

Effets de la déforestation et des cultures sur la structure des sols argileux d'Amazonie brésilienne

Michel Grimaldi, Max Sarrazin, Armand Chauvel, Flavio Luizao, Neizia Nunes, Maria de Rosario Lobato Rodriguez, Philippe Amblard, Daniel Tessier

Dans les régions tropicales humides, la baisse de fertilité des sols cultivés a surtout été attribuée à une évolution de leurs caractéristiques chimiques (acidification, pauvreté en éléments nutritifs, toxicité aluminique). La structure du sol, c'est-à-dire le mode d'assemblage de ses constituants, peut aussi évoluer rapidement sous l'action de facteurs externes, d'origine climatique ou anthropique. Or, cette caractéristique du sol joue un rôle essentiel sur sa fertilité, car en déterminant un espace poral, elle contrôle la disponibilité pour les plantes de l'eau, de l'air et des éléments nutritifs en solution. Il importe donc de

La déforestation est le plus souvent associée à des changements à l'échelle du globe (CO₂ et changement de climat). Cet article montre que les changements de végétation ont également des répercussions importantes à une échelle plus locale sur le sol et notamment sur ses propriétés physiques. Ainsi, la porosité peut constituer un critère essentiel pour évaluer les risques de dégradation (compaction, érosion) encourus lors de la mise en valeur.

définir des modalités de mise en valeur des milieux tropicaux, qui limitent les risques de dégradation de la structure du sol, par érosion ou compaction. Cet article présente une analyse de l'évolution de l'espace poral des sols argileux d'Amazonie brésilienne, après déforestation et mise en culture. Ces sols, appelés latosols par les Brésiliens, couvrent plus de 10 % de la surface de l'Amazonie, sur des plateaux de pente très faible, donc préférentiellement mis en culture. Des observations ont mis en évidence l'importance des tassements provoqués par les engins de défrichement, leurs conséquences sur les propriétés hydriques du sol et leur réversibilité très variable selon le type de culture [1]. Nous avons donc cherché à compléter les résultats précédents, en comparant un plus grand nombre de situations dont les histoires sont bien connues.

gramme plus général sur « *le fonctionnement de systèmes pédologiques en milieu équatorial (Amazonie brésilienne) et leurs transformations sous l'effet de la déforestation et de leur mise en valeur* ». Ce programme associe des chercheurs brésiliens (INPA et EMBRAPA) et français (ORSTOM, CIRAD et INRA)*.

Les sites expérimentaux sont situés sur les stations de l'INPA et de l'EMBRAPA, au Nord de Manaus. En plus des propriétés physiques du sol dont il sera question ici, sont abordées sur les mêmes sites : la fertilité chimique du sol, notamment la mobilité des éléments nutritifs et de l'aluminium [2], la biologie et la microbiologie du sol, et les relations entre ces différentes caractéristiques du sol et le comportement des plantes cultivées.

* Recherche réalisée dans le cadre de la convention ORSTOM/CNPq-INPA.

M. Grimaldi, A. Chauvel : ORSTOM, 72, route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex, France.

M. Sarrazin : ORSTOM, BP 165, 97323 Cayenne Cedex France.

F. Luizao, N. Nunes : INPA, Département d'écologie, CP 478, 69011 Manaus, AM, Brésil.

M.d.R. Lobato Rodriguez : EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agro-Pastorais, CPAA, CP 319, 69000 Manaus, AM, Brésil.

P. Amblard : Antenne CIRAD-IRHO auprès de l'EMBRAPA, CPAA, CP 319, 69000 Manaus, AM, Brésil.

D. Tessier : INRA, Station de Science du sol, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles Cedex, France.

Tableau 1

Variation avec la profondeur, de la granulométrie et de l'indice de vide interparticulaire, d'un latosol sous forêt naturelle

Profondeur (cm)	10	20	30	40	50	120
Argile (%) (0 à 2 μm)	84,9	87,9	91,2	91,8	91,2	92,4
Limons fins (%) (2 à 20 μm)	1,8	1,8	0,9	0,7	1,0	1,4
Limons grossiers (%) (20 à 50 μm)	0,8	0,8	0,3	0,5	0,6	0,4
Sables fins (%) (50 à 200 μm)	2,3	1,9	2,0	1,6	1,5	1,3
Sables grossiers (%) (0,2 à 2 mm)	9,8	7,8	5,4	5,3	5,7	4,4
Indice de vide interparticulaire (e) pour $3,75 < r < 100$ nm	0,613	0,636	0,671	0,691	0,727	0,806
100e/Argile	0,722	0,724	0,736	0,753	0,797	0,872

Variations with depth in granulometry and interparticle pore space in a natural-forest latosol

Milieu et méthode

Caractéristiques du milieu physique et des sites expérimentaux

Le climat est de type tropical humide, avec une pluviométrie annuelle

moyenne de 2 075 mm ; deux à quatre mois (entre juin et octobre) ont une pluviométrie inférieure à 60 mm. Développée sur la formation sédimentaire Alter-do-Chao, la couverture pédologique présente deux pôles : très argileux (sol ferrallitique) et très sableux (podzol), avec tous les intermédiaires entre ces deux pôles, de

sorte que les sites d'études sont représentatifs de très vastes superficies du milieu amazonien. La couverture pédologique est un « système de transformation » du sol ferrallitique en podzol [3, 4]. Notre étude concerne seulement le pôle ferrallitique du système, autrement dit le « latosol » très argileux (oxisol selon la *Soil Taxonomy*) qui recouvre de larges plateaux de pente faible. Sa constitution est simple jusqu'à 5 m de profondeur [5] : elle est dominée par la kaolinite associée à de petites particules (< 20 nm) d'oxy-hydroxydes métalliques (goethite, gibbsite, anatase) ; le taux de sables (quartz), passe de 6 à 12 % dans les 20 premiers centimètres du sol (*tableau 1*). La constitution du latosol varie peu latéralement, sur un même plateau ou d'un plateau à un autre.

Deux sites ont été suivis :

— les pâturages du domaine Fucada (*photo 1*), plantés en graminées après une déforestation manuelle plus ou moins récente (3 ou 5 ans) ;

— les plantations de palmiers à huile de la station Rio Urubu de l'EMBRAPA (*photo 2*) ; cet essai comprend six parcelles : trois types de déforestation (manuelle, totalement mécanisée, partiellement mécanisée) et deux types de légumineuses de couverture (*Pueraria*, *Desmodium*).

Un témoin sous forêt naturelle est également étudié sur chaque site.



Photo 1. Pâturage du domaine Fucada, après déforestation manuelle. (Cliché D. Tessier)



Photo 2. Plantation de palmiers à huile de l'EMBRAPA à Rio Urubu, avec *Pueraria*. (Cliché A. Chauvel)

Figure Photo 1. Pasture land on the Fucada estate following manual deforestation.

Photo 2. The EMBRAPA oil-palm plantation at Rio Urubu, showing *Pueraria*.

Échantillonnage, mesures et expression des résultats

Deux types d'échantillonnage ont été pratiqués :

— à Fucada, on caractérise des situations locales, choisies sur les deux parcelles en fonction de l'état dégradé ou non de la prairie ;

— à Rio Urubu, l'objectif étant de comparer les différentes parcelles (ou histoires), quatre à cinq profils pédologiques indépendants ont été caractérisés sur chaque parcelle, afin de prendre en compte la variabilité spatiale du sol.

Nous avons cherché à décrire l'évolution de la structure du sol, en prenant en compte les différents niveaux d'organisation du sol, depuis le profil jusqu'aux assemblages élémentaires des constituants. Ceci est nécessaire car les mesures globales, comme la porosité totale, ne permettent pas de comprendre les changements de propriétés du sol [6].

Des échantillons à structure conservée ont été prélevés à différentes profondeurs. Au laboratoire, on a déterminé le spectre poral (c'est-à-dire la répartition du volume des pores en fonction de leur taille) à partir des courbes d'injection de mercure ou de rétention d'eau [7]. C'est une approche indirecte, mais quantitative de la structure du sol. On se réfère aussi, de manière moins systématique, à des observations aux microscopes optique et électronique.

Ces observations mettent en évidence les différents niveaux d'organisation des constituants, chacun étant associé à un type de pore.

Les résultats présentés ici ont été obtenus avec un porosimètre à mercure Carlo-Erba 2000, sur des échantillons centimétriques, déshydratés et dégazés [8].

