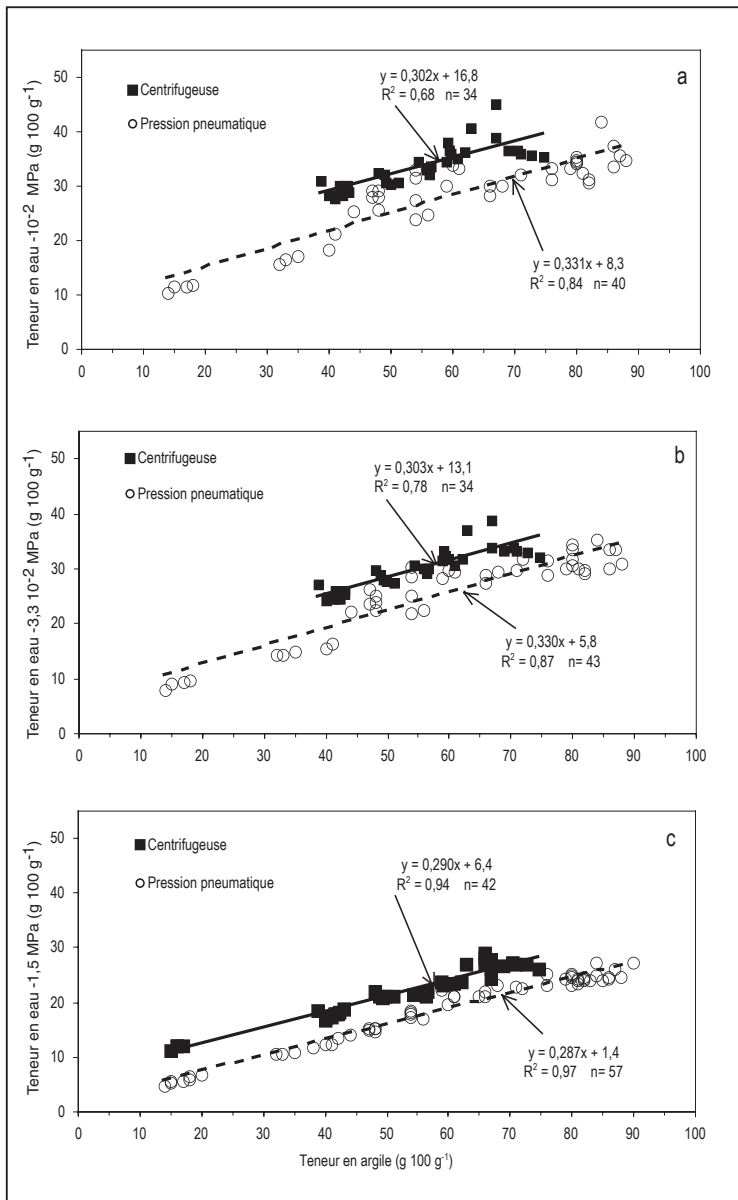
\*Méthode par centrifugation, <sup>1</sup>anthropisé, <sup>2</sup>Végétation herbacée naturelle, <sup>3</sup>Cultivé depuis 13 ans, <sup>4</sup>après 7 cultures avec le labour à 30-35 cm intercalé avec le labour à 15-20 cm, <sup>5</sup>cultivé depuis 30 ans.

ment les horizons 0–20 cm et 20–40 cm après 7 années de culture. En revanche, à 40–60 cm de profondeur, elle n'aurait diminué que de 135 à 124 mm h<sup>-1</sup>, ce qui n'est pas significatif. Volpe (1998) analyse un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-escuro*, sous plusieurs modes de récupération de pâturage, et mesure des valeurs élevées de Ks (427 à 982 mm h<sup>-1</sup>) pour l'horizon de surface en fonction de l'outil utilisé. Une gamme de variation encore plus large (6,6 à 95,4 mm h<sup>-1</sup>) est enregistrée pour l'horizon de surface par Beutler et al. (2001a) en fonction des techniques culturales.

A l'état non saturé, les valeurs de la conductivité hydraulique calculées à l'aide de la méthode du profil instantané varient de 4,92 10<sup>-2</sup> à 6,00 mm h<sup>-1</sup> pour des teneurs en eau variant de 0,274 à 0,409 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Frizzone et Sobrinho, 1982). Ces valeurs sont supérieures à celles généralement enregistrées pour d'autres types de sols dans la même gamme de texture et de teneur en eau. Stone et Silveira (1978) ont cependant obtenu pour un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-amarelo* des valeurs inférieures : 3,8 10<sup>-3</sup> à 85,0 10<sup>-2</sup> mm h<sup>-1</sup> pour les teneurs en eau variant de 0,284 à 0,214 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (figure 8).

**Figure 7** - Teneurs en eau ( $\text{g } 100\text{g}^{-1}$ ) aux valeurs de potentiel de (a)  $-10^{-2}$ , (b)  $-3,3 \cdot 10^{-2}$  et (c)  $-1,5$  MPa en fonction de la teneur en argile (d'après Camargo *et al.*, 1988; Chagas *et al.*, 1997; Santos *et al.*, 1997 et Neufeldt *et al.*, 1999).

**Figure 7** - Relation between the water retained ( $\text{g } 100\text{g}^{-1}$ ) at (a)  $-10^{-2}$ , (b)  $-3,3 \cdot 10^{-2}$  and (c)  $-1,5$  MPa water potential and clay content (after Camargo *et al.*, 1988; Chagas *et al.*, 1997; Santos *et al.*, 1997 and Neufeldt *et al.*, 1999).



