

Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

2ème Réunion du groupe thématique

STRUCTURE ET FERTILITE DES SOLS TROPICAUX

Montpellier - 12 et 13 septembre 1994



5 SEP. 1996

φ68
PEDAPP
MON

Montpellier Orstom 1995

H 2000-77528, 530-532
(10af)
2 ex FDI
Non Hum



F

SOMMAIRE

	Pages
COMPTE RENDU DE LA 2^{ème} REUNION DU GROUPE THEMATIQUE STRUCTURE ET FERTILITE DES SOLS TROPICAUX	1
• Compte rendu de la journée de terrain du 12/09/1994 (B. BARTHES)	3-6
• Communications du 13/09/1994	
1. H. MANICHON : Le profil cultural. Une perspective nouvelle pour l'analyse du travail du sol.	7-14
2. P. ZANTE : Etude du comportement physique de sols argileux soumis à l'irrigation dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Distribution d'agrégats et courbe de retrait.	15-36
3. P. DE BLIC L'organisation macrostructurale du sol. Méthode d'étude.	37-40
4. J.P. LEFEBVRE Notes sur l'apport du traitement d'images à l'étude des sols.	41-48
5. P. BLANCANEAUX Utilisation de l'analyse morphostructurale 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.	49-56
6. R. RALISCH Utilisation du profil cultural pour l'étude de la compaction des sols ferrallitiques de l'état du Parana (Brésil).	57-62
7. A. CHAUVEL Effets de la structure et des racines dans un sol ferrallitique argileux sur le cycle de l'eau en milieu forestier amazonien.	63-72
8. D. HERVE Indicateurs de l'évolution de la fertilité physique des sols en jachère sur les hauts plateaux boliviens. Questions de méthodes.	73-84
9. R. MOREAU Le pénétromètre Yamanaka et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés.	85-92
10. T. BECQUER Evaluation de la compacité des sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie - Relation avec l'enracinement.	93-100
ANNEXE : LISTE DES PARTICIPANTS.	101

**Compte rendu de la 2ème réunion du groupe thématique
STRUCTURE et FERTILITE DES SOLS TROPICAUX.
Montpellier, 12-13 septembre 1994**

Au cours de cette deuxième réunion, l'accent a été mis sur les méthodes et travaux concernant la caractérisation de l'état structural à différents niveaux d'échelle, en particulier à celle du profil cultural.

Une bonne vingtaine de personnes de l'ORSTOM, du CIRAD et de l'Université de Londrina (Brésil) ont participé à cette réunion qui s'est tenue sur deux jours (cf. Liste des participants).

La première journée (12 septembre) était consacrée à l'étude du profil cultural et s'est déroulée sur le terrain au nord de Montpellier. Nous avons pu discuter, sur des exemples concrets, des aspects méthodologiques, de l'intérêt et des limites de l'étude du profil cultural, en tant que niveau d'analyse et de diagnostic (le plus directement accessible et pertinent) pour l'étude des relations entre le sol, les pratiques culturales et le développement des cultures. Un compte rendu de cette journée a été rédigé par B. BARTHES (Cf. ci-après).

Nous sommes très redevables pour l'organisation de cette journée du 12 septembre à Mme CLARET, à M. CLOUP du Lycée agricole et à M. RUEL du CEMAGREF qui nous ont aimablement permis d'accéder à leurs terrains respectifs et d'y ouvrir des fosses. Nous les en remercions vivement.

La deuxième journée (13 septembre) a été consacrée à des exposés et discussions autour de deux thèmes principaux. Le premier thème, sur le profil cultural et les relations sol-enracinement, comprenait cinq exposés, le second thème, sur la pénétrométrie, en comportait quatre.

Ces deux journées ont permis un large échange d'informations et d'idées faisant ressortir, au-delà de la convergence des objectifs, une complémentarité évidente des techniques et méthodes appliquées par les différents participants, pour l'étude du comportement physique et de la fertilité des sols. Une revue rapide des principaux thèmes et situations d'étude en cours a montré qu'une telle complémentarité pouvait et devait s'exprimer d'une façon plus profitable, en associant les différentes compétences dans la réalisation d'opérations conjointes. Ce sujet sera un point principal de l'ordre du jour de la prochaine réunion en septembre 1995.

Au terme de la réunion, le comité d'animation a été reconstitué avec les membres suivants : P. De BLIC, ORSTOM Burkina-Faso ; G. BELLIER, ORSTOM Bondy ; M. FORTIER, CIRAD Montpellier, et deux coordinateurs : H. MANICHON, CIRAD Montpellier et R. MOREAU, ORSTOM Montpellier.

R. MOREAU

GROUPE STRUCTURE ET FERTILITE DES SOLS TROPICAUX

Compte-rendu de la journée de terrain du 12.09.94 à Montpellier

LE PROFIL CULTURAL

B. Barthès

Le profil cultural est un niveau d'analyse et de diagnostic. Ph. de BLIC explique que dans l'étude du profil cultural, le "volume morphologiquement homogène" est l'unité de base de la description, la structure étant le principal critère retenu. La division du profil cultural en volumes sert de cadre aux investigations ultérieures (mesures de densité...).

Périodes d'observation : dans les régions à saisons contrastées, H. MANICHON conseille d'effectuer les observations lorsque le sol est réhumecté, au début des pluies ; pour les cultures annuelles, il préconise des observations à la floraison, lorsque le développement racinaire est maximal.

Dimension des fosses : compte tenu de l'empattement des tracteurs, d'environ 1.80-1.90 m, l'observation du profil cultural nécessite l'ouverture de fosses larges de 2.50 m.

1. ZONE DU MAS PIQUET / SOL D'ALLUVIONS POLYPHASE

Sur la parcelle de luzerne (âgée d'un an, semée derrière un blé, qui succédait à une vigne), H. MANICHON distingue en surface trois ensembles de volumes :

- des zones compactées, à mottes delta ; ces mottes compactes, à cassure plane ou conchoïdale, présentent un état interne continu, sans sous-structure, avec une porosité structurale faible ; ces mottes ne se pulvérisent guère au labour, et constituent un obstacle à l'enracinement ; dans ces zones compactes, la dessiccation provoque l'apparition de grandes fentes de retrait ;
- des zones autour des plants, très riches en racines, avec une structure nettement plus fine ;
- des zones entre les deux précédentes, avec des mottes gamma ; celles-ci ne sont pas compactes et présentent une sous-structure ; dans ces zones peu compactes, la dessiccation s'accompagne d'une diminution de volume de chaque élément.

Il convient d'être attentif à tous les indices.

Ainsi, la présence de pailles enfouies témoigne d'un labour après la culture de blé (précédent).

La répartition des mottes delta indique que la zone compactée, en place, est de l'année ; après des labours ultérieurs, on retrouverait ces mottes dures ailleurs dans le profil cultural. Ces mottes résultent ici du passage des engins (dans d'autres cas, elles peuvent résulter des piétinements par le bétail).

H. MANICHON propose un schéma du profil cultural de la fosse observée (large de 250 cm), en distinguant plusieurs volumes qui se succèdent latéralement au sein de l'horizon cultivé (celui-ci est épais de 20 cm) :

- un volume *C (delta)*, où le compactage résulte du dernier labour ; ce volume est large de 90 cm, ce qui correspond à environ deux fois la largeur d'une roue de tracteur (cote 0 à 90 cm) ;
- à l'autre extrémité de la fosse, un volume *C (delta+fissures)*, avec des mottes delta et des fentes de retrait ; ce volume semble résulter de la reprise par le dernier labour puis du tassement de mottes delta préexistantes (anciennement compactées donc) ; ce volume est large de 40 cm environ, ce qui correspond à la largeur d'une roue (cote 210 à 250 cm) ;

dans ces deux volumes, l'exploitation de l'eau est imparfaite ; entre ces deux volumes, il n'y a pas de trace de compactage après labour, mais on distingue :

- un volume *B (delta)*, avec des mottes de 3 à 5 cm et de grosses mottes delta compactes ; ces dernières semblent résulter du fractionnement d'un volume anciennement compacté par des travaux culturaux récents ; ce volume est large de 40 cm (cote 110 à 150 cm) ;
- deux volumes *O(tf+gamma)*, avec de la terre fine entre des mottes gamma, non compactées (cotes 90 à 110 cm et 150 à 210 cm) ;

dans ces deux derniers types de volumes, l'exploitation de l'eau est satisfaisante.

Plusieurs participants notent la présence d'une pellicule fine relativement continue à la surface du sol, qui est limoneux. Pour H. MANICHON, compte tenu que cette couche est mince, fissurée et non compacte, elle ne constitue pas vraiment un obstacle.

De manière plus générale, H. MANICHON explique que la culture de maïs en France, avec un travail du sol (printemps) et une récolte (automne) en conditions humides, est générateur de mottes delta (compactes) ; en situation d'équilibre, celles-ci peuvent représenter jusqu'à 70% de l'horizon labouré. Pour les autres céréales, en situation d'équilibre, les mottes delta peuvent représenter jusqu'à 30% de l'horizon labouré.

2. ZONE DU MAS PIQUET / SOL FERSIALLITIQUE CARBONATE

2.1 Sous forêt

On s'intéresse d'abord à un profil sous forêt, supposé non anthropisé. Il s'agit d'un sol rouge méditerranéen, recarbonaté par un niveau d'accumulation de calcaire situé à la base du profil (normalement, le sol rouge méditerranéen n'est plus carbonaté, la rubéfaction succédant à la décarbonatation). Dans l'ensemble, la structure est polyédrique subanguleuse fine.

2.2 Parcelle cultivée

On s'intéresse ensuite à une fosse située sur une parcelle proche, qui montre un sol rouge méditerranéen sans niveau d'accumulation de calcaire.

Le sol a été labouré récemment, après une culture de blé dur. Les pluies qui ont suivi le labour ont comme ennoyé les gros blocs dressés dans un manteau continu de terre fine (avant les pluies, ces blocs étaient plus gros et plus compacts). La surface du sol apparaît très irrégulière, avec des différences de niveau de près de 20 cm. Sur le profil, on observe de très grosses mottes compactes (delta), qui témoignent également d'un travail du sol de mauvaise qualité.

Mais H. MANICHON indique que ce type de sol est difficile à travailler, en règle générale (plus de 40% d'argile). Comme il ne peut pas être travaillé à l'état humide, on le laboure généralement dès les premières pluies, lorsqu'il est encore relativement sec, en comptant sur les pluies ultérieures pour favoriser la fissuration et aplanir le microrelief. Le risque existe, en cas d'automne sec, de ne pas pouvoir semer, du fait de la taille des mottes et de la trop grande irrégularité de la surface. De plus, ce type de sol ne peut être travaillé que par une charrue lourde attelée à un tracteur puissant, ce qui ne permet pas un labour autre que profond (40 cm).

Quelques solutions sont envisageables pour éviter ces inconvénients (grosses mottes dures, sol très irrégulier...) :

- abandonner le labour, du fait de l'existence d'une activité fissurale importante ;
- semer directement, mais il faut des équipements spéciaux, rares chez les entrepreneurs de la région ;
- faire deux passages croisés de chisel (écartement 40 cm), si l'état hydrique le permet ; le chisel est un outil rapide, qui consomme relativement peu d'énergie de traction, et qui peut être passé juste après la moisson ;
- brûler les pailles (peu conseillé dans la région).

Reste la question des adventices, qui doit être réglée indépendamment.

3. CEMAGREF / SOL ALLUVIAL

La fosse observée est située sur une parcelle de tournesol irriguée.

Dans l'horizon labouré, on observe :

- une petite croûte en surface (à peine une croûte de battance) ;
- un horizon superficiel finement fragmenté, très meuble, provenant de la reprise du labour ; l'observation attentive de la base de ce niveau permet de voir des rayures plus ou moins curvilignes, provoquées par un outil de travail superficiel de type herse rotative (diagnostic confirmé par l'exploitant) ayant effectué des passages croisés ; dans ce niveau fin, on retrouve également des mottes centimétriques, un peu plus grosses que les autres, provenant du fractionnement des mottes compactes delta préexistantes ;
- un horizon sous-jacent, non repris, comprenant des petites mottes, mais aussi de grosses mottes compactées (delta) provoquées par les compactages des années antérieures.

De la matière organique est présente au fond du labour ; elle semble avoir été tassée sous la roue de fond de raie de labour.

Concernant le système racinaire :

- on note la présence de racines en arêtes de poisson, qui ne pénètrent pas dans les mottes ; elles caractérisent les mottes delta ;
- on observe des pivots de tournesol peu ramifiés, dont le diamètre diminue rapidement dans l'horizon labouré, ce qui est peu favorable ; ces pivots empruntent généralement des fissures, mais sont gênés dans leur développement ;
- les petites racines sont présentes uniquement dans le lit de semences.

La réhabilitation de cette parcelle est possible, mais ne passe pas par des interventions "chirurgicales" de type sous-solage. Sur une parcelle très compactée comme celle-ci, le sous-solage est coûteux en énergie (tracteur puissant), avec un résultat qui n'est pas assuré ; de plus, après sous-solage, la charrue interviendra sur un milieu plus sensible au compactage ; le sous-solage s'accompagne également de risques de suffosion (circulations sous la surface).

On conseillera plutôt :

- des cultures de graminées non irriguées (l'irrigation augmente les risques de compactage, car elle est rarement maîtrisée) ;
- un labour peu profond, à moins de 25 cm, avec un outil léger ; une charrue 14" est ainsi préférable à une charrue 18", afin de mieux dresser le labour (ce qui facilitera la fragmentation ultérieure des mottes), afin également de mieux découper les volumes compactés ; ce labour est à effectuer à une humidité proche de la capacité au champ, après une première fragmentation au chisel ; les travaux de reprise sont à limiter ;
- le passage d'une charrue munie à l'arrière d'une griffe profonde, qui éclate et fragmente les zones compactées sous-jacentes ;
- d'éviter toute submersion de la parcelle et tout apport d'eau intempestif (pas d'irrigation donc) ;
- de planter une prairie, ce qui est la meilleure réhabilitation possible.

Pour la réhabilitation des zones compactées situées sous la semelle de labour, il faut surtout compter sur leur évolution naturelle, avec le temps.

Le profil cultural

Une perspective nouvelle pour l'analyse du travail du sol

Hubert Manichon
Directeur scientifique du Cirad

L'étude des systèmes de culture (SEBILLOTTE, 1978, 1990), de leurs performances techniques et économiques, de leurs effets à court et à long terme sur l'agrosystème, de leurs conséquences environnementales, constitue une partie essentielle de l'agronomie.

La démarche la plus ancienne (et encore la plus répandue) consiste à étudier des corrélations (ou fonctions de production) entre techniques culturales et rendements des cultures. On attend de la répétition (dans le temps et l'espace) de la comparaison des rendements, obtenus selon différentes modalités d'une technique culturale, l'établissement de relations stables, suffisamment générales pour être extrapolables et utilisables comme références.

Pour le travail du sol, l'échec de cette attitude est particulièrement net (HAWKINS, 1967 ; SEBILLOTTE, 1975 ; WINGATE-HILL, 1978), sauf pour des cas extrêmes.

On est donc conduit à adopter une autre attitude qui consiste à :

– mieux définir les variables explicatives : sans examen direct du milieu, ce sont des effets supposés (et non vérifiés) de l'outil que l'on met en relation avec le peuplement végétal ;

– étudier des variables moins distantes, grâce à l'introduction d'une variable intermédiaire « état du sol » dans l'étude des relations travail du sol-rendement des cultures.

Cette voie nouvelle a été ouverte en 1960 par S. Hénin et ses collaborateurs, R. Gras, G. Monnier et A. Feodoroff, du Laboratoire des techniques culturales de l'Inra à Versailles, quand ils ont inventé le concept de « profil cultural ». Ils ont ainsi permis un renouvellement des démarches en agronomie, et tout particulièrement pour l'analyse du travail du sol. Nous nous proposons de retracer ici brièvement l'évolution de l'utilisation de ce concept, et les perspectives qu'il offre aujourd'hui.

Naissance du concept de profil cultural : son utilisation pour le diagnostic au champ

L'histoire de l'agronomie est intimement liée à celle de l'agriculture. Ainsi, la première moitié du XX^e siècle a été marquée par le développement de la fertilisation minérale et les progrès des analyses de laboratoire pour le diagnostic sur les composantes chimiques de la fertilité. Citons, comme manifestations éminentes des travaux réalisés à cette époque, les synthèses réalisées par DEMOLON (1952). A partir de 1950, de nouveaux systèmes de culture, motorisés, se généralisent en France et en Europe. Avec eux apparaissent des problèmes d'une autre nature, révélant la nécessité d'évaluer non seulement les quantités d'éléments nutritifs présentes dans le sol, mais aussi leurs conditions de prélèvement par les cultures ; un diagnostic sur les effets du travail du sol s'impose alors, impliquant la caractérisation et l'étude du fonctionnement du système constitué par « *la succession des couches de terre, individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines de végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces actions* » (HÉNIN *et al.*, 1960).

L'utilisation de ce concept nécessite l'élaboration d'une méthode dont le principe est proche de la démarche du médecin généraliste : détection de symptômes par observation et « auscultation » du sol, élaboration d'une synthèse (syndrome), formulation d'un diagnostic. La nécessité d'une grande rigueur dans l'analyse est affirmée : observation indépendante des différents caractères, nécessité de rendre objective leur appréciation.

Pour l'état structural, les bases d'une description systématique des différents horizons du profil s'inspirent, en les simplifiant, des approches morphologiques d'origine pédologique. Mais ce n'est pas cet aspect de la méthode qui a, essentiellement, été retenu par ses utilisateurs, peut-être parce qu'à l'usage il a paru difficilement praticable dans les horizons travaillés.

Dans la pratique qui s'instaure et compte tenu des faibles connaissances théoriques d'alors en agronomie (notamment en agrophysiologie), c'est plus la recherche de symptômes défavorables aux cultures (ou supposés tels), que l'examen méthodique, qui ressort. Il en résulte un certain manque de crédibilité scientifique de la méthode, qui est surtout pratiquée avec profit par quelques experts proches du développement agricole dont E. Dalleine et P. Chazal : le « profil cultural » n'est pas devenu un véritable « outil de recherche », comparable dans son usage aux analyses de laboratoire. Ceci est renforcé par le fait qu'il concerne des états du sol très fugaces (contrairement aux analyses pédologiques), dont la caractérisation ne peut guère être contrôlée par d'autres observateurs qui retourneraient sur le même terrain, après que l'agriculteur ait continué ses travaux culturaux ! Certaines déviations ou abus d'observateurs mal avertis ne renforcent pas le statut scientifique de la méthode, jugée trop subjective.

Il nous a été donné de rencontrer, sous différentes latitudes, plusieurs de ces « experts » au discours brillant, énonçant des conclusions définitives valables pour plusieurs hectares, après avoir dégagé à la pointe du couteau quelques centimètres cubes de terre. Reconnaissons cependant que ces discours avaient une grande force de conviction et ont été malgré tout utiles. Ils ont contribué à ce que les agriculteurs découvrent que les moyens mécaniques de plus en plus puissants dont ils disposaient pour travailler le sol ne garantissaient pas, par leur seule existence, l'obtention de résultats satisfaisants.

Le « nouveau » profil cultural

N'oublions pas que S. Hénin, au début des années 60, c'est-à-dire au moment de la parution de la première édition du « Profil cultural », était professeur d'agriculture à l'Institut national agronomique. Il illustrait ses cours par des projections de diapositives issues de ses nombreuses tournées sur le terrain et les commentait brillamment, ses anciens élèves s'en souviennent. Il voulait, ce faisant, montrer la diversité et la complexité du réel, et la nécessité d'y confronter le discours théorique. Cet enseignement était complété par un stage sur le terrain, comportant une observation du sol.

Dès le milieu des années 60, M. Sebillotte, successeur de S. Hénin à la chaire d'agriculture de l'Ina, voulut renforcer la formation des étudiants à l'observation, à l'analyse et à la synthèse. Il fit pour cela de la méthode du profil cultural un outil pédagogique privilégié, dont la valeur formatrice dépasse largement l'objet considéré.

Il voulut aussi en faire un outil de recherche en l'introduisant comme variable explicative dans des protocoles d'expérimentations et d'enquêtes (MANICHON et SEBILLOTTE 1973, par exemple). Plusieurs autres équipes de chercheurs introduisaient le concept de profil cultural dans leurs démarches : citons, par exemple, GRAS *et al.* (1971), pour l'étude de la betterave à sucre en Picardie, CHARREAU et NICOU (1971), en Afrique tropicale.

C'est surtout l'expérience accumulée par M. Sebillotte et l'équipe d'enseignants-chercheurs qui l'entourait qui permit un renouvellement de la démarche.

Cette expérience, tout en confirmant la validité des principes théoriques de départ énoncés par S. Hénin, révélait l'insuffisance des modalités de caractérisation de l'état structural proposées à l'origine, pour rendre compte de la variabilité des situations rencontrées et les comprendre.

Plusieurs tentatives avaient eu lieu pour rendre plus opérationnelles les procédures d'examen du profil cultural, notamment dans le cadre des essais multilocaux de travail du sol de l'Institut technique des céréales et des fourrages, lancés par S. Hénin, sans que l'on ait pu aboutir à des résultats satisfaisants (MANICHON et BODET, 1976). La poursuite des réflexions nous a amené à adopter une attitude clairement déterministe.

- D'abord, pour la définition des critères de caractérisation de l'état des horizons anthropiques : l'état du profil cultural observé à un moment donné appartient à une histoire, au cours de laquelle sont intervenus deux groupes d'agents externes (les outils, les agents naturels), qu'il convient de distinguer pour obtenir un diagnostic. Ceci passe par la définition de deux niveaux d'organisation structurale (MANICHON, 1982) : l'état interne des mottes (fig. 1) et leur mode d'assemblage (fig. 2). Les modalités de passage d'un état à l'autre, à chaque niveau d'organisation, ont été pour partie élucidées.