Par ailleurs, des courbes de rétention d'eau ont été établies au laboratoire sur des mottes (environ 10 cm³) et sur des échantillons cylindriques (100 cm³). Ces courbes confortent les résultats acquis en porosimétrie au mercure ; elles permettent aussi de vérifier que la déshydratation préalable à l'injection de mercure ne modifie pas l'allure du spectre poral.

Pour chaque échantillon on a également déterminé sa granulométrie, sa

teneur en matière organique, sa densité de solide et sa densité apparente. Deux modes de présentation des résultats sont utilisés en porosimétrie au mercure :

— la courbe d'indice de vide cumulé, des plus petits (3,75 nm) vers les plus grands pores pris en compte (100 μm environ) ; rappelons que l'indice de vide (e) est le volume des pores rapporté au volume de solide, c'est-à-dire rapporté à un volume indépendant du volume des pores et donc identique pour tous les échantillons comparés ;

— l'histogramme de répartition de l'indice de vide, ou spectre poral, dérivé de la courbe précédente ; les différentes classes de pores sont définies par un accroissement constant du logarithme décimal de la taille des pores (r).

Résultats et discussion

Caractérisation du latosol sous forêt naturelle

Trois sites sous forêt naturelle ont été caractérisés. Les résultats obtenus en porosimétrie au mercure sur l'un de ces trois sites (Rio Urubu) sont portés sur la *figure 1*.

Pour toutes les profondeurs analysées (jusqu'à 1,5 m sur l'un des sites), le spectre poral est nettement bimodal. Deux classes de pores peuvent ainsi être distinguées ; elles correspondent aux deux principaux niveaux d'organisation de ces matériaux kaoliniques : — la classe des petits pores, de taille comprise entre 0,01 et 0,03 μm, résulte de l'assemblage compact des particules argileuses de kaolinite (*photo 3a*) ;

— la classe des grands pores, beaucoup plus étalée (de 0,1 à 100 μm), regroupe des fissures qui délimitent des agrégats et microagrégats, ainsi que des pores d'origine biologique de forme variée (galeries, chenaux, chambres) (*photo 3b*).

Cependant, il apparaît une variation du spectre poral en fonction de la profondeur, que l'on retrouve sur chaque site :

— le volume des petits pores interparticulaires augmente de haut en bas du profil pédologique ; cette augmentation peut être attribuée à l'accroissement de la teneur en argile jusqu'à 30 cm (*tableau 1*). Au-delà, la teneur en argile étant constante, c'est la taille modale des pores qui passe de 0,016 à 0,025 μm entre 30 cm et 1,5 m de profondeur. L'assemblage des particules de kaolinite devient donc moins compact. Selon les observations au microscope électronique à balayage, la forme et la taille des particules de kaolinite évoluent également [5].

— le volume des grands pores diminue entre 20 et 30 cm de profondeur, réaugmente localement, entre 50 et 60 cm, au niveau d'un horizon très microagrégé [9]. Il se stabilise plus bas, représentant de 20 à 25 % du volume total des pores pris en compte en porosimétrie au mercure.

Sous forêt, le sol présente donc avant tout un spectre poral bimodal, caractéristique des oxisols ou sols ferrallitiques, avec deux niveaux bien distincts d'organisation des constituants : l'assemblage des particules argileuses ménage des pores très petits (quelques dizaines de nanomètres), tandis que les agrégats de ces particules argileuses sont délimités par des fissures et chenaux beaucoup plus grands (de l'ordre de la dizaine de micromètres).

Effets d'une déforestation mécanisée

Différents types de déforestation sont pratiqués en Amazonie.

Les petits paysans abattent les arbres à la tronçonneuse, puis les brûlent ; les risques de compactage du sol sont alors minimes. Ces risques augmentent fortement lorsque des engins à chenille sont utilisés pour abattre les arbres, déplacer les troncs et rassembler les débris végétaux avant de les brûler.

La déforestation mécanisée est plus rapide mais plus néfaste pour le sol, surtout lorsqu'elle est réalisée en condition humide. Dans ce cas, elle provoque un tassement caractérisé par une diminution de 70 à 80 % du volume initial des pores de taille supérieure à 0,1 μm, c'est-à-dire des fissures et des pores d'origine biologique ; le spectre poral devient pratiquement unimodal

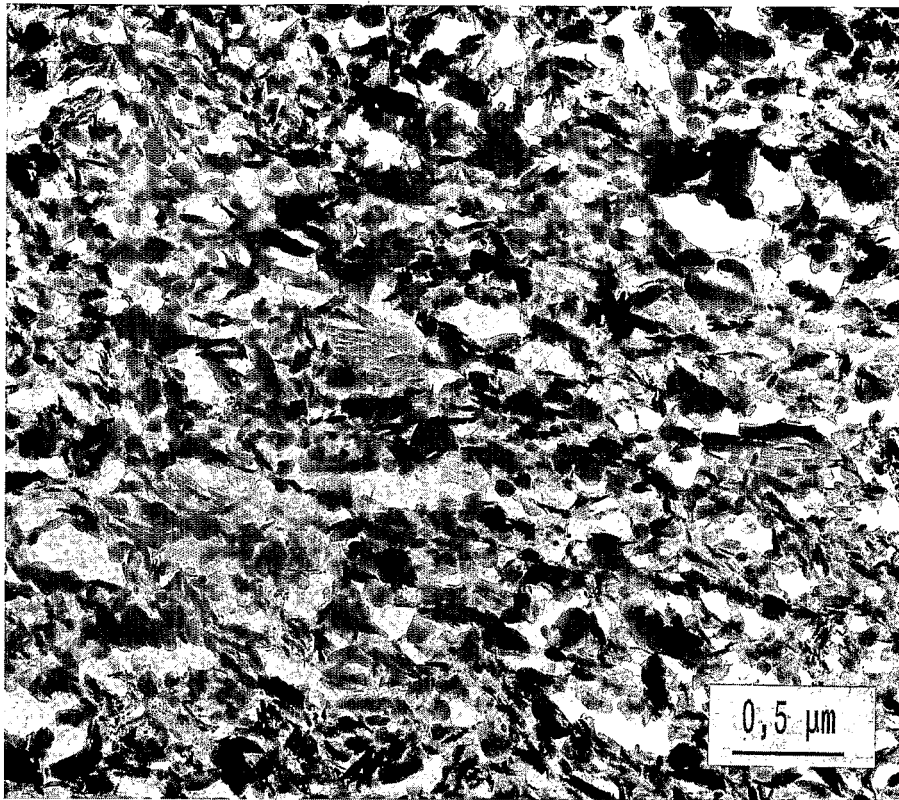


Photo 3a. Assemblage de particules argileuses, en microscopie électronique à transmission ; pores en blanc et particules de kaolinite en noir ou gris. (Cliché D. Tessier)

Photo 3a. Group of argillaceous particles (transmission electron microscope) ; pores white ; kaolinite particles black or grey.

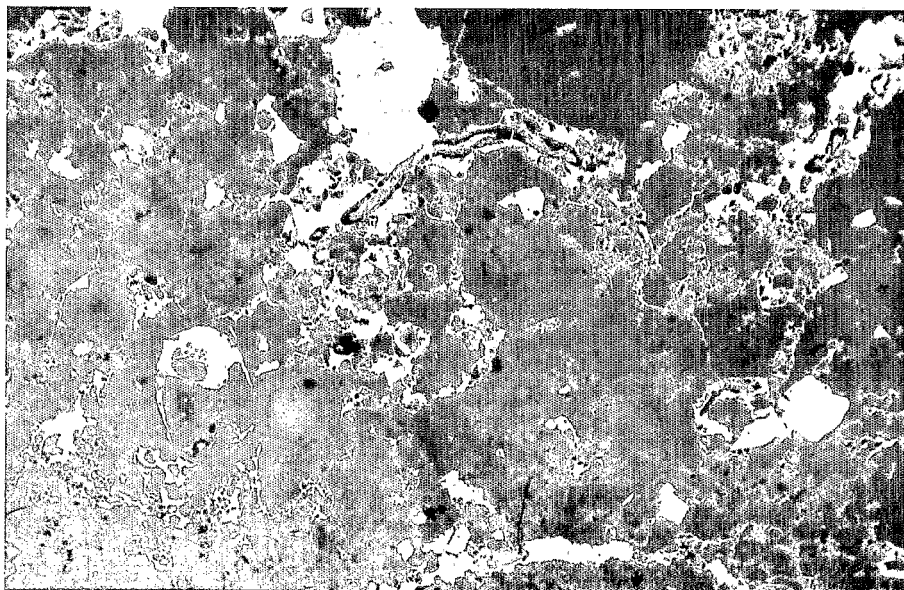


Photo 3b. Assemblage d'agrégats argileux d'un sol sous forêt, en microscopie optique ; pores et grains de quartz en jaune. La largeur du cliché représente 2 mm d'échantillon. (Cliché A. Chauvel)

Photo 3b. Group of argillaceous aggregates from a forest soil (light microscope) ; pores and quartz yellow. Width of photo represents 2 mm of sample.

