

Caractérisation des sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) sous différents systèmes de gestion dans le cadre de l'analyse morpho-structurale

FREITAS Pedro Luiz de¹, BLANCANEUX Philippe², MOREAU Roland³

¹ Ingénieur Agronome, Ph.D.; Chercheur EMBRAPA / C N P S (Centre des Recherches Agronomiques des Sols),
Rio de Janeiro, RJ, Brésil, actuellement dans un programme de post-doctorat à ORSTOM/L C S C, Montpellier, France.

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

³ Ingénieur Agronome, Pédologue, Chercheur ORSTOM / L C S C ; 911, av. Agropolis; B.P. 5045;
34032, Montpellier, France.

RESUME

Les Latossolos (sols ferrallitiques fortement desaturés) sont les sols les plus fréquents et les plus utilisés des Cerrados Brésiliens, avec une potentialité élevée pour l'agriculture mécanisée intensive. La durabilité de l'exploitation agricole dans cette région dépend de l'adoption de systèmes de gestion alternatifs. L'évaluation de ces systèmes doit s'appuyer sur la mise en oeuvre d'approches méthodologiques, comme l'analyse morpho-structurale, permettant, en particulier, la caractérisation de l'état structural du sol. L'analyse morpho-structurale permet l'identification des différents horizons pédologiques et la caractérisation des unités pédologiques homogènes (UPH), qui résulte de l'activité anthropique et sont directement liées à l'action des outils agricoles.

Une série de résultats et quelques corrélations obtenues à partir de l'évaluation de différents systèmes de gestion du sol, dans le cadre d'un travail basé sur l'analyse morpho-structurale, sont présentées. Ce travail résulte d'une coopération entre l'EMBRAPA/CNPS et l'ORSTOM, concernant l'étude des facteurs et mécanismes de modification de la structure des Latossolos des Cerrados Brésiliens. On y considère différentes situations comprenant une parcelle sous végétation naturelle anthropisée (CER), une parcelle sous pâturage cultivé de longue durée (PAL) et deux parcelles expérimentales (succession maïs/haricot), correspondant à un système de gestion conventionnel (CCL) et un système de gestion alternatif par semis direct (PD).

L'analyse morpho-structurale permet de mieux préciser l'évolution du sol d'après la variation des caractères d'organisation morphologique et d'observer les effets des différents systèmes de gestion du sol, d'après la caractérisation de l'espace poral, des propriétés structurales et de la stabilité des agrégats à l'eau. Nous avons observé une macro-structure très fragile du sol sous végétation naturelle (CER) et une meilleure définition macro-structurale sous culture, du fait d'une netteté plus grande et d'une cohésion d'ensemble plus forte.

L'application de l'analyse morpho-structurale peut être considérée comme un outil de diagnostic pour appréhender l'impact de systèmes de gestion du sol et pour identifier les processus de dégradation structurale du sol. Cette approche apparaît très utile pour mieux évaluer et comparer les effets des systèmes de gestion du sol, en réalisant les recherches chez les agriculteurs ou en stations expérimentales. Elle constitue un moyen approprié et indispensable à l'étude des indicateurs de durabilité des systèmes agro-sylvo-pastoraux.

Mots-Clés: Analyse Morpho-structurale - Unités Pédologiques Homogènes
Cerrados (Savanes) - Brésil - Systèmes de gestion du sol
Cohésion - Espace Poral - Propriétés structurales - Stabilité

INTRODUCTION

Avec 2 millions de km², la région des Cerrados du Brésil représente approximativement un quart de la superficie du territoire brésilien. La majeure partie de cette région possède un climat caractéristique d'une région tropicale sub-humide, avec une précipitation moyenne annuelle de 1 500 mm, répartie entre les mois d'octobre et d'avril. Les Latossolos (sols ferrallitiques fortement desaturés) sont les sols les plus fréquents et les plus utilisés dans cette région. Ce sont des sols très évolués, de faible capacité d'échange cationique (CEC), d'acidité élevée, de forte capacité d'adsorption du phosphore et, en conséquence, de faible fertilité naturelle (Blancaneaux et al., 1994a). La culture de ces sols est possible après correction des déficiences chimiques par chaulage et fertilisation (N, P, K + oligo-éléments).

Dans les zones non exploitées, ces sols présentent des caractéristiques favorables: profondeur, friabilité, porosité, aération et drainage, qui, outre le relief peu accentué, leur confèrent une potentialité élevée pour l'agriculture mécanisée intensive. Toutefois, à la suite de la mise en culture, apparaissent des modifications du sol qui se manifestent par une dégradation structurale très importante, une diminution de la teneur en matière organique et une évolution défavorable des propriétés physico-hydriques. Ces modifications conduisent à une augmentation de la susceptibilité à la compaction ou tassement, à la pulvérisation, au ruissellement et à l'érosion (Freitas, 1994). Les systèmes de gestion conventionnels, utilisés dans les Cerrados, sont tenus comme responsables d'une réduction importante du rendement des cultures installées (Goedert et Lobato, 1986). Cette réduction résulte de l'utilisation intensive et continue des mêmes outils agricoles, presque toujours inappropriés pour le travail des ces sols ferrallitiques tropicaux.

L'adoption de systèmes de gestion alternatifs, comme le semis direct, associé à d'autres pratiques agro-écologiques (rotation des cultures, utilisation d'engrais verts ou cultures de couverture, lutte antiparasitaire intégrée, contrôle intégré des herbes, conduite rationnelle du pâturage, etc.) a été présentée comme option afin d'assurer la durabilité de l'utilisation agricole dans cette région (Freitas et Blancaneaux, 1991). Pour rendre viable l'utilisation de pratiques agro-écologiques alternatives, il est nécessaire de perfectionner les techniques de fertilisation, de chaulage, de lutte antiparasitaire et d'améliorer les systèmes de plantation et de couverture du sol. L'évaluation de ces systèmes alternatifs doit s'appuyer sur la mise en oeuvre d'approches méthodologiques devant prendre aussi en compte la différenciation de l'état structural du sol. Freitas *et al.* (1996) ont proposé l'analyse morfo-structurale comme un outil nécessaire à l'étude des effets de l'utilisation des sols ferrallitiques des Cerrados, à partir de la caractérisation morphologique de l'état structural, considéré comme un indicateur de durabilité des systèmes de gestion. Cette approche permet aussi de rationaliser le prélèvement d'échantillons et les déterminations chimiques, physiques et biologiques réalisées sur le terrain et au laboratoire, en se référant à un contexte organisationnel du sol bien défini.

L'approche morfo-structurale s'inscrit dans un contexte agropédologique bien défini à l'échelle locale, visant à mieux apprécier l'impact des activités humaines sur le milieu (dégradation, amélioration, préservation) et les conséquences sur la durabilité des systèmes de gestion des cultures. Un tel contexte se définit, en particulier, d'après la variation des composantes climatiques, la différenciation des couvertures pédologiques, l'état d'occupation et d'évolution des sols. (Moreau, 1993).

La méthode de l'analyse morfo-structurale a été adaptée et proposée pour l'étude des sols des Cerrados Brésiliens par Blancaneaux *et al.* (1991) à partir des méthodes de description du profil pédologique et du profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987). Elle se fonde sur l'identification des différents horizons

(pédologiques ou anthropisées) qui comprennent une ou plusieurs *unités pédologiques homogènes*¹ (UPH), correspondant à des ensembles bien définis d'éléments structuraux. La caractérisation de ces unités est faite à partir de l'examen macro-morphologique des profils représentatifs des différentes situations de gestion du sol, en considérant notamment l'état structural, l'activité biologique, le développement et l'orientation des racines. Les caractéristiques des UPH résultent de l'activité anthropique et sont liées directement à l'action de divers outils agricoles. L'analyse est complétée par différentes mesures sur le terrain (pénétration, infiltration de l'eau et profil hydrique) et diverses déterminations physiques, chimiques et biologiques réalisées au laboratoire, sur échantillons représentatifs des UPH identifiées (Blancaneaux *et al.*, 1994b).

Nous présenterons ici une série de résultats et quelques corrélations obtenues à partir de la caractérisation de l'état structural des sols pour différentes situations de référence, dans le cadre d'une étude basée sur l'analyse morpho-structurale. Ce travail résulte d'une coopération entre l'EMBRAPA/CNPS et l'ORSTOM, concernant l'étude des facteurs et mécanismes de modification de la structure des Latossolos (sols ferrallitiques) des Cerrados Brésiliens. Ces études ont porté sur l'observation et la comparaison entre différents systèmes de gestion des cultures et, en particulier, de préparation du sol (Blancaneaux et Freitas, 1995).

MATERIEL ET METHODES

L'étude porte sur un sol ferrallitique très désaturé, argileux et rouge sombre ("Latossolo Vermelho-Escuro argiloso distrófico, relevo suave ondulado") développé sur la couverture détrito-lateritique du quaternaire, sous végétation de cerrado (savane arborée). Quatre situations représentatives des systèmes de gestion de sol des cerrados sont comparées:

A) sites représentatifs des situations en équilibre sous végétation pérenne:

1. Cerrado (C E R): sous végétation naturelle anthropisée, "campo-cerrado" ou savane arborée ouverte après un défrichement sélectif, avec l'introduction de bovins pendant la saison sèche (Station Expérimentale F.M.Carneiro de l'EMGOPA à Goiânia).
2. Pâturage Cultivé longue durée (P A L): *Brachiaria brizanthae*, renouvelé depuis cinq ans, avec une gestion rationnelle évitant sa dégradation (Station Expérimentale de Zootechnie de l'EMGOPA à Senador Canedo, Goiás).

B) parcelles expérimentales sous cultures avec différents systèmes de travail du sol; succession de deux cycles annuels de maïs pluvial (*Zea mays*) / haricot irrigué (*Phaseolus vulgaris*) depuis cinq ans²:

1. Culture Conventiennelle Longue Durée (C C L): labour à pulvérisateur offset "cover-crop" travaillant sur 15 cm, suivi d'un double passage de pulvérisateur à disque niveleur (5 à 10 cm), avec incorporation d'herbicide non-sélectif (trifluraline);
2. Plantio Direto (P D): semis direct sur résidus de la culture précédente et application d'herbicide non sélectif, avant semis.