- Ensuite, pour la manière d'appliquer ces critères à l'objet complexe qu'est un profil cultural : à chaque opération culturale, le volume de sol n'est que partiellement affecté par les actions mécaniques (comptages, fragmentations), ce qui conduit à définir une double stratification (MANICHON, 1987, 1988 ; MANICHON et ROGER-ESTRADE, 1990). Les intersections de limites horizontales et verticales (fig. 3) définissent des compartiments ayant subi des actions mécaniques définies.

Cette double stratification, qui fournit une « géographie » des horizons anthropiques, se révèle efficace :

- comme moyen d'analyse et de diagnostic de l'origine de l'état observé (confrontation à l'histoire culturelle), en utilisant les critères morphologiques définis ci-dessus ;

- comme plan de sondage pour le choix des emplacements et des volumes de sol sur lesquels on pratique des mesures physiques (PAPY, 1986).

- comme grille d'analyse de la répartition spatiale du système racinaire : l'établissement de cartes des impacts des racines sur des plans verticaux et horizontaux, dont la localisation est choisie en fonction de la stratification, permet de calculer des fonctions de distribution des distances entre racines (TARDIEU et MANICHON, 1986 ; TARDIEU 1987, 1988) ; ces fonctions de distribution rendent mieux compte de la fonction puits pour l'eau que le critère habituel de distance moyenne entre racines, dès lors que la répartition spatiale de celles-ci est variable ; on a aussi pu montrer que les conséquences d'un état donné de la couche labourée sur l'enracinement pouvaient s'étendre au-delà de celle-ci (« effet d'ombre » des obstacles).

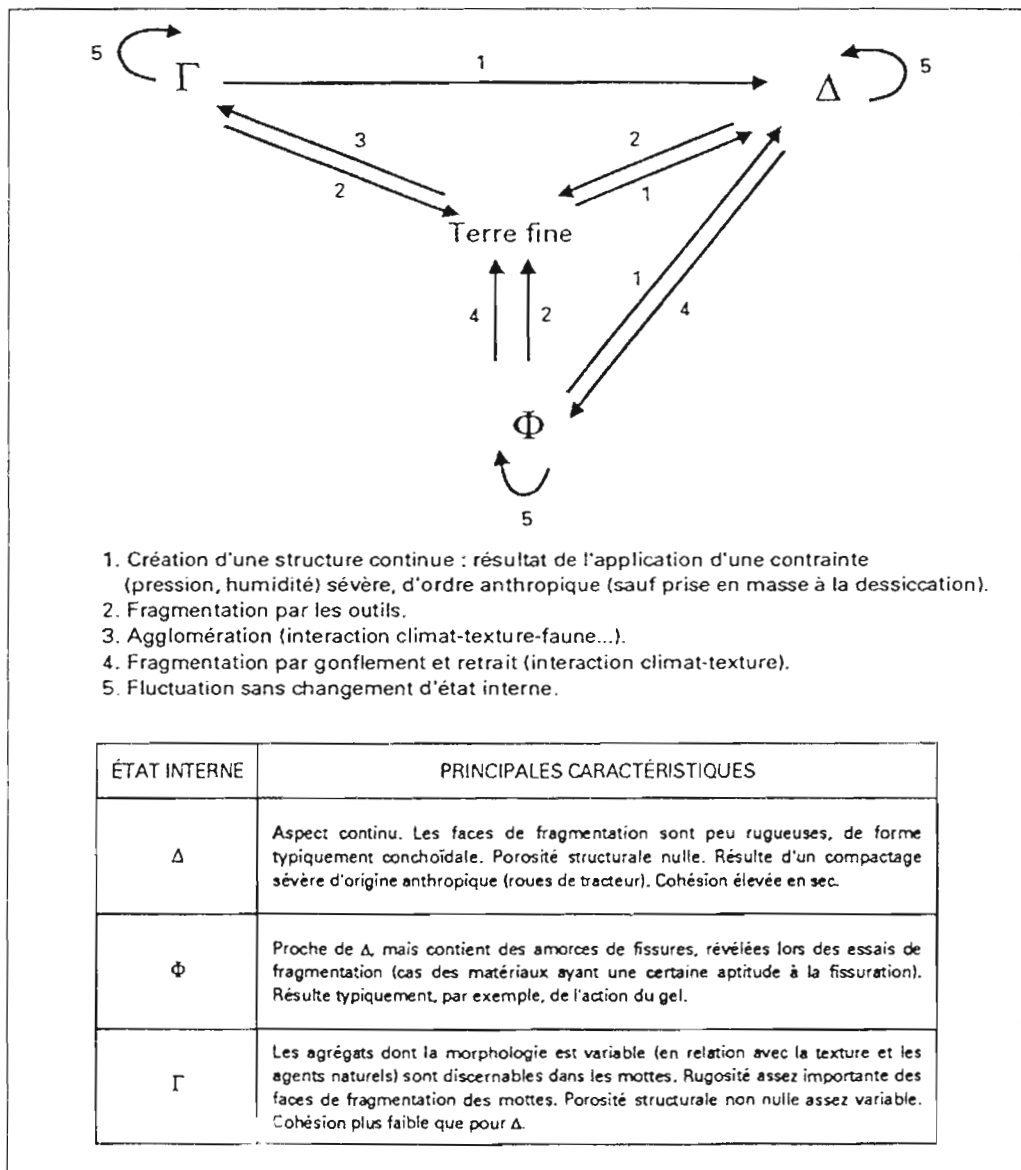


Figure 1. L'état interne des mottes (GAUTRONNEAU et MANICHON, 1987).

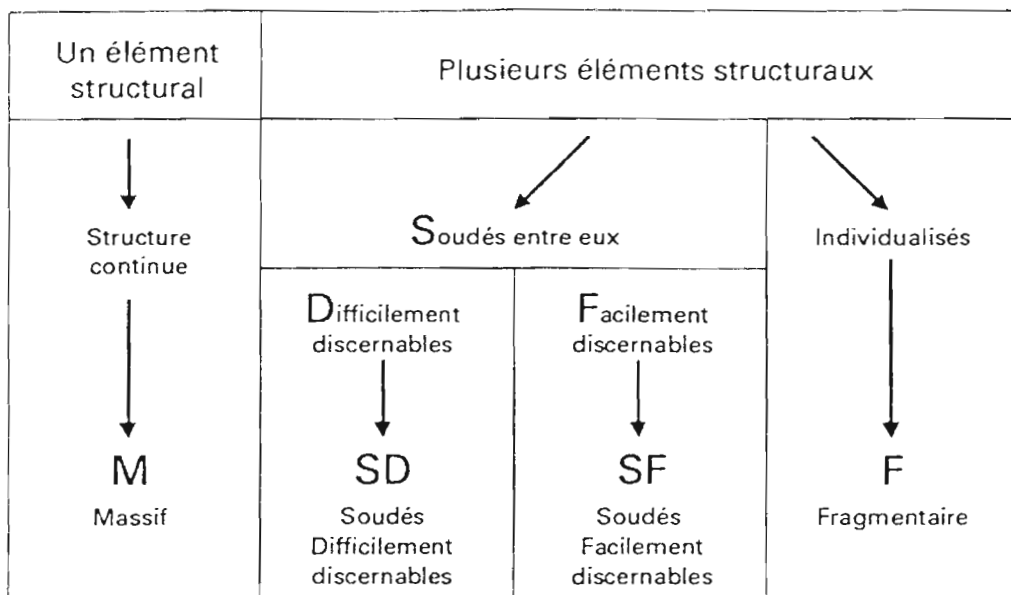


Figure 2. Les modes d'assemblage des mottes, deuxième niveau d'organisation (GAUTRONNEAU et MANICHON, 1987).

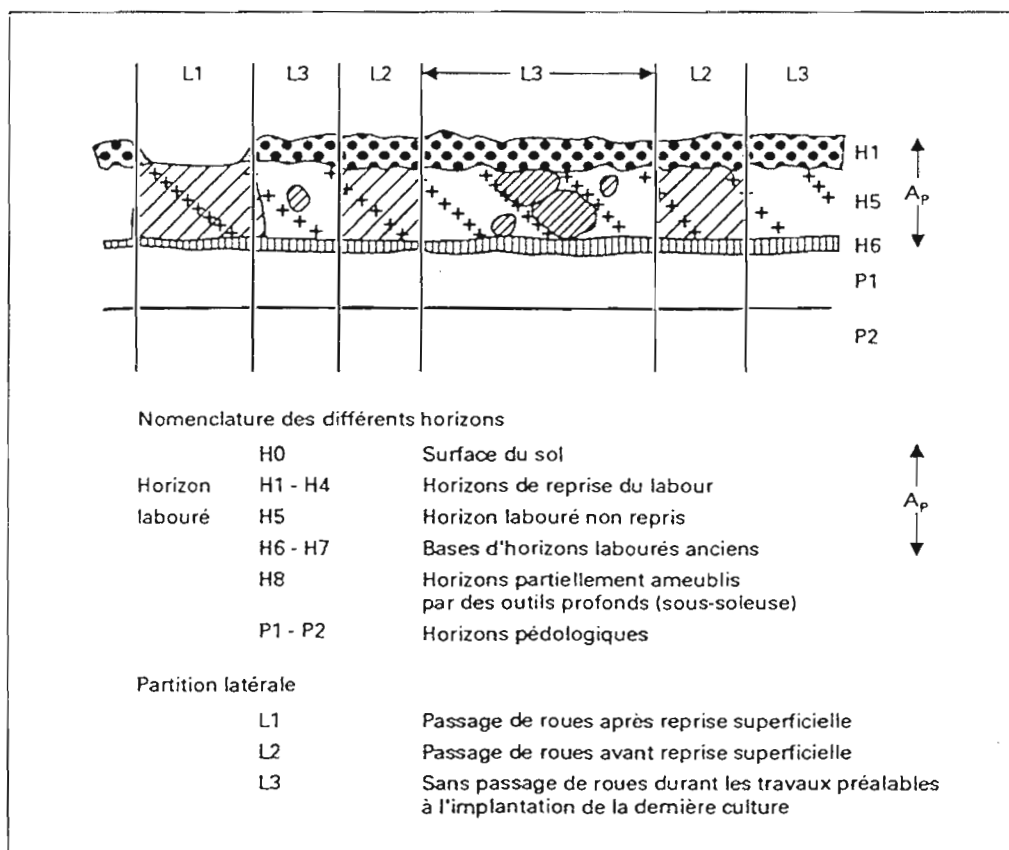


Figure 3. Double stratification du profil cultural.

Conclusion

Deux principaux obstacles limitaient l'utilisation de la méthode du profil cultural :

– les critères de caractérisation de l'état structural proposés à l'origine : inspirés de ceux de la pédologie, ils étaient utilisés dans les horizons travaillés en dehors de leur domaine de validité, les facteurs d'évolution du sol n'étant pas les mêmes ; il n'est pas interdit de penser que l'identification, dans une deuxième étape, d'une démarche spécifique à l'agronomie pour l'étude du sol *in situ* ait pu contribuer à une meilleure compréhension entre ces deux disciplines ;

– la variabilité spatiale de l'état des horizons travaillés à des échelles décimétriques et métriques, rendant inopérantes les observations effectuées à l'aide de descripteurs « moyens » de ces horizons.

Dans ces deux cas, une attitude déterministe, dont la mise en forme doit beaucoup à G. Monnier, a permis de surmonter les difficultés, et de proposer un système de description plus adapté. Une publication – à l'usage des étudiants, des agents du développement agricole et des chercheurs – a été réalisée sur la forme d'un « Guide méthodique du profil cultural » (GAUTRONNEAU et MANICHON, 1987).

Cette méthode reste qualitative, elle nécessite un apprentissage sérieux. Nous avons pu en montrer la pertinence dans plusieurs cas (MANICHON et ROGER-ESTRADE, 1990 ; COULOMB *et al.*, 1990), autant pour détecter les causes de la variabilité des profils cultureux entre parcelles (interactions entre le milieu et les itinéraires techniques) que pour apporter des éléments de compréhension aux performances des cultures. Mais il n'est pas exclu que cette nouvelle méthode de description, typiquement axée sur le diagnostic cultural au champ, entraîne des utilisations déviantes : la rigueur dans l'observation comme dans l'interprétation des faits reste une obligation essentielle.

Outre son utilisation en diagnostic, la méthode que nous avons évoquée offre de nouvelles possibilités. Il s'agit :

– au laboratoire, de pouvoir travailler sur des constituants de la structure bien identifiés (mottes de calibres et d'états internes définis) pour en étudier les propriétés physiques et mécaniques (travaux en cours de J. Guerif, F. de Leon et P. Stengel à la Station de science du sol de l'Inra, Montfavet) ; ceci doit permettre l'établissement de relations plus efficaces entre les échelles de travail du laboratoire et du terrain ;

– sur le terrain, de pouvoir définir et créer des grands types d'états des profils, constituant les « traitements » des expérimentations ; nous avons évoqué les travaux de F. Tardieu sur l'enracinement, d'autres recherches sont en cours (I. Coulomb, J. Caneill, J. Roger-Estrade au Laboratoire d'agronomie de l'Inra/Ina, à Grignon) et portent sur la modélisation des états du profil et leur évolution sous l'action des outils.

Cela implique un perfectionnement des modalités de caractérisation des profils, qui, tout en restant basées sur les principes exposés précédemment, puissent fournir des informations précises (calibre, nombre et disposition spatiale des constituants de la structure) sans accroître le temps passé sur le terrain : une procédure comportant la prise de photos stéréographiques et l'analyse informatisée des images est en cours de mise au point à Grignon.

Ainsi, la méthode du profil cultural devient un véritable outil de recherche en agronomie, comme l'atteste le lancement par l'Inra en 1989 d'une ATP « Travail du sol », qui sert de support aux travaux évoqués ci-dessus, et associe l'Inra, l'Ina et l'ITCF.

Dans la forme, dans les procédures, on semble s'être fortement éloigné des bases du profil cultural. Sur le fond, il n'en est rien, ou presque ; les idées énoncées par S. Hénin dès 1960 sont toujours actuelles. Que l'on en juge par ces citations tirées de l'introduction de l'ouvrage (HÉNIN *et al.*, 1960) :

– « On peut ... essayer de définir l'état physique du sol. Mais ... on se heurte à de nombreuses difficultés – la plus fondamentale de toutes est liée à l'hétérogénéité du milieu (qui) elle-même constitue un des éléments de la description du milieu ». Ceci n'annonçait-il pas la double stratification du profil à laquelle nous avons fait allusion ?

– « Ces faits conduisent non seulement à considérer l'état physique actuel du milieu mais encore à essayer de prévoir ou comprendre son histoire ». Comment, après avoir lu cette phrase, ne pas adopter une attitude déterministe pour le choix des critères de description de l'état structural ?

Une seule conclusion s'impose : il a fallu près de 30 années pour comprendre la pensée du Maître et, peut-être, la rendre accessible à un plus grand nombre. Nous souhaitons que, sous des formes nécessairement renouvelées, elle puisse maintenant imprégner davantage la communauté scientifique internationale.

Bibliographie

CHARREAU (C.), NICOU (R.), 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. Paris, IRAT, 254 p. (Bulletin agronomique n° 23).

COULOMB (I.), MANICHON (H.), ROGER-ESTRADE (J.), 1990. « Evolution de l'état structural sous l'action des systèmes de culture » In *La structure du sol et son évolution*. J. Boiffin, A. Marin-Lafliche (éd.). Paris, Inra, p. 137-155 (Les Colloques de l'Inra n° 53).

DEMOLON (A.), 1952. *La dynamique du sol*. Paris, Dunod.

GAUTRONNEAU (Y.), MANICHON (H.), 1987. *Guide méthodique du profil cultural*. Lyon, CEREF-GEARA.

GRAS (R.), OSTY (P.L.), DEFFONTAINES (J.P.), MARIN-LAFLÈCHE (A.), 1971. Contribution à l'étude de la culture de la betterave à sucre sur des sols légers du Laonnois et de la Champagne de l'Aisne. *Ann. Agron.*, 22 (5) : 537-584.

HAWKINS (J.C.), 1967. Systems of mechanization for agriculture in developing semi-arid countries. *J. Proc. Int. Agric. Eng.*, 23 (2) : 9-53.

HENIN (S.), FEODOROFF (A.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol*. Paris, SEIA, 320 p.

HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1969. *Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques*. Paris, Masson, 322 p.

MANICHON (H.), 1982. *Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique*. Thèse docteur-ingénieur, INA-PG.

MANICHON (H.), 1987. « Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés » In *Soil compaction and regeneration*. G. Monnier, M.J. Goss (eds). Rotterdam, Balkema, p. 39-52.

MANICHON (H.), 1988. Compactage, décompactage du sol et systèmes de culture. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (1) : 43-54.

- MANICHON (H.), BODET (J.M.), 1976. « Caractérisation des profils culturaux ». In *Simplification du travail du sol en culture céréalière*. Paris, ITCF.
- MANICHON (H.), ROGER-ESTRADE (J.), 1990. « Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture ». In *Les systèmes de culture*. L. Combe, D. Picard (éd.). Paris, Inra, p. 27-55.
- MANICHON (H.), SEBILLOTTE (M.), 1973. *Etude de la monoculture du maïs en Béarn*. Paris, INA-PG (doc. multigr.)
- PAPY (F.), 1986. Effet de l'état structural d'une couche labourée sur sa rétention en eau. *Agronomie*, 6 (6) : 57-66.
- SEBILLOTTE (M.), 1975. Comment aborder et suivre l'introduction dans un système de culture de nouveaux procédés de travail du sol. *Bull. Tech. Inf.*, 302-303 : 555-667 (numéro spécial : Procédés nouveaux de travail du sol).
- SEBILLOTTE (M.), 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 64 (11) : 906-914.
- SEBILLOTTE (M.), 1990. « Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes ». In *Les systèmes de culture*. L. Combe, D. Picard (éd.). Paris, Inra, p. 165-196.
- TARDIEU (F.), 1987. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. III. Disponibilité des réserves en eau du sol. *Agronomie*, 7 : 279-288.
- TARDIEU (F.), 1988. Analysis of spatial variability of maize root density. II. Distances between roots. *Plant Soil*, 107 : 259-266.
- TARDIEU (F.), MANICHON (H.), 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II. Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie*, 6 : 415-425.
- TARDIEU (F.), MANICHON (H.), 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs I. Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. *Agronomie*, 7 : 123-131.
- WINGATE-HILL (R.), 1978. Tillage requirements for cereal crop production, and their relationships to the development of new tillage machinery. In *Modification of soil structure*. W.W. Emerson et al. (eds). Chichester, J. Wiley and Sons.

ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSIQUE DE SOLS ARGILEUX SOU MIS A L'IRRIGATION DANS LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

Distribution d'agrégats et courbe de retrait

ZANTE Patrick

*Orstom, Laboratoire d'hydrophysique
70-74 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex*

RESUME

Le développement important de l'irrigation pour la riziculture inondée dans les moyenne et basse vallées du fleuve Sénégal entraîne, à moyen et long terme, des risques de salinisation et d'alcalisation des sols lourds, vertiques ou hydromorphes, d'origine marine. Ces risques sont connus et continuent à faire l'objet de nombreuses études.

Le financement de la mise en place de la riziculture, dans un contexte de désengagement de l'État, est en partie assuré par le développement, sur ces périmètres rizicoles, de cultures commerciales cultivées en billons.

L'implantation durable de cultures diversifiées dans les casiers rizicoles exige alors l'étude des transformations physiques liées aux nouvelles techniques de mise en culture de ces sols. Pour ce faire, il est nécessaire de rechercher des méthodes de mesure adaptées.

Après un bref rappel des conditions climatiques et des caractéristiques des sols utilisés pour l'irrigation, une description schématique des grands types d'aménagements est présentée dans la première partie. La deuxième partie est consacrée aux effets de la culture irriguée de sols argileux sur la structure.

Le sol non cultivé est décrit par son profil pédologique, le sol cultivé est décrit par la méthode du profil cultural adaptée au sol billonné. Les méthodes du fractionnement en agrégats et de la courbe de retrait sont appliquées sur sol non cultivé et sur sol cultivé en billons. Les deux méthodes sont sensibles aux transformations physiques dues au travail du sol qui provoque un accroissement des teneurs en gros agrégats et qui se traduit par une augmentation de l'amplitude de la phase principale du retrait.

Mots-clés: culture irriguée - vertisol - profil cultural - structure - courbe de retrait - fractionnement en agrégats - fleuve Sénégal.

INTRODUCTION

La vallée du fleuve Sénégal (fig. 1) est située en zone climatique sahélienne, caractérisée par une faible pluviosité annuelle et une forte évaporation. Ces conditions climatiques ne sont pas favorables à la production des cultures pluviales. L'intensification de l'agriculture et la sécurisation de la production agricole passent par la création de périmètres irrigués. Celle-ci est facilitée depuis la construction de deux barrages: Maka-Diama à l'aval, qui bloque la remontée de la langue salée en saison sèche, et Manantali à l'amont qui écrête les crues et assure le maintien d'un niveau d'eau moyen toute l'année. Le premier objectif de ces périmètres irrigués est d'assurer la production du riz par submersion, le second est de dégager un revenu par installation de cultures commerciales, la tomate et l'oignon, ce qui oblige au billonnage.