(figure 2). Ainsi, par coalescence des agrégats, la structure macroscopique du sol est devenue pratiquement massive (photo 4). L'épaisseur du sol concernée par le compactage varie de 20 à 40 cm.

On compare sur la figure 2 des échantillons de sols déforestés ou non, de constitution semblable (en se basant sur la granulométrie, la densité de solide et la teneur en matière organique). Puisque le volume des pores interparticulaires ne varie pas significativement c'est qu'il n'y a pas de tassement à l'échelle de l'assemblage des particules argileuses (figure 2a). Néanmoins, l'organisation des particules de kaolinite doit être modifiée car la distribution de la taille des pores interparticulaires est moins étalée que sous forêt (figure 2b).

En définitive, la déforestation mécanisée a non seulement pour effet de réduire fortement le volume des fissures et des pores biologiques, mais aussi d'uniformiser les pores interparticulaires. Cette dernière modification, concernant le niveau le plus fin de l'organisation des constituants, a probablement des conséquences sur les propriétés de retrait et de gonflement du sol, donc sur son évolution structurale ultérieure. Une étude en laboratoire sur ce même type de sol a d'ailleurs mis en évidence une diminution importante du retrait et du gonflement après compactage [10].

Quant à la forte diminution du volume et de la continuité des grands pores, elle se traduit par des changements importants de propriétés hydriques du sol, qu'il s'agisse des propriétés de transfert ou de rétention d'eau. La conductivité hydraulique diminue, comme l'atteste l'accumulation d'eau, au cours des averses, à la surface des sols défrichés mécaniquement, contrairement aux sols sous forêt. Après le passage d'un bulldozer, l'infiltration de l'eau est dix fois plus lente dans un oxisol du Brésil [17, 18] et dans un ultisol du Pérou [13]. Une autre conséquence est la réduction de l'évaporation en saison sèche, ce qui serait un avantage, si les transferts d'eau vers les racines des plantes cultivées n'étaient pas aussi ralentis. Ainsi, la comparaison des profils hydriques en fin de saison sèche, sous forêt et après divers défrichements et cultures, met-elle en évidence un degré de saturation en eau

Latosol sous forêt naturelle

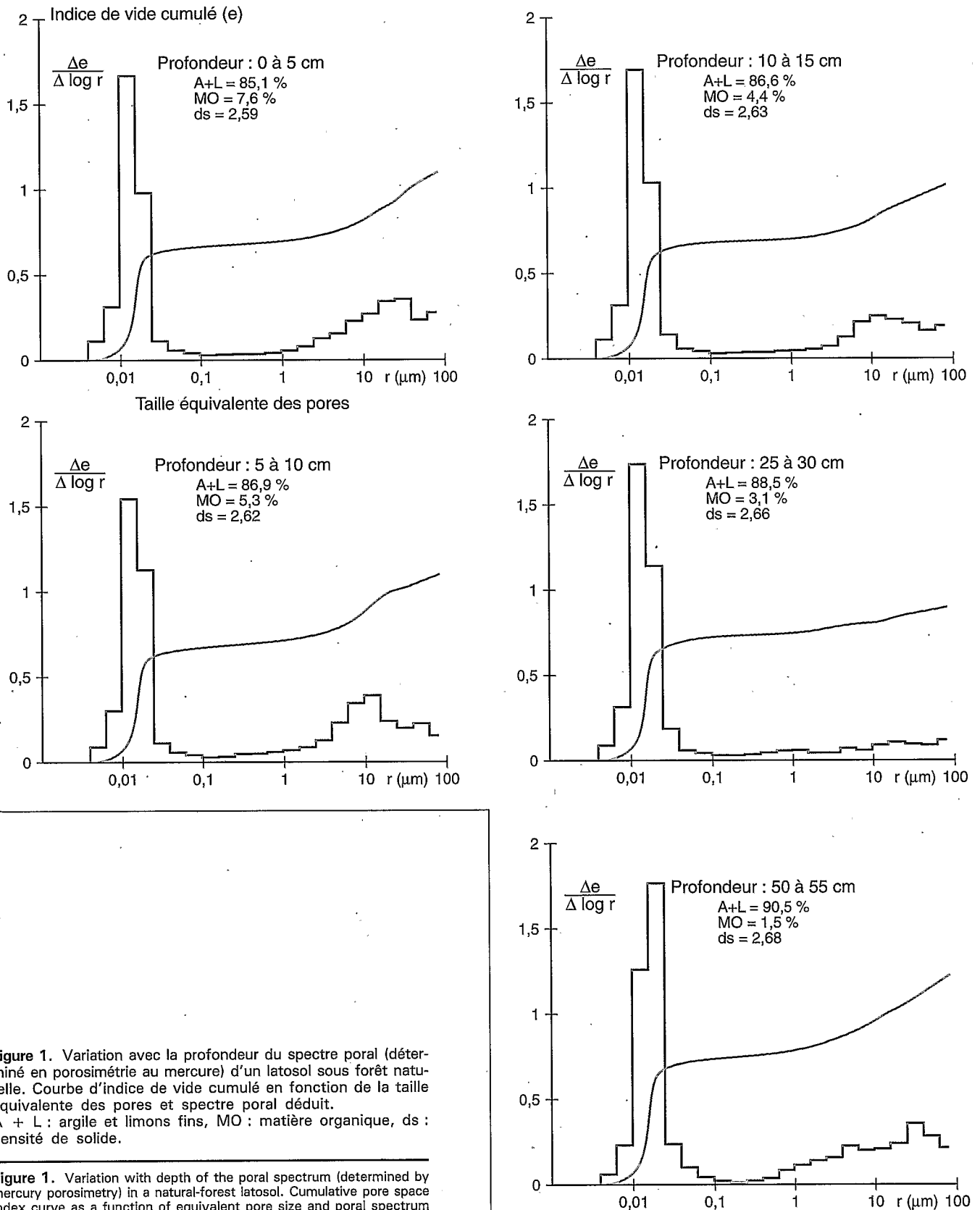


Figure 1. Variation avec la profondeur du spectre poral (déterminé en porosimétrie au mercure) d'un latosol sous forêt naturelle. Courbe d'indice de vide cumulé en fonction de la taille équivalente des pores et spectre poral déduit. A + L : argile et limons fins, MO : matière organique, ds : densité de solide.

Figure 1. Variation with depth of the poral spectrum (determined by mercury porosimetry) in a natural-forest latosol. Cumulative pore space index curve as a function of equivalent pore size and poral spectrum deduced. A + L : fine clay and silt, MO : organic matter, ds : density of solid.