Les rares études réalisées mettent donc en évidence une diminution de la conductivité hydraulique à l'état saturé. Cette diminution reste cependant limitée en raison vraisemblablement du rôle joué par quelques pores d'origine biologique, même au sein des horizons les plus compacts. Des données concernant la conductivité hydraulique à l'état non saturé, en particulier dans le domaine de teneur en eau proche

de la saturation, permettraient de mieux apprécier les variations de conductivité liées aux évolutions structurales enregistrées.

## Ruissellement et érosion

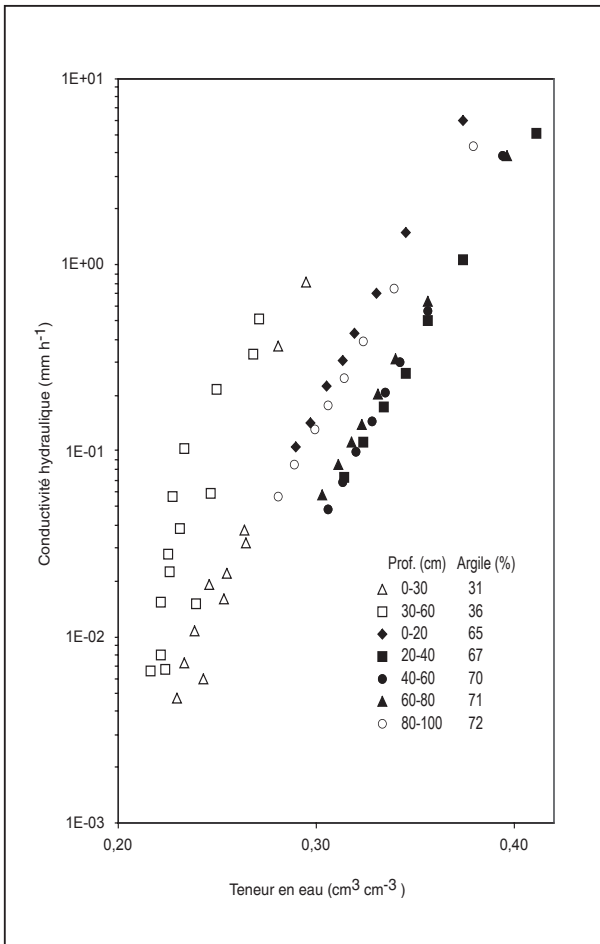
Les principales données disponibles pour les pertes en terre par érosion hydrique proviennent des travaux de Dedecek *et al.* (1986) dans la région de Brasília, de Blancaneaux *et al.* (1993) et Silva *et al.* (1997) dans l'état du Goiás, de Hernani *et al.* (1997 et 1999) dans l'état du Mato Grosso do Sul et de Baccaro *et al.* (2000) dans l'état de Minas Gerais. Le tableau 3 résume les principales caractéristiques de ces expérimentations. La localisation des études peut être considérée comme représentative des conditions et de la diversité du milieu régional. La gamme de variation des pluviométries annuelles (1 100–1 600 mm) correspond à plus de la moitié de la région. Les parcelles sont de type Wischmeier et toutes situées sur des Ferralsols. Les pentes, qui sont de 4–5 %, sont celles les plus fréquemment rencontrées dans le Cerrado. Les données de pertes en terre et en eau ont été regroupées dans le tableau 4. L'examen de ces données conduit aux commentaires suivants :

- pour les parcelles travaillées et maintenues nues, les pertes en eau et en terre sont dans tous les cas les plus importantes tout en restant dans une gamme de valeurs moyennes quand on les compare à certaines autres régions du Brésil (Leprun, 1994) ;
- sous cultures de soja et maïs, les pertes sont comparables à celles des autres régions du sud du Brésil ;
- sous pâturages, la protection du sol est pratiquement totale. Les pertes en terre sont infimes et représentent moins de 1 % des pertes sur sol nu et seulement quelques pour cent des pertes sous cultures. Les pertes en eau sont très faibles. Elles sont près de dix fois inférieures à celles sous cultures.

On peut expliquer ces faibles valeurs par la structure des Ferralsols qui, comme nous l'avons vu plus haut, leur confère une capacité élevée à infiltrer la lame d'eau pluviométrique. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que ces données sont obtenues sur des parcelles de petite taille comparée à celle des périmètres cultivés et ne prennent en compte que l'érosion laminaire. Elles laissent de côté les phénomènes d'érosion linéaire ravinante qui sont aujourd'hui très préoccupants et dont la forme la plus caractéristique est en ravines (*voçorocas*). Elles s'observent en particulier dans les pâturages cultivés

**Figure 8** - Conductivité hydraulique en non saturé pour un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-amarelo* (0-60 cm de profondeur) (d'après Stone et Silveira, 1978) et pour un Ferralsol de type *Latossolo Vermelho-escuro* (0-100 cm de profondeur) (d'après Frizzone et Sobrinho, 1982).

**Figure 8** - *Unsaturated hydraulic conductivity for a red-yellow Ferralsol (from 0 to 60 cm depth) (after Stone et Silveira, 1978) and for a dark-red Ferralsol (from 0 to 100 cm depth) (after Frizzone et Sobrinho, 1982).*



dégradés par surpâturage. Les pertes en terre dues à ces *voçorocas* sont des milliers de fois supérieures à celles provoquées par l'érosion laminaire.