La culture irriguée des sols lourds de cuvette, par les pratiques culturales nouvelles qu'elle exige (labour et billonnage mécanisés), induit des changements physiques, et par la remontée des nappes, provoque des transformations chimiques dans ces sols autrefois plantés d'*Acacia* et cultivés en décrue. Dans ce contexte, l'étude de ces modifications sous l'effet des nouvelles conditions de culture prend une place importante nécessitant, pour la caractérisation physique de l'évolution du sol, la recherche d'outils analytiques adaptés.

Notre objectif est de vérifier si deux méthodes d'appréciation de l'état structural du sol, la distribution dimensionnelle des agrégats issus du fractionnement du sol et la courbe de retrait, mettent en évidence des changements entre un sol cultivé et un sol non cultivé.

LES CONDITIONS DE L'IRRIGATION

Le Climat

La vallée du fleuve Sénégal est située dans la zone climatique sahélienne caractérisée par une seule saison des pluies, centrée sur le mois d'août, et qui s'étend de juin à octobre (fig. 2).

La pluviosité (période de 1968 à 1990) augmente du nord au sud, passant de 195 mm en 13 jours à Podor à 473 mm en 29 jours à Bakel. Cette variation dans l'espace est assortie d'une variation dans le temps qui est à Podor de 374 mm entre le maximum et le minimum enregistrés sur la période. La probabilité de dépasser une hauteur de 100 mm est de 9 années sur 10 à Podor; mais si 15% des pluies sont supérieures à 20 mm, une pluie sur deux est inférieure à 5 mm donc inefficace pour l'agriculture. La température de l'air variant de 20 à 40°C et l'évapotranspiration Penman de 5,5 à 8,5 mm/j (SAED, 1993), on comprendra que les besoins en eau des cultures soient loin d'être satisfaits et que l'irrigation est un facteur indispensable à la production agricole de la région de Podor.

Une première conséquence de ce climat est positive, puisqu'une ETP élevée et l'abondance d'énergie lumineuse permettent un fort potentiel de production.

La seconde conséquence est négative: l'existence d'un bilan évaporatoire fortement positif provoque une concentration des sels en surface (salinisation).

Les sols

L'histoire géologique de la vallée du fleuve Sénégal, succession de transgressions et de régressions marines, laisse apparaître un ensemble de dépôts sédimentaires formant une mosaïque de cuvettes de décantation et de "levées" (MICHEL, 1973; FAO-SEDAGRI, 1973) (fig. 3).

Dans la région de Podor les cuvettes de décantation sont occupées par des sols vertiques et les sols de levée, considérés généralement comme légers, sont en réalité souvent argileux (petites levées) ou présentent des perméabilités très faibles (BOIVIN *et al.*, 1993). La variabilité des caractères pédologiques de ces sols est faible. Ils sont constitués d'au moins 55% d'argiles, mélange de smectites, illites et kaolinite. L'argile, présente sur une épaisseur de 0,4 à 2 m, repose sur un sable blanc fin du Nouakchottien. A l'interface on peut rencontrer les traces d'enracinement d'une mangrove à *Rhizophora*.

Du point de vue analytique, la capacité d'échange cationique varie de 0,35 à 0,65 méq/g d'argile et le complexe est saturé à 80-90% par des ions calcium et magnésium à parts égales (BOIVIN *et al.*, 1993).

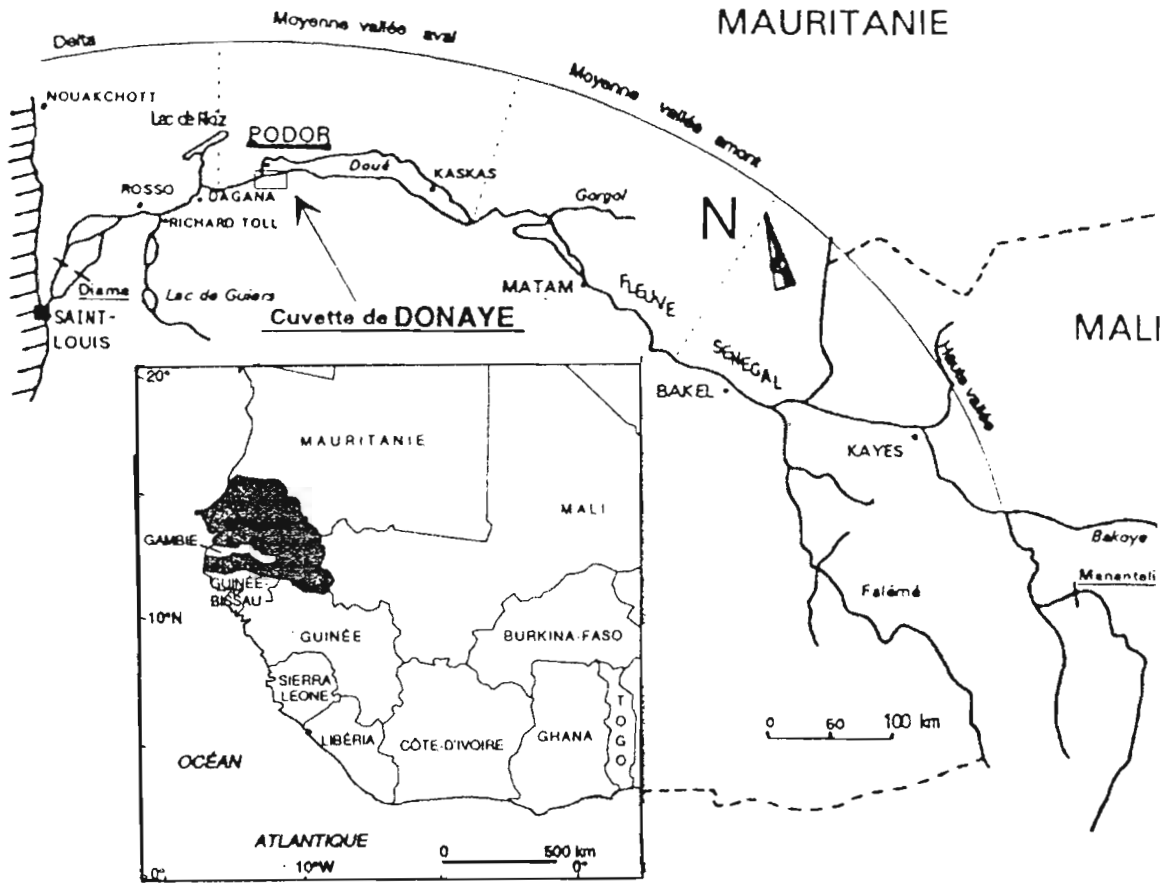


Figure 1 : Cartes de situation

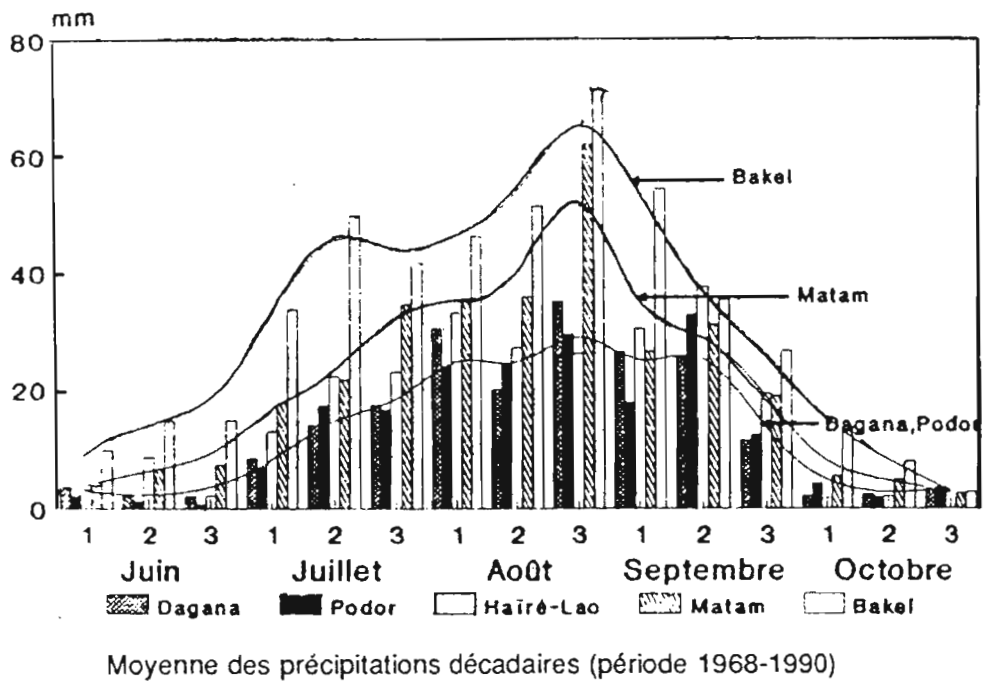
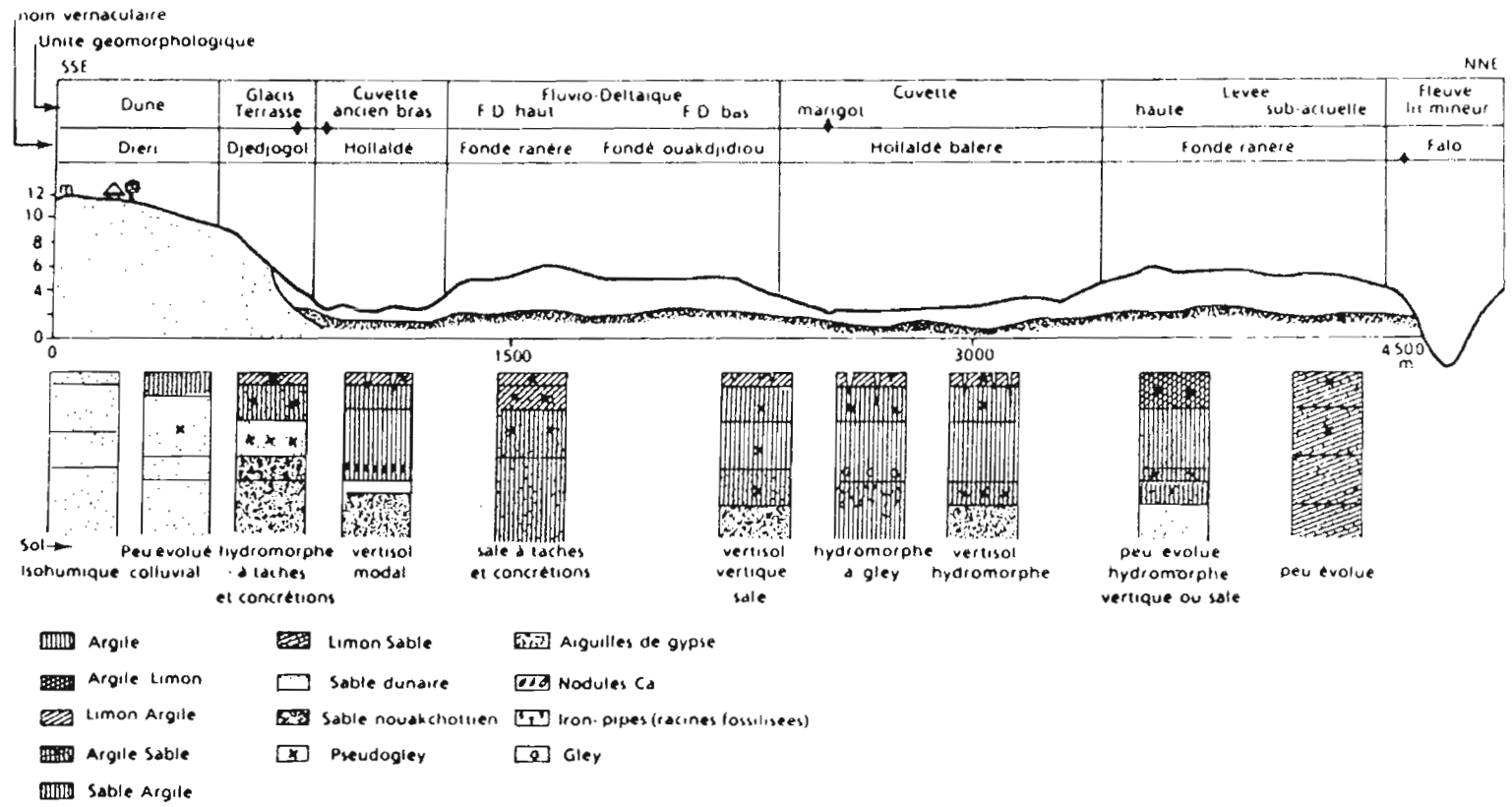


Figure 2 : Pluviosité (in SAED, 1993).

Figure 3 : Toposéquence à travers la plaine alluviale (in MTIMET, 1979).



Les aménagements

Le barrage de Maka-Diama, qui bloque la remontée de la langue salée, et celui de Manantali qui écrête les crues et assure le maintien d'un niveau d'eau moyen toute l'année avec 30 à 50 m³ s⁻¹ en étiage, permettent de créer des crues contrôlées et offrent un potentiel théorique de 375 000 ha de cultures irriguées (SEGUIS, 1992). Cette disponibilité permanente de l'eau permet la création de périmètres irrigués qui offrent la possibilité de pratiquer plusieurs cycles de culture par an.

P.D. DIOUF et C.Z. GUILMOTO, (1994) distinguent trois grands groupes de ménages dans la région de Podor: les éleveurs (12%), les petits paysans (50%) et les paysans moyens ou aisés (25%), le reste de la population étant constitué de ménages ni éleveurs ni paysans. La culture irriguée est un secteur d'activité très important puisque 70% des ménages disposent de parcelles irriguées; cependant les cultures traditionnelles sont encore largement présentes, surtout chez les petits paysans, qui, à côté de leur parcelle de riz, continuent les cultures de décrue, les cultures de berge et l'entretien du jardin pour minimiser les risques.

La culture du riz est la plus importante des cultures irriguées, la récolte est autoconsommée par les trois quarts des cultivateurs. Le degré d'intensification est proportionnel à la surface irriguée et correspond à un recul très net des cultures de décrue dès que les surfaces irriguées atteignent 50 ares. Le développement des cultures spéculatives (tomate et oignon) correspond à une étape ultérieure de l'intensification qui permet un premier enrichissement et semble freiner l'exode rural.

Les cultures se pratiquent sur trois grands types d'aménagements:

- les Périmètres Irrigués Villageois (PIV), d'une superficie moyenne d'environ 20 ha où chaque attributaire dispose d'environ 0,14 ha. Ils se caractérisent par une faible mise en valeur et une spécialisation dans la polyculture en contre saison froide (novembre à février)
- les périmètres intermédiaires (IT), sont des aménagements de 50 ha divisés en parcelles d'un ha dont 84 ares sont cultivés en riz et 16 en cultures spéculatives. Leur mise en valeur est nettement supérieure à celle des PIV, les attributaires faisant souvent deux campagnes rizicoles et une campagne de tomate-oignon
- les périmètres privés, favorisés par le développement des Groupements d'Intérêts Économiques (GIE) qui donnent accès au crédit, sont surtout créés pour sécuriser le patrimoine foncier des familles. La culture principale y est le riz d'hivernage mais en 1992 49% des attributaires n'ont fait qu'une seule campagne.

Dans un contexte de désengagement de l'État et de non compétitivité des produits (avant dévaluation du Franc CFA), les aménagements sont construits de façon sommaire et au moindre coût (sans drainage). L'irrigation se fait pour l'essentiel sur des petits aménagements anciens dans un état d'entretien médiocre (DIOUF, GUILMOTO, 1994).

LES EFFETS DE LA CULTURE IRRIGUEE DE SOLS ARGILEUX

Pour répondre au premier objectif de satisfaction des besoins alimentaires, tous les périmètres ont été conçus pour la culture du riz inondé, avec maintien d'une lame d'eau de 10 à 20 cm dans le fond des casiers. Ils sont donc principalement installés dans les sols lourds des cuvettes de décantation. Dans la région de Podor, 80% des périmètres sont implantés dans les cuvettes de décantation dont 75% sur vertisols (*Hollaide*). La culture du riz inondé par la présence d'une semelle de labour limitant la zone d'exploitation racinaire aux 15 premiers centimètres de sol, et la gestion collective de l'eau qui privilégie les tours d'eau de 2 à 3 semaines pour le riz, créent des conditions défavorables aux cultures de diversification.

Les risques de dégradation de ces sols sont essentiellement dus à la pratique de la riziculture inondée sans drainage (LOYER, 1989) qui provoque la remontée des nappes jusqu'à affleurement et permet aux sels d'origine marine, piégés dans les sédiments lors de leur mise en place, de remonter en surface (salinisation).

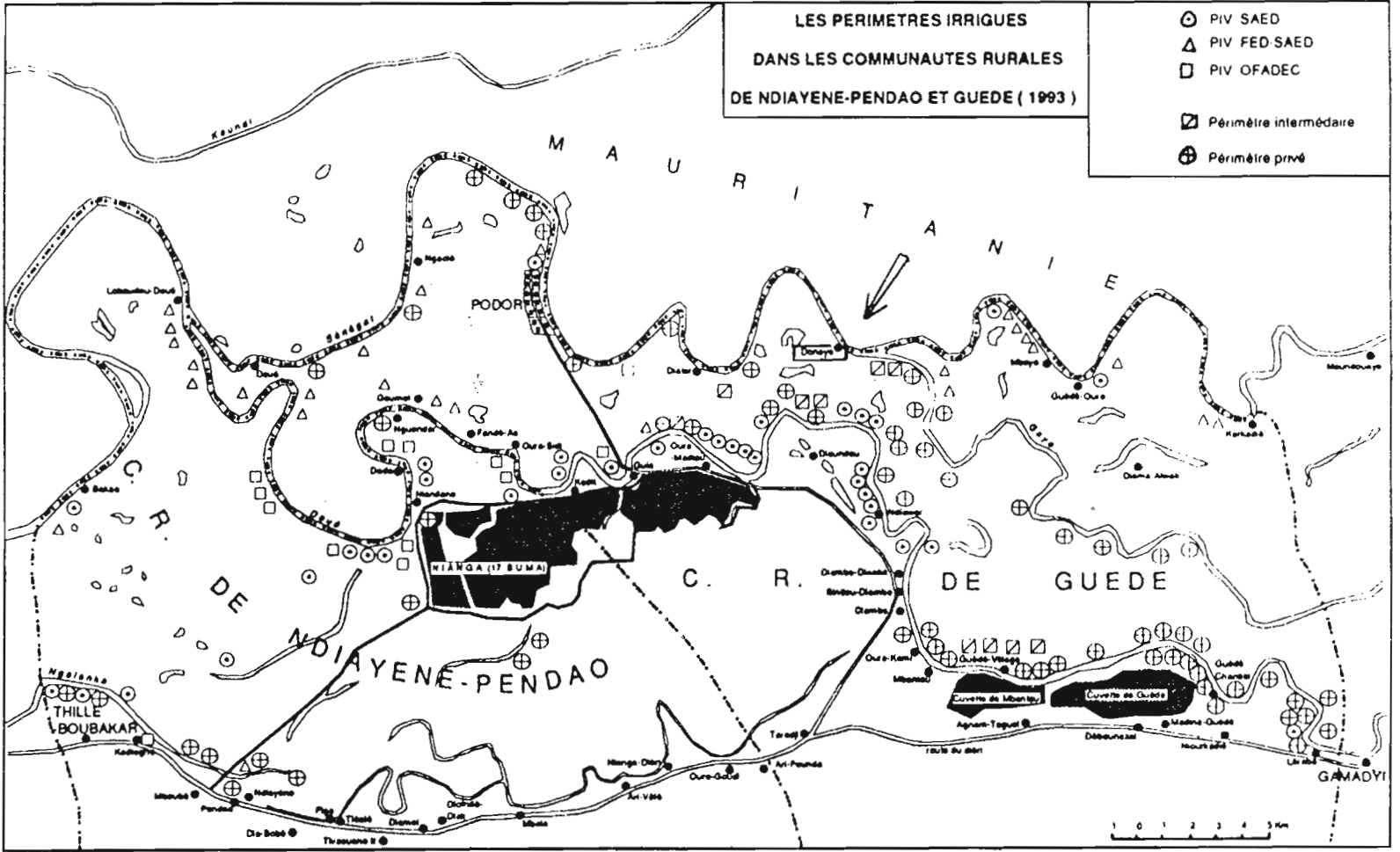


Figure 4 : Carte de localisation des périmètres irrigués près de Podor (in LERICOLLAIS, 1993).