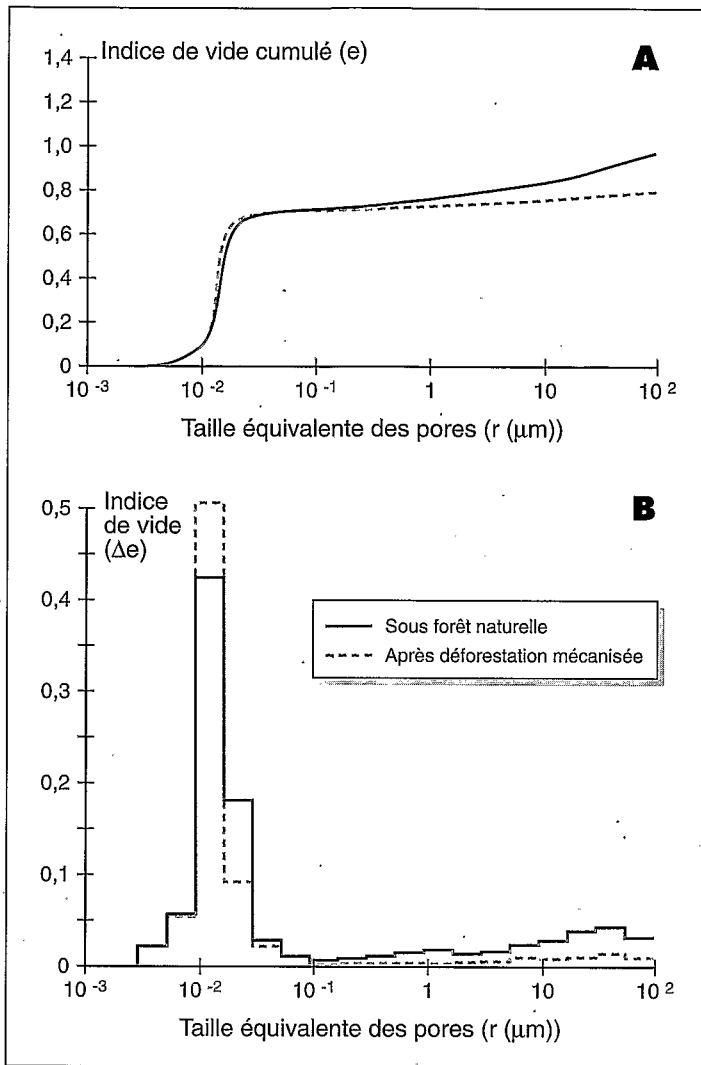


Figure 2. Effet d'une déforestation mécanisée sur le spectre poral d'un latosol. En porosimétrie au mercure, (A) courbe d'indice de vide cumulé en fonction de la taille équivalente des pores et (B) spectre poral déduit.

Figure 2. Effect of mechanical deforestation on the poral spectrum of a latosol. By mercury porosimetry, (A) cumulative pore space index curve as a function of equivalent pore size and (B) poral spectrum deduced.

plus élevé dans la couche affectée par les compactages [1]. Ceci n'implique pas pour autant que cette eau soit disponible pour les plantes. Les racines ne peuvent en effet extraire du sol l'eau retenue entre les particules de kaolinite, car ces pores interparticulaires sont trop petits (si l'on considère un point de flétrissement permanent des plantes à $pF = 4,2$, soit une succion matricielle du sol de 16 bars, l'eau utile est retenue par des pores dont la taille minimale est de $0,1 \mu m$). En d'autres termes, lorsque le sol compacté est saturé en eau, 10 % seulement de cette eau est utilisable par les plantes, au lieu de 25 à 35 % sous forêt.

Évolution des sols sous pâturage

Le domaine Fucada a été déforesté manuellement en saison sèche, c'est-à-dire dans de bonnes conditions climatiques. De plus, les pâturages sont assez récents (3 et 5 ans) et bien entretenus. Il ne s'agit donc pas d'une situation des plus problématiques ; néanmoins on observe localement une dégradation de la structure du sol, provoquée vraisemblablement par le piétinement du bétail. Un exemple est présenté figure 3.

Le profil cultural correspondant présente les caractéristiques suivantes : la matière organique peu décomposée est

très abondante en surface ; les racines sont très nombreuses dans les deux premiers centimètres du sol dont la structure est alors polyédrique très fine (agrégats millimétriques) ; la structure est lamellaire entre 2 et 5 cm, puis à tendance massive entre 5 et 10 cm ; on note alors des signes d'hydromorphie, c'est-à-dire que le sol est en situation d'anoxie au moins temporaire (couleur grise, au lieu de jaune rougeâtre sous forêt, et taches de fer oxydé à la périphérie des agrégats dont la consistance est plus dure) ; à partir de 10 cm, le sol devient progressivement plus fissuré.

La figure 3 montre que, jusqu'à 5 cm de profondeur, le spectre poral du sol est bimodal, avec un volume non négligeable de pores de taille comprise entre $0,1$ et $1 \mu m$. Un tel spectre, également obtenu avec des agrégats riches en matière organique, sous forêt, correspond à une microfissuration et à des assemblages peu compacts de particules de kaolinite. Des observations en microscopie électronique à transmission montrent qu'une grande partie de l'espace interparticulaire est occupée par la matière organique (photo 4). En revanche, au-delà de 5 cm de profondeur, le volume des pores de taille supérieure à $0,1 \mu m$ diminue fortement ; il est à peine plus élevé que dans les échantillons de sol déforesté mécaniquement. Ce volume réaugmente dès 15 cm de profondeur et le spectre poral devient, à 30 cm, comparable à celui d'un sol sous forêt.

Une telle évolution de la structure du sol, entre 5 et 15 cm de profondeur, constitue un obstacle pour l'enracinement des graminées, pour l'infiltration de l'eau et la diffusion de l'oxygène. Ceci peut expliquer la dégradation des pâturages dont le système racinaire n'a pas la capacité de restructurer ce type de sol lorsqu'il est compacté, et donc l'échec fréquent de l'élevage sur les sols argileux de la région de Manaus.

Effets du mode de déforestation et de la plante de couverture

L'arboriculture et notamment les plantations de palmiers à huile sont souvent présentées comme une alternative aux pâturages. En milieu tropical

Latosol sous pâturage (3 ans)

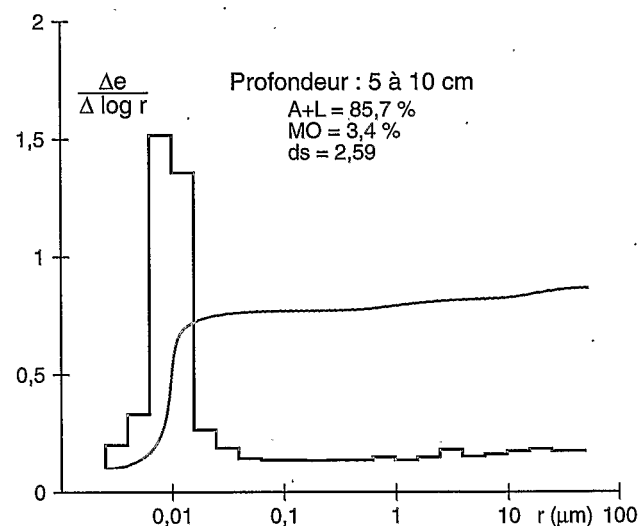
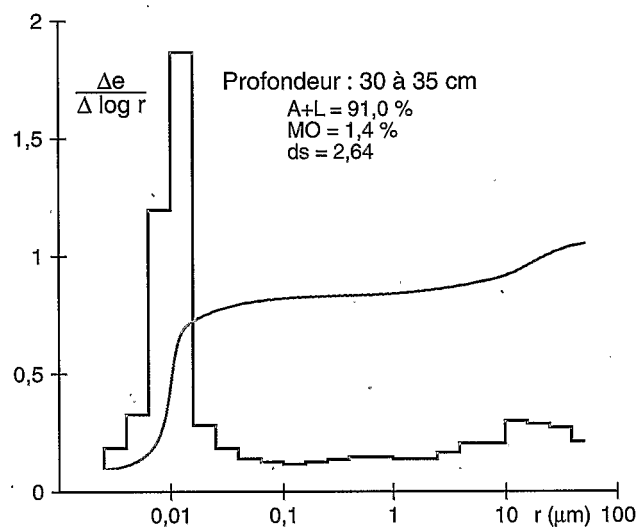
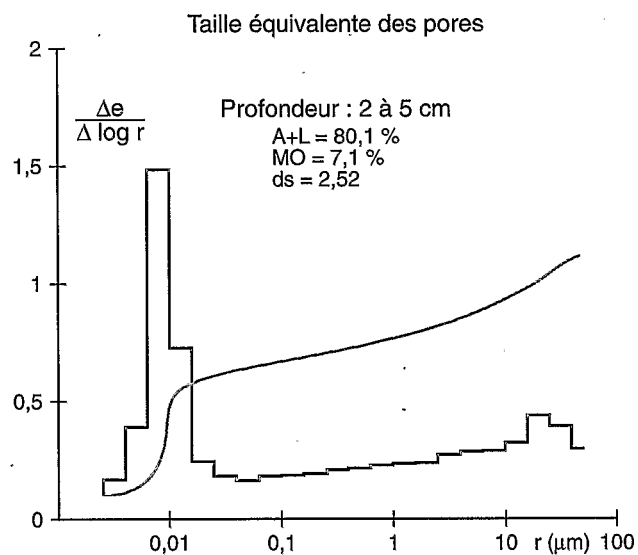
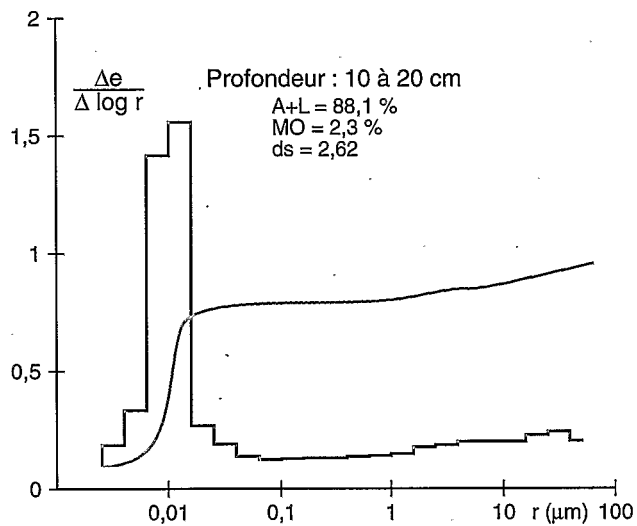
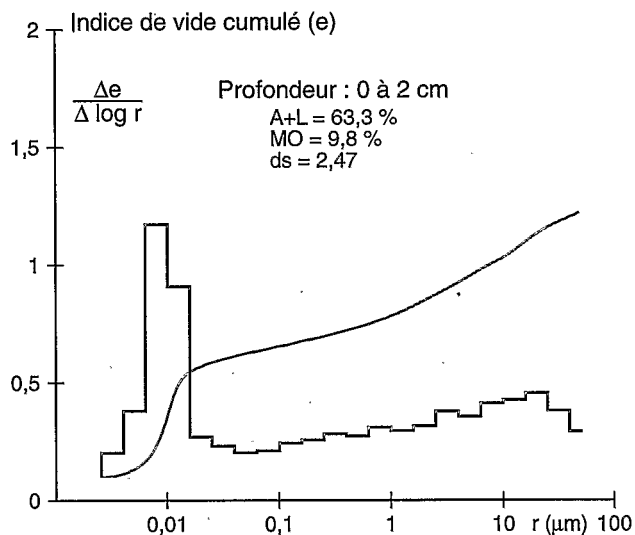