Dans un travail récent, Silva *et al.* (1999) ont cherché à l'aide de régressions multiples à relier l'érodibilité mesurée au champ avec les caractéristiques physico-chimiques des horizons superficiels de près d'une vingtaine de Ferralsols brésiliens. Les études réalisées montrent que les données pédologiques de base, analytiques et descriptives de terrain conduisent fréquemment à une estimation satisfaisante de l'érodibilité. Cela étant, l'estimation des risques

d'érosion pour les Ferralsols est loin de pouvoir être réalisée tant elle requiert d'autres données que les seules données sur leur érodibilité.

## CONCLUSION

Il peut sembler paradoxal que pour une région si étendue et où l'activité agricole est aujourd'hui de première importance pour l'ensemble du Brésil, l'évolution de la fertilité des sols et en particulier de leur fertilité physique ne soit pas mieux connue.

Les Ferralsols qui représentent approximativement la moitié de la surface du Cerrado constituent un modèle tout à fait intéressant pour l'étude de l'évolution de la fertilité des sols sous différents systèmes de cultures. Leur fertilité chimique et physique, qui résulte d'un fragile équilibre atteint sous végétation naturelle, est très rapidement affectée après mise en culture.

Si la gestion de la fertilité chimique des Ferralsols pour de nombreuses cultures repose aujourd'hui sur de nombreux travaux, la gestion de la fertilité physique est en revanche moins bien établie. Dans l'appréciation globale de la fertilité d'un Ferralsol, ce qui revient aux propriétés chimiques et à leurs propriétés physiques est encore difficilement identifiable. Les études révèlent que la mise en culture s'accompagne effectivement d'une importante et rapide modification de l'état structural qui se traduit fréquemment par une augmentation de la masse volumique. Une telle évolution qui correspond à la disparition de la structure microagrégée se traduit par une évolution des propriétés physiques élémentaires : diminution de la stabilité structurale, accroissement de la proportion d'argile dispersable dans l'eau, plus faible conductivité hydraulique.

Même si, selon les modes de mise en culture, il est encore difficile de quantifier l'intensité de l'évolution de l'état structural et ses conséquences sur les propriétés physiques, l'analyse effectuée montre clairement que l'état structural est profondément affecté. Cependant, il faudra à l'avenir chercher à mieux identifier les processus à l'origine des transformations observées au champ et déterminer dans quelle mesure ils interviennent selon l'usage du sol et l'itinéraire technique mis en œuvre. La fertilité physique des Ferralsols repose en grande partie sur sa structure microagrégée qui leur confère une résistance à la pénétration faible, même aux faibles teneurs en eau, et une conductivité hydraulique élevée à saturation, les microagrégats possédant eux-même une stabilité structurale élevée. Un tel milieu est alors aisément prospecté par les racines compensant ainsi au moins partiellement les faibles teneurs en calcium et potassium échangeable et en phosphore assimilable. Enfin, si la structure microagrégée a bien pour origine l'activité des termites comme le suggèrent plusieurs travaux, il y aura lieu d'entreprendre des études permettant de mieux cerner le rôle de l'activité biologique dans le développement et le maintien de la structure microagrégée.

**Tableau 3** - Principales caractéristiques des sites expérimentaux de pertes en eau et en terre de la région du Cerrado (d'après Leprun et Brossard, 2000).

**Table 3** - Main characteristics of runoff and erosion plots of the Cerrado region (after Leprun and Brossard, 2000).

Localisation	P (mm) (1)	R (EI30 ws) (2)	Période (3)	Parcelle(m <sup>2</sup> ) (4)	Sol (5)	Pente (%) (6)	Traitements testés (6)
Planaltina	1 600	7 897	1977-83	77	LVEd	6	N, S,M,P*
Goiânia	1 522	8 355	1989-93	77	LVEd	4	N, S,M,P
Dourados	1 400	6 411	1987-95	77	LVEd	3	S
Iraí de Minas	1 150	7000*	1998-99	10	LRa	5	N, P**

(1) Pluviométrie moyenne annuelle ; (2) Facteur érosivité des pluies R de Wischmeier exprimé en mm ha<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> ; (3) Période de l'expérimentation ; (4) superficie de la parcelle rectangulaire (22 x 3,5 m ou 10 x 1 m) ; (5) LVEd : Latossolos Vermelho-escuro distrofico, LRa : Latossolos Roxo álico ; (6) N : nu ; S : soja ; M : maïs ; P : pâturage (\* *Bracharia decumbens* ; \*\* *Paspalum nonatum*).

**Tableau 4** - Pertes en terre et ruissellement dans plusieurs sites expérimentaux (d'après Leprun et Brossard, 2000).

**Table 4** - Soil loss and water runoff in several experimental plots (after Leprun and Brossard, 2000).

	Pertes en terre (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) (1)	Ruissellement (% P) (2)
SOL NU		
Planaltina	53,00	23,60
Goiânia	46,00	28,90
Iraí de Minas	5,10	4,30
Moyenne	34,70	18,93
Soja conventionnel *		
Planaltina	9,00	14,50
Goiânia	3,50	11,10
Dourados	7,26	5,20
Moyenne	6,59	10,27
Maïs conventionnel *		
Planaltina	29,00	21,30
Goiânia	1,40	8,40
Moyenne	15,20	14,85
PATURAGE		
Planaltina	0,10	1,30
Goiânia	0,07	2,90
Iraí de Minas	0,47	0,01
Moyenne	0,21	1,40