Pour la caractérisation du sol sur le terrain, nous avons utilisé l'analyse morpho-structurale (Blancaneaux *et al.*, 1994b) faite à des endroits choisis en fonction de leur représentativité pour chaque situation considérée.

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

² dispositif expérimental décrit par Blancaneaux et Freitas (1995).

Pour **CER** et **PAL** les observations ont été réalisées en octobre, 1994. Pour les parcelles expérimentales (**CCL** et **PD**) les observations ont été réalisées sur culture de haricot, en août, 1994. Cette approche a permis l'identification des horizons pédologiques et la description et caractérisation des UPH. La résistance à la pénétration a été mesurée horizontalement avec un pénétromètre de poche à aiguille conique type Yamanaka (DAIKI push-cone, mod. DIK-5551) (Moreau et Nagumo, 1995).

Les échantillons ont été prélevés sur l'UPH la plus représentative de chaque horizon pédologique identifié et les déterminations suivantes ont été réalisées:

- densité apparente et courbe pF sur cylindres de 100 cm³ (pF 1,78; 2,00; 2,52; 3,00; 3,48 et 4,18;
- courbe de retrait du sol, sur échantillons cylindriques de 50 cm³ (Braudeau, 1993),
- intrusion de mercure sur échantillons de 2 à 3 cm³, déshydratés à l'étuve à 105 °C (Porosimètre Micrométrics - Pore Sizer 9310).
- distribution des agrégats stables, sur agrégats de 4 à 8 mm de diamètre (Freitas et Blancaneaux, 1994 d'après Kemper, 1965).

Les déterminations ont été faites dans les Laboratoires du CNPS/EMBRAPA, à Rio de Janeiro, de l'EMGOPA, à Goiânia (Brésil), et dans les laboratoires de l'ORSTOM, à Montpellier et à Bondy, et du CIRAD, à Montpellier (France).

Prof. cm	pH cm	pH KClN	Al	H+Al	Ca+Mg	K	S	CEC7	S/T %	P ppm	C %	N %	C/N	SABLE		ARG. %	ARG. %	ACIDE TRIACIDE				
														GROS	FIN			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ti ₂ O ₃	
1. CER (végétation naturel anthropisée de "Cerrado")																						
0-10	5.5	4.2	0.6	6.4	0.8	0.29	1.2	7.6	16	<1	2.26	0.16	14.1	9	25	20	46	30	5.2	18.8	9.1	1.44
10-20	5.2	4.2	0.6	4.9	0.3	0.12	0.5	5.4	9	<1	1.96	0.13	15.1	9	26	19	46	33	5.0	19.7	9.2	1.44
20-40	5.4	4.3	0.4	4.0	0.3	0.09	0.4	4.4	10	<1	1.37	0.11	12.5	7	25	18	50	38	7.0	20.9	10.1	1.43
40-60	5.4	4.6	0.0	2.6	0.3	0.06	0.4	3.0	13	<1	1.07	0.08	13.4	6	25	19	50	0	7.8	21.5	10.0	1.41
60-80	5.5	4.9	0.0	2.0	0.3	0.04	0.4	2.4	16	<1	1.01	0.07	14.4	6	25	18	51	0	5.7	19.6	10.1	1.51
80-100	5.6	5.2	0.0	1.6	0.3	0.04	0.4	2.0	20	<1	0.80	0.06	13.3	6	25	18	51	0	6.7	21.6	10.4	1.53
2. PAL (Pâturage Longue Durée)																						
0-10	5.9	4.8	0.8	3.5	1.0	0.79	1.8	5.3	34	2	2.20	0.16	13.8	11	37	16	36	32	7.6	13.7	9.1	1.29
10-20	5.4	4.6	0.6	3.2	0.5	0.32	0.8	4.0	21	1	1.61	0.10	16.1	11	34	17	38	31	8.0	15.4	9.6	1.23
20-40	5.4	4.8	0.4	2.2	0.4	0.22	0.6	2.8	22	1	1.08	0.08	13.5	9	35	15	41	29	8.1	17.3	10.0	1.25
40-60	5.6	5.2	0.0	1.7	0.2	0.15	0.4	2.1	17	1	0.96	0.07	13.7	9	33	17	41	0	8.2	17.3	9.9	1.32
60-80	5.7	5.6	0.0	1.2	0.2	0.16	0.4	1.6	24	<1	0.83	0.05	16.6	9	34	16	41	0	8.7	17.3	10.7	1.36
80-100	5.8	5.7	0.0	1.0	0.1	0.15	0.3	1.3	21	<1	0.69	0.05	13.8	8	33	18	41	0	8.4	17.2	10.2	1.24
3. CCL (Culture Conventiennelle Longue Durée)																						
0-10	5.2	4.4	0.0	5.1	1.1	0.46	1.6	6.7	24	30	2.14	0.15	14.3	9	26	15	50	33	8.0	20.2	12.1	1.79
10-20	4.7	4.2	0.0	4.7	0.7	0.24	1.0	5.7	17	11	1.94	0.11	17.6	9	25	18	48	33	8.2	19.5	11.4	1.77
20-40	4.9	4.4	0.0	3.3	0.4	0.18	0.6	3.9	15	1	1.39	0.09	15.4	7	27	14	52	0	7.3	18.1	12.3	1.78
40-60	5.1	4.6	0.0	2.6	0.4	0.18	0.6	3.2	18	1	1.03	0.07	14.7	8	26	15	51	0	8.3	20.7	11.8	1.86
60-80	5.4	5.2	0.0	1.9	0.5	0.13	0.6	2.5	25	<1	0.83	0.06	13.8	7	27	14	52	0	8.2	20.1	12.2	1.88
80-100	5.7	5.6	0.0	1.3	0.5	0.14	0.7	2.0	33	1	0.67	0.06	11.2	7	28	13	52	0	8.7	20.8	12.6	1.70
4. PD (Semis Direct)																						
0-10	5.3	4.5	0.0	5.3	3.0	0.59	3.8	9.1	41	43	2.17	0.15	14.5	9	25	15	51	40	6.0	21.3	11.9	1.97
10-20	5.2	4.5	0.0	5.1	1.6	0.29	2.0	7.1	28	13	1.81	0.12	15.1	8	24	17	51	4	5.5	22.9	12.0	1.89
20-40	5.2	4.5	0.0	3.4	1.2	0.17	1.4	4.8	30	<1	1.42	0.09	15.8	7	23	19	51	4	4.3	24.1	12.3	1.84
40-60	5.4	4.9	0.0	2.4	0.7	0.10	0.8	3.2	26	<1	1.09	0.07	15.6	5	24	16	55	0	4.2	24.0	12.1	1.78
60-80	5.4	4.9	0.0	2.4	1.1	0.11	1.2	3.6	34	<1	0.87	0.06	14.5	6	24	17	53	0	4.9	25.0	12.4	1.86
80-100	6.0	5.7	0.0	1.5	1.1	0.15	1.3	2.8	47	<1	0.83	0.05	16.6	6	23	18	53	0	4.8	25.2	12.4	1.84

prélevement réalisé dans l'hiver 1994 pour les situations CER et PAL, et dans l'été 93/94 pour les situations CCL et PD (culture de maïs).

méthodes:

Acidité potentielle (H+Al): déterminée à pH 7,0 avec acétate de calcium (CNPS/Rio)

Ca, Mg et Al: déterminées avec KCl N (CNPS/Rio)

Kéchangeable et Passimilable: solution de HCl 0,05 N + H2SO4 0,025 N (CNPS/Rio)

CEC7: somme de cations échangeables et acidité potentielle

Carbone Total: Déterminé par combustion - LECO CHN-600 Elemental Analyser (ORSTOM/LCSC, Montpellier)

Azote: digestion au sulfate de Na et Cu, digestion par volumétrie et distillation (CNPS/Rio)

Granulométrie: dispersion avec NaOH et agitation mécanique (CNPS/Rio)

Tableau 1. Caractéristiques chimiques et physiques du sol pour les quatre situations considérées

Les caractéristiques analytiques du sol, déterminées sur échantillon composite (neuf prises élémentaires) pour chaque situation (Tableau 1), nous permettent de faire les observations suivantes:

- texture argileuse sous les différentes situations (50 % d'argile), avec une teneur sensiblement plus faible pour **PAL** (40 %);
- variation de pH avec la profondeur: augmentation légère du pH (eau) et plus forte de pH KCl;
- valeurs faibles d'acidité potentielle (à pH 7,0), des bases échangeables et de CEC, avec une importante diminution avec la profondeur;
- teneurs en carbone total très comparables: entre 2,17 et 2,26 % en surface (0 à 10 cm);
- teneurs en SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ et Ti₂O₃ du même ordre de grandeur, indiquant une minéralogie comparable dans les différents profils.

RESULTATS ET DISCUSSION

La description morpho-structurale des différents horizons pédologiques (Tableau 2) permet de mettre en évidence l'état d'évolution du sol sous pâturage et sous culture, par comparaison avec le sol sous végétation naturelle (**CER**). Dans cette situation témoin, on constate une macro-structure très fragile, avec une faible cohésion d'ensemble et une faible netteté des éléments structuraux identifiés, qui caractérise la fragilité structurale du sol; par contre, le sous-structure granulaire est très nette. On observe une meilleure définition macro-structurale (cohésion d'ensemble, netteté et stabilité des éléments structuraux) sous pâturage (**PAL**). Des caractéristiques de dégradation structurale (très forte cohésion d'ensemble et forte résistance à la pénétration dans l'horizon *AB*) se manifestent avec le système de gestion conventionnel (**CCL**). Le système de gestion alternative de semis direct (**PD**) apparaît comme une possibilité d'amélioration de l'état structural du sol dû à une macro-structure très nette (polyédrique sub-anguleuse, avec cohésion d'ensemble modérée et une faible résistance à la pénétration) observée jusqu'à 32 cm.

Les aspects morpho-structuraux observés sur le terrain pour les quatre systèmes de gestion considérés suggèrent une modification de l'espace poral, qui détermine la dynamique de l'eau et la croissance des racines. Nous avons affiné ces observations pour mieux caractériser l'espace poral des UPH les plus importantes dans les horizons existants. Cette caractérisation a été faite selon différentes méthodes qui permettent d'étudier en détail la distribution des différentes classes de taille de pores, en relation avec leurs fonctions. L'analyse de la courbe de retrait a également permis d'apporter des éléments de caractérisation complémentaire des propriétés structurales.