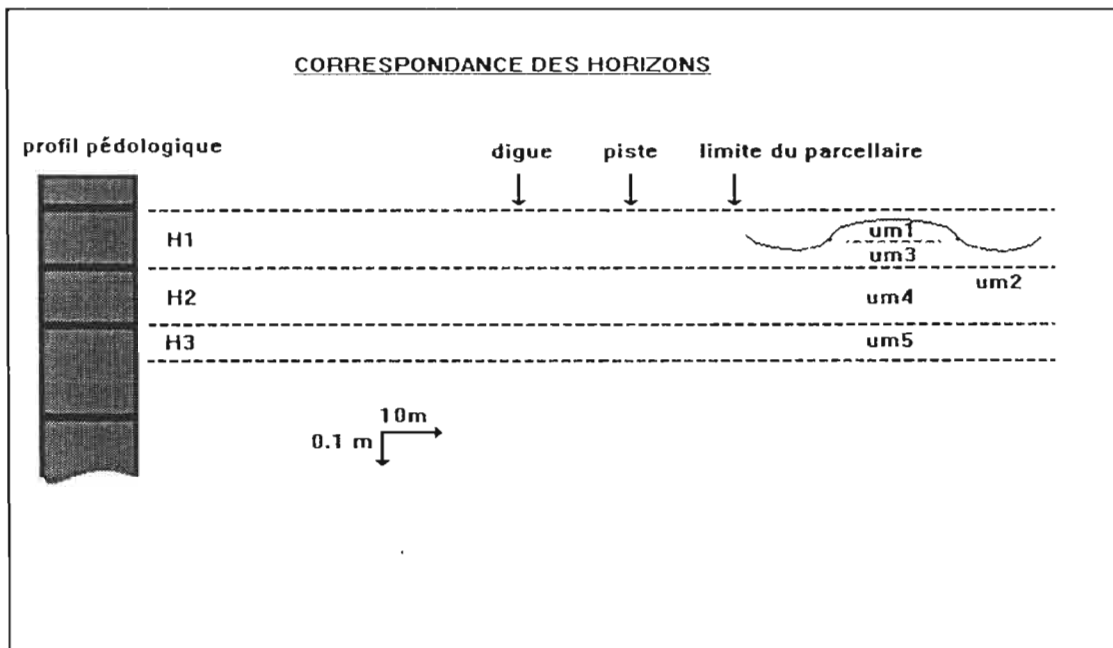
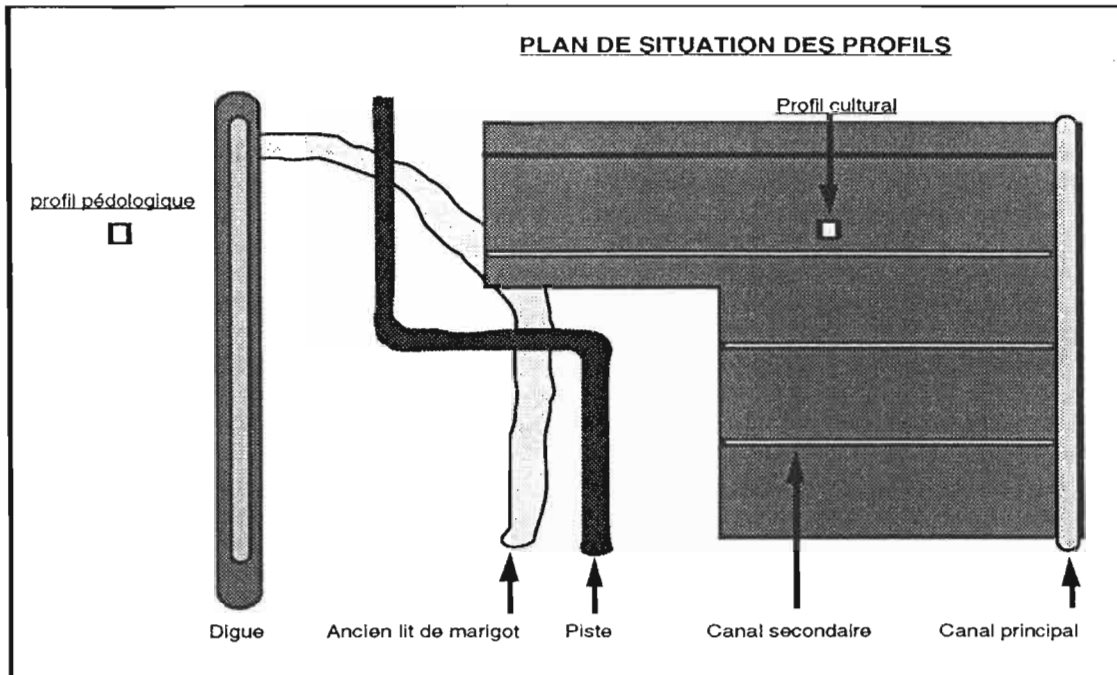


Figure 5 : Carte de localisation des sites.

La concentration en ions sodium qui se manifeste déjà dans certains sols (sodisation), et l'irrigation avec l'eau du fleuve à l'alcalinité résiduelle positive, peut aboutir à une hausse du pH du sol (alcalisation). Cette dynamique d'alcalinisation entraîne un effondrement de la structure du sol qui le rend impropre à la culture et difficilement récupérable.

Cette exigence de mise en place de deux systèmes de culture antagonistes du point de vue du travail du sol que sont la riziculture inondée et les cultures de diversification sur billons provoque des modifications importantes du sol. Ces modifications sont, à moyen et long termes, liées aux risques de salinisation, de sodisation et d'alcalisation et, à court terme, liées aux modifications physiques dues au travail du sol.

Le programme de recherche conjoint ORSTOM-ISRA "*Développement de l'agriculture irriguée et systèmes de production dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal*" étudie les problèmes de salinisation et d'alcalisation liés à l'irrigation mais n'a pas encore abordé les problèmes physiques de la mise en culture de ces sols.

Méthodes d'étude

Les facteurs pouvant modifier le comportement d'un sol sous l'effet de la mise en culture sont nombreux et d'interactions mal connues, d'autant plus qu'au travail du sol vient s'ajouter ici l'irrigation.

Parmi ces facteurs, composition du sol, structure, humidité, type de travail effectué ... etc., on sait que:

- l'état structural du sol conditionne son comportement mécanique (GUERIF, 1990) par la résistance mécanique qu'il lui confère et par la transmission des contraintes qu'il assure.

- l'état structural initial du sol est un facteur déterminant pour l'état final (COULOMB, 1991). Il est donc important de le décrire et de le mesurer. Ceci implique le choix de deux sites, l'un non cultivé et l'autre cultivé.

Il a, d'autre part, été montré (MAYMARD *et al.*, 1960) que la submersion des sols verticaux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal provoquait effectivement des changements au niveau de la structure et que ces changements se traduisaient par une diminution de la stabilité structurale mesurée par le test de Hénin.

Ces considérations nous ont amené à choisir deux méthodes, déjà anciennes mais qui ont connu des développements récents, pour mesurer les effets de la mise en culture sur la structure:

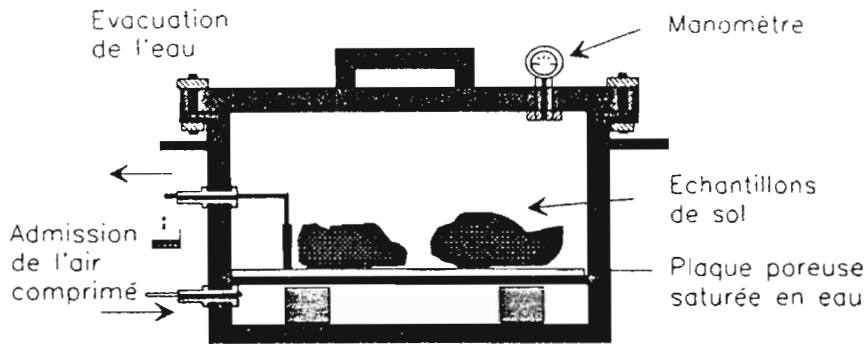
- la première est la fragmentation en agrégats,
- la seconde est l'obtention des courbes de retrait d'échantillons de sol.

Nous avons appliqué ces méthodes à un sol non cultivé et un sol cultivé. Afin d'éviter les interactions sels-structure le choix s'est porté sur un périmètre établi sur un sol vertical non salé, dans une cuvette de décantation située à proximité du village de Donaye. Le périmètre IT3 retenu est cultivé en polyculture riz-tomate-oignon et offre les conditions de proximité requises pour le choix d'un site hors périmètre (sol non cultivé) et d'une parcelle billonnée cultivée en tomate (sol cultivé) (fig. 4 et 5).

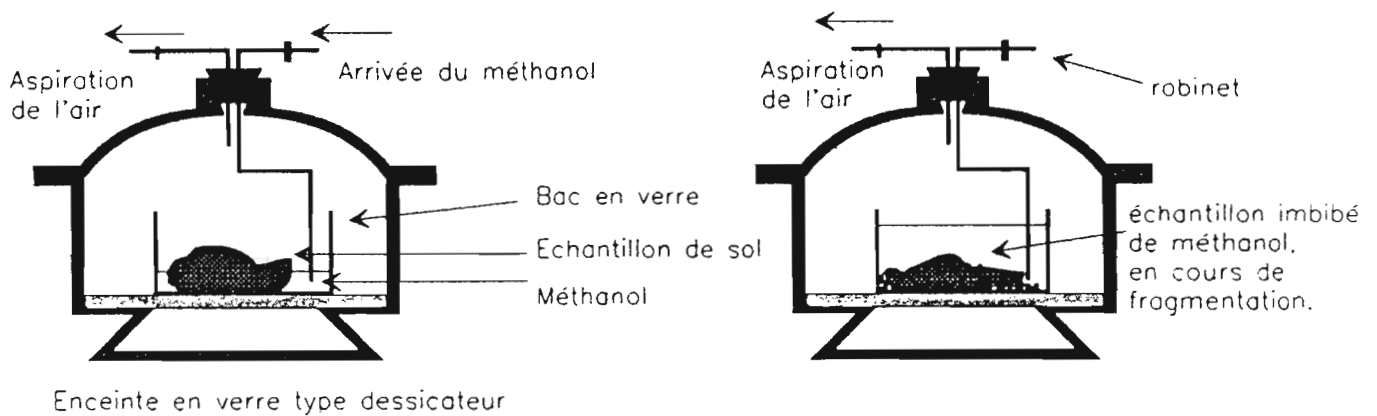
La description pédologique classique permet d'identifier les volumes qui seront prélevés dans le sol non cultivé alors que nous avons utilisé la méthode du profil cultural de MANICHON pour mettre en évidence les Unités Morphologiques du sol cultivé (ZANTE, 1994). Dans le sol non cultivé, les échantillons ont été prélevés dans trois horizons, supérieur (H1, 15-35 cm) médian (H2, 35-50 cm) et profond (H3, 80-90 cm). Dans le profil cultural, les échantillons représentent les différentes unités morphologiques, sauf celle de surface du billon souvent peu épaisse et très hétérogène. Dans les deux cas les échantillons sont prélevés sous forme de cylindres de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur, à l'aide d'un carottier adapté.

Méthode de description du profil cultural

Les principes énoncés par MANICHON (1982) mis en pratique dans la méthode de description du profil cultural (GAUTHRONNEAU, MANICHON, 1987) sont appliqués en simplifiant la description et en l'adaptant au sol billonné.

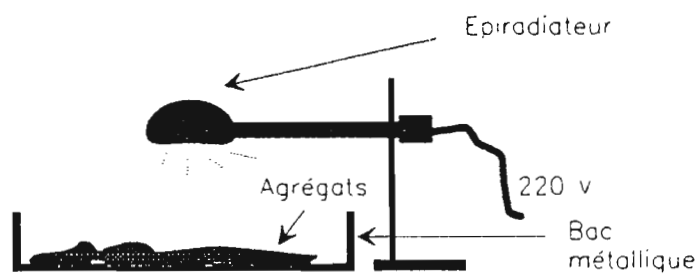


a Mise en équilibre de l'échantillon de sol à l'état hydrique désiré



b Imbibition lente de l'échantillon par le méthanol

c Immersion complète de l'échantillon dans le méthanol



d Séchage des agrégats sous lampe infra-rouge

Figure 6 : Méthode de fractionnement en agrégats (in COLLEUILLE, 1993)

On utilise une grille de description morphologique reposant sur deux paramètres:

- *l'état interne des éléments structuraux d'origine anthropique*, défini par les morphologies suivantes:

- D : cohésion élevée, faces de rupture lisses, de forme conchoïdale, sans porosité visible, résulte d'un compactage anthropique
- F : proche de D mais contient des amorces de fissures
- G : agrégats discernables dans les mottes, cohésion plus faible, faces de rupture rugueuses, porosité visible.

- *l'assemblage de ces éléments structuraux*, défini par les modes

- M : Massif: le volume observé ne comporte qu'une seule motte
- S : Soudé: le volume observé comporte plusieurs mottes soudées
- F : Fragmentaire: le volume comporte des mottes parfaitement individualisées, sans liaisons entre elles.

L'état interne des mottes et leur mode d'assemblage permet d'identifier les Unités Morphologiques (UM).

La partition latérale du profil est déterminée par l'emplacement des interbillons qui correspondent aussi à la position des roues du tracteur lors du billonnage.

Méthode de fractionnement en agrégats

Le principe du fractionnement est basé sur les propriétés de friabilité du sol (débit en agrégats cohérents) et de dualité porale (porosité texturale et structurale de STENGEL, 1979).

La méthode doit permettre de rompre les forces de liaison inter-agrégats (porosité structurale) sans dénaturer leur cohésion interne (porosité texturale). S'inspirant de la méthode du "critical drying point" (NEWMANN et THOMASSON, 1979; MURRAY et QUIRK, 1980) BRAUDEAU (1982) propose l'utilisation du méthanol pour séparer les agrégats de sols humides. Suite aux travaux de COLLEUILLE (1993), nous avons adopté le protocole suivant (fig. 6):

- *Mise en équilibre de l'échantillon à pF 3,0* : Les échantillons sont humectés lentement par capillarité jusqu'à saturation. Ils sont ensuite placés sur la plaque poreuse de l'appareil de RICHARDS et soumis à une pression de 100 kPa (pF 3,0) jusqu'à équilibre (72 heures). Ce potentiel de l'eau du sol (pF 2,5 à 3,0) est le plus favorable à son tassement (SALA, TESSIER, 1993).

- *Imbibition par le méthanol* : La méthode consiste à humecter la base de l'échantillon placé dans un bécher par du méthanol, puis l'échantillon est amené à immersion complète. Cette opération se fait sous vide dans un dessiccateur relié à une trompe à vide électrique.

- *Séchage et tamisage* : Après avoir éliminé le méthanol par décantation, les agrégats sont mis à sécher sous épiradiateur en silice. Ils sont ensuite tamisés (tamiseuse électromagnétique à vibrations verticales) pendant 10 mn sur une batterie de tamis de 10 à 0,050 mm

Méthode de la courbe de retrait

La courbe de retrait d'un échantillon de sol représente la variation du volume massique (V_m) de l'échantillon en fonction de sa teneur en eau pondérale. L'intérêt de ces courbes est de fournir des renseignements sur les processus hydrodynamiques dans le sol et sur les propriétés structurales du sol. Le processus de retrait reflète le fonctionnement structural d'ensemble du sol en relation avec les volumes d'eau et d'air qui l'occupent.

Le volume massique est exprimé par la formule suivante:

$$V_m = (1/d_a) \times (d_i/d_f)^3$$

où

- d_a est la densité apparente
- d_i est le diamètre de l'échantillon à l'instant i
- d_f est le diamètre de l'échantillon en fin de retrait

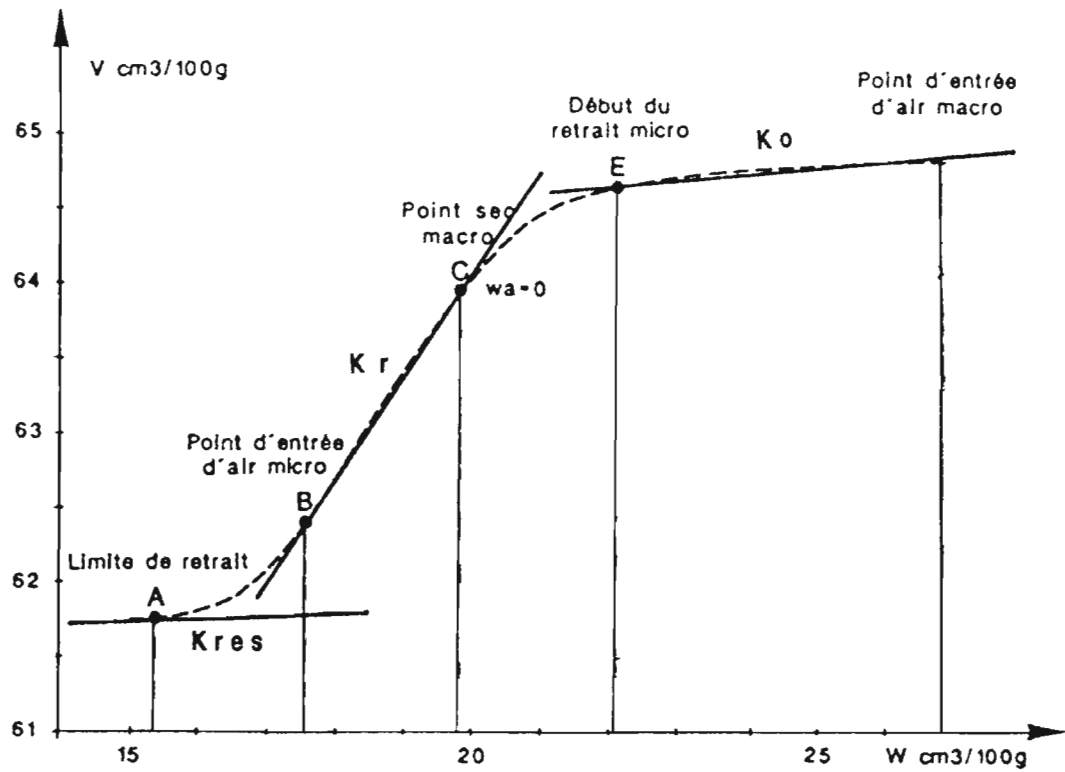
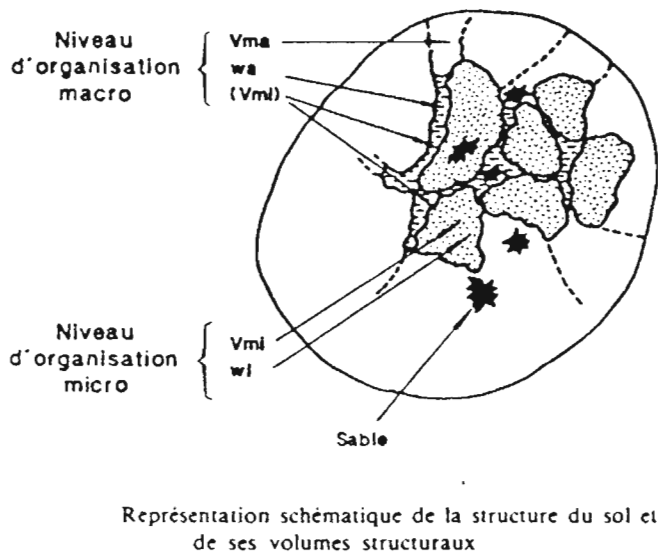


Fig. 7 a



Représentation schématique de la structure du sol et de ses volumes structuraux

Fig. 7 b

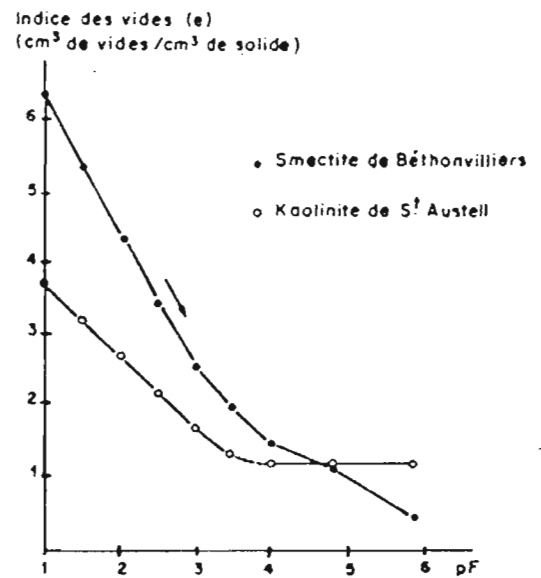
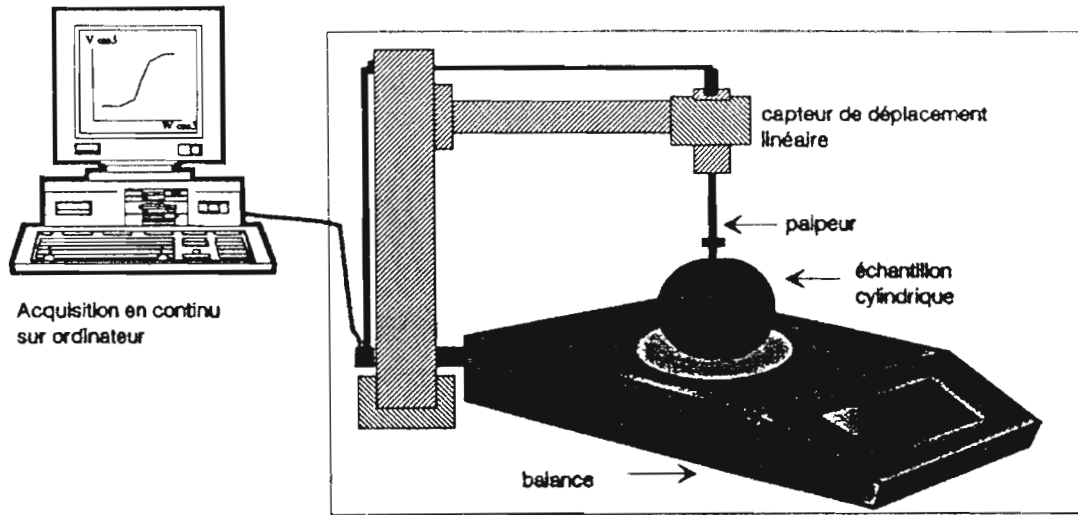
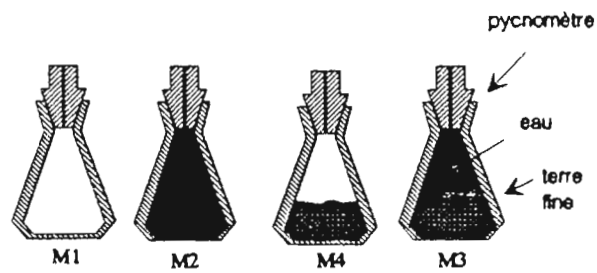


Fig. 7 c

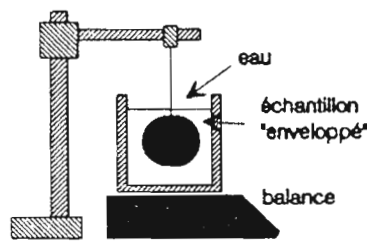
Figure 7 : Points caractéristiques de la courbe de retrait théorique (a), niveaux d'organisation de la structure (b) (in BRAUDEAU, 1988) et courbes de retrait d'argiles pures (c) (in TESSIER, 1980).