Figure 3. Variation avec la profondeur du spectre poral (déterminé en porosimétrie au mercure) d'un latosol sous pâturage depuis trois ans sur le domaine Fucada. Courbe d'indice de vide cumulé en fonction de la taille équivalente des pores et spectre poral déduit.

A + L : argile et limons fins, MO : matière organique, ds : densité de solide.

Figure 3. Variation with depth of the poral spectrum (determined by mercury porosimetry) in a latosol beneath land pastured for three years on the Fucada estate. Cumulative pore space index curve as a function of the equivalent pore size and poral spectrum deduced.

A + L : fine clay and silt, MO : organic matter, ds : density of solid.

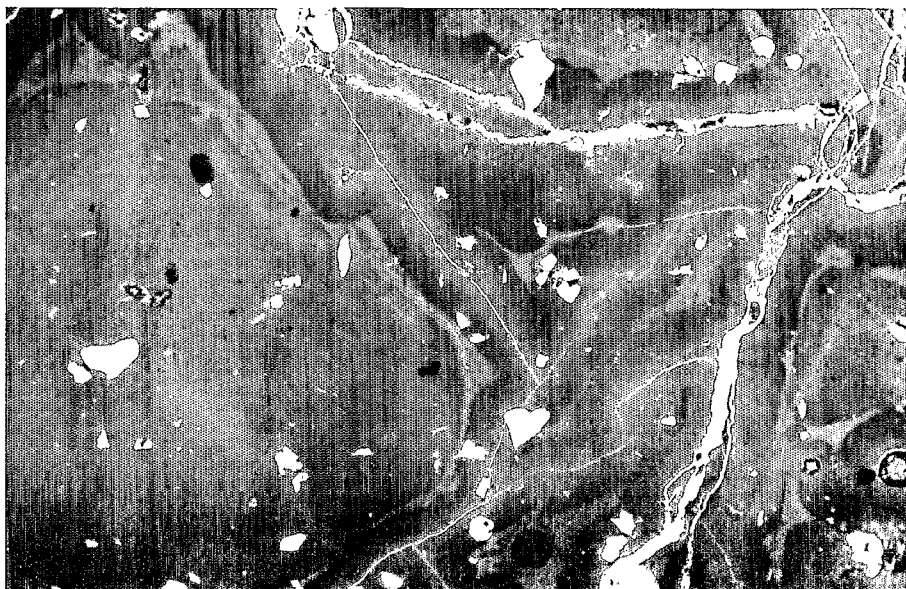


Photo 4. Sol compacté par une déforestation mécanisée, en microscopie optique ; pores et grains de quartz en jaune. La largeur du cliché représente 2 mm d'échantillon. (Cliché A. Chauvel)

Photo 4. Soil compacted by mechanical deforestation (light microscope) ; pores and quartz yellow. Width of photo represents 2 mm of sample.

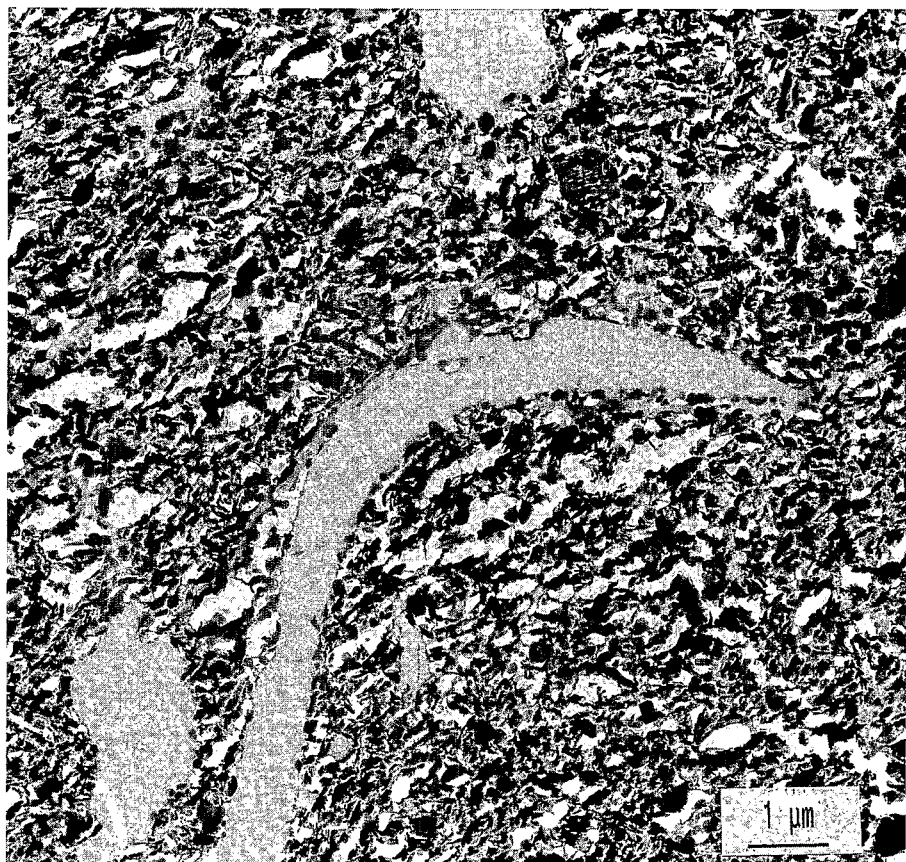


Photo 5. Présence de matière organique et de microorganismes (en gris clair) au sein des agrégats argileux, en microscopie électronique à transmission. (Cliché D. Tessier)

Photo 5. Presence of organic matter and micro-organisms (light grey) among the argillaceous aggregates (transmission electron microscope).

humide, une plante de couverture est classiquement installée avec les palmiers. Sur la plantation de Rio Urubu, l'EMBRAPA étudie la réversibilité des tassements du sol provoqués par la déforestation, sous deux légumineuses de genres différents : *Desmodium* et *Pueraria*. La déforestation a été réalisée en saison sèche.

Une première série de prélèvements a été effectuée sur quatre parcelles (déforestées manuellement ou mécaniquement et plantées depuis un an en *Pueraria* ou *Desmodium*) et à diverses profondeurs. Un seul profil pédologique par parcelle a été alors ouvert.