Densité apparente et courbe pF

La densité apparente, la porosité totale et la distribution de pores, déterminée d'après la courbe pF, sont présentées à la figure 1. On constate, sur la situation **CER**, une augmentation de densité apparente de la profondeur vers la surface, en concordance avec les modifications observées pour la sous-structure (granulaire en *BA* et *Bw* et sub-anguleuse et granulaire en *A₂*). Cette augmentation traduirait un effet de densification peut-être causé par l'action anthropique et par le piétinement des animaux sur le site, pendant la saison sèche, sans augmentation de cohésion (résistance à la pénétration maximum: 5 kg/cm²). Les horizons caractérisés dans la situation sur pâturage (**PAL**) sont plus denses, ce qui suggère une densité d'équilibre plus élevée, en rapport avec la texture légèrement plus sableuse. Dans les situations cultivées (**CCL** et **PD**), on constate une densification des horizons les plus affectés par le travail du sol (*AB* en **CCL** et *Ap₂* en **PD**). Dans ces

Situation de référence	CER		PAL		CCL		PD	
	CERRADO		PATURAGE LONGUE DUREE		GESTION CONVENTIONNELLE		GESTION ALTERNATIVE	
Couverture	Végétation Naturelle Anthropisée		<i>Brachiaria brizantha</i>		Haricot irrigué (<i>Phaseolus vulgaris</i>)		Haricot Irrigué (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	
Horizons	I	A ₁ 0 - 8 cm	Ap ₁ 0 - 5 cm	Ap ₁ 0 - 5 cm	Ap ₁ 0 - 5 cm	Ap ₁ 0 - 8 cm		
	II	A ₂ 8 - 30 cm	Ap ₂ 5 - 25 cm	Ap ₂ 5 - 12 cm	Ap ₂ 5 - 12 cm	Ap ₂ 8 - 25 cm		
	III			AB ¹ 12 - 30 cm	AB ¹ 25 - 32 cm			
	IV	BA 30 - 56 cm	BA 25 - 45 cm	BA 30 - 50 cm	BA 32 - 55 cm			
	V	Bw 56 - 100 cm	Bw 45 - 100 cm	Bw 50 - 100 cm	Bw 55 - 100 cm			
Taches	dans A ₂ (concentration de matière organique)				dans AB (mélange de Ap ₂ et BA)		dans AB (mélange de Ap ₂ et BA) et BA (matière organique localisée)	
Type de structure ²	I	Grumeleuse (très nets, individualisés)	Grumeleuse (très nets, individualisés)	Pol. sub-anguleuse [grumeleuse] et grumeleuse	Pol. sub-anguleuse [grumeleuse] et grumeleuse			
	II	Pol. sub-anguleuse (peu net) [sub-anguleuse granulaire]	Pol. sub-anguleuse (net) [sub-anguleuse]	Pol. sub-anguleuse (très net) [sub-anguleuse]	Pol. sub-anguleuse (très net) [sub-angul / anguleuse]			
	III			Pol. anguleuse (très net) [anguleuse]	Pol. sub-anguleuse (très net) [granulaire]			
	IV	Pol. sub-anguleuse (peu net) [granulaire]	Pol. sub-anguleuse (nette) [granulaire]	Pol. sub-anguleuse (très net) [granulaire]	Pol. sub-anguleuse (net) [granulaire]			
	V	Pol. sub-anguleuse (peu net) [granulaire]	Pol. sub-anguleuse (peu net) [granulaire]	Pol. sub-anguleuse (peu net) [granulaire]	Pol. sub-anguleuse (peu net) [granulaire]			
Porosité	très poreux. pores fins/moyens dans A ₁ et A ₂ ; fins dans BA et Bw (racines et act. biologique)		très poreux. pores fins/moyens dans Ap ₂ (racines) et BA. fins dans Bw		très poreux en Ap ₁ et Ap ₂ . poreux dans AB (pores fins/moyens-act biolog.); très poreux dans BA et Bw		très poreux. pores fins/moyens, jusqu'à 32 cm (activ. biologique). pores fins au dessous	
Racines	nombreuses et horizontales jusqu'à 30 cm. communes, fines moyennes et verticales au dessous		très nombreuses, verticales/horizontales jusqu'à 25 cm. communes, fines et verticales au dessous		nombreuses et horizontales jusqu'à 12 cm (concentré sur la ligne de semis); peu, fines et verticales dans AB (dans fissures)		nombreuses et verticales jusqu'à 25 cm; communes, fines et verticales dessous (nodulation forte)	
Matière Organique	abondante, détritiques (racines) et humifiée jusqu'à 30 cm. commune, humifiée et localisée au dessous		abondante, humifiée ou détritiques (racines) jusqu'à 25 cm, humifiée et localisée au dessous		abondante, détritiques et humifiée jusqu'à 12 cm. très peu et humifiée au dessous		abondante (détritiques) en surface; abondante humifiée jusqu'à 32 cm.	
Activité Biologique	très forte jusqu'à 8 cm, forte jusqu'à 56 cm et moyenne au dessous		très forte jusqu'à 25 cm. forte et localisée au dessous		moyenne/forte jusqu'à 12 cm; faible au dessous		très forte jusqu'à 70 cm	
Observations compacité	horizons peu compacts		horizons peu compacts		horizons peu compacts, sauf dans AB (forte cohésion) (12 à 30 cm)		peu compacts, sauf dans AB (cohésion modérée) (25 à 32 cm)	
sur l'enracinement	concentration dans A ₁ et A ₂		chevelue dans Ap ₁		concentration sur la ligne de semis		nodulation forte	
générales	macro-structure très fragile dans le profil.		macro-structure dans BA et Bw très fragile		mottes tassés dans Ap ₂			
variation latérale	sans variation latérale		sans variation latérale importante		variation latérale due à la ligne de semis		variation latérale due à la ligne de semis	
Résistance à la pénétration ³	Valeur H _v		Valeur H _v		Valeur H _v		Valeur H _v	
	I	3,5 32 (24)	6,8 34(34)	8,2 34 (35)	20,1 34 (35)			
	II	5,0 30 (32)		90,3 33 (35)	8,8 36 (36)			
	III			28,3 30 (36)				
	IV	13,0 22 (28)	11,8 28 (33)	5,4 30 (29)				
V	7,3 30 (33)							

¹ constitue un horizon Ap₂H (ancien horizon labouré)

² annotation de type (gras) et netteté (entre parenthèses) des éléments structuraux, type de sous-structure [entre crochets]

³ valeur moyenne de cinq déterminations en kg cm³ et humidité volumétrique (H_v) en cm³ H₂O / 100 cm³ sol
(H_v à la capacité au champ - pF 2,52 - entre parenthèses)

Tableau 02 . Description morphostructurale des différents horizons pour les quatre situations considérées.

situations, les caractéristiques de micro-agrégation des sols ferrallitiques permettent néanmoins de maintenir une porosité totale au-dessus de 49 % en volume, avec une microporosité représentant de 20 à 30 % du volume du sol.

La distribution de taille de pores, déterminée d'après les différentes valeurs de pF sélectionnées, montre la variation de volume de vides selon quatre classes de diamètre (Figure 1):

1. microporosité: pores de diamètre inférieur à 0,2 μm (pF 4,18);
2. mésoporosité: pores de 0,2 à 9 μm (pF 2,52) qui comprend l'eau disponible mesurée entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent;
3. macroporosité fine: pores de 9 à 50 μm (pF 1,78), responsable du drainage lent;
4. macroporosité grossière: pores de diamètre supérieur à 50 μm , responsable du drainage rapide et de l'aération.

En comparant les horizons supérieurs (A_2/CER , A_{p2}/PAL , AB/CCL et A_{p2}/PD) aux horizons de profondeur (BA), la distribution montre que la microporosité est sensiblement plus importante dans les horizons supérieurs qu'en profondeur; la différence n'excède pas 5 % en volume du sol. La mésoporosité et la macroporosité fine représentent les classes de porosité les plus réduites (10 à 15 %) et ne varient que faiblement; on relève toutefois une tendance à l'augmentation de la surface vers la profondeur, en particulier pour les situations **CCL** et **PD**.

La macroporosité grossière, qui occupe 10 à 20 % du volume du sol (30 % en **CER**), montre les variations les plus importantes, avec une augmentation nette de 5 à 15 % entre les horizons supérieurs et profonds; cette augmentation est, toutefois, plus réduite en **PAL** ($\approx 2,5$ %).

En considérant les différents systèmes de gestion on note que, pour les horizons de profondeurs équivalentes, les volumes de porosité totale et de macroporosité sont supérieures dans la situation témoin **CER**, par rapport aux situations **PAL**, **CCL** et **PD**; tandis que les résultats sont à l'inverse pour la densité apparente et la microporosité. On constate que la macroporosité est la plus réduite dans les horizons supérieurs de **CCL** et **PD**, respectivement 14,4 et 14,1 %. Ce volume macroporal ne se traduit par aucune marques de restriction d'aération et de ruissellement sur le terrain. Le développement racinaire se trouve, par contre, très réduit en AB/CCL et plus normal en A_{p2}/PD .