(1) total annuel des pertes en sol par érosion laminaire ; (2) ruissellement total en % de la pluviométrie moyenne annuelle, \* valeur estimée ; préparation conventionnelle du sol : labour à disques suivi de deux passages de déchaumeuse à disques crénelés.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pour son soutien financier à M. Luiz Carlos Balbino lors de son séjour en France, dans le cadre du projet Sols et Pâturages EMBRAPA Cerrados-IRD. Ils remercient également Dr Edson Sano, chercheur de l'Embrapa Cerrados, pour la mise à disposition des cartes climatiques, M. Lefebvre et E. de S. Martins pour leur contribution à la réalisation de la carte des sols.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abreu J.-C., 1975 - Caminhos antigos e povoamento do Brasil (4a. Edição). Editora Civilização Brasileira, Rio de Janeiro-RJ, 156 p.
- Adámoli J., Macedo J., Azevedo L. G., Netto J. M., 1986 - Caracterização da região dos cerrados. In: W.J. Goedert (ed), Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. Planaltina: EMBRAPA-CPAC/São Paulo: Nobel, 33-74.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., 1984 - O Pré-Cambriano do Brasil. Blücher E.E., São Paulo-SP, 378 p.
- Andrade R.P., Karia C.T., 2000 - Uso de Stylosanthes em pastagens no Brasil. In: A.R. Evangelista, T.F. Bernardes, E.C.J. Sales (eds). Simp. de Forragicultura e Pastagens, 1-3 de junho, Lavras-MG, 273-309.
- Assad E.D., Sano E.E., Masutomo R., Castro L.H.R. de, Silva F.A.M. da, 1993 - Veranicos na região dos cerrados brasileiros: frequência e probabilidade de ocorrência. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 28, 993-1002.
- Ayarza M.A., Vilela L., Barcellos A.O., Balbino L.C., Brossard M., Pasini A., 1998 - Intégration culture-élevage dans les Cerrados au Brésil: une solution pour des systèmes durables. Agriculture et développement 18, 91-98.
- Baccaro C.A.D., Silva J.-B., Vieira W.C., Campos C.A.A., Silva G.A., 2000 - Comportamento da ação pluvioerosiva em parcelas com pastagem na microbacia do Córrego da Divisa. In: International Symposium "Soil functioning under pastures in intertropical areas", Brasília, October 16-20, 2000 - CD-rom Embrapa Cerrados/IRD.
- Balbino L.C., Di Stefano J.-G., 1999 - Projet PROCITROPICOS: Intégration de l'agriculture et de l'élevage par les systèmes de semis direct. In: F. Rasolo, M. Raunet (eds). Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Actes de l'atelier international, Antsirabe, Madagascar, 23-28 mars 1998, Anae, Cirad, collection Colloques, 409-417.
- Barbosa A.S., Ribeiro M.B., Schmitz P.I., 1993 - Cultura e ambiente em áreas de Cerrado do sudoeste de Goiás. In: M. Novaes Pinto (org.). Cerrado