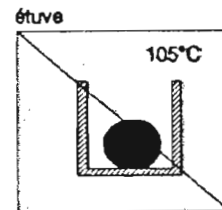
a Enceinte régulée en température et humidité



b Mesure de la masse volumique réelle



c Mesure de la masse volumique apparente



d Mesure de la masse sèche.

Figure 8 : Méthode de mesure du retrait et des éléments de calcul de la courbe de retrait (in COLLEUILLE, 1993).

La mise au point d'une méthode de mesure en continu permet à BRAUDEAU (1987, 1988), d'obtenir l'intégralité de la courbe de retrait (fig. 7a) et d'en déduire les principaux paramètres pédo-hydriques des sols ferrallitiques.

Les points caractéristiques de sa courbe sont:

- le point A: limite de retrait (SL, Shrinkage Limit)
- le point B: point d'entrée d'air dans la microporosité (AE, Air Entry)
- le point C: point sec de la macroporosité (LM, Limit of Macoporosity)
- le point E: début du retrait de la phase microporeuse (MS, Maximum Swelling ou capacité de rétention).

Si l'on décrit cette courbe expérimentale depuis la saturation de l'échantillon, elle s'interprète de la façon suivante (BOIVIN, 1991):

- de la saturation à E, l'échantillon se dessèche sans que la teneur en eau des agrégats ne varie. Seule l'eau contenue dans les macropores s'évapore
- de E à C, l'eau contenue dans les agrégats commence à participer au dessèchement de l'échantillon, tandis qu'il reste de l'eau dans la macroporosité jusqu'au point C. Au point C la teneur en eau de la phase macroporale est nulle tandis que la phase microporale se rétracte en restant saturée. La partie de la courbe située entre la saturation et le point C est la phase structurale du retrait, elle est représentée par la pente K_0
- de C à B, le retrait se fait en phase saturée, toute réduction de teneur en eau s'accompagne d'une réduction de volume. La pente de la phase de retrait principal C-B est la constante de retrait (K_r). L'entrée d'air dans la phase microporale ne se fait qu'au point B. K_r permet de quantifier l'évolution de la structure du sol au cours du dessèchement
- de B à A, il y a entrée d'air dans la phase microporale, le retrait tend à devenir nul. C'est la phase de retrait résiduel exprimée par la pente K_{res} .

Cependant ce type d'ajustement de courbe de retrait pose de sérieux problèmes dans le cas des sols vertiques, au moins pour toute la phase macroporale, de la saturation au point C. Un problème d'ajustement peut aussi survenir pour la phase de retrait résiduel dont la pente peut être sensiblement différente de zéro. Les travaux de TESSIER (1980) et TESSIER et PEDRO (1980) peuvent donner une explication: contrairement aux sols riches en kaolinite (ferrallitiques), les sols riches en smectites (vertisols), peuvent ne pas atteindre leur limite de retrait lors d'un séchage à l'air (fig. 7c).

En pratique, la méthode de mesure consiste à amener à saturation lente un échantillon cylindrique de sol prélevé *in situ* à l'aide d'un carottier adapté. L'échantillon saturé est ensuite posé sur le plateau d'une balance qui permet d'enregistrer la perte de masse d'eau au cours du dessèchement. Un capteur de déplacement disposé au dessus de l'échantillon mesure le retrait (fig. 8). L'ensemble du dispositif, placé en enceinte maintenue à 30°C, est relié à un micro-ordinateur pour l'enregistrement en continu des données: temps, masse et diamètre de l'échantillon, qui après calcul, permettront de tracer les courbes de retrait.

Descriptions du sol

Sol non cultivé

Le profil est situé dans une forme plate sans végétation. La surface est constituée d'une croûte pelliculaire fragile et de petits agrégats. Il n'y a pas de fentes larges et profondes.

0 - 15 cm : horizon sec, brun-gris, à structure de forme polyédrique subanguleuse de 2 à 10 cm de longueur et 0,5 à 5 cm de hauteur avec une sous-structure d'agrégats plus fins, aspect lité, ensemble friable, racines fines. A la base, lentilles de 1 à 2 cm de long et 0,5 cm d'épaisseur, à surface à reflets bleutés par plages alternant avec des plages sableuses.

15 - 35 cm (H1): sec, brun, très compact, argilo-sableux, agrégats à faces rugueuses en litage peu net fortement soudés les uns aux autres, localement tendance à la formation de lentilles centimétriques, quelques racines fines.

35 - 50 cm (H2): horizon sec, brun, très compact, massif, présence de fentes obliques avec des dépôts de gypse et de halite en tête d'épingle. Pas de racines, peu poreux.

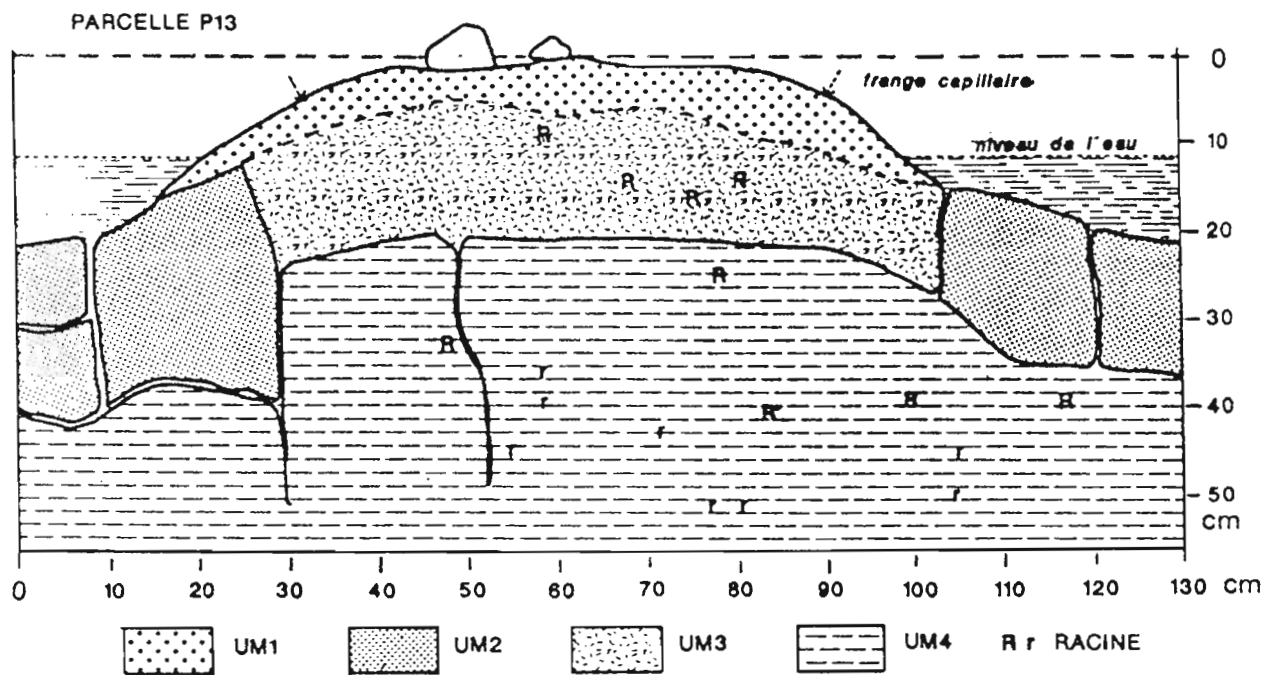
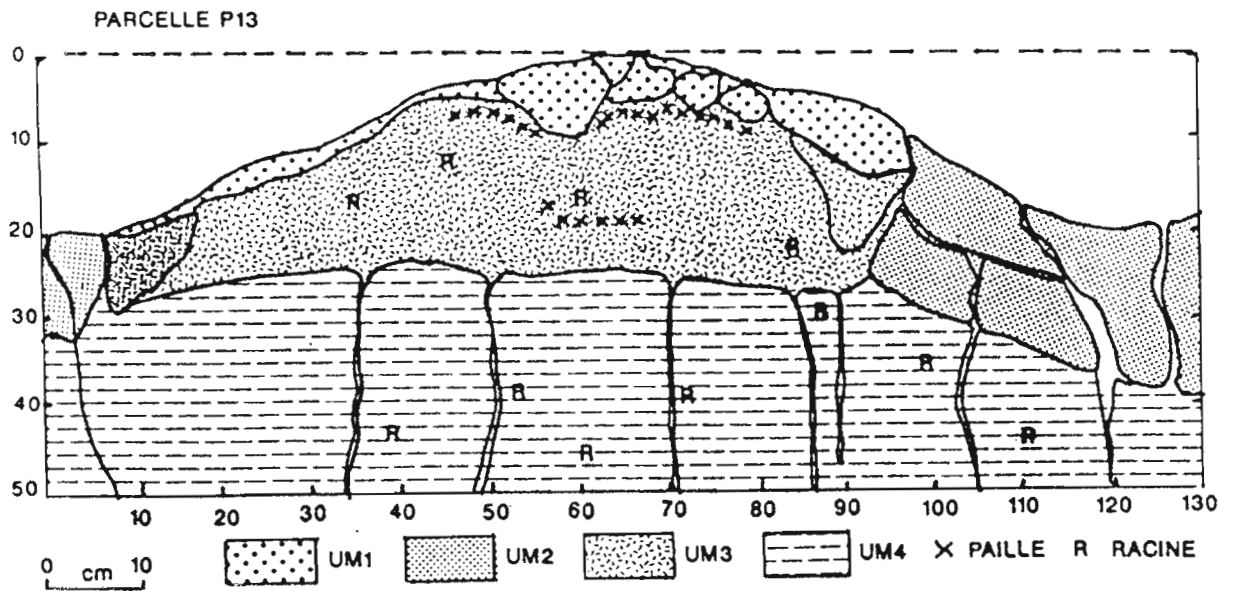


Figure 9 : Profils culturaux, parcelle IT3 P13.

50 - 90 cm (H3): sec, brun foncé, très compact, massif, argileux, tendance à la formation de lentilles de 10 à 15 cm, tâches noires d'oxydes de manganèse de 1 à 2 mm de diamètre, faces lisses et plages sableuses aux interfaces, très peu poreux, pas de racines.

> 90 cm: sec à frais, brun-gris, très argileux à nombreuses taches rouilles très fines, traces d'un ancien enracinement de mangrove, très peu poreux.

Les résultats des analyses effectuées dans chacun de ces horizons montrent une granulométrie très homogène sur tout le profil avec une teneur en argile de 53%. La fraction argileuse, analysée à l'Institut de Géologie de Strasbourg, est constituée de 60% de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés), 30% de kaolinite, 5% de chlorite et 5% d'illite. La capacité d'échange est de 0,30 méq/g d'argile; le pH eau sur extrait 1/5 de 5,3 et la conductivité électrique de 0,7 mS cm⁻¹.

Sol cultivé

Suite à l'examen d'une dizaine de profils culturaux répartis dans différentes parcelles localisées dans trois périmètres, en situation salée ou non salée, nous avons identifié cinq grandes unités morphologiques (UM) qui permettent de rendre compte de l'état d'un profil cultural dans ce système de culture. Deux profils relevés dans la parcelle P13 sont présentés à titre d'exemple (fig. 9):

- **UM1: (F G)** située en sommet de billon, d'une épaisseur de 5 à 15 cm, la première unité est constituée de mottes à surface rugueuse de 2 à 5 cm de diamètre comprenant des agrégats poreux, fissurés. Les mottes sont individualisées.

- **UM2: (M D)** située en interbillon, celle-ci est constituée de prismes massifs de 5 à 15 cm de largeur et de 2 à 10 cm d'épaisseur. Ces prismes sont séparés par des fentes de retrait pouvant atteindre plus de 1 cm de largeur. Ces fentes se prolongent parfois dans la partie sous-jacente. Cette description correspond à l'état sec ou frais; en saturé l'ensemble prend une consistance pâteuse ou boueuse alors qu'à l'état humide on obtient une morphologie proche de celui de l'UM4.

- **UM3: (S G)** cette unité est située au coeur du billon, au dessus de la zone non travaillée. Les mottes, rarement sèches, sont formées d'agrégats plus ou moins poreux, elles peuvent former des massifs soudés non compacts ou laisser des espaces vides. C'est la zone de prédilection pour l'enracinement.

- **UM4: (SF F)** zone non labourée, compacte, à l'aspect souvent finement lité ou lamellaire, parfois lenticulaire. Toujours fraîche ou humide (19% d'humidité massique après 15 jours sans irrigation), elle est cependant pénétrée par les racines.

- **UM5: (SD F)** zone située sous l'UM4 correspondant à l'horizon H3 du vertisol. Elle n'est pas pénétrée par les racines.

Lors de la description morphologique du profil cultural, nous avons tout de suite été confronté à la description du système racinaire, qui peut être un élément révélateur de la structure et de la compacité du sol mais n'est pas l'objet de l'étude. Nous avons donc opté pour un simple report cartographique des racines sur le seul plan vertical de description du profil cultural en distinguant si possible les racines principales de diamètre supérieur à 1,5 mm (R) des racines secondaires (r).

Dans tous les profils culturaux observés l'enracinement ne semble pas traduire de contrainte physique ou chimique particulière, même en sol visiblement salé. Le seul obstacle est la proximité de l'UM4, qui peut provoquer l'étalement des racines à sa surface. En général les racines prospectent bien le coeur du billon et peuvent même passer sous l'interbillon pour prospecter le billon voisin.

Des prélèvements ont été effectués dans chacune des unités morphologiques: les teneurs en argile varient de 55 à 58% en passant de l'UM1 à l'UM4. La capacité d'échange cationique des argiles est de 0,42 méq/g. Le pH eau mesuré sur extrait 1/5 est de 5,8 à 6,5 et la conductivité électrique de 0,05 mS cm⁻¹.

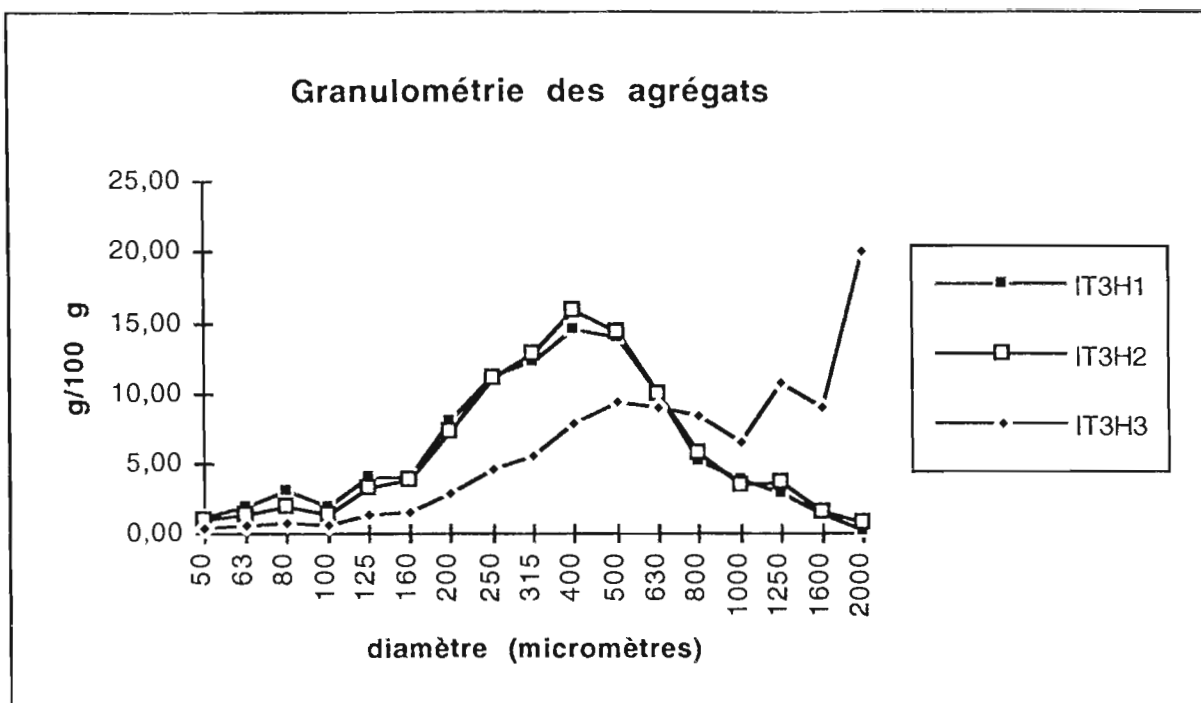


Figure 10 a

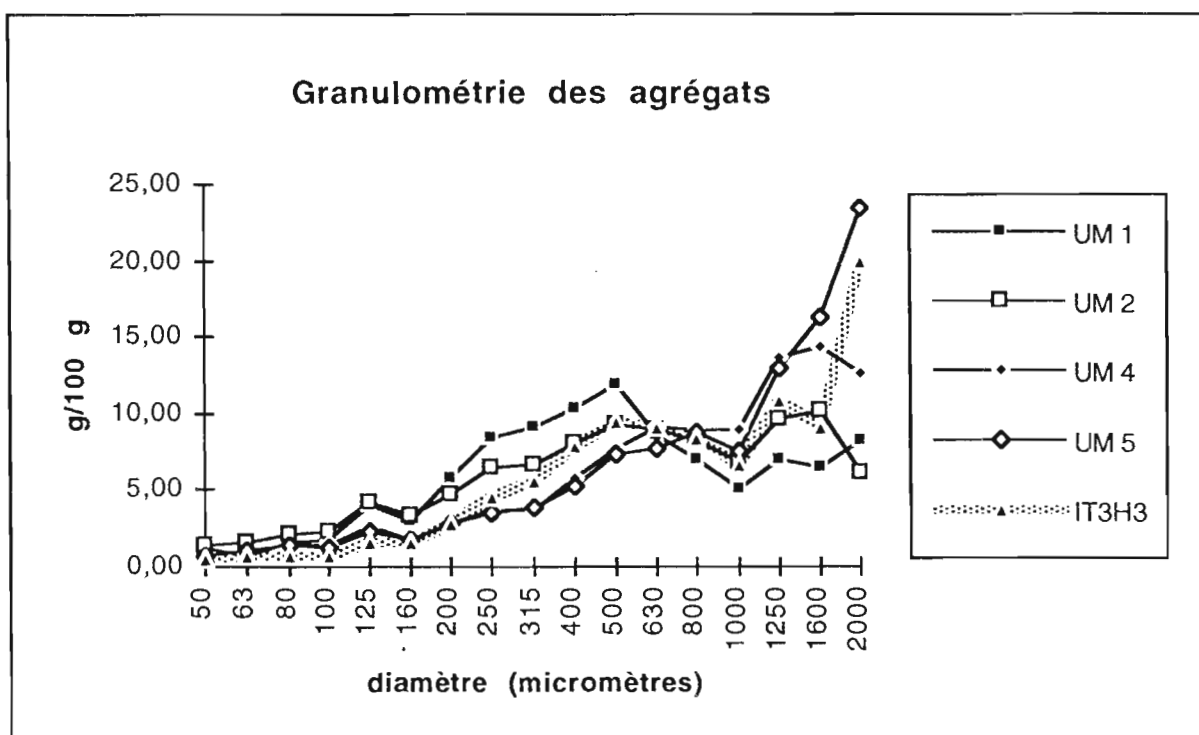


Figure 10 b

Figures 10 : Granulométrie des agrégats en sol non cultivé (a) et en sol cultivé (b).

Discussion

La mise en culture par billonnage et irrigation modifie profondément la morphologie de la surface du sol. Les deux méthodes de description employées sont bien adaptées pour traduire ces changements. Lors de nos examens de profils culturaux nous n'avons pas observé de traces de roues, conséquences du passage des engins. En fait, le billonnage se fait entre les roues du tracteur qui sont donc positionnées dans les interbillons. Le choix de l'interbillon comme critère de partition latérale est donc justifié. Les travaux du sol antérieurs, labour et offsetage, marquent l'ensemble des périmètres au niveau de l'UM4, continue, alors que les UM1, 2 et 3 ont une extension latérale discontinue liée à la pratique du billonnage.

Les résultats des mesures chimiques traduisent le passage du sol en place au sol cultivé par augmentation des teneurs en cations échangeables, de la Capacité d'Échange Cationique (CEC) et du pH. La granulométrie indique essentiellement une diminution de la fraction limons grossiers au profit de la fraction sables fins dans le sol cultivé.

Il s'agit maintenant d'apprécier s'il existe des indicateurs de ces changements morphologiques au niveau de la structure par des mesures physiques comme le fractionnement en agrégats et la courbe de retrait.

Le fractionnement en agrégats

Distribution des agrégats du sol non cultivé

Trois niveaux de la fosse pédologique IT3 ont fait l'objet de l'étude de distribution des agrégats (fig. 10), correspondant aux horizons supérieur (H1, 15-35 cm), médian (H2, 35-50 cm) et profond (H3, 80-90 cm). Les horizons supérieur et médian présentent le même type de distribution des agrégats avec un mode proche de 400 μm de diamètre. L'horizon de profondeur, sur une distribution des classes de 0-2000 μm , ne présente pas de mode nettement marqué. Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus par COLLEUILLE (1993).