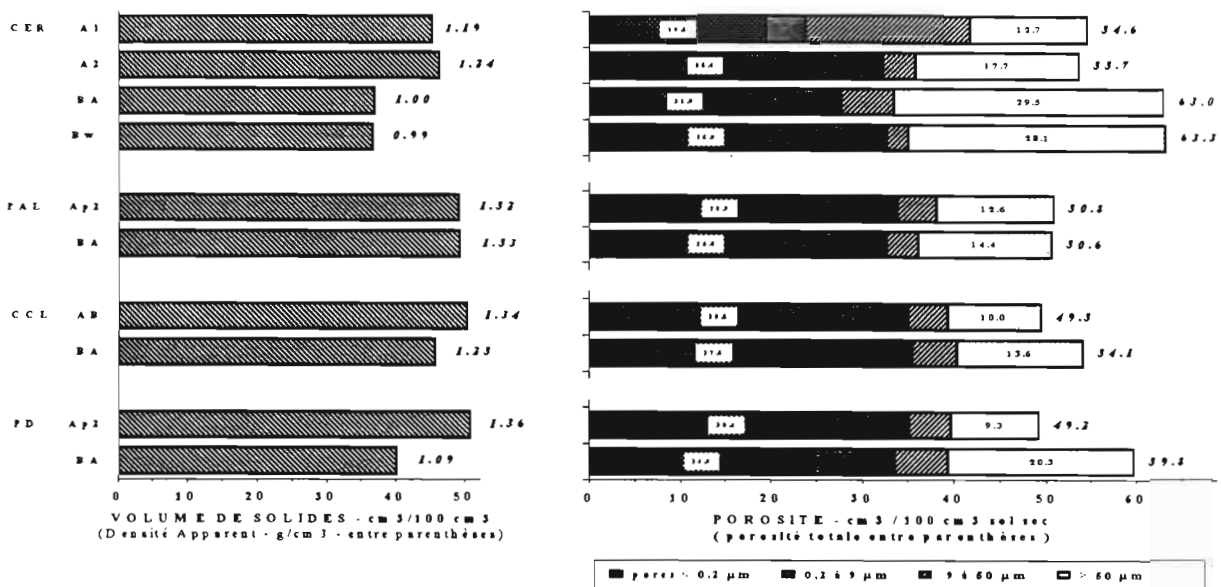


Figure 1. Volumes des solides, densité apparente et distribution de taille de pores, mesurée dans les horizons sélectionnés, d'après le courbe pF

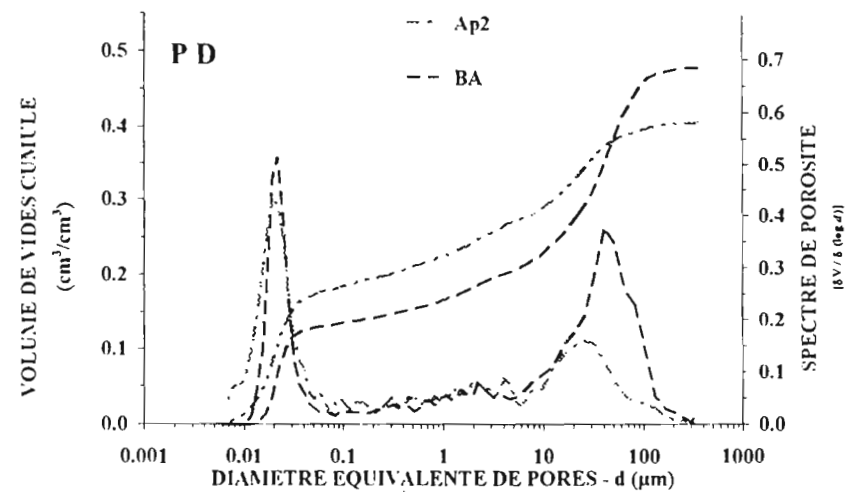
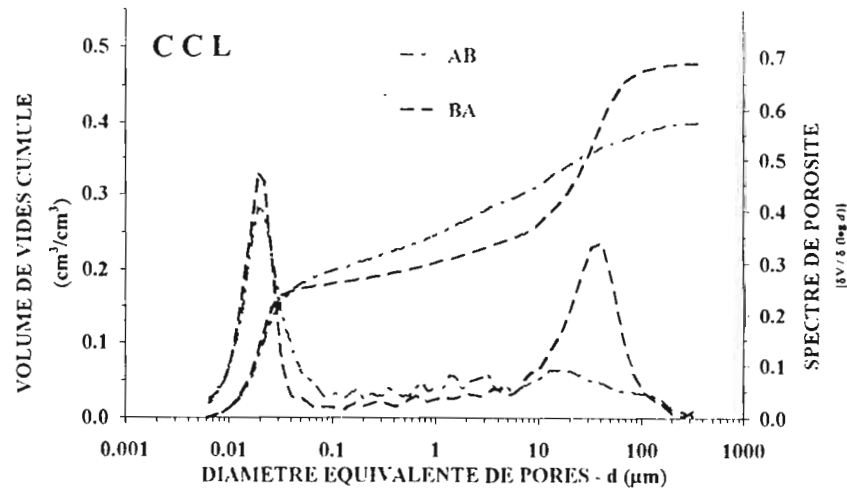
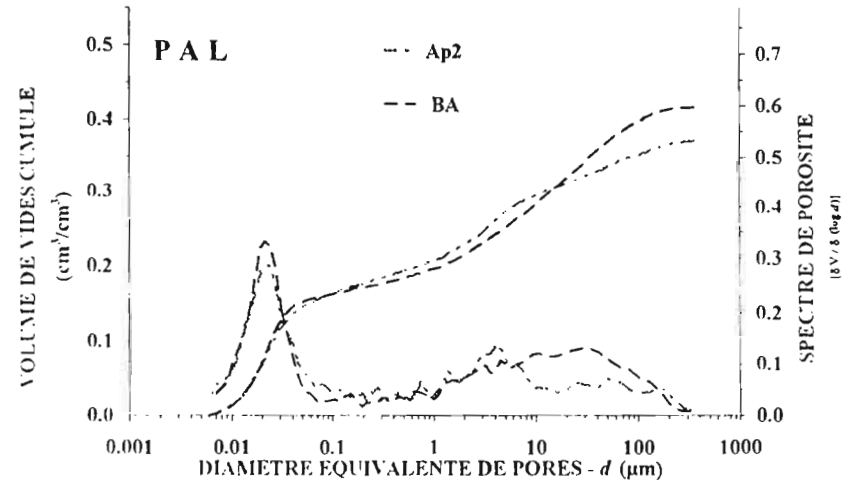
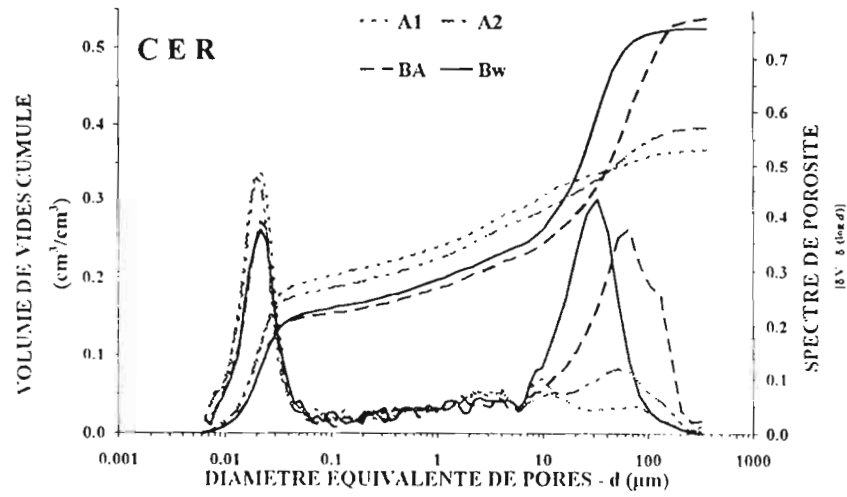


Figure 2. Distribution de l'espace poral en cm³ / cm³ d'échantillon, obtenu avec le technique d'intrusion de mercure

Porosimétrie au mercure

La technique d'intrusion de mercure permet de caractériser l'espace poral à partir des courbes de volume de vides cumulé et du spectre de porosité dérivé (Figure 2). Les premières montrent les différences concernant la porosité totale des mottes, jusqu'à une limite de 400 μm . On constate une inversion de progression de volume cumulé en relation avec le diamètre équivalent entre les horizons supérieurs (A, Ap et AB) et de profondeur (BA et Bw), entre 10 et 50 μm . Les spectres de porosité montrent une première apogée, existant pour tous les échantillons, avec un mode de diamètre équivalent de 0,022 μm , qui varie uniquement en intensité. Une deuxième apogée apparaît dans la gamme de diamètre entre 11 à 60 μm , avec une intensité très variable. En CER on trouve une spectre bimodal bien marqué pour les horizons de profondeur (BA et Bw), très caractéristiques des sols micro-agrégés, tandis que le deuxième mode est très atténué pour les horizons supérieurs. Cette distribution se retrouve aussi en CCL et PD. En PAL, par contre, on trouve une distribution avec un deuxième mode d'apogée basse pour les deux horizons (Ap₂ et BA).

A partir de l'observation de ces courbes, il est possible d'identifier trois classes de taille de pores. Les valeurs encadrant ces classes se retrouvent assez semblables pour les différents échantillons étudiés. Les classes de pores identifiées coïncident assez bien avec la classification établie par Stengel (1990), qui a défini l'origine et la fonction des classes considérées; celles-ci ont aussi été identifiées par Bruand et Cousin (1995). Nous distinguons les classes suivantes (Figure 3):

- 1) microporosité ou porosité texturale: pores de diamètre inférieur à 0,1 μm , qui correspond aux pores de la phase argileuse du sol dus à l'assemblage des constituants fins (argiles, oxydes et constituants organiques);
- 2) mésoporosité ou porosité structurale argileuse: pores de 0,1 à 6 μm , due à l'assemblage des éléments grossiers et des micro-agrégats;
- 3) macroporosité fine ou porosité structurale lacunaire: pores de 6 à 400 μm , qui comprend les pores dus à l'assemblage des macro-agrégats et à l'occurrence des cavités, fissures et canaux de l'activité biologique, responsables du drainage et de l'aération.