- Caracterização, ocupação e perspectivas, Ed. Univ. de Brasília, Brasília-DF, 75-108.
- Barcellos A.O., 1996 - Sistemas extensivos e semi-intensivos de produção: pecuária bovina de corte nos Cerrados. In: Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos cerrados, Anais/ Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the Tropical Savannas, Proceedings. (8° Simpósio sobre o cerrado, 1° International symposium on tropical savannas), EMBRAPA-CPAC, Brasília-DF, 130-136.
- Barcellos A.O., Andrade R.P., Karia C.T., Vilela L., 2000 - Potencial e uso de leguminosas forrageiras dos gêneros *Stylosanthes*, *Arachis* e *Leucena*. In: A. M. Peixoto, C.G.S. Pereira, J.-C. de Moura, V.P. de Faria (eds). Anais do 17° Simp. Sobre manejo da pastagem, Piracicaba-SP, FEALQ, 297-357.
- Barcellos A.O., Vilela L., Lupinacci A.V., 2001 - Produção animal a pasto: desafios e oportunidades. Anais 3o Encontro Nacional do boi verde, A pecuária sustentável. 23-25 agosto de 2001, Uberlândia - MG, Embrapa, ABCZ, CNPC, FAEMG, Sindicato rural de Uberlândia, 27-64.
- Bennema J., Lemos R.C., Vetturs L., 1959 - Latosols in Brazil. In: III Inter-African Soils Conference, Dalaba. I, 273-281.
- Bertran P., 1994 - História da terra e do homem do Planalto Central: Eco-História do Distrito Federal, do indígena ao colonizador. Solo, Brasília-DF, 314 p.
- Beutler A.N., Silva M.L.N., Curi N., Ferreira M.M., Cruz J.-C., Pereira Filho I.A., 2001a - Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos Cerrados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25, 167-177.
- Beutler A.N., Silva M.L.N., Curi N., Ferreira M.M., Pereira Filho I.A., Cruz J.-C., 2001b - Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos Cerrados no estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25, 129-136.
- Blancaneaux P., Freitas P.L., Amabile R.F., Carvalho A., 1993 - Le semis direct comme pratique de conservation des sols des cerrados du Brésil central. Cah. Orstom, sér. Pédologie, XXVIII(2), 253-275.
- Borges E.N., Lombardi Neto F., Corrêa G.F., Borges E.V.S., 1999 - Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho-escuro textura média. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 34(9), 1663-1667.
- Brossard M., Lopes Assad M.L., Chapuis L., Barcellos A.O., 1997 - Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de Cerrados. In: L.L. Leite, C.H. Saito (eds). Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado. Trabalhos selecionados do 3° Congresso de Ecologia do Brasil. Universidade de Brasília, Dep. Ecologia, 272-277.
- Camargo M.N., Kimble J.-M., Beinroth F.H. (eds), 1988 - Classification, characterization and Utilization of Oxisols. Vol 2. Proceedings of the eight international soil classification workshop, Rio de Janeiro, Brazil, 12 to 23 May 1986. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro-RJ, 240 p.
- Carvalho E.J.M., Figueiredo M.S., Costa L.M., 1999 - Comportamento físico-hídrico de um podzólico vermelho-amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 34(2), 257-265.
- Carvalho M.A., 1998 - Retenção de água e outros atributos físicos de agregados de um Latossolo Vermelho-escuro. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 83 p.
- Carvalho S.I.C., Vilela L., Spain J.-M., Karia C.T., 1990 - Recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens* cv. Basilik na região dos Cerrados. Pasturas Tropicales, 12(2), 24-28.
- Castro Filho C., Logan T.J., 1991 - Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. Soil Science Society of America Journal, 55, 1407-1413.
- Castro O.M., Camargo O.A., Vieira S.R., Vasques Filho J., 1999 - Effect of two types of lime on some soil physical attributes of an Oxisol from Brazil. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 30(15-16), 2183-2195.
- Chagas C.S., Curi N., Duarte M.N., Motta P.E.F., Lima J.-M., 1997 - Orientação das camadas de rochas metapelíticas pobres na gênese de Latossolos sob Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 32(5), 539-548.
- Chapuis-Lardy L., 1997 - Réserves et formes du phosphore de sols ferrallitiques sous végétation naturelle de Cerrados et sous pâturages (Brésil). Stabilité du phosphore organique. Thèse doctorat. Université Paris 6, 175 p.
- Corsini P.C., Ferrauto A.S., 1999 - Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 34(2), 289-298.
- Costa F.P., Rehman T., 1999 - Exploring the link between farmers' objectives and the phenomenon of pasture degradation in the beef production systems of Central Brazil. Agricultural Systems, 61, 135-146.
- Curi N., Franzmeier D.P., 1984 - Toposequence of oxisols from the Central Plateau of Brazil. Soil Science Society of America Journal, 48(2), 341-346.
- de Brito Galvão T.C., Schulze D.G., 1996 - Mineralogical properties of a collapsible lateritic soil from Minas Gerais, Brazil. Soil Science Society of America Journal, 60, 1969-1978.
- Dedecek R.A., Resck D.V.S., Freitas Júnior E., 1986 - Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em Latossolo Vermelho-escuro dos Cerrados em diferentes cultivos sob chuva natural. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 10, 265-272.
- Del'Arco J.O., Bezerra P.E.L., 1988 - Geologia. In: Geografia do Brasil Volume I, Região Centro-Oeste, IBGE; Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro-RJ, 35-51.
- Eiten G., 1972 - The Cerrado vegetation of Brazil. The Botanical Review, 38(2), 201-341.
- Eiten G., Sambuichi R.H.R., 1996 - Effect of long-term periodic fire on plant diversity in a Cerrado region. In: R.C. Pereira, L.C.B. Nasser (eds). Anais VIII Simpósio sobre o Cerrado, Embrapa-CPAC, 46-55.
- EMBRAPA / Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1981 - Mapa de solos do Brasil 1:5 000 000. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- EMBRAPA Cerrados, 2000 - II Plano Diretor, 2000-2003. Doc. EMBRAPA Cerrados, Planaltina-DF, n° 15, 32 p.
- EMBRAPA, 1999 - Centro Nacional de Pesquisa de solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Produção de Informação, Embrapa Solos, Brasília-DF.
- Eschenbrenner, V. 1986 - Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, 4, 397-408.
- Ferreira M.M., Fernandes B., Curi N., 1999 - Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades física de Latossolos da região sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 23, 515-524.
- Fontes M.P.F., Gjorup G.B., Alvarenga R.C., Nascif P.G.S., 1995 - Calcium salts and mechanical stress effects on water-dispersible clay of oxisols. Soil Science Society of America Journal, 59, 224-227.
- Fontes M.P.F., Oliveira T.S., Costa L.M., Campos A.A.G., 2000 - Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. Geoderma, 96, 81-99.
- Fontes M.P.F., Weed S.B., 1991 - Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: I. Mineralogy. Soil Science Society of America Journal, 55, 1143-1149.
- Franco A.C., Nardoto G.B., Souza M.P., 1996 - Patterns of soil water potential and seedling survival in the Cerrados of Central Brazil. In: R.C. Pereira, L.C.B. Nasser (eds). Proceedings of the 1st international Symposium on Tropical Savannas. Brasília-DF, Brazil, 24-29 mar. 1996. Embrapa-CPAC, Planaltina-DF, 277-280.
- Fregonezi G.A.F., Brossard M., Guimarães M.F., Medina C.C., 2001 - Transformações morfológicas e físicas de um latossolo argiloso sob pastagens. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25, sous presse.
- Freitas P.L., Blancaneaux P., Gavinelli E., Larré-Larrouy M.-C., Feller C., 2000 - Nível e natureza do estoque orgânico de latossolos sob diferentes sistemas