Sous *Desmodium*, le spectre poral dépend du mode de déforestation, jusqu'à 15 cm de profondeur au moins (figures 4 et 5) et 25 cm au plus. Cette différence concernant surtout le volume des grands pores ($r > 0,1 \mu\text{m}$) : le sol défriché mécaniquement est ainsi nettement moins poreux que celui défriché manuellement. Sous *Pueraria* en revanche, le mode de déforestation n'aurait plus d'effet sur le spectre poral.

Cependant, comme ont pu le montrer d'autres auteurs, notamment en milieu tempéré [11], le tassement d'un sol n'est jamais uniforme. Pour apprécier la variabilité spatiale du sol, des échantillons ont été prélevés dans la couche superficielle du sol (0 à 5 cm) de quatre profils pédologiques ouverts au hasard sur chacune des parcelles plantées en *Pueraria* (depuis deux ans), après une déforestation manuelle ou mécanisée ; trois déterminations du spectre poral ont été effectuées pour chaque profil. En considérant seulement le volume des grands pores ($r > 0,1 \mu\text{m}$), l'analyse statistique (analyse de variance à deux critères de classification hiérarchisée) aboutit aux conclusions suivantes :

- la porosité est généralement élevée dans la parcelle déforestée manuellement, mais l'un des profils est significativement moins poreux que les trois autres ; la parcelle déforestée mécaniquement est plus homogène, les quatre profils n'étant pas significativement différents ;

- bien que la parcelle déforestée mécaniquement soit, en moyenne, moins poreuse que celle déforestée manuellement, la différence n'est pas significative.

La variabilité spatiale du spectre poral

est donc largement influencée par le mode de déforestation. Si *Pueraria* facilite la restructuration du sol, grâce au développement de son système racinaire et à l'activité biologique qu'elle favorise [12], cette restructuration apparaît d'autant moins rapide que le sol a été plus compacté.

Conclusion

D'après les résultats précédents, la

déforestation mécanisée et la mise en culture des sols argileux d'Amazonie modifient leur structure : polyédrique ou microagrégée sous forêt naturelle, la structure devient massive après compactage par les engins de déforestation ou par le piétinement du bétail. Ce sont les plus grands pores, à savoir les fissures, entre les agrégats argileux, ou les chenaux d'origine biologique, qui diminuent, voire disparaissent. Or, dans ces sols très argileux, l'eau utilisable par les plantes est retenue seule-

ment par ces grands pores qui assurent aussi l'infiltration de l'eau et l'aération du sol. L'échec des plantations après déforestation mécanisée, et la dégradation des pâturages peuvent donc s'expliquer par l'évolution de la structure du sol et des propriétés physiques qui en dépendent.

Il semble cependant que l'introduction, en arboriculture, d'une légumineuse de couverture, comme *Pueraria*, améliore la structure des sols compactés. Notons que seule l'activité biolo-

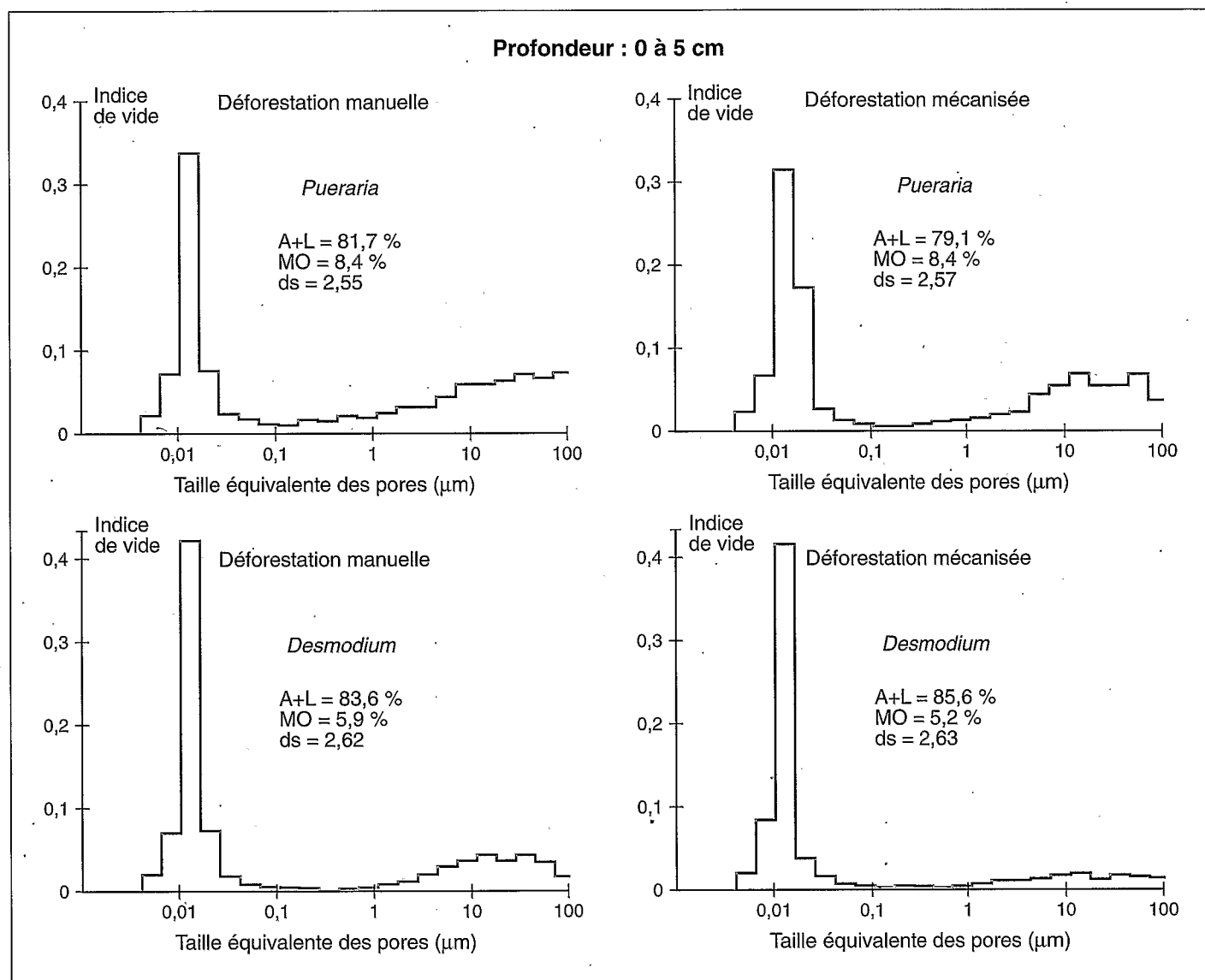


Figure 4. Comparaison du spectre poral (déterminé en porosimétrie au mercure) d'un latosol déforesté manuellement ou mécaniquement, et planté en *Pueraria* ou *Desmodium* (spectres moyens : 2 à 3 répétitions, un seul profil par parcelle). Plantation du Rio Urubu (EMBRAPA), profondeur : 0 à 5 cm.

A + L : argile et limons fins, MO : matière organique, ds : densité de solide.

Figure 4. Comparison of the poral spectrum (determined by mercury porosimetry) in a latosol deforested manually or mechanically, and planted with *Pueraria* or *Desmodium* (mean spectra : 2 to 3 replications, one profile per plot). Rio Urubu plantation (EMBRAPA), depth : 0 to 5 cm.

A + L : fine clay and silt, MO : organic matter, ds : density of solid.

gique (faune du sol, mais aussi le développement des racines) permet de régénérer une structure comparable à celle du sol sous forêt. Certains systèmes de cultures se révèlent donc mieux adaptés à ce milieu que d'autres, du moins si l'on considère les propriétés physiques du sol.

Les résultats précédents reposent principalement sur la porosimétrie au mercure. Cette technique est donc un bon outil pour caractériser l'évolution de la

structure des sols sous l'action des pratiques culturales. D'autres données, comme les mesures de rétention d'eau sur des échantillons non remaniés, permettent d'apprécier directement les conséquences de l'évolution de l'espace poral sur le fonctionnement hydrique du sol [13, 14]. L'importance de la variabilité spatiale du sol oblige dans tous les cas à multiplier le nombre de mesures afin de s'assurer de la fiabilité des résultats.