Distribution des agrégats sous culture

Chacune des unités morphologiques (UM) définies lors de la description du profil cultural a fait l'objet d'une étude de la distribution des masses d'agrégats par classe de diamètres de 50 à 2000 μm . Deux essais, effectués dans deux laboratoires différents, n'ont pas permis de désagréger les échantillons de l'UM3. Les agrégats sont parfaitement visibles mais semblent retenus par un chevelu racinaire important.

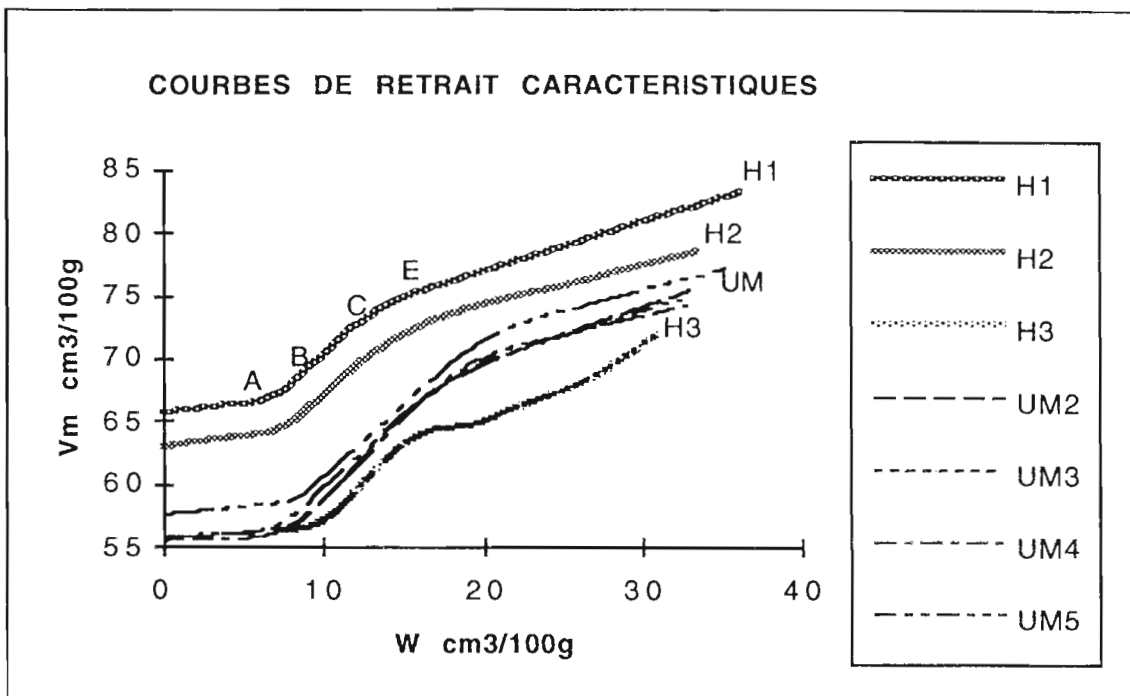
Les résultats obtenus sur les autres échantillons montrent la conservation d'un mode vers 500 μm pour les UM1 et UM2 mais avec diminution progressive des effectifs des classes 200 à 500 μm et augmentation corrélative des effectifs des classes supérieures à 630 μm ; la classe 630 μm servant de pivot. Quant aux UM 4 et 5 leur type de distribution est proche de celui de l'horizon de profondeur du sol non cultivé caractérisé par des effectifs plus importants dans les classes supérieures à 630 μm . Le passage de l'UM1 en surface de billon à l'UM5 en profondeur indique une tendance à l'évolution vers le type non modal à effectifs croissants avec la taille. L'unité morphologique d'interbillon (UM2) présente un profil de distribution du même type que celui de l'UM4, sommet de la partie non labourée du profil cultural. Dans l'ensemble le profil cultural présente cependant des courbes de distribution d'allure semblable à celle de l'horizon de profondeur de la fosse pédologique (IT3H3).

Discussion

Un nivellement topographique effectué entre la fosse pédologique et l'interbillon du profil cultural révèle une dénivelée d'environ -30 cm de celui-ci ce qui permet la correspondance suivante entre les unités morphologiques du profil cultural et les horizons du profil pédologique (fig. 5):

- UM1 et UM3 correspondent à H1
- UM2 et UM4 correspondent à H2
- UM5 correspond à H3

La courbe de répartition des agrégats, de même type pour H3 et UM5, montre bien l'identité de structuration et l'identité d'origine de ces deux échantillons. Le travail du sol n'affectant pas cette UM de profondeur, elle a conservé son identité par rapport au profil non travaillé.



Pentes du retrait principal (Kr):

H1: 1,209	H2: 1,174	H3: 1,355	
UM2: 1,385	UM3: 1,153	UM4: 1,317	UM5: 1,201

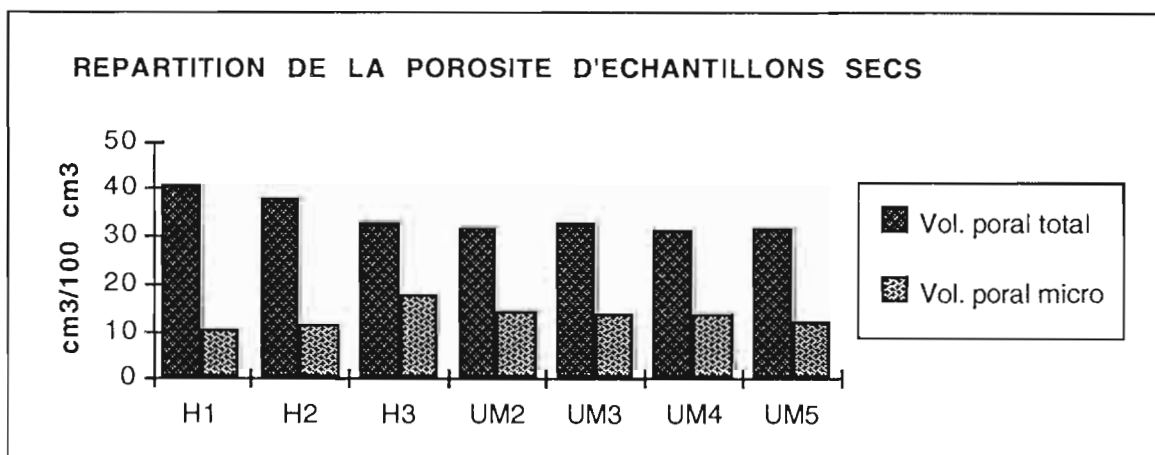


Figure 11 : courbes de retrait caractéristiques du sol non cultivé (H1, H2, H3) et du sol cultivé (UM2, UM3, UM4, UM5).

La mise en culture a, par contre, sensiblement modifié la répartition granulométrique des agrégats des horizons H1 et H2. Ceux-ci présentent, en sol irrigué, une répartition d'autant plus proche de celle de H3 que l'on descend sous le billon. Ce transfert d'agrégats des classes moyennes vers les classes les plus élevées (>630 μm) ne semble pas être dû aux ions sodium puisque les teneurs moyennes en ions sodium échangeables sont de 0,44 méq pour 100g de terre fine en sol cultivé et de 3,26 méq pour 100g en sol non cultivé. La distribution dimensionnelle des agrégats semble donc bien traduire la contrainte physique exercée par le travail du sol qui se module selon les unités morphologiques du profil cultural.

La courbe de retrait

Analyse des courbes obtenues

Chaque courbe de retrait (sauf H3 ne représentant qu'un échantillon) présentée figure 11 est obtenue en calculant les coordonnées moyennes des points caractéristiques de trois courbes puis en leur appliquant le modèle d'ajustement. Les courbes s'ordonnent parallèlement, des volumes massiques les plus élevés aux plus faibles, respectivement de l'horizon supérieur du vertisol aux horizons profonds. Selon que l'on considère l'amplitude du retrait ou le volume massique il apparaît que:

- l'amplitude du retrait identifie le sol non cultivé: ses courbes ont un retrait global plus faible que celles du sol cultivé

- le volume massique sépare les horizons de surface (H1 et H2) du sol non cultivé de son horizon de profondeur H3 et des UM du sol cultivé.

Il est à remarquer que l'UM3, qui est le coeur du billon, là où se trouvent les racines, présente des volumes massiques légèrement supérieurs à ceux des autres UM, situées en marge du billon. Cependant elle présente un retrait global de même amplitude que les autres unités morphologiques.

Les points A et B sont dans tous les cas atteints pour des teneurs en eau sensiblement identiques, ce qui s'explique par le fait que les échantillons ont des teneurs en argile peu différentes (55 à 58 %). Les phases de retrait résiduel et les points d'entrée d'air dans la microporosité (B) sont donc obtenus aux mêmes teneurs en eau.

Cependant, pour une même teneur en eau au point d'entrée d'air, les volumes massiques sont nettement plus importants pour les échantillons des horizons supérieur et médian (H1 et H2) du sol non cultivé que pour ceux du sol cultivé. Les différences de comportement au retrait des échantillons se manifestent aussi par des teneurs en eau et des volumes massiques différents aux points E et C. Le retrait durant la phase C-B est nettement plus important pour les échantillons de sol cultivé que pour ceux du sol non cultivé.

Discussion

Les courbes de retrait établissent que le retrait global de ces échantillons de sol verticale, travaillé ou non, n'est pas directement lié à la capacité de gonflement-retrait de la phase argileuse.

Le rapprochement de ces résultats de rétractométrie avec ceux obtenus par l'étude des distributions dimensionnelles d'agrégats issus du fractionnement (fig. 10) peut apporter une explication. Le fractionnement en agrégats des horizons H1 et H2 du sol non cultivé présente une courbe de répartition unimodale avec de faibles masses de gros agrégats alors que les unités morphologiques du sol cultivé (UM) ont toutes des effectifs massiques élevés dans les classes de gros agrégats. La répartition des agrégats selon leur taille joue sur le retrait global des échantillons: lorsque la quantité des agrégats les plus gros augmente, le retrait global de l'échantillon s'accroît, ici essentiellement par augmentation du retrait principal (C-B).

Le travail du sol provoque donc un accroissement des teneurs en gros agrégats qui se traduit par une augmentation de l'amplitude de la phase principale du retrait global.

COLLEUILLE (1993) constate que les profils légèrement salés à complexe sodique des vertisols de la cuvette de Diawara située près de Podor, ont des teneurs plus fortes en gros agrégats et un retrait global plus important. Dans notre cas le pourcentage de retrait global le plus élevé est observé dans les échantillons qui ont les plus gros agrégats mais les plus faibles teneurs en ions sodium (0,54 méq pour 100g) tandis que les échantillons à plus forte teneur en ions sodium (3,26 méq pour 100g) ont le retrait global le plus faible. Les teneurs en ions sodium sont ici insuffisantes (8,5 à 19% des cations échangeables contre 37% à Diawara) pour provoquer la création des gros agrégats et expliquer ce retrait global plus important.

Par contre l'hypothèse d'une dessiccation plus importante du sol cultivé, en période de non irrigation, n'est pas à exclure. Elle peut être en partie à l'origine de ce retrait global plus important si on considère que plus on dessèche une argile de type smectite, plus elle est susceptible de gonfler (TESSIER, PEDRO, 1980).

Conclusion

La répartition granulométrique des agrégats issus du fractionnement des échantillons de sol non cultivé et cultivé montre que le travail du sol provoque un accroissement des teneurs massiques en gros agrégats.

Ces échantillons plus riches en gros agrégats ont une capacité de retrait global plus importante et des volumes massiques au point d'entrée d'air plus faibles. La mise en culture semble bien avoir augmenté la compacité ce qui est vérifié ici par la mesure de la densité apparente : elle est en moyenne sur trois répétitions de 1,51 en H1, de 1,57 en H2 et de 1,76 pour des mottes prélevées en UM1.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette région à très faible pluviosité, traversée par un cours d'eau pérenne marqué par des crues importantes et une longue période d'étiage, il s'était développé un écosystème où la vie était réglée par le régime du fleuve. Confrontés à des sécheresses persistantes et à des besoins alimentaires croissants, les états riverains du fleuve Sénégal ont cherché à régulariser son débit par la construction de deux grands barrages qui permettent de développer la culture irriguée.

Ces changements importants ne sont pas sans effets sur l'environnement et les structures sociales. Les conséquences sur l'environnement se manifestent entre autres par des risques de salinisation et de dégradation de la structure des sols. Le développement important de l'irrigation, même si les paysans ne cultivent pas toujours la totalité de la surface qui leur est attribuée, n'est donc pas sans conséquence sur la gestion durable des sols.

Les études menées dans la vallée du fleuve Sénégal ont montré que la culture irriguée des sols vertiques a deux conséquences majeures: la première est un apport d'eau important qui provoque à court, moyen et long terme une salinisation et une alcalisation par irrigation avec de l'eau à alcalinité résiduelle positive, la seconde est le travail du sol, d'une part pour créer les périmètres rizicoles, d'autre part pour billonner les rizières et implanter les cultures commerciales de tomate et d'oignon.

En se limitant ici à l'étude de l'effet du travail du sol, il apparaît que la comparaison *in situ* des états non cultivé et cultivé d'un sol non salé met en évidence la transformation d'une part, de la répartition des agrégats par augmentation des masses dans les classes supérieures à 630 μm , et d'autre part de l'amplitude du retrait, plus importante en sol cultivé. Ces changements ne sont, ici, pas dus aux ions sodium mais probablement au travail du sol.

Le fractionnement en agrégats par la méthode au méthanol semble donc être un bon outil pour mettre en évidence l'évolution structurale du sol. Cette méthode pourrait être utilisée pour la détermination des seuils de sensibilité aux contraintes à la fois chimique et physique.

Les courbes de retrait permettent de discriminer les deux traitements mais il est difficile de les interpréter en terme de fonctionnement et de quantification des paramètres pédo-hydrauliques sans support théorique pour ce type de sol. L'application de cette technique aux sols vertiques laisse supposer le développement des recherches en terme de modélisation pour franchir le pas de l'interprétation fonctionnelle.

La confrontation du chercheur avec la réalité quotidienne vécue par les paysans et les hommes en charge du développement laisse apparaître l'importance des problèmes physiques pour le devenir des sols à moyen et long terme, afin d'assurer une exploitation durable du milieu. Il faut cependant constater qu'à court terme la réussite des cultures irriguées de diversification par rapport au riz passe d'abord par une meilleure programmation de la campagne de culture et de son calendrier à l'échelle de l'unité de production, ce qui sous-entend pour le paysan la possibilité d'appliquer correctement les pratiques culturales préconisées, de lutter efficacement contre les prédateurs (criquets) et d'effectuer ses récoltes dans les meilleures conditions.

BIBLIOGRAPHIE

- BOIVIN P., (1991) - Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Étude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Thèse, collection Études et Thèses, ORSTOM Paris, 226 p.
- BOIVIN P., BRUNET D., GASCUEL C., ZANTE P., NDIAYE J. P., (1993) - Les sols lourds de la vallée alluviale, région de Podor: répartition, caractéristiques, aptitudes et risques liés à leur mise en valeur. Atelier "Nianga, laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal", St Louis, 19-20-21 octobre 1993, ISRA-ORSTOM, Dakar, 9 p. .
- BRAUDEAU E., (1982) - Fractionnement physique du sol. Mode de séparation et étude du comportement d'agrégats de 0,050 à 2 mm. Cah. ORSTOM sér. Pédologie., vol XIX, n°4, 353-367.
- BRAUDEAU E., (1988) - Méthode de caractérisation pédo-hydrique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. Cah. ORSTOM, sér. Pédologie, vol. XXIV, n°3, 179-189.
- BRAUDEAU E., (1987) - Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. Science du Sol, vol. 25/2, 85-93.
- COLLEUILLE H., (1993) - Approches physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales. Thèse Univ. Paris VI, 353 p. .
- COULOMB I., (1991) - Analyse quantitative du sol au labour: rôle de l'état structural initial. Thèse, 1 tome 230 p., 1 annexe 73 p., INA-PG, Paris.
- DIOUF P. D., GUILMOTO C. Z., (1994) - Démographie et développement dans la moyenne vallée du Sénégal. Présentation des enquêtes de 1992-1993, premiers résultats et analyse typologique des ménages. Direction de la Prévision et de la Statistique, ORSTOM, Dakar, 80 p. .
- F.A.O - S.E.D.A.G.R.I., (1969) - Cartes pédologiques et géomorphologiques de la vallée et du delta du Sénégal au 1/50 000. Feuille 3a Podor.
- GAUTRONNEAU Y., MANICHON H., (1978) - Guide méthodique du profil cultural. CEREF GEARA, 69 p.
- GUERIF J., (1990) - Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In " la structure du sol et son évolution", Laon, 9/1/1990, les colloques de l'INRA n° 53, Ed. INRA Paris, 71-89.
- LOYER J. Y., (1989) - Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Collection Études et Thèses, Ed. ORSTOM, Paris, 137p.
- MANICHON H., (1982) - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Doc. Ing. INA-PG, 214 p + annexes.
- MAYMARD J., COMBEAU A., (1960) - Effet résiduel de la submersion sur la structure du sol (mise en évidence à l'aide de l'indice d'instabilité structurale de S. Hénin). Sols Africains, vol. V, n°2, 123-148.
- MICHEL P., (1973) - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique. Mémoires ORSTOM n°63, 3 tomes, 752 p. .
- MURRAY R.S., QUIRK J.P., (1980) - Comments on recent work critical point dried soil. Replies by Newmann A.C.D. and Lawrence G.P., Payne D., Greenland D.J. . J. Soil Sci., 32, 161-163.

- NEWMANN A.C.D., THOMASSON A.J., (1979) - Rothamsted studies of soil structure. III Pore size distributions and shrinkage processus. *J. Soil Sci.*, 30: 415-440.
- SAED, (1993) - Détermination des besoins en eau. Zone de la vallée du fleuve Sénégal. Projet gestion de l'eau, coopération KULeuven-SAED, bulletin technique n° 7, SAED ST Louis, 41 p. .
- SALA G.H., TESSIER D., (1993) - Importance de l'état énergétique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non saturés. *C.R. Acad. Sci., Paris t. 316, Série II*, 231-236.
- SEGUIS L., (1992) - Cultures de décrue et périmètres irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal. 6èmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, 12-13 sept. 1990, Montpellier. *in "Usages agricoles de l'eau" collection Colloques et Séminaires, Ed. ORSTOM, Paris, 338p.* .
- TESSIER D., (1980) - Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles. Note à l'Académie des Sciences, *C.R. Acad. Sci.*, t. 291, Série D, 377-380, Paris.
- TESSIER D., PEDRO G., (1980) - Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. Note à l'Académie des Sciences, *C.R. Acad. Sci.*, t. 291, Série D, 461-464, Paris.
- ZANTE P., (1994) - Culture irriguée et évolution de sols argileux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de caractérisation physique. Mémoire de DESS "Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales", Univ. Paris XII Val de Marne, Créteil, 86 p. .
- ZANTE P., (1994) - Les techniques d'étude du profil cultural. Étude bibliographique. DESS "Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales". Univ. Paris XII Val de Marne, Créteil, 68 p. .

L'ORGANISATION MACROSTRUCTURALE DU SOL METHODE D'ETUDE

Philippe de BLIC

ORSTOM, B.P. 182 OUAGADOUGOU 01, BURKINA FASO

RESUME

Une méthode d'étude de l'organisation macrostructurale du sol est présentée qui associe étroitement approche morphologique et mesures physiques réalisées in situ et sur échantillons non remaniés.

Une première démarche consiste à caractériser la couverture pédologique à l'échelle du versant par la méthode des toposéquences. Des stations d'étude sont ensuite identifiées et décrites à l'échelle du champ.

L'organisation macrostructurale est décrite et mesurée au sein du profil cultural. Elle est mise en relation avec la morphologie du système racinaire et/ou avec la capacité d'infiltration mesurée in situ.

Mots-clefs : macrostructure, morphologie, profil cultural, système racinaire, infiltration

INTRODUCTION

La macrostructure du sol représente l'aspect de la structure que l'on peut décrire sur le terrain à l'oeil nu ou sous un faible grossissement. Elle comprend les unités solides et les vides de dimensions supérieures à 0,5 mm. La microstructure du sol se réfère à la dimension, la forme et l'arrangement des unités solides et des vides plus petits que 0,5 mm.

La distinction macro-micro corrobore bien la partition que l'on peut effectuer de l'espace poral suivant deux ensembles de pores d'origines différentes, à savoir :

- Un espace poral textural résultant de l'assemblage des particules constitutives du sol.
- Un espace poral structural généré sous l'action de facteurs externes (techniques culturales, climat, organismes vivants) et qui fait référence à une échelle d'observation macroscopique.

L'étude de la macrostructure du sol en relation avec le fonctionnement des peuplements végétaux implique que l'on ait au préalable,

- caractérisé l'organisation pédologique du paysage,
- retracé aussi rigoureusement que possible l'histoire du milieu étudié afin de distinguer les caractères hérités de ceux qui sont liés à l'utilisation actuelle des sols.

CARACTERISATION DE L'ORGANISATION PEDOLOGIQUE

Cette première étape consiste à analyser à partir de toposéquences la différenciation spatiale des sols sur un échantillon représentatif du paysage. Cet échantillon peut être défini sur des critères géographiques (versant, petit bassin versant), agronomiques (périmètre agricole, champ d'essai), socio-économiques (terroir villageois), écologiques (peuplements végétaux).

Cette démarche qui privilégie l'étude des limites séparant les diverses structures pédologiques est plus connue sous le nom de "analyse structurale tridimensionnelle de la couverture pédologique". Elle permet notamment d'établir les rapports existant entre les propriétés et comportements observés sur les différents compartiments du paysage.