- de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(1), 157-170.
- Freitas P.L., Blancaneaux P., Moreau R., 1998 - Caractérisation structurale de sols des cerrados Brésiliens (Savanes) sous différents modes d'utilisation agricole. *Etude et Gestion des Sols*, 5(2), 93-105.
- Frizzone J.A., Sobrinho F.C., 1982 - Condutividade hidráulica de um solo de cerrado não saturado - Latossol vermelho escuro alíco. *Científica*, 10(1), 49-56.
- Furley P.A., Ratter J.A., 1988 - Soil resources and plant communities of the central Brazilian cerrado and their development. *Journal of Biogeography*, 15, 97-108.
- Garcia E.A.C., 1995 - Desenvolvimento econômico sustentável do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 30(6), 759-774.
- Goedert W.J., 1967 - Contribuição ao estudo das argilas no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2, 245-258.
- Goedert W.J., 1973 - Cation equilibria in soils of Rio Grande do Sul, Brazil. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, 200 p.
- Goedert W.J., 1987 - Management of acid tropical soils in savannas of South America. In: IBSRAM (International Board for Soil Research and Management). *Management of acid tropical soils for sustainable agriculture: Proceed. of an IBSRAM inaugural workshop*. Bangkok, Thailand, 109-127.
- Grohmann F., 1975 - Porosidade. In: A. C. Moniz (ed). *Elementos de pedologia*, EDUSP, São Paulo-SP, 77-84.
- Guimarães D., 1964. *Geologia do Brasil*. Minist. Minas Energia, D.N.P.M., Rio de Janeiro-RJ, Mem nº1, 674 p.
- Hernani L.C., Kurihara C.H., Silva W.M., 1999 - Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23, 145-154.
- Hernani L.C., Salton J.-C., Fabricio A.C., Dedecek R., Alvas M.J., 1997 - Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21, 667-676.
- Hingston F.J., Posner A.M., Quirk J.P., 1974 - Anion adsorption by goethite and gibbsite. II: Desorption of anions from the hydrous oxide surface. *Journal of Soil Science*, 25, 16-26.
- ISSS Working Group R.B., 1998 - World Reference Base for Soil Resources: Introduction, J.A. Deckers, F.O. Nachtergaele, O.C. Spaargaren (eds). First Ed. International Society of Soil Science (ISSS). ISRIC-FAO-ISSS-Acco. Leuven. 88 p.
- Kämpf N., Resende M., Curi N., 1988 - Iron oxides in brazilian oxisols. In: F.H. Beinroth, M.N. Camargo, H. Eswaran (eds). *Proceeding of the 8th International soil classification workshop, Classification, characterization and utilization of Oxisols*, Embrapa/SMSS/AID/UPR, Rio de Janeiro-RJ, 71-77.
- Kato E., 1995 - Efeito do selamento na condutividade hidráulica saturada da camada superficial de solo sob Cerrado em três condições de manejo. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Agrônômica. 39 p.
- Klamt E., Van Reeuwijk L.P., 2000 - Evaluation of morphological, physical and chemical characteristics of ferral soils and related soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24, 573-587.
- Kluthcouski J., Oliveira I.P., Yokoyama L.P., Dutra L.G., Portes T.A., Silva A.E., Pinheiro B.S., Ferreira E., Castro E.M., Guimarães C.M., Gomide J.-C., Balbino L.C., 1999 - Sistema Barreirão: Recuperação/Renovación de Pasturas Degradadas Utilizando Cultivos Anuais. In: E.P. Guimarães, J.I. Sans, I.M. Rao, M.C. Amézquita, E. Amézquita (eds). *Sistemas Agropastoriles en Sabanas Tropicales de America Latina*, CIAT-Embrapa, 195-231.
- Kondo M.K., Dias Junior M.S., 1999a - Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23, 497-506.
- Kondo M.K., Dias Junior M.S., 1999b - Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23, 773-782.
- Kornelius E., Saueressig M.G., Goedert W.J., 1978 - Pastures establishment and management in the Cerrado of Brazil. In: P.A. Sanchez, L.E. Tergas (eds). *Proceed. Seminar Pasture production in acid soils of the tropics*, 17-21 April 1978, CIAT, Cali, Colombia, 147-166.
- Kouakoua E., Larré-Larrourouy M.-C., Barthès B., Freitas P.L. de, Neves C., Sala G.-H., Feller C., 1999 - Relations entre stabilité de l'agrégation et matière organique totale et soluble à l'eau chaude dans des sols ferrallitiques argileux (Congo, Brésil). *Canadian Journal of Soil Science*, 79, 561-569.
- Leprun J.-C., 1994 - Effets de la mise en valeur sur la dégradation physique des sols. Bilan du ruissellement et de l'érosion de quelques grands écosystèmes brésiliens. *Etude et Gestion du sol*, 1, 45-65.
- Leprun J.-C., Brossard M., 2000 - Balanço das medidas de perdas em terra e água por erosão hídrica em solos cultivados do Cerrado. O papel das pastagens. In: *International Symposium "Soil functioning under pastures in intertropical areas"*, Brasília, October 16-20, 2000 - CD-rom Embrapa Cerrados/IRD.
- Lilienfein J., Wilcke W., Ayarza M.A., Lima S.C., Vilela L., Zech W., 1999 - Annual course of matric potential in differently used savannah Oxisols in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1778-1785.
- Lima J.-M., Anderson S., 1997 - Aggregation and aggregate size effects on extractable iron and aluminum in two hapludoxs. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 965-970.
- Lima J.-M., Anderson S.J., Curi N., 2000 - Phosphate induced clay dispersion as related to aggregate size composition in hapludoxs. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 892-897.
- Lima W.P., Zakia M.J.B., Libardi P.L., Filho A.P.S., 1990 - Comparative evapotranspiration of Eucalyptus, pine and natural Cerrado vegetation measured by the soil water balance method. *Piracicaba International 1:5-11*. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais da ESALQ (IPEF), Piracicaba, São Paulo, Brésil.
- Lopes A.S., 1977 - Available water, phosphorus fixation, and zinc levels in Brazilian Cerrado soils in relation to their physical, chemical, and mineralogical properties. Ph. D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA, 189 p.
- Lopes A.S., 1984 - Solos sob "Cerrado": características, propriedades e manejo. *Associação brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato*, Piracicaba-SP, 162 p.
- Macedo J., 1994 - Prospectives for the rational use of the Brazilian cerrados for food production. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 66 (1), 159-165.
- Macedo J., 1995 - Pastagens no ecossistema Cerrados: pesquisas para o desenvolvimento sustentável. *Anais do Simpósio sobre Pastagens nos ecossistemas brasileiros, XXII Reunião anual da Sociedade Brasileira de Zootécnica*, Brasília-DF, 1-27.
- Macedo J., Bryant R.B., 1987 - Morphology, Mineralogy, and Genesis of a hydrosequence of Oxisols in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 51,690-698.
- Macedo J., Madeira Netto J.-S., 1981 - Contribuição para a interpretação de levantamentos de solos. *Boletim Técnico nº 6*, EMBRAPA/CPAC, Planaltina-DF, 32 p.
- Melatti J. C., 2001 - Índios da América do Sul - Áreas etnográficas, Brasília - DF, Brasil. Document released via internet (<http://www.geocities.com/juliomelatti/ias.htm>), août 2001.
- Melo V.F., Fontes M.P.F., Novais R.F., Singh B., Schaefer C.E.G.R., 2001 - Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25, 19-32.
- Mesquita Filho M.V. de, Torrent J., 1993 - Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). *Geoderma*, 58, 107-123.
- Moraes W.V. 1984 - Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho escuro, submetido a diferentes sistemas de culti-