Parallèlement à l'évolution des propriétés physiques, d'autres aspects du fonctionnement du sol doivent être abordés. La pérennité de l'espace poral macroscopique étant assurée par l'activité biologique, le suivi du statut organique des sols est sans doute un indicateur de la dégradation de l'ensemble des propriétés. La matière organique est en effet un constituant essentiel, assurant notamment la stabilité physique du sol. Son accumulation

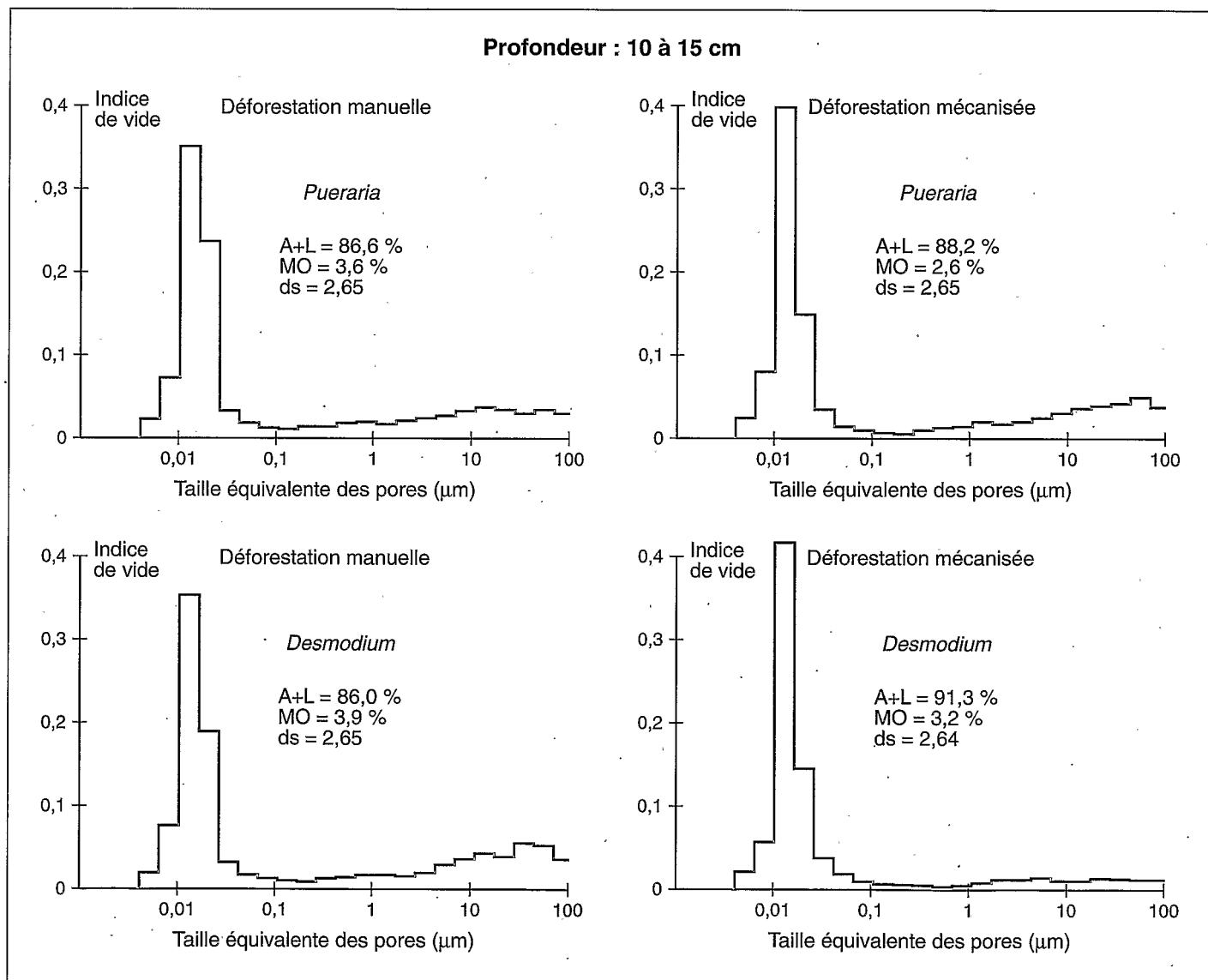


Figure 5. Comparaison du spectre poral (déterminé en porosimétrie au mercure) d'un latosol déforesté manuellement ou mécaniquement, et planté en *Pueraria* ou *Desmodium* (spectres moyens : 2 à 3 répétitions, un seul profil par parcelle). Plantation du Rio Urubu (EMBRAPA), profondeur : 10 à 15 cm.

A + L : argile et limons fins, MO : matière organique, ds : densité de solide.

Figure 5. Comparison of the poral spectrum (determined by mercury porosimetry) in a latosol deforested manually or mechanically and planted with *Pueraria* or *Desmodium* (mean spectra : 2 to 3 replications, one profile per plot). Rio Urubu plantation (EMBRAPA), depth 10 to 15 cm.

A + L : fine clay and silt, MO : organic matter, ds : density of solid.

Summary

Effect of deforestation and crops on the structure of clayey soils in the Brazilian Amazon

M. Grimaldi, M. Sarrazin, A. Chauvel, et al.

Clayey soils covering large plateaux account for more than 10 % of the total surface area of the Amazonian rain forest in Brazil. To evaluate the effects of deforestation in the Amazon, selected examples were chosen in order to show changes between the soil structures of primary forest and deforested areas. A number of situations were examined : primary forest, immediately after mechanical clearance, following establishment of pasture, and in oil palm plantations following the establishment of a leguminous ground cover. Mercury porosimetry analysis was used to quantify the pore size distribution. This method accounts for pores from ranging 100 μm to 3.75 nm. Soil fabric was studied using light microscope, whereas clay fabric was observed by transmission electron microscopy.

The results showed that, under the rain forest, the pore size distribution was clearly bimodal, indicating two types of pore : the smaller (from 0.01 to 0.03 μm) were due to the presence of pores between the elementary clay particles ; and the larger (from 0.1 to 100 μm) corresponding to fissures or biological causes, accounted for less than one-quarter of the total pore volume. This pore spectrum is characteristic of oxisols in the central Amazon as well as in numerous other tropical rain forest situations worldwide.

Mechanical clearance compresses the soil, destroying most of the $> 0.1 \mu\text{m}$ pores, i.e. the biological spaces and fissures. The structure becomes bulky and pore space almost unimodal. The end result is a fall of 70 to 80 % of the pore volume containing water available for plant life. Furthermore, clay interparticle pores, i.e. $< 0.1 \mu\text{m}$, are more uniform in size, even their volume remaining largely constant.

Pastures established after manual clearance indicated that pore size distribution remained bimodal up to a depth of 5 cm. Between 5 and 15 cm, a decrease in the volume of the largest pores was observed. This change was similar to that occurring after mechanical clearance and appeared to be mainly due to stock compaction during the rainy season.

In oil palm plantations where Desmodium was the plant cover, the soil remained less porous after mechanical clearance than after manual, while under Pueraria the soil was more porous and similar to that under the forest. In either situation, it also appeared that both mechanical or manual clearance had a strong influence on the spatial variability of the soil. Suggestions for collecting samples in the field and making laboratory measurements are given.

To conclude, the main effect of heavy mechanical action is to reduce macroporosity. As a result, there is a significant change in soil structure and a sharp decrease in the amount of water available for plants. Root action, as shown by the effect of Pueraria, increases macroporosity which seems not to be the case with Desmodium. Amazonian agriculture must use all available means to reduce soil damage due to mechanical compaction such as using heavy machinery during deforestation and grazing during the rainy season. Plant root systems and their associated biological activity appear to be one of the best means of regenerating or at least maintaining soil macroporosity.

Cahiers Agricultures 1993 ; 2 : 36-47.

peut aussi être révélatrice de mauvaises conditions d'aération.