En considérant ces trois classes de taille de pores, on constate la prédominance des micro (< 0,1 μm) et des macropores (> 6 μm). La microporosité est comparable dans tous les horizons où elle occupe un volume important (15 à 20 %). On observe, toutefois, une diminution des valeurs entre la surface (A/Ap/AB) et la profondeur (BA/Bw), vraisemblablement en relation avec la densité apparente et avec l'état de

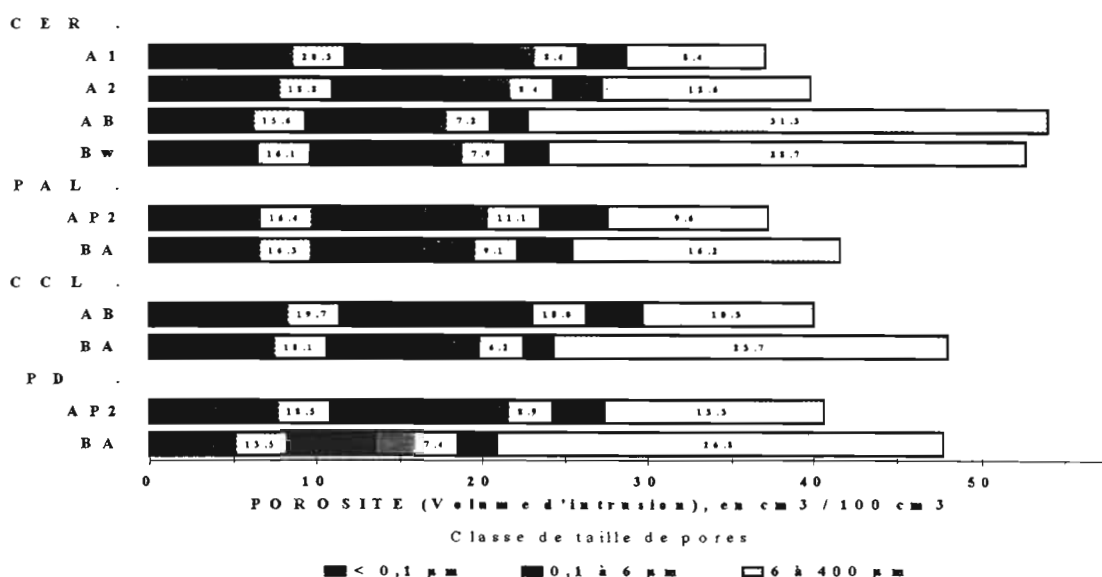


Figure 3. Distribution de taille de pores obtenue par intrusion de mercure

micro-agrégation (mode d'assemblage de particules et micro-agrégats), incluant une faible relation avec la teneur en argile. La mésoporosité est la plus faible et assez comparable dans toutes les situations; elle tend aussi à diminuer avec la profondeur. La macroporosité est la plus variable, très importante dans les horizons de profondeur (*BA/Bw*) et plus réduite dans les horizons supérieurs (*A/Ap/AB*). Cette réduction de macroporosité dans les horizons supérieurs peut caractériser l'effet du système de gestion du sol sur l'assemblage des éléments structuraux de base.

Ces observations permettent de comparer les résultats obtenus avec la courbe pF et l'intrusion de mercure, en utilisant les indices de vides pour différents diamètres équivalents de pores (Figure 4). L'analyse de ces courbes montre un décalage des indices de vides pour les pores de diamètre les plus fins (inférieure à 10 μm) qui peut être expliqué par les différences de procédure et de principe de détermination entre les deux méthodes.

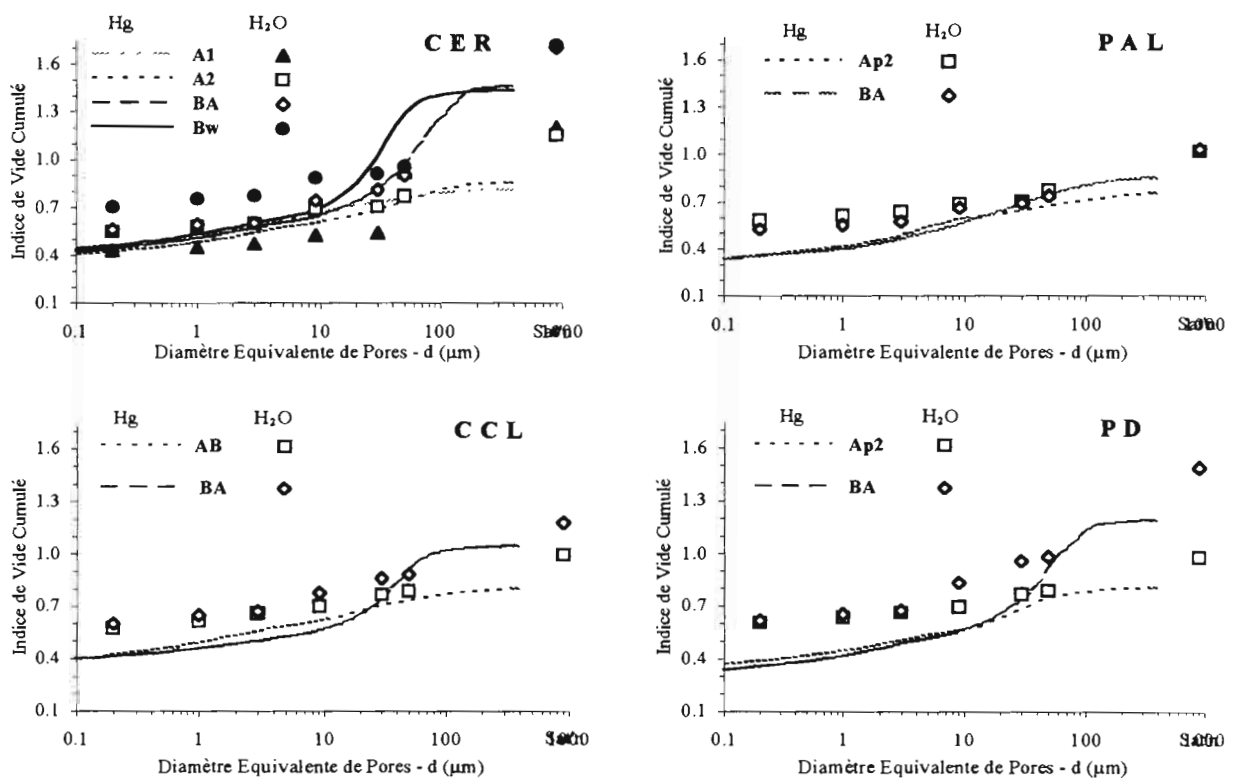


Figure 4. Indices de vides cumulés, d'après la courbe pF (H_2O) et l'intrusion de mercure (Hg), pour différents diamètres équivalents de pores.

Courbe de retrait du sol

La courbe de retrait a permis de quantifier la variation du volume massique du sol selon la teneur en eau, évaluée sur un échantillon non remanié de 50 cm^3 (Braudeau, 1993). Les courbes sont présentées à la figure 5, à partir de la variation des volumes massiques basée sur les valeurs mesurées au point de retrait maximum (SL). On observe une correspondance entre les caractéristiques des courbes de retrait et les aspects morphologiques décrits pour les différents horizons considérés (Tableau 2).

Les principales caractéristiques du sol déduites des courbes de retrait, figurant au tableau 3, permettent de dégager les observations suivantes:

- a) la constante de retrait structural (K_o), fonction de la stabilité de la structure en cours de vidange de la macroporosité et indicatrice de la cohésion d'assemblage des éléments structuraux, présente des

- valeurs très faibles en **CER**; ce qui concorde avec la fragilité macro-structurale observée (description morpho-structurale); en **AB/CCL**, par contre, K_o est très élevée, en relation avec la cohésion élevée du sol;
- b) la constante de retrait principal (K_r), qui indique le mode d'assemblage et la cohésion interne des éléments structuraux, présente des valeurs faibles en **CER** (0,17 à 0,27) et plus importantes en **CCL** (0,41 à 0,46);
- c) le retrait global, déterminé d'après la courbe de retrait en relation avec le volume en début d'analyse et le volume de l'échantillon sec à 105 °C, est un indicateur de retrait du volume microporal et macroporal, d'une part, et d'accroissement du volume macroporal par fissuration, d'autre part. Cet indicateur montre une rétraction nette très faible des échantillons. Les horizons de profondeur (**BA**) ont un retrait global variant entre 1 et 3,3 % et les horizons supérieurs ont des valeurs sensiblement plus élevées en **CER** et **PD** (2,3 et 2,8 %) et élevées en **CCL** et **PAL** (4,2 et 6 %).

Les caractéristiques de retrait du sol mettent en évidence une distinction nette entre les horizons. On constate, par exemple d'après les valeurs de K_r et K_o , une cohésion d'assemblage et une cohésion interne des éléments structuraux très élevées en **AB/CCL** et élevées en **Ap2/PAL**. Par contre, en **Ap2/PD** on observe une cohésion interne élevée et une cohésion d'assemblage faible.

Les volumes micro et macroporal, déterminés d'après les points MS (avant retrait) et SL (limite de retrait) sont indiqués à la figure 6. Le volume microporal, défini comme la porosité du milieu déformable (particules fines, inférieures à 20 μm , et composants organiques) montre une faible tendance à diminuer avec la profondeur, en concordance avec la microporosité déterminée par intrusion de mercure (Figure 3). On constate aussi une diminution importante de ce volume microporal en passant du point MS au point SL. A l'inverse, le volume macroporal, défini comme la porosité d'assemblage ou inter-agrégats, augmente de façon importante avec la rétraction, probablement du fait de la fissuration du sol en dessèchement. Cependant

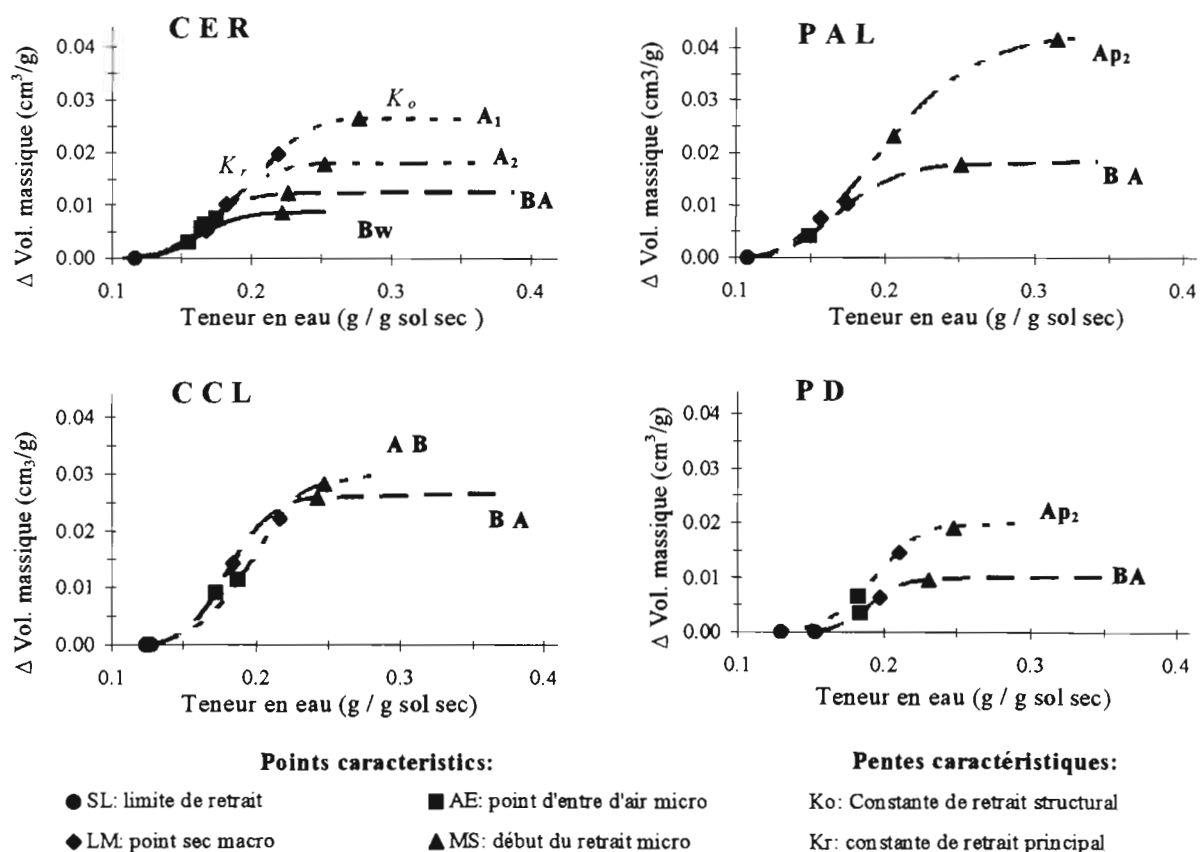


Figure 5. Variation des volumes massiques, basée sur le point de maximum retrait (point SL)