LES STATIONS D'OBSERVATION

Le choix de leur implantation est fonction, d'une part des modes d'utilisation étudiés (techniques culturales, jachères), d'autre part de l'organisation pédologique du paysage.

La station d'observation représente, au moment où sont effectuées les observations, une unité homogène au point de vue du sol, du peuplement végétal et de l'utilisation humaine. En zone de cultures, son échelle de définition est généralement celle du champ. Dans les jachères, l'implantation des stations doit tenir compte de l'ancienneté relative des peuplements ainsi que de la répartition spatiale des espèces et groupes d'espèces végétales.

La description des stations est effectuée par les différents intervenants. En l'absence de spécialistes des différents domaines concernés, on peut retenir les variables suivantes : structure du couvert végétal, résidus végétaux, microrelief, états de surface (y compris les constructions de la mésofaune).

DESCRIPTION ET MESURE DE LA MACROSTRUCTURE

Choix et préparation des emplacements

L'observation du profil cultural nécessite le creusement de fosses d'observation rectangulaires dont l'emplacement et le nombre sont guidés par l'hétérogénéité apparente de la station. Dans le cas de cultures en lignes, les fosses sont implantées perpendiculairement aux lignes.

Description du profil cultural

Mise en évidence et cartographie sur la face d'observation du profil des unités morphologiques homogènes (UMH), c'est à dire des volumes qui se différencient par leur état structural et/ou leur compacité. L'évaluation de ce dernier critère peut - sous certaines conditions d'humidité - être facilitée par l'utilisation d'un pénétromètre de poche.

Densité apparente des UMH

Les mesures sont effectuées in situ et sur mottes et agrégats ramenés au laboratoire, de façon à identifier et mesurer les porosités texturale et structurale.

Mesure de la macroporosité par désorption d'eau

Des échantillons non perturbés sont prélevés dans les UMH dont on désire analyser plus finement la macroporosité. Les courbes de pF eau sont établies aux basses tensions d'humidité (sur un bac à sable) en vue d'estimer la répartition des macro et mésopores selon leur diamètre. Basée sur l'utilisation d'un modèle capillaire qui assimile les pores à des tubes cylindriques isodiamétriques (pores équivalents), la méthode par désorption d'eau implique que la géométrie de l'espace poral ne varie pas significativement en fonction de l'humidité ; elle est surtout applicable aux matériaux rigides pauvres en colloïdes argileux. Son domaine d'utilisation se situe dans une gamme de diamètres poraux compris entre 30 μm et 200 μm .

Caractérisation morphométrique de la macroporosité

La méthode précédente devient très imprécise pour des diamètres de pore supérieurs à 200 μm . Elle ne convient donc pas à la caractérisation de toute une gamme de macropores - souvent d'origine biologique - susceptibles de jouer un rôle essentiel vis à vis des écoulements préférentiels rapides et de la pénétration racinaire. En outre, elle ne renseigne pas sur la morphologie des vides qui est un paramètre important de l'organisation structurale du sol.

Les techniques d'analyse morphométrique représentent la seule véritable alternative aux méthodes physiques pour la caractérisation de la macroporosité grossière et de la bioporosité.

Des échantillons de sol non perturbés sont imprégnés avec une résine additionnée d'un pigment fluorescent. Après durcissement, on confectionne une tranche polie qui est photographiée en lumière ultra-violette pour mettre en évidence le système poral. L'image obtenue est ensuite analysée en vue de déterminer les caractéristiques morphométriques de l'espace macroporal.

MACROSTRUCTURE ET DEVELOPPEMENT RACINAIRE

Il est souvent intéressant d'effectuer une cartographie simultanée des macrostructures identifiées dans le profil cultural et du système racinaire de la couverture végétale.

On procède à un relevé des impacts racinaires sur la face d'observation du profil en s'aidant d'un grillage à maille carrée et en utilisant un système de notation normalisé fondé sur des caractères tels que le diamètre des racines, leur morphologie, l'abondance des radicelles.

A partir des cartes racinaires, on peut calculer un certain nombre de paramètres et d'indices caractéristiques de la géométrie du système racinaire : densité, régularité, courbe densité-profondeur, distribution latérale, par exemple.

MACROSTRUCTURE ET INFILTRATION

La capacité d'infiltration du sol est un critère pertinent de l'état structural, notamment pour les sols ferrugineux tropicaux où la structure se décrit essentiellement en termes de macroporosité.

Deux techniques simples à mettre en oeuvre en permettent une évaluation satisfaisante :

Infiltration d'une lame d'eau superficielle

On dispose sur la surface étudiée des cylindres en tôle de 10 à 15 cm de diamètre puis, après les avoir légèrement enfoncés et remplis d'eau jusqu'à un niveau donné, on note le temps d'infiltration d'une lame d'eau de 5 à 10 mm. Des remplissages successifs permettent de répéter les mesures jusqu'à obtention du régime permanent (trois lectures successives identiques).

Infiltration sous des tensions d'eau négatives

Cette technique met en oeuvre des disques munis d'une membrane perméable à l'eau qui, posés à la surface du sol, permettent un apport contrôlé d'eau sous différentes suctions réglées au moyen d'un dispositif de Mariotte. La mesure des flux d'infiltration permet d'estimer la sorptivité capillaire du sol et la conductivité hydraulique en fonction de la succion appliquée. Ces deux paramètres sont étroitement liés à la géométrie de la macrostructure et permettent en particulier d'estimer un diamètre poral moyen caractéristique de l'état structural étudié.

CONCLUSION

Ces quelques réflexions ont essayé de montrer l'intérêt que présente pour l'étude des macrostructures dans les sols tropicaux cultivés une démarche associant l'approche morphologique familière au pédologue et les méthodes physiques propres à mesurer l'organisation des constituants du sol ou certaines propriétés en découlant.

C'est ainsi que l'approche morphologique couplée à des mesures de l'espace macroporal apparaît particulièrement pertinente pour étudier le comportement physique des sols peu structurés des régions tropicales sèches.

BIBLIOGRAPHIE

- BOULET, R. et al. (1982) - Analyse structurale et cartographie en pédologie, Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 19, 4, 309-351.
- BOUMA, J. (1990) - Using morphometric expressions for macropores to improve soil physical analyses of field soils, *Geoderma*, 46, 3-11.
- RINGROSE-VOASE, A.J. (1987) - A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis, *J. of Soil Sci.*, 38, 343-356.
- SAUER, T.J., CLOTHIER, B.E., DANIEL, T.C. (1990)- Surface measurements of the hydraulic properties of a tilled and untilled soil, *Soil Tillage Res.*, 15, 359-369.
- STENGEL, P. (1990) - Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In : *La structure du sol et son évolution*, Les Colloques de l'INRA, n° 53, 15-36.
- TARDIEU, F., MANICHON, H. (1986) - Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines, *Agronomie*, 6, 5, 415-425.
- VAUCLIN, M., CHOPART, J.L. (1993) - L'infiltrométrie multi-disques pour la détermination in-situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire, *Agron. Tropicale*, 46, 4, 11-27.

NOTES SUR L'APPORT DU TRAITEMENT D'IMAGES À L'ÉTUDE DES SOLS

Jean-Pierre LEFEBVRE

*Centre de Recherches Orstom - Ile de France
Laboratoire d'hydrophysique
32 Avenue Varagnat, 93143 Bondy cedex*

RÉSUMÉ

Un certain nombre de travaux récents dans le domaine des sciences du sol mentionnent le recours au traitement d'images. Bien que mal connues, ces techniques semblent *a priori* attrayantes parce qu'elles portent sur un objet proche d'une observation de terrain, à savoir l'image. Le but de cette note est de familiariser le lecteur aux différentes étapes constituant une chaîne complète de traitements, depuis le prélèvement de l'échantillon jusqu'à l'analyse proprement-dite des paramètres à étudier.

On insistera sur la nécessité de définir au préalable, les modalités de l'analyse à conduire afin de conserver l'information à extraire, sans dégradation excessive.

Mots-clés: conditionnement, digitalisation, traitement d'images

INTRODUCTION

Le traitement d'images, même s'il ne constitue pas en soi une technique nouvelle, a bénéficié des progrès récents de l'opto-électronique et de l'informatique. De plus en plus de laboratoires se dotent à faible coût de systèmes complets d'acquisition et d'analyse d'images. Les sciences descriptives particulièrement, semblent plus à même de profiter de l'apport fourni par ces techniques. Bien que la globalisation de l'information offerte par le traitement d'images peut paraître *a priori* séduisante, on ne sait pas toujours précisément qu'attendre de ces systèmes. La présente note a pour but de définir les potentialités de ces techniques et de mettre en lumière les différents écueils à éviter lors de l'approche d'un problème par le biais du traitement d'images.

Trois étapes principales seront à distinguer dans le cadre d'un problème classique de traitement d'images : le conditionnement de l'échantillon, la digitalisation et le traitement proprement dit de l'image. On s'efforcera lors de chaque étape de préciser la distance entre l'objet réel et sa représentation obtenue. Quelques exemples ayant trait à l'étude de la porosité d'un sol illustreront cet exposé. Le problème du passage de l'observation *in situ* à la quantification au laboratoire n'étant pas spécifique à l'approche étudiée, il ne sera pas abordé au cours de cette note.

CONDITIONNEMENT DE L'ÉCHANTILLON

Dans la majorité des cas, l'objet étudié est sensé être représentatif d'un ensemble plus vaste que l'on souhaite caractériser, c'est notamment le cas d'un échantillon extrait d'un sol particulier. En dehors de toute considération sur les perturbations liées au prélèvement proprement dit, la question de la représentativité de l'échantillon doit se poser suivant des critères logiques, (par exemple: la taille de l'échantillon permet-elle que les pores les plus longs soient représentés sans être tronqués ?), ce qui oblige à une définition préalable des termes précis de l'étude.

Il est assez rare de pouvoir exploiter l'échantillon tel quel. La plupart du temps, il doit être conditionné sous forme d'un bloc poli avec ou non inclusion de produit fluorescent, ou sous forme de lames minces. On passe alors d'une information tridimensionnelle : structure porale dans le volume, à une information bidimensionnelle : plan d'observation (fig. 1). De plus, le choix du plan d'observation, dans le cas de structures à orientations privilégiées, peut se révéler crucial (fig. 2). On notera que pratiquement, le plan d'observation n'est pas une coupe du matériau au sens strict, mais au mieux, une projection sur l'épaisseur de la section pour une lame mince voire une fonction plus complexe tenant compte de la profondeur des pores représentés, pour un bloc poli avec adjonction de produit fluorescent.

On peut se rendre compte des difficultés de proposer à l'analyse un objet physique représentatif du milieu dont il est issu, sans connaissance *a priori* d'un certain nombre d'informations telles que l'orientation et les tailles de pores, l'homogénéité du milieu etc. Or, c'est précisément ce type d'information que l'on souhaite extraire par analyse d'images. Le lien entre le milieu et le plan destiné à être digitalisé peut être délicat à définir. Mais c'est ce plan et non strictement l'échantillon qui fera l'objet d'une digitalisation.

DIGITALISATION DE L'IMAGE

L'image informatique est en réalité une matrice, c'est-à-dire un tableau de valeurs. Le passage d'un horizon continu à un horizon discret est appelé digitalisation (fig. 3). Les lois régissant cette transformation sont bien connues (théorème de Shannon). Elles permettent de quantifier la perte d'informations induite (fréquence de coupure, overlapping...). Dans certains cas, on pourra envisager d'en limiter les effets (fenêtres de pondération).

L'échantillon conditionné, même dans l'approximation d'un plan théorique d'observation, reste un élément physique borné mais continu, pouvant être décrit suivant cinq dimensions : deux coordonnées d'espace et trois dimensions de couleur (par exemple dans le système HSI : teinte, saturation et intensité) (fig. 4).

Codage de la couleur

On peut coder une couleur en une expression numérique, soit par discrétisation de trois composantes équivalentes (codage couleur type RVB), soit par discrétisation suivant une composante unique pouvant prendre des valeurs comprises sur une certaine plage (codage en niveaux de gris) ou soit, dans le cas extrême, par attribution de valeurs binaires à l'aide d'un seuillage (codage noir et blanc). Le codage couleur est rarement utilisé dans le cadre de petits systèmes, d'une part parce qu'il nécessite un matériel d'acquisition plus coûteux, et d'autre part, parce que les traitements ultérieurs doivent être effectués en parallèle sur les trois composantes de codage, ce qui conduit le plus souvent à une augmentation rédhibitoires de la lourdeur de l'algorithme. Dans le cas du codage en niveaux de gris, deux couleurs ne différant que par la teinte (i.e. même saturation et intensité), seront confondues par le codage (par exemple: un grain jaune paraissant blanc pourra être assimilé de ce fait à un pore). Le nombre de bits permettant de coder l'ensemble des valeurs entre le blanc et le noir est appelé dynamique de codage. Quant au codage binaire, il nécessite l'utilisation d'un seuil dont la détermination est le plus souvent arbitraire. La binarisation utilisée plus tard dans le traitement aura une toute autre fonction que celle de codage.

Codage spatial

Le passage d'une représentation continue à une représentation discrète est fortement conditionné par des paramètres matériels. Une valeur discrète ne correspond en effet pas à un point théorique de l'horizon continu (fonction de Dirac), mais à une moyenne sur un élément de taille et géométrie définies par les caractéristiques de la matrice à CCD (Charge Coupled Device) et du dispositif optique associé à la prise d'image. Il en résulte une distorsion des formes appelée "erreur de pixélisation" (fig. 5). La connaissance de l'arrangement des cellules actives de la matrice (trame rectangulaire ou hexagonale) peut s'avérer essentielle puisque cette information disparaît avec le codage. En fixant arbitrairement une géométrie de trame, on peut introduire un décalage entre les lignes et risquer ainsi de biaiser fortement des estimations basées sur des mesures de périmètres.

Le dispositif optique peut bien entendu permettre d'augmenter ou de réduire la taille réelle du sub-horizon moyenné dans une cellule de la matrice de CCD, mais cette action a également pour effet de modifier la taille de l'horizon analysé. On retrouve la limitation déjà évoquée précédemment de la taille du champ investigué et donc de sa représentativité. Compte tenu du nombre de cellules de la matrice à CCD, on doit optimiser le grossissement pour sélectionner un champ de l'objet significatif en terme de représentation d'hétérogénéité (par exemple : distinction des plus petits pores, non-troncature des plus grands...).

Il est à noter que chaque dispositif optique introduit des déformations spécifiques (fonction du grossissement, de l'ouverture du taux de transmission...), qui participent à la fonction de transfert du système. D'autres sources de bruits, telles que la fonction de modulation de l'éclairage d'excitation ou la présence de lumière ambiante devront en toute rigueur, être prises en compte et dans la mesure du possible, réduites. Le choix d'une chaîne d'acquisition bénéficiant d'une bonne définition (i.e. nombre de cellules actives de la matrice à CCD) et d'une grande dynamique de codage est bien entendu souhaitable, néanmoins, on peut être amené à se limiter à des configurations sous-optimales pour des raisons de places en mémoire ou de temps de calcul.

On mesure ainsi la distance entre le matériau à étudier et sa représentation informatique sur laquelle porteront les traitements. On doit à ce stade s'interroger sur la conservation, éventuellement sous une forme peu dégradée, des informations que l'on souhaite extraire.

TRAITEMENT DE L'IMAGE

Il n'existe pas de traitement d'images standard. On doit garder constamment à l'esprit la notion suivant laquelle plus le traitement effectué sera spécifique aux caractéristiques propres de l'étude, plus les probabilités d'obtenir une réponse fiable et pertinente seront grandes. Un certain nombre de traitements ont été élaborés, chacun dans les conditions particulières d'une étude. Ainsi, une transposition d'un algorithme à une problématique légèrement différente peut-elle conduire à des résultats aberrants. Le sujet est trop vaste pour qu'on puisse le développer ici. Retenons simplement qu'un traitement est constitué d'une suite d'opérations de morphologie mathématique (un opérateur morphologique modifiant la valeur d'un pixel par application d'une fonction sur un voisinage plus ou moins étendu du pixel considéré). La conception d'un algorithme peut donc être assimilée à la traduction d'une stratégie en une suite d'opérations élémentaires modifiant à chaque étape et d'une manière contrôlée, une image source en une image destination.

On se limitera donc à quelques considérations d'ordre générale sur ce que peut être le traitement d'une image en distinguant deux parties: identification des objets à analyser et caractérisation de ceux-ci à l'aide de critères variés.

Identification des objets à analyser

On extrait une classe d'objet du reste de l'image par application d'un critère de sélection. Pour ce faire, on a souvent recours à une technique de seuillage. Dans le cas de l'étude de la porosité d'un sol à partir d'une lame mince, on peut utiliser un critère lié à l'intensité du signal codé par exemple en niveaux de gris, et extraire cette phase par application d'une valeur seuil de niveau de gris (dans l'exemple d'une lame mince, le niveau de luminosité transmise à travers un pore peut être déterminé avec assez de précision pour servir de référence, à condition que l'éclairage incident satisfasse à des critères notamment sur sa stabilité lors du temps, son homogénéité spatiale,...). Compte tenu de différents paramètres plus ou moins quantifiables (diffraction de la lumière, effets d'ombre, imperfection dans la réalisation de la lame mince, etc.), une variation faible sur le niveau de seuillage peut conduire à une grande variation sur le résultat obtenu (fig. 6). Il est par ailleurs assez hasardeux de fixer *a priori* une valeur de seuillage. D'autres alternatives peuvent être mises en œuvre pour éviter ce problème. Comme souligné précédemment, l'image binaire obtenue est le résultat d'une sélection et non d'un codage.

Analyse et caractérisation de phase

Une fois la sélection de la phase à analyser effectuée, on cherche à caractériser ces éléments constitutifs soit globalement soit individuellement (labelisation). Le plus souvent, un traitement préalable est nécessaire pour rendre l'information exploitable. Sans entrer dans les détails, on peut plus ou moins aisément faire porter une analyse sur cinq types de caractéristiques : la proportion d'une phase par rapport à une autre, la taille d'objet, l'orientation privilégiée d'objet, leur dispersion dans l'horizon et leur forme (fig. 7). Le problème posé devra donc s'articuler autour de ces caractéristiques, et pourra déboucher sur des études relativement complexe (comme par exemple celle de la connexion de la porosité). A ce stade, des limitations spécifiques tels que les effets de bords pourront entacher l'analyse d'un biais éventuellement important.

CONCLUSION

Il ressort de ce qui a été dit précédemment, que le traitement d'image n'a pas vocation de technique de mesure mais plutôt d'aide à l'interprétation. On jugera plus prudent d'attendre de tels traitements, des informations relatives (prédominance d'une classe sur une autre, orientation privilégiée...) plutôt qu'une quantification stricte (à titre d'exemple, quelle serait la

pertinence de l'estimation du diamètre d'un pore présent dans l'échantillon de la fig. 2, après mesure sur sa représentation fig. 6 ?). En cela, l'analyse d'images ne saurait remplacer l'analyse classique de laboratoire mais du moins, peut-elle la compléter.

Il est à peu près indispensable d'adapter le traitement effectué aux conditions propres de l'étude. On pourra bien entendu s'inspirer de tels ou tels traitements même pratiqués dans des domaines différents, mais le rendement d'un algorithme sera d'autant meilleur qu'il intégrera des conditions spécifiques de l'étude. Des logiciels type 'boîte à outils' permettent cette approche. Néanmoins, la relative facilité d'utilisation de ces techniques est à l'origine même d'attitudes peu critiques vis-à-vis de résultats obtenus. Pour cela, il est nécessaire d'être en possession d'une part, d'une bonne connaissance du problème et d'autre part, de l'action exacte des opérateurs utilisés. L'élaboration de l'algorithme devra être la plus théorique possible afin d'éliminer le plus grand nombre d'interventions humaines lors du traitement (choix de valeur d'après un rendu...). L'analyse devra idéalement être conçue par le pédologue intéressé, ou du moins être réalisée en collaboration avec celui-ci.

On a tenté de montrer dans ce qui précède, la richesse potentielle mais aussi les difficultés de mise en œuvre du traitement d'images. Le plus souvent, par manque de connaissances précises sur ces techniques, des études peu adaptées à ces approches conduisent à de résultats décevants. Afin d'augmenter les chances de succès, le problème posé devra être en adéquation avec ce que l'imagerie permet de faire, ce qui implique une certaine connaissance de ce domaine.

Les quelques clefs fournies au cours de cette note, ne prétendent pas constituer une étude exhaustive du sujet. Il existe malheureusement très peu d'ouvrages de vulgarisation en français sur ce domaine. On conseillera néanmoins le "précis d'analyse d'images" de M. COSTER et J.L. CHERMANT (presse du CNRS, 1989) pour de plus amples informations.