Des résultats similaires ont été obtenus dans d'autres régions tropicales humides, par exemple au Surinam et en Côte-d'Ivoire [15, 16]. La fragilité du sol lorsque des contraintes mécaniques sont mises en jeu apparaît fortement dépendante de sa constitution granulométrique. Dans les sols sableux, la fraction argileuse est en proportion trop faible pour assurer son rôle de stabilisant de la structure. La constitution chimique du sol intervient aussi. Ainsi les oxydes de fer, lorsqu'ils existent, jouent un rôle essentiel sur la stabilité physique et en conséquence sur l'aptitude au tassement du sol. Au Brésil par exemple, dans les sols développés sur basaltes, très riches en fer, une agriculture intensive a pu se développer. Cependant, des dégradations importantes ont été notées du fait de pratiques culturales mal conduites. Les outils à disque semblent beaucoup plus néfastes que les outils à dents. En outre, l'accroissement de la puissance des tracteurs autorise leur utilisation durant les périodes humides, par exemple au moment du ressuyage des sols après les pluies. Or il est bien connu que plus le sol est humide plus il est sensible au tassement. Le choix des outils, ainsi que les modalités de réalisation des opérations d'abattage et de travail des sols conditionnent certainement le maintien à long terme de la fertilité de ces sols.

En définitive, en milieu tropical, les couvertures pédologiques les moins fragiles au plan physique doivent si possible être sélectionnées pour la mise en culture. Il est nécessaire de considérer les caractéristiques permanentes des sols comme leur constitution ; la présence de liants d'origine minérale comme les oxydes de fer est un critère de choix des sites. Les sols tropicaux étant, par rapport aux sols tempérés, beaucoup plus fragiles à tous égards, il est nécessaire de proscrire les actions mécaniques traumatisantes, le pâturage intensif étant un cas de figure, et de maintenir absolument une activité biologique intense. Dans ces conditions on doit pouvoir assurer la permanence d'un espace poral macroscopique qui est un élément décisif du maintien à long terme de la fertilité et des ressources en sols de ces régions □

Références

1. Chauvel A, Grimaldi M, Tessier D. Changes in pore space distribution following deforestation and revegetation. An example from the central Amazon basin, Brazil. *Forest Ecology and Management* 1991 ; 38 : 259-71.
2. Grimaldi C, Luizao F, Chauvel A. Hydric and biogeochemical pulses in the functioning of soils in amazonian forest ecosystems. In : *Forest 92, Rio de Janeiro, 24-29 mai 1992*, sous presse.
3. Lucas Y, Chauvel A, Boulet R, Ranzani G, Scatolini F. Transicao « Latossolo-podzols » sobre a Formação Barreiras na região de Manaus, Amazonia. *Rev Bras Ciên Solo* 1984 ; 8 : 325-35.
4. Chauvel A, Lucas Y, Boulet R. On the genesis of the soil mantle in the region of Manaus, Central Amazonia. Numéro spécial : *The dynamics of the Amazonia Terra Firme Forest. Experientia* 1986 ; 43 : 285-99.
5. Lucas Y. *Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Équilibres, déséquilibres et transformations*. Thèse, Université de Poitiers, 1989 ; 177 p.
6. Grimaldi M, Tessier D. Changements de propriétés de retrait, de gonflement et de rétention d'eau d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. *Science du sol* 1986 ; 24 : 319-36.
7. Lawrence GP. Measurement of pore sizes in fine textured soils : a review of existing techniques. *Journal of Soil Science* 1977 ; 28 : 527-40.
8. Vachier P, Cambier P, Prost R. Structure d'un milieu poreux : la craie. *Ann Agron* 1979 ; 30 : 247-53.
9. Chauvel A, Guillaumet JL, Schubart HOR. Importance et distribution des racines et des êtres vivants dans un « latossol » argileux sous forêt amazonienne. *Rev Ecol Biol Sol* 1987 ; 24 : 19-48.
10. Tavares-Filho J. *Comportement physique d'une sol argileux d'Amazonie. Étude du tassement et influence de l'histoire hydrique*. DEA Géosciences-Pédologie, 1992 ; 53 p.
11. Manichon H. Compactage, décompactage du sol et systèmes de culture. *CR Acad Agric Fr* 1988 ; 74 : 43-54.
12. Lavelle P, Pashanasi B. Soil macrofauna and land management in Peruvian Amazonia (Yurimaguas, Loreto). *Pedobiologia* 1989 ; 33 : 283-91.
13. Alegre JC, Cassel DK, Dale Bandy, Sanchez PA. Effect of land clearing on soil properties of an Ultisol and subsequent crop production in Yurimaguas, Peru. In : Lal R, Sanchez PA, Cummings RW, Balkema AA, eds. *Land development in the tropics*. Rotterdam, 1986 ; 4 951 p.
14. Kilasara M, Tessier D. Intérêt de mesures physiques sur échantillons non remaniés dans la caractérisation des sols ferrallitiques. Application à la couverture ferrallitique du district de Muhesa (Tanzanie). *Cah ORSTOM, sér Pédol* 1991 ; XXVI : 91-103.
15. Goense D. *Mechanized farming in the humid tropics with special reference to soil tillage, workability and timeliness of farm operations. A case study for the Zanderij area of Suriname*. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University (Netherlands), 1987 ; 136 p.
16. Hartmann C. *Évolution et comportement de sols sablo-argileux ferrallitiques sous culture de palmiers à huile*. Thèse, Université Paris VI, 1991 ; 201 p.
17. Ferreira da Silva LF. Influencia de manejo de

un ecosistema nas propriedades edáficas dos Oxisolos de Tabuleiro. CEPLAC-SUDENE, Brasil, 1978.

18. Jose M Toledo, Jaime Navas. Land clearing and pastures in the Amazon. In : Lal R, Sanchez PA, Cummings RW, Balkema AA, eds. *Land and development in the tropics*. Rotterdam, 1986 ; 4 951 p.

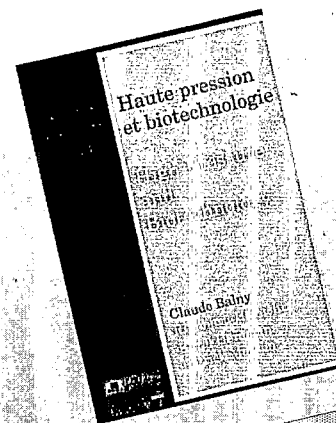
Résumé

En Amazonie, les sols ferrallitiques ou oxisols, caractéristiques des régions tropicales humides, ont, sous forêt, une structure microagrégée favorable à l'infiltration et au stockage de l'eau. L'échec des fermes d'élevage et des plantations a d'abord été attribué à la pauvreté chimique de ces sols. Cet article montre cependant que la déforestation mécanisée et le piétinement du bétail compactent les sols argileux d'Amazonie centrale.

Pour évaluer les effets de la déforestation sur la structure des sols et leur réversibilité, différentes situations sont examinées : sous forêt primaire, juste après déforestation mécanisée, sous pâturage, sous une légumineuse de couverture dans une plantation de palmiers à huile. L'analyse du spectre poral, en porosimétrie au mercure, permet de caractériser la structure d'une manière quantitative. Les différents niveaux d'organisation des constituants ont au préalable été identifiés par des observations en microscopie optique et en microscopie électronique à transmission.

Sous forêt, l'espace poral se divise en deux classes de pores : d'une part des pores très fins (quelques dizaines de nanomètres) entre les particules d'argile, et d'autre part des fissures et chenaux d'origine biologique, de taille beaucoup plus variable (0,1 à 100 μm au moins), qui délimitent les microagrégats argileux. Seuls les fissures et chenaux sont affectés par les compactages ; la diminution de leur volume atteint fréquemment 80 %, ce qui diminue d'autant la réserve en eau utile du sol. Il semble que l'introduction d'une légumineuse de couverture améliore la structure des sols compactés, par l'action de son système racinaire et par l'activité biologique qu'elle favorise.

**John Libbey
EUROTEXT**



Vient de
paraître

Claude BALNY
Rikimaru HAYASHI
Karel HEREMANS
Patrick MASSON
1992, broché, 640 pages
550 FF

Un ouvrage réalisé dans le but de favoriser la communication entre chercheurs et représentants de l'industrie intéressés par l'application des hautes pressions en biotechnologie et en science des aliments. Des spécialistes (principalement européens et japonais) présentent la biochimie et la biologie sous haute pression avec leurs applications potentielles.

**HAUTE PRESSION
ET BIOTECHNOLOGIE**

Collection Colloques
Vol. 224
Co-édition INSERM/
John Libbey Eurotext

BON DE COMMANDE

NOM Prénom
Adresse.....

Désire recevoir
Haute pression et biotechnologie
au prix de 550 FF + 30 FF de frais de port, soit 580 FF.
Ci-joint mon règlement à l'ordre de
John Libbey Eurotext 6, rue Blanche.
92120 MONTROUGE, FRANCE
Tél. : (1) 47.35.85.52.