Syst/ Horizon	Densité apparent g/cm ³	Teneur en argile g/100 g	Retrait Global cm ³ /100cm ³	Pentes caractéristiques		Vol.massique au pt. SL cm ³ /g	Porosité à MS			Porosité à SL			Cap. gonfl/ rétraction cm ³ /g argil
				K _o	K _r		Pt	Ma	M	Pt	Ma	M	
CER													
A ₁	1.21	46	3.75	0.000	0.271	0.829	55.7	27.2	28.5	54.3	36.1	18.2	0.185
A ₂	1.22	46	2.29	0.002	0.252	0.819	55.1	29.8	25.2	54.1	36.5	17.6	0.136
BA	1.05	48	1.30	0.003	0.237	0.954	61.7	41.8	19.9	61.2	46.4	14.8	0.100
Bw	1.07	50	0.98	0.003	0.166	0.936	60.7	40.5	20.2	60.3	45.7	14.7	0.104
PAL													
Ap ₂	1.39	38	5.95	0.023	0.331	0.724	50.9	19.3	31.6	48.1	30.7	17.5	0.268
BA	1.39	41	2.96	0.007	0.242	0.720	49.8	23.2	26.6	48.5	31.4	17.1	0.166
CCL													
AB	1.29	50	4.15	0.045	0.411	0.774	53.4	26.1	27.3	51.6	32.1	19.5	0.120
BA	1.23	54	3.31	0.006	0.456	0.815	55.6	32.0	23.6	54.2	36.5	17.7	0.089
PD													
Ap ₂	1.29	52	2.77	0.011	0.310	0.771	53.1	25.8	27.3	51.8	32.3	19.5	0.117
BA	1.09	54	1.12	0.014	0.212	0.917	60.2	38.5	21.7	59.8	42.3	17.5	0.070

Tableau 3. Caractéristiques principaux du sol, d'après la courbe de retrait.

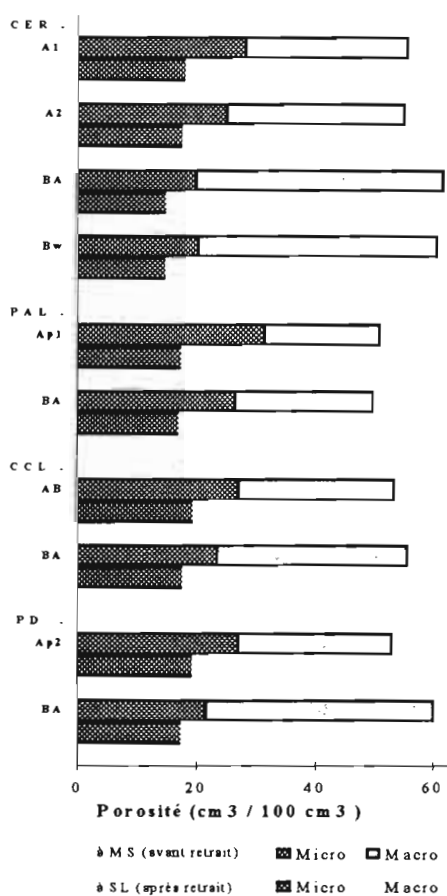


Figure 6. Volumes macro et microporal, d'après la courbe de retrait du sol, déterminés au point MS (avant retrait) et au point SL (retrait maximum)

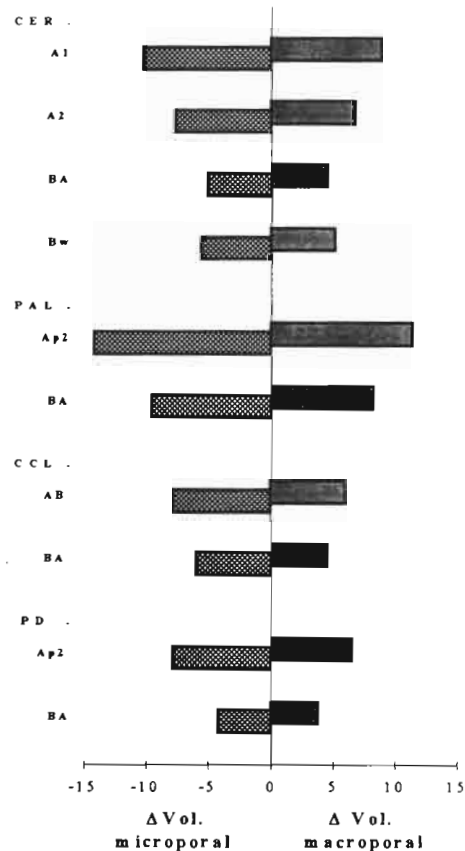


Figure 7. Variation des volumes macro et microporal en passant du point SL au point MS, d'après la courbe de retrait

l'augmentation du volume macroporal ne compense pas exactement la diminution du volume microporal (Figure 7). Les variations les plus importantes concernent les horizons supérieurs, probablement en relation avec la cohésion interne des éléments structuraux.

En considérant le volume microporal aux points MS et SL, on a calculé la capacité de gonflement-retrait de la phase argileuse (Bruand *et al.*, 1990). On trouve, dans le cas de notre étude, un indice très faible voisin de 0,1 cm³/g d'argile (Tableau 3); toutefois, les horizons de la situation **PAL** ont des valeurs plus importantes (0,27 et 0,17), qui pourraient être associées aux densités plus élevées et au caractère plus sableux observées pour cette situation. le volume microporal aux points MS et SL est en rapport avec la porosité de diamètre inférieure à 0,2 µm, déterminée d'après la porosimétrie à mercure (Braudeau et Bruand, 1993; Bruand *et al.*, 1990). Cette relation est très nette pour toutes les situations (Figure 8), à l'exception de **PAL**; ce qui peut résulter du caractère différent de **PAL** par rapport aux autres situations.

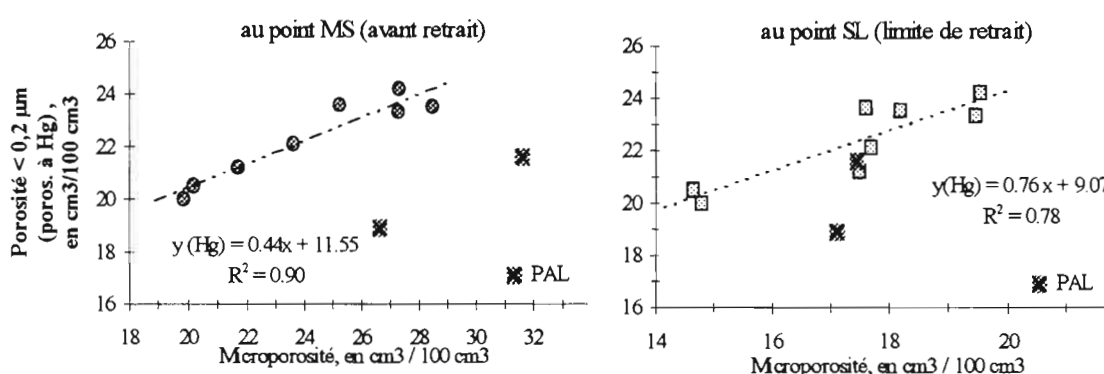


Figure 8. Corrélation entre le volume microporal d'après la courbe de retrait et la microporosité (diamètre < à 0,2 µm), d'après l'intrusion de mercure (équations des courbes de tendances calculées sans considérer la situation PAL)

Stabilité des agrégats

La description morpho-structurale a mis en évidence la netteté et la stabilité des éléments structuraux de base, de type granulaire. Nous avons déterminé la stabilité de ces éléments, par tamisage dans l'eau, en utilisant les macro-agrégats entre 4 et 8 mm sélectionnés par tamisage à sec. On a considéré quatre classes d'agrégats stables à l'eau (Figure 9). Le pourcentage des macro-agrégats de taille supérieure à 2 mm indique une stabilité plus élevée dans les horizons supérieurs que dans les horizons profonds. Cette stabilité est aussi plus importante pour les échantillons obtenus sur les situations **CER** et **PAL**, en rapport avec la micro-agrégation plus importante décrite pour ces situations. Le pourcentage d'agrégats de cette dimension diminue de manière significative en passant aux situations cultivées (**CCL** et **PD**), de façon inversement proportionnelle à l'augmentation des agrégats entre 0,25 et 2 mm. Cette diminution peut résulter de la fragilisation ou destruction des macro-agrégats entre 2 et 8 mm due au travail du sol, à la fertilisation ou à l'absence de végétation et racines pérennes.

En analysant les agrégats stables de diamètre supérieur à 105 µm, on constate que plus de 95 % des agrégats sont stables à l'eau pour tous les échantillons, à l'exception de l'horizon **BA** en **PD**. Toutefois, les agrégats de diamètre supérieur à 0,25 mm (classes entre 0,25 et 8 mm) diminuent en général avec la profondeur. Cette diminution apparaît en rapport avec les caractéristiques morphologiques, chimiques et physiques, quand on compare les horizons supérieurs et de profondeur pour une situation déterminée (sous végétation naturelle, sous pâturage ou sous culture annuelle).