- vos. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura de Lavras-MG, 107 p.
- Moraes W.V., Corrêa L.A., Ferreira M.M., 1985 - Efeitos de diferentes sistemas de cultivos em algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa. *Ciência Prática*, 9(2), 180-189.
- Motchi E.P., 1977 - Características, gênese e aptidão agrícola de uma sequência de solos no Planalto Central Brasileiro. Tese Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 107 p.
- Muggler C.C., Van Griethuysen C., Buurman P., Pape T., 1999 - Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisols from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science*, 164(10), 759-770.
- Neufeldt H., Ayarza M.A., Resck D.V.S., Zech W., 1999 - Distribution of water-stable aggregates and aggregating in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 93, 85-99.
- Ohba K., 1999 - Determination and simulation of soil moisture dynamics in upland fields in the Cerrados area (Brazil). *JARQ*, 33(4), 251-259.
- Oliveira C.V., Ker J.-C., Duarte M.N., Curi N., Fontes L.E.F., 2000 - Atributos micro-morfológicos de solos do projeto Jaíba, Norte Pesq. de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24, 117-128.
- Oliveira Filho A.T., Shepherd G.J., Martins F.R., Stubblebine W.H., 1989 - Environmental factors affecting physiognomy and floristic variation in an area of Cerrado in central Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, 5, 413-431.
- Oliveira I.P., Kluthcouski J., Yokoyama L.P., Dutra L.G., Portes T.A., Silva A. E., Pinheiro B.S., Ferreira E., Castro E.M., Guimarães C.M., Gomide J.-C., Balbino L.C., 1996 - Sistema Barreirão: Recuperação/renovação de pastagens degradadas em consórcio com culturas anuais. Documentos, 64. EMBRAPA-CNPAP-APA. Goiânia-GO, 90 p.
- Pereira G., Aguiar J. L. P., Moreira L., Bezerra H. S., 1997 - Área e população do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 32(7), 759-763.
- Petri S., Fulfaro V.J., 1983 - Geologia do Brasil (Fanerozoico). Queiroz T.A. (ed). Universidade de São Paulo, Brésil, 631 p.
- Pinheiro-Dick D., Schwertmann U., 1996 - Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. *Geoderma*, 74, 49-63.
- Ribeiro J.-F., Walter B.M.T., 1998 - Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: S.M. Sano, S.P. de Almeida (eds). *Cerrado, ambiente e flora*. Embrapa-CPAC, 87-166.
- Rippstein G., Lascano C., Decaëns T., 1996 - La production fourragère dans les savanes d'Amérique du Sud intertropicale. *Fourrages*, 145, 33-52.
- Rocha C.M.C., Madeira Netto J.-S., 1998 - Recuperation and development of acid soils in the Brazilian "Cerrados". In: Workshop to develop a strategy for collaborative research and dissemination of technology in sustainable crop production in acid savannas and other problem soils of the world. *Proceeding (SI)*. Purdue University, 13-26.
- Rodrigues T.E., 1977 - Mineralogia e gênese de uma sequência de solos dos Cerrados no Distrito Federal. Mestrado Agronomia e Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Sales L.E.O., Ferreira M.M., Oliveira M.S., Curi N., 1999 - Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(11), 2091-2095.
- Sano E.E., Barcellos A. de O., Bezerra H.S., 1999 - Área e distribuição espacial de pastagens cultivadas no Cerrado Brasileiro. s: Boletim de pesquisa n° 3, EMBRAPA Cerrados, Planaltina-DF, 21 p.
- Sans L.M.A., 1986 - Estimativa do regime de umidade, pelo método de Newhall, de um Latossolo Vermelho-escuro álico da região de Sete Lagoas, MG. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 190 p.
- Santos M.N., 1997 - Influencia de diferentes sistemas de manejo nos teores de carbono orgânico e de nutrientes e no tamanho e distribuição de poros em um Latossolo Vermelho-escuro argiloso na região dos Cerrados. Tese de doutorado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Agrônômica. 133 p.
- Savidan Y., Jank J., de Souza F.H.D., Book A., 1985 - Preliminary evaluation of Panicum maximum germplasm in Brazil. In: International agronomy research program. Proc. XVth. Int. Grassl. Congress, Kyoto, Japan, 117-118.
- Sawhney B.L., 1974 - Charge characteristics of soils as affected by phosphate sorption, 38, 159-160.
- Schmitz P.I., 1993 - Caçadores e coletores antigos da região do Cerrado. In: Cerrado. Caracterização, ocupação e perspectivas, Pinto M.N. (Org). Ed. Univ. de Brasília, 109-154.