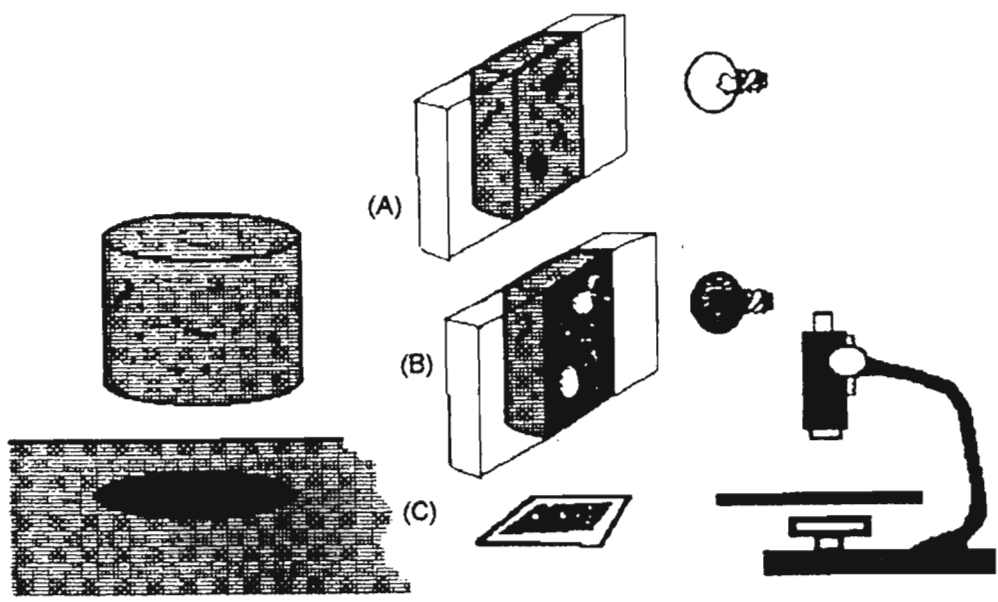


figure 1 : Passage d'un échantillon volumique de sol à un plan d'observation. Différents types de conditionnement (A) bloc poli, (B) bloc poli avec adjonction de produit fluorescent, (C) lame mince.

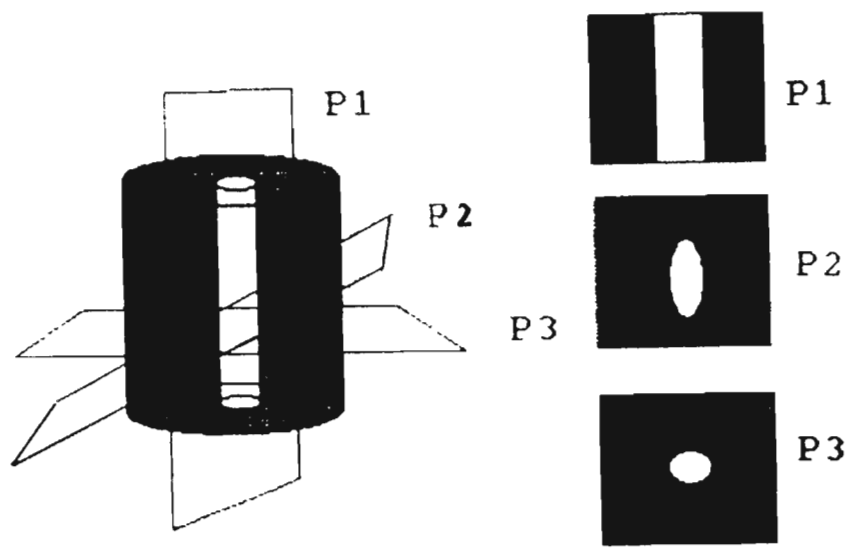


figure 2 : Influence du plan de coupe dans le cas de structures orientées.

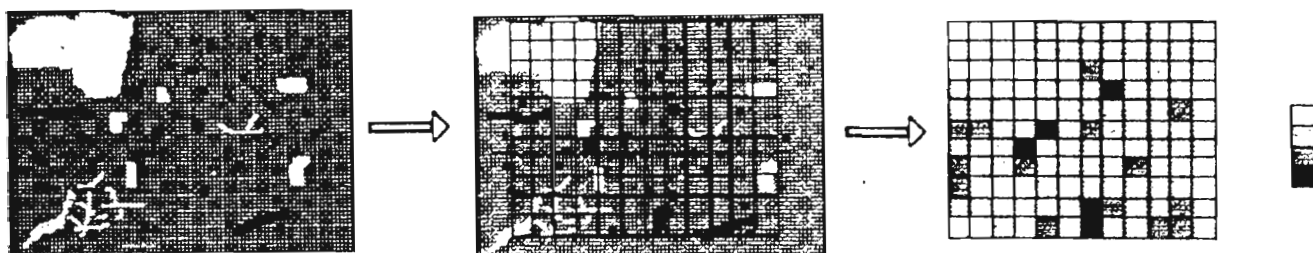


figure 3 : Digitalisation de l'image

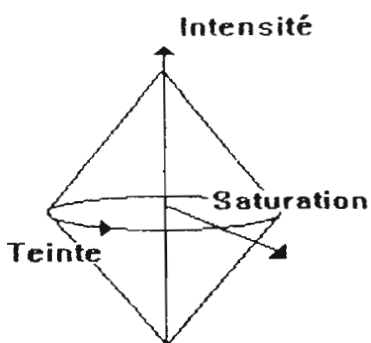


figure 4 : Représentation de la couleur dans le système HSI

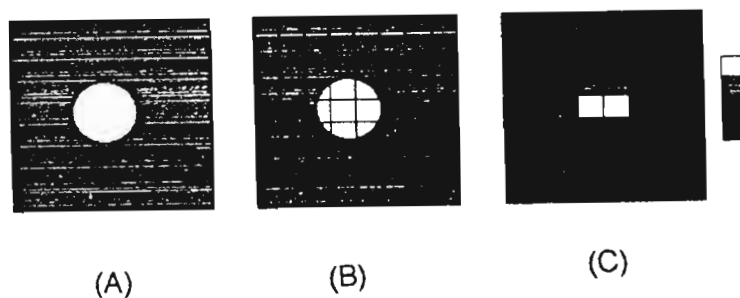


figure 5 : Erreur de pixelisation : (A) plan d'observation, (B) projection du plan d'observation sur la matrice à CCD, (C) image digitalisée résultante.

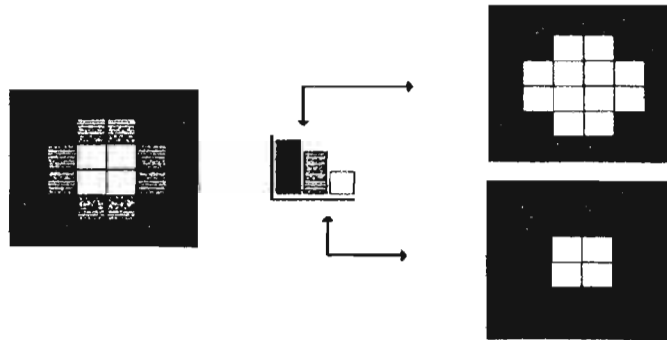


figure 6 : Erreur de seuillage : variation de l'image seuillée en fonction du choix de la valeur seuil

Proportion Taille Orientation dispersion forme

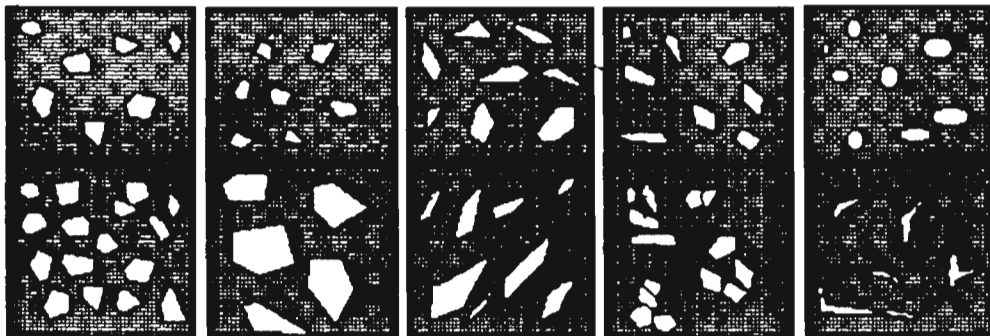


figure 7 : caractéristiques analysables par traitement d'images

**UTILISATION DE L'ANALYSE MORPHOSTRUCTURALE DANS LES
RECHERCHES AGROPEDOLOGIQUES DEVELOPPEES DANS LES
CERRADOS DU BRESIL CENTRAL
UN EXEMPLE D'APPLICATION: LE SEMIS-DIRECT SUR LA PAILLE
COMME SYSTEME CULTURAL ALTERNATIF VIABLE**

BLANCANEUX PHILIPPE* et FREITAS PEDRO LUIZ DE**

**ORSTOM, MAA/UR3D. EMBRAPA/CNPS, BRESIL.*

***EMBRAPA/CNPS, Rua Jardim Botânico, 1024, 22460-000 Rio de Janeiro, BRASIL*

RESUME

Le programme de recherche mené par le Centre National de Recherche du Sol (CNPS/EMBRAPA), en coopération avec l'ORSTOM, vise à une production agricole soutenue dans les Cerrados du Centre-Ouest du Brésil. L'objectif principal est de fournir des recommandations techniques de pratiques culturales alternatives permettant de maintenir ou d'accroître la productivité du sol, basées sur l'étude détaillée de sa structure sous conditions naturelle et anthropique, de façon à comprendre les relations existant entre les conditions structurales du sol, la croissance des racines, les rendements des cultures et le retour économique de ces dernières aux fermiers et à la société.

L'analyse morphostructurale du sol sous différents systèmes (conventionnel par pulvérisateur à disques, lourd, autoporté, et de systèmes alternatifs récemment introduits, avec des charrues à disques ou à socs permettant un labour profond, ainsi que du Semis-Direct), nous permet de montrer, qu'après correction de la fertilité chimique des sols ferrallitiques, l'utilisation du Semis-Direct présente de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes culturaux dans les conditions actuelles du "Cerrado".

MOTS-CLES: Analyse morphostructurale - Cerrados - Bresil - Semis-Direct.

SUMMARY

The research program developed by the National Soil Research Center (EMBRAPA/CNPS), conducted in cooperation with the ORSTOM is diverted towards with the sustainability of agricultural production in the "Cerrados" of Center-West Brazil. The main objective is to produce technical recommendations of alternative practices to maintain and increase soil productivity, supported by the detailed study of its structure under natural and antropic conditions, in order to understand the relationship between soil structural conditions, root growth, crop yield and return to farmers and society.

Morphological analysis of the soil structure, after applying different systems (conventional with heavy disk harrow, and recently introduced alternative, with deep molboard or disk plows, scarification and no-tillage), allowed us to show that, with the chemical deficiencies of oxisols amended, the utilization of the No-Tillage system generates many advantages under the conditions present in the "Cerrado" area.

KEYWORDS: Morphostructural analysis - Cerrados - Brazil - No-Tillage.

INTRODUCTION

La description de l'approche méthodologique utilisée pour les recherches agropédologiques dans les Cerrados du Brésil Central a fait l'objet d'une publication lors de la première Réunion du groupe thématique "*Structure et Fertilité des Sols Tropicaux*", du 06 septembre 1993 (Blancaneux, Ph. et al, 1994).

Nous rappelons que l'évaluation des modifications de l'**ETAT STRUCTURAL** du sol rend nécessaire le développement et l'adaptation de méthodologies qui permettent la caractérisation des différents facteurs limitants la croissance des racines et la production des cultures, de manière intégrée, multidisciplinaire et "holistique", avec une vision agroécologique.

Cela est rendu possible par l'analyse morphostructurale du sol, qui consiste en l'association de différentes méthodologies compartimentées dans les diverses spécialités de la pédologie, de forme systémique (Blancaneaux Ph. et al, 1991, 1993).

L'étude des systèmes alternatifs, y compris celui du Semis-Direct sur la paille, s'inclue dans un vaste programme de recherche sur les modifications structurales et de comportement physico-chimique des sols des Cerrados. Il est conduit en plusieurs sites représentatifs de l'Etat du Goiás, qui sont localisés à Goiânia (Station Expérimentale de l'EMBRAPA/CNPS-EMGOPA), à Rio Verde, Jataí, Morrinhos (Stat. Exp. EMGOPA et Microbassin versant pilote). Les observations sont également faites, directement dans des propriétés privées avec l'aide des propres producteurs ruraux. Ces études visent à l'observation et à la comparaison de différents systèmes de préparation du sol et de gestion des cultures (succession, rotation, association), conventionnels ou alternatifs, sous irrigation ou non.

Nous présentons ici un exemple d'application de notre méthodologie pour l'étude du Semis-Direct sur la paille de la culture antérieure. Les résultats obtenus montrent que cette technique peut être une pratique culturale alternative viable pour la mise en valeur des Cerrados, permettant une production agricole soutenue, économiquement rentable et surtout conservatrice d'un environnement fragile et facilement dégradable.

MATERIEL ET METHODE

Dans le travail présenté ici, l'application de notre méthodologie est réalisée dans l'étude de systèmes de préparation de sol sous irrigation par aspersion (Pivot Central).

Les différents systèmes de préparation du sol testés sont: a) "Grade Pesada" ou système conventionnel (GP) qui consiste en une préparation du sol par Pulvérisateur à disques, lourd, autoporteur, suivi de deux pulvérisations légères; b) labour profond par préparation avec charrue à disques, puis passage de charrue à socs, suivis de nivellement (AP); c) Semis-Direct (PD) sur la paille de la culture précédente, après correction de la fertilité chimique du sol; d) succession de préparation Labour Profond (AP), Semis-Direct (PD), ou (AP/PD).

La succession des cultures testée est le maïs (*Zea mays* L.) en été et le haricot (*Phaseolus vulgaris*) en hiver. L'expérience est menée dans des parcelles de 40 x 15 m, avec trois répétitions, sur les sols ferrallitiques rouges, fortement désaturés en B ("Latosolo Vermelho-Escuro"), argileux, de la station expérimentale de Goiânia, sols très représentatifs des Cerrados de la région Centre-Ouest du Brésil (Blancaneaux Ph. et al, 1993).

Notre méthodologie se base sur les techniques du **Profil Cultural** (Henin S. et al, 1969; Gautronneau Y. et Manichon H., 1987), complétées par des déterminations analytiques diverses de la qualification et de la quantification de la structure du sol. Aux observations qualitatives de l'organisation structurale du sol, réalisées durant la description du profil, sont associées un certain nombre de déterminations physiques tant sur le terrain qu'au laboratoire, permettant l'analyse et la discussion des modifications qui se produisent dans le sol. De la même manière, sont évalués les constituants et les propriétés chimiques et biologiques du sol.

Les résultats sont rapportés à la productivité des cultures pour chaque traitement, ainsi qu'aux rendements économiques de ces dernières.

RESULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de la **productivité** et du **rendement économique** pour les cultures de maïs et de haricot, réalisée pour les quatre traitements sélectionnés (Figures 1 et 2), montre que le système continu par Semis-Direct et la succession Labour Profond (été) et Semis-Direct (hiver) sont viables pour les zones irriguées par aspersion.

Les **rendements** en maïs (Figure 1) sous les différents traitements appliqués durant les quatre années montre une réponse irrégulière, due à des raisons climatiques (saison sèche durant différents stades de croissance de la culture). Pour le haricot (Figure 2), sous l'effet de la régularité du régime

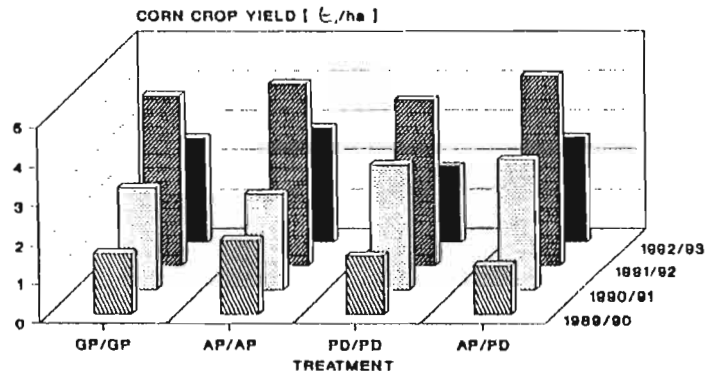


Figure 1. Crop yields, in t/ha, for summer corn (*Zea mays* L.)

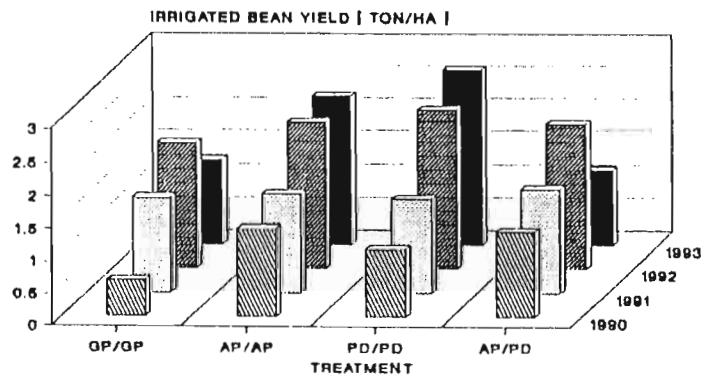


Figure 2. Crop yields, in t/ha, for irrigated beans (*Phaseolus vulgaris* L.).

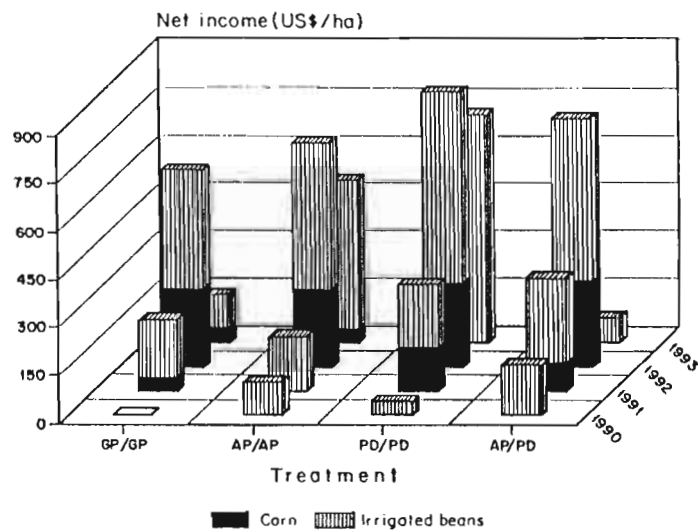


Figure 3. Annual basis net income (In US\$) for corn and irrigated bean crops.

Figure 4 . Morphological analysis of soil structure in a Clayey Dark-Red Latosol under 4 different continuous tillage systems for irrigated bean crop (winter, 1992).

TREATMENT:	HEAVY DISK HARROW [GP/GP]	DEEP MOLDBOARD PLOW [AP/ AP]	NO TILLAGE SYSTEM [PD/PD]	MOLDBOARD PLOW / NO-TILL SEQUENCE [AP/PD]
Horizon Sequence:	Ap ₁ /Ap ₂ /ARp/BA/Bw ₁	Ap ₁ /ARp/BA/Bw ₁	Ap ₁ /Ap ₂ /ARp/BA/Bw ₁	Ap ₁ /ARp/BA/Bw ₁
Plow Layer Depth:	28 cm	25 cm	24 cm	25 cm
Depth of Organic Matter Influence:	28 cm	47 cm	24 cm	75 cm
Surface Crop Residues abundance:	a few	very few	many	many
Org. Residues in Plow Layer:	common/few	few	many, to common in Ap ₃	many, to common in Ap ₃
Soil Structure:				
- Plow Layer:	rounded crumbs and sub-angular blocky	rounded crumbs and sub-angular blocky	rounded crumbs and sub-angular blocky	rounded crumbs and sub-angular blocks
- Deep Layers:	subangular blocky (sub-angular blocky)	subangular blocky (fine granular)	subangular blocky (fine granular)	subangular blocks (fine granular)
Porosity				
- Plow Layer	very porous	very porous, fine/medium	very porous, macropores	very porous
- Deep Layers:	very porous (macropores)	very porous	very porous, inter/intra-aggregates	very porous
Consistency				
- Plow Layer:	slightly hard, friable	soft, friable/firm	soft, friable	soft, friable
- Deep Layers:	slightly hard, friable	slightly hard, friable	soft, very friable	slightly hard, friable
Roots:	concentrated in plow layer, vertical, fines	concentrated in plow layer, vertical, deep tap roots	high abundance in plow layer, very common in depth	many in plow layer, common in depth
Biological Activity:	very frequent in the profile (earthworms/termite)	very frequent in plow layer, few/common in depth (termites)	very frequent in plow layer and in depth	very frequent in plow layer and common in depth
Observations:	compacted layer, without restriction to root growth	compacted layer, without root growth resistance	vestiges of tillage (moldboard plow), previous to the experimentation	superficial layer pulverized (exposing and/or machines); org. matter to 75 cm
Root Growth:	more than 80 % of bean root system in Ap ₁	tap rooted, weakly fasciculated, few nodules	extremely abundant in Ap ₁ , with abundant nodulation	concentrated in the top of ARp layer, tap rooted, horizontal bellow in and bellow AR.

hydrique en condition d'irrigation, une augmentation constante des rendements est observée pour le Semis-Direct.

Considérant les quatre traitements, les meilleures performances pour le maïs et le haricot ont été toutefois observées pour le système (AP/AP), suivis du système mixte (AP/PD), puis du Semis-Direct (PD/PD). En ce qui concerne le **profit net** (Figure 3), calculé à partir des coûts en main d'oeuvre, préparation du sol, irrigation, herbicides, pesticides, fertilisants etc., le Semis-Direct montre la meilleure performance pour le haricot, suivi de la séquence (AP/PD), avec des profits nets de 860 US\$ et 714 US\$ par hectare respectivement, pour l'année agricole 1991/92.

L'**analyse morphostructurale** du sol dans les traitements sélectionnés (Figure 4) permet de déduire que le Semis-Direct présente plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes culturaux, parmi lesquels: le maintien d'une bonne condition structurale du sol et le contrôle de l'érosion; une forte macroporosité et une bonne distribution de la taille des pores; un bon drainage interne et une faible susceptibilité à l'érosion et à l'encroûtement superficiel; une forte activité biologique et une grande variété de la faune du sol qui