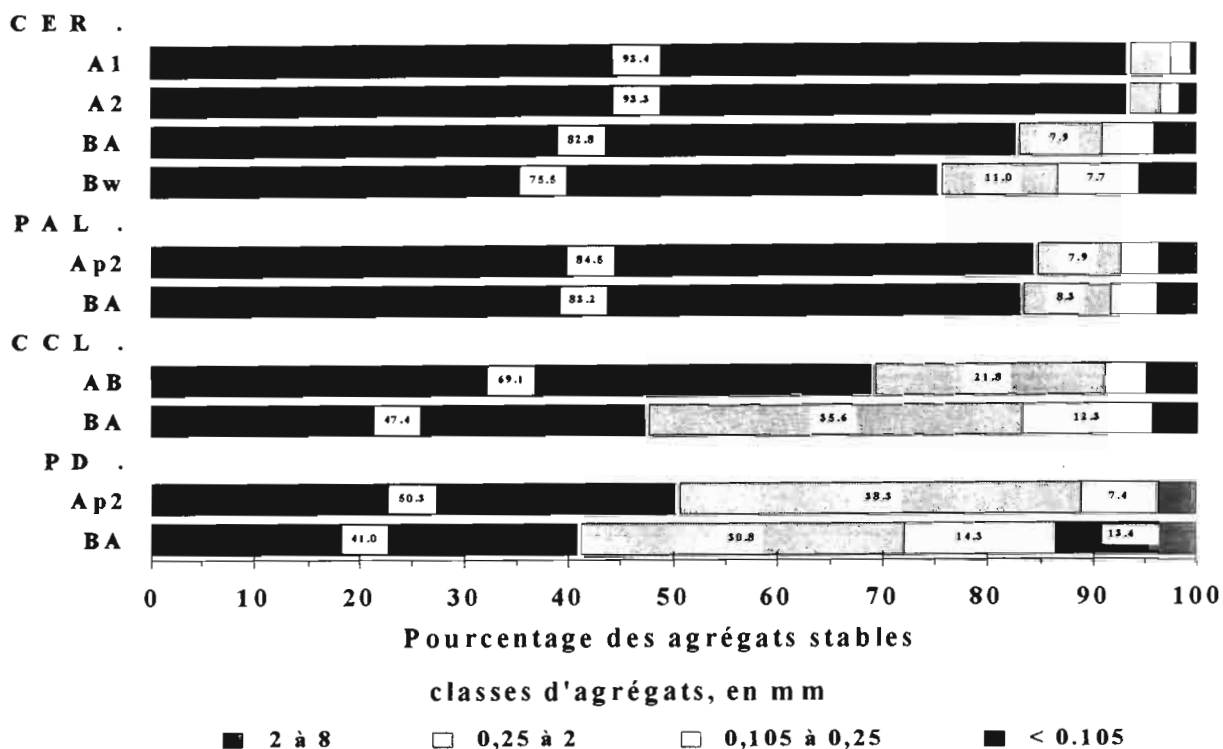


Figure 9. Stabilité d'agrégats à l'eau, mesurée sur échantillons d'agrégats entre 4 et 8 mm (Freitas et Blancaneaux, 1994, d'après Kemper, 1965).

En comparant les systèmes sous culture annuelle, par exemple, on constate un pourcentage assez important de macro-agrégats stables (diamètres supérieurs à 2 mm et entre 0,25 et 2 mm) pour les horizons *AB/CCL* et *Ap₂/PD*. On observe, pour ces situations, une correspondance nette avec la cohésion décrite sur le terrain et confirmée avec les déterminations physiques au laboratoire.

Comparaison des systèmes de culture

L'ensemble des observations permet de comparer les deux systèmes de culture irriguée intensive de longue durée, en observant les différences entre le système de gestion conventionnelle (*CCL*) et le système alternatif de semis direct (*PD*). Ces systèmes ont été étudiés sur des parcelles expérimentales, avec une situation initiale similaire et contrôlée. L'analyse morpho-structurale a permis l'identification des différences morphologiques entre les horizons supérieurs, de position équivalente, *AB* en *CCL* et *Ap₂* en *PD*. Ces horizons sont comparés au tableau 4.

On a observé, sur le terrain, que le UPH les plus importantes en *AB/CCL* sont formées d'éléments structuraux polyédriques anguleux (sous structure également anguleuse). Ces éléments caractérisent une structure de plus forte cohésion d'ensemble que la structure polyédrique sub-anguleuse observée en *Ap₂/PD*. A cette cohésion de *AB/CCL* est associée un enracinement réduit, une activité biologique faible, une faible présence de matière organique identifiable et une résistance à la pénétration très forte. Les déterminations complémentaires indiquent que l'espace poral des deux horizons sont comparables, bien que cet espace poral soit différent dans les horizons *BA* sous-jacents. La caractérisation des propriétés structurales des UPH par retractométrie a permis de confirmer les différences observées sur le terrain. Les retraits global, structural et principal, plus importants en *AB/CCL* qu'en *Ap₂/PD* indiquent des différences de modes d'assemblage inter et intra éléments structuraux, associés avec la cohésion. Ainsi, la caractérisation dans le cadre de l'analyse morpho-structurale révèle très bien des différences dues aux systèmes de gestion du sol.

système de gestion considéré:	C C L Conventionnel (pulvériser "offset")	P D Alternatif (semis direct)
horizon:	AB (Ap ₃ B)	Ap₂
profondeur:	12 à 30 cm	8 à 25 cm
<i>de l'analyse morpho-structurale:</i>		
type de structure [sous-structure]	polyédrique anguleuse [anguleuse]	polyédrique sub-anguleuse [sub-anguleuse et anguleuse]
porosité	poreux	très poreux
enracinement	limité à 12 cm; horizontal et concentré	abondant jusqu'à 25 cm; vertical
matière organique	très peu abondante et humifiée	abondante et humifiée
activité biologique	faible; (moyenne à forte au dessus)	très forte jusqu'à 32 cm
résistance à la pénétration	très forte (90 kg/cm ²) (légèrement élevée au dessous)	légèrement forte (20 kg/cm ²) (faible au dessous)
<i>de l'espace poral:</i> (d'après la densité apparente, la courbe pF et la porosimétrie au Hg)	très dense - 1,34 g/cc; (BA dense - 1,23 g/cc, avec 14 % de macropores >50 µm)	très dense - 1,36 g/cc; (BA peu dense - 1,09 g/cc, avec 20 % de macropores >50 µm)
<i>propriétés structurales:</i>		
retrait global	fort (3 à 4 cm ³ /100 cm ³)	faible (1 à 2 cm ³ /100 cm ³)
K _o (const.de retrait structural)	fort (0,045) fort (0,41)	moyen (0,011) faible à moyen (0.21)
K _r (const.de retrait principal)		

Tableau 4. Comparaison entre les horizons supérieurs identifiés sur les systèmes de culture de longue durée

En considérant ces résultats, il apparaît que le système alternatif a conduit à un meilleur état structural du sol. Cette amélioration s'accorde aussi avec la meilleure performance agronomique observée avec ce système, d'après les rendements de maïs et haricot obtenus (Blancaneaux et Freitas, 1995; Teixeira *et al.*, 1995).

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus à partir de l'évaluation de quatre systèmes de gestion du sol, dans le cadre de l'analyse morpho-structurale, a permis de vérifier les modifications de la structure d'un sol ferrallitique (Latossolo Vermelho-Escuro) des Cerrados Brésiliens.

Les différentes situations considérées comprennent une parcelle sous végétation naturelle anthropisée (**CER**), une parcelle sous pâturage cultivé de longue durée, peu dégradé (**PAL**), et deux parcelles expérimentales avec la succession maïs/haricot irrigué depuis cinq ans. Ces deux dernières situations correspondent d'une part à un système de gestion conventionnel, avec labour à pulvérisateur offset "cover-crop" (**CCL**), et d'autre part à un système de gestion alternatif, avec semis direct sur résidus de la culture précédente (**PD**).

La description morpho-structurale des horizons identifiés dans la situation **CER**, choisie comme témoin, montre une macro-structure fragmentaire polyédrique très fragile. La densité et la porosité sont comparables, avec une densification sensible dans les horizons supérieurs; la cohésion, toutefois, est très faible. Les horizons de profondeur présentent une porosité très élevée et une cohésion d'ensemble très faible des éléments structuraux granulaires stables. Cette cohésion d'ensemble est plus forte dans les horizons supérieurs sous l'effet des facteurs climatiques, biologiques et anthropiques.

L'approche de l'analyse morpho-structurale a permis d'observer les effets des différents systèmes de gestion du sol et de choisir les horizons les plus sensibles à ces effets pour caractériser l'espace poral, les propriétés structurales et la stabilité des agrégats à l'eau. Deux séries d'échantillons ont été sélectionnées pour chaque situation en fonction de la profondeur: d'une part, dans les horizons supérieurs (A_2 , Ap_2 et AB), de couleur brune, à matière organique abondante et à structure fragmentaire formée d'éléments structuraux polyédriques; et d'autre part, dans horizons de profondeur (BA), de couleur rouge-sombre, à structure fragmentaire formée d'éléments structuraux polyédriques et sous-structure granulaire, caractérisant une micro-agrégation bien développée et très stable. L'évolution structurale du sol dans les différentes situations cultivées peut être mieux appréciée en considérant les modifications d'organisation de ces horizons supérieurs et de profondeur, par comparaison avec la situation **CER**. De façon générale, une différenciation macro-structurale mieux définie est observée dans les situations cultivées, du fait d'une netteté plus grande des éléments structuraux et aussi d'une cohésion d'ensemble plus forte.

La situation sur pâturage cultivé (**PAL**) présente une densité du sol très élevée, avec des éléments structuraux de base très stables, une forte cohésion interne des agrégats et une faible cohésion d'ensemble (faible résistance à la pénétration). L'étude y suggère un matériel pédologique sensiblement différent, en considérant la texture légèrement plus sableuse. La couverture de graminées est associée à une amélioration structurale limitée aux horizons superficiels (Ap_1 et Ap_2), jusqu'à 25 cm, avec un espace poral semblable à l'horizon BA .