- Schobbenhaus C., Campos D. de A., Derze G.R., Asmus H.E., 1984 - Geologia do Brasil. Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. D.N.P.M., Rio de Janeiro-RJ, 501 p.
- Seguy L., Bouzinac S., 1999 - Concepts et mise en pratique de modes de gestion agrobiologique, adaptés aux sols acides de la zone tropicale humide. In: F. Rasolo, M. Raunet (eds). *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*. Actes de l'atelier international, Antsirabe, Madagascar, 23-28 mars 1998, Anae, Cirad, collection Colloques, 225-230.
- Seguy L., Bouzinac S., Trentini A., Côtes N.A., 1996 - L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. *Agriculture et développement*, 12, 2-61.
- Shang C., Tiessen H., 1997 - Organic matter lability in a tropical Oxisol: Evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. *Soil Science*, 162(11), 795-807.
- Silva M.L.N., Curi N., Ferreira M.M., Lima J.-M., Ferreira D.F., 1999 - Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(12), 2287-2298.
- Silva M.L.N., Freitas P.L., Blancaneau P., Curi N., Lima J.-M., 1997 - Relação entre parâmetros da chuva e perdas de solo e determinação da erodibilidade de um Latossolo Vermelho-escuro em Goiânia (GO). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21, 131-137.
- Silva V.R., Reinert D.J., Reichert J.-M., 2000 - Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-escuro e de um Podzólico Vermelho-amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24, 239-249.
- Silveira P.M., Silva S.C., Silva O.F., Damaceno M.A., 1994 - Estudo de sistemas agrícolas irrigados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 29(8), 1243-1252.
- Spain M.J., Ayarza M.A., Vilela L., 1996 - Crop pasture rotations in the Brazilian Cerrados. In: R.C. Pereira, L.C.B. Nasser (eds). *Proceedings VIII Simpósio sobre o Cerrado*, 24-29 março de 1996, EMBRAPA-CPAC, Brasília-DF, 39-45.
- Spera S.T., Reatto A., Correia J.-R., Silva J.C.S., 2000 - Características de um Latossolo Vermelho-escuro no Cerrado de Planaltina, DF, submetido à ação do fogo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(9), 1817-1824.
- Stone L.F., Silveira P.M., 1978 - Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho-amarelo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 13(4), 63-71.
- Stone L.F., Silveira P.M., Zimmermann F.J.P., 1994 - Características físico-hídricas e químicas de um latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18, 533-539.
- Stoner E.R., Freitas E., Macedo J., Mendes R.C.A, Cardoso I.M., Amabile R.F., Bryant R.B., 1991 - Physical constraints to root growth in savanna Oxisols. *TropSoils Bulletin* No 91-01. North Carolina State University, Raleigh, 28 p.
- Taunay A.E., 1951 - História das bandeiras paulistas (2 volumes). Ed. Melhoramentos, São Paulo - SP, 364 p.
- Tavares Filho J., Tessier D., 1997 - Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sols du Paraná (Brésil). *Etude et Gestion des sols*, 5(1), 61-71.
- Vettori L., 1969 - Métodos de análise de solos. DNPA, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, Rio de Janeiro-RJ, Boletim Técnico n° 7, 24 p.
- Volkoff B., 1985 - Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. *Chronologie des différenciations*. Cah. Orstom, sér. Pédologie, XXI, 225-236.
- Volpe E., 1998 - Sistemas de recuperação direta de Brachiaria decumbens cv. Basilisk, em Latossolo Vermelho-escuro, na região dos Cerrados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. 126 p.

Waniez P., 1992 - Les Cerrados, un "espace frontière" brésilien. G.I.P. RECLUS-ORSTOM, Montpellier, 344 p.

Westerhof R., Buurman P., Van Griethuysen C., Ayarza M., Vilela L., Zech W., 1999 - Aggregation studied by diffraction in relation to plowing and liming in the Cerrado region in Brazil. *Geoderma*, 90, 277-290.

Wolf J.-M., 1975 - Soil-water relations in Oxisols of Puerto Rico and Brazil. *In*: E. Bormemisza, A. Alvarado (eds). *Soil Management in Tropical America*,

Raleigh, North Carolina State University, 145-154.

Yoder R.E., 1936 - A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion. *Journal of the American Society of Agronomy*, 28, 337-351.

Zimmer A.H., Correa E.S., 1993 - A Pecuária Nacional, uma pecuária de pasto ? *In*: Encontro sobre recuperação de pastagens, Anais, Instituto de Zootecnia, Nova Odessa-SP, 1-25.