Les situations sur culture annuelle présentent de différences morphologiques dans les horizons supérieurs (éléments structuraux angulaires en AB/CCL et sub-angulaires en Ap_2/PD) en relation avec la cohésion d'ensemble et la résistance à la pénétration. Les déterminations complémentaires ont montré un espace poral comparable, avec des densités apparentes élevées. A partir des caractéristiques de retrait du sol, il a été possible d'observer une cohésion d'assemblage forte et une cohésion interne des éléments structuraux élevée en AB/CCL , caractérisant une dégradation structurale importante. En Ap_2/PD , toutefois, la cohésion d'assemblage est faible et la cohésion interne modérée. Cette condition de **PD** apparaît comme une amélioration de l'état structural du sol par rapport à **CER** et à **CCL**. La forte cohésion d'ensemble vérifiée en AB/CCL constitue une limitation mécanique forte à la croissance des racines (compaction), qui est limitée à 12 cm. La forte cohésion interne observée en Ap_2/PD , par contre, ne constitue pas une condition limitante à la croissance des racines. Cette cohésion interne pourrait cependant être limitante en condition de stress hydrique prolongé.

L'étude de ces quatre situations de référence montre que l'analyse morpho-structurale permet de mieux apprécier l'évolution du sol, en considérant la modification des caractères d'organisation et des caractéristiques associées. La prise en compte des aspects morpho-structuraux est importante pour comprendre et pronostiquer le comportement du sol évoluant sous différents systèmes de gestion et conditions climatiques.

Les différentes déterminations complémentaires sont nécessaires pour vérifier et préciser les caractères de transformation du sol. Toutefois, on doit s'interroger sur les difficultés d'évaluation du comportement du sol à partir de l'analyse des caractéristiques physiques et chimiques et de la dynamique de matière organique. Une question importante est de savoir quels sont les caractères définissant la qualité optimale de la structure du sol.

L'analyse de l'espace poral réalisée dans le cadre de l'analyse morpho-structurale montre l'intérêt de réaliser des études comparatives plus approfondies des différentes méthodes de caractérisation du spectre poral et de l'organisation du sol en relation avec son fonctionnement, notamment avec le fonctionnement hydrique et le développement racinaire. Il est nécessaire de mieux analyser les relations existant entre les

résultats de différentes déterminations possibles pour préciser les caractérisations les plus pertinentes et aisément praticables dans ce type d'approche.

L'étude des rapports mutuels entre différentes caractéristiques considérées et leur relation avec les rendements suggère que il n'a pas un paramètre explicatif unique des rendements, parce que même au seul niveau du sol, plusieurs aspects de comportement physique (densité apparente, résistance à pénétration, ...), chimique (disponibilité des nutriments, capacité d'échange,...) et biologiques (matière organique, activité biologique, ...) sont à considérer. L'enracinement des cultures est, en fait, une réponse à un ensemble de caractéristiques du sol dans chaque UPH considérée, dépendant de la localisation (profondeur et épaisseur) de ces unités dans le profil.

Il s'avère, en conclusion, que l'analyse morpho-structurale peut être un outil de diagnostic très utile pour appréhender l'impact des systèmes de gestion et identifier les processus de dégradation structurale du sol. Elle constitue un moyen approprié et indispensable à l'étude des indicateurs de durabilité des systèmes agro-sylvo-pastoraux.

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'EMBRAPA et l'ORSTOM pour la possibilité de réaliser un stage de post-doctorat qui a été donné à P. FREITAS.

Les auteurs remercient aussi les chercheurs et techniciens qui ont participé aux déterminations analytiques pour leur collaboration:

Wilson Santana de ARAUJO, Washinton de O. BARRETO, Marie Elisabeth C.C. MELO, José Lopes de PAULA, et Daniel Vital PERES (CNPS/EMBRAPA, Rio de Janeiro, RJ); Hélio Afonso de MENEZES (EMGOPA, Senador Canedo, GO); Dalmiron Pereira de OLIVEIRA (Boursier, Etudiant Ing. Agronome, UFG/EA, Goiânia, GO), au Brésil.

J. FARDOUX; E. GAVINELLI; M.C. LARRE-LARROUY et J-C. MARCOUREL (LCLC/ORSTOM, Montpellier); M. FORTIER (Lab. Physique du Sol/CIRAD, Montpellier); G. BELLIER et J. L. DELARIVIERE (LFS/Hydrophysique/ORSTOM, Bondy) à France.

BIBLIOGRAPHIE

Blancaneaux, Ph. et Freitas, P.L. de. 1995. Utilisation de l'analyse morpho-structurale dans les recherches agropédologiques développées dans les Cerrados du Brésil Central. Un exemple d'application: Le semis direct sur la paille comme système cultural alternatif viable. In: Structure et Fertilité des Sols Tropicaux. Montpellier, ORSTOM, C.R. 2ème. Réunion du Groupe Thématique, ORSTOM, 1994.

Blancaneaux, Ph.; Freitas, P.L. de et Amabile, R.F. 1991. Sistematização e adaptação da metodologia para caracterização do perfil cultural. In: **Reunião de Trabalho para Correlação dos Estudos em Perfil Cultural**. Londrina, UEL/CCA.

Blancaneaux, Ph.; Freitas, P.L. de; Amabile, R.F. et Carvalho, A.M. de. 1994a. Le "zerotillage" comme pratique de conservation des sols sous végétation de "Cerrados" du Brésil. *Cahiers ORSTOM*, série Pédologie, Spécial Erosion, Montpellier, (à paraître).

- Blancaneaux, Ph.; Freitas, P.L. de; Carvalho, A. M. de et Correia, J.R. 1994b. Approche méthodologique utilisée pour les recherches agropédologiques dans les Cerrados du Brésil Central et premiers résultats. In: **Structure et Fertilité des Sols Tropicaux**. Montpellier, ORSTOM, C.R.1^{ère}. Réunion du Groupe Thématique, ORSTOM, 1993.
- Braudeau, E. 1993. Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Sci. du Sol*, 25 (2): 85-93.
- Braudeau, E. et Bruand, A. 1993. Détermination de la courbe de retrait pour la phase argileuse à partir de la courbe de retrait établie sur échantillon de sol non remanié. Application à une séquence de sols de Côte-d'Ivoire. *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 316, série II*: 685-92.
- Bruand, A.; Braudeau, E. et Fritsch, E. 1990. Evolution de la géométrie de l'espace poral des sols lors du passage du domaine ferrallitique au domaine ferrugineux et hydromorphe. Exemple du Bassin de Booro-Borotou (Côte-d'Ivoire). In: **Structure et fonctionnement hydropédologique d'un petit bassin versant de savane humide**. Coll. Etudes et Thèses. ORSTOM, Paris, pp. 137-145.
- Bruand, A. et Cousin, I. 1995. Variation of textural porosity of a clay-loam soil during compaction. *European J. of Soil Science*, 46: 377-385.
- De Blic, Ph. 1994. L'organisation macrostructurale du sol: intérêt et limites d'une approche morphologique, méthodes d'étude. In: **Structure et Fertilité des Sols Tropicaux**. Montpellier, ORSTOM, C.R. 1^{ère}. Réunion du Groupe Thématique, ORSTOM, 1993.
- Freitas, P.L. de. 1988. *Effects of Soil Structure on Root Growth and Function*. Ithaca, NY, Cornell University, (Ph. D. Thesis).
- Freitas, P.L. de. 1994. Aspectos físicos e biológicos do solo. In: Landers, J.N. (ed.). *Fasciculos sobre experiências em plantio direto nos Cerrados*. Uberlândia, A. P. D. C., Cap. IX.
- Freitas, P.L. de et Blancaneaux, Ph. 1991. Condição estrutural do solo para plantio direto (resumo de palestra). *Informativo AEAGO*, Goiânia, 1(1).. pág. 04.
- Freitas, P.L. de et Blancaneaux, Ph. 1994. Estrutura e Porosidade do Solo. In: Puignau, J. (ed.). *Metodologias para investigacion en manejo de suelos*. Montevideo, IICA - PROCISUR, (Diálogo/IICA-PROCISUR, 39). pp. 25 - 42.
- Freitas, P.L. de; Blancaneaux, Ph. et Moreau, R. 1996. A análise morfo-estrutural como uma ferramenta para a avaliação da sustentabilidade de sistemas agrossilvipastoris nos Cerrados. In: **VIII Simpósio Sobre o Cerrado**, Brasília, DF, Brasil, 1996.
- Gautronneau, Y. et Manichon, H. 1987. *Guide méthodologique du profil cultural*. Paris, Gera et Ceref. 71 p.
- Goedert, W.J. et Lobato, E. 1986. Agro-economic considerations of modern agriculture on Oxisols. s.n.t. In: **International Soil Classification Workshop**, VIII. Brasília, DF.
- Kemper, W.D. 1965. Aggregate stability. In: Klute, A.K. (ed.). *Methods of soil analysis, part 1 - Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, ASA/SSSA. p. 511-519. (ASA/SSSA, Agronomy, 9).
- Moreau, R. 1993. Les principales couvertures pédologiques des régions d'Afrique Centrale et de l'Ouest/Répartition zonale, caractères généraux et utilisation. In: **Gestion durable des sols et environnement en Afrique Intertropicale**. Ouagadougou, (à paraître).
- Moreau, R. et Nagumo, F. 1995. Le pénétromètre Yamanaka et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés. In: **Structure et Fertilité des Sols Tropicaux**. Montpellier, ORSTOM, C.R. 2^{ème}. Réunion du Groupe Thématique, ORSTOM, 1994.
- Stengel, P. 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In: Boiffin, J. et Marin-Lafleche, A. (eds.). *La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*. Laon, France, 1990. Ed. INRA, Paris, pp 15-36.
- Teixeira, S.M.; Freitas, P.L. de; Landers, J.N.; Blancaneaux, Ph. et Milhomen, A. 1995. Les effets économiques et pédologiques du semis direct dans les savanes brésiliennes (Cerrados). Une technique agricole qui améliore la durabilité d'un système cultural. In: **L'environnement Humain de L'érosion**. Paris, ORSTOM, [Résumé du Journée du Réseau Erosion, 1994]. (ORSTOM, Réseau Erosion, Bull. 15). pp. 300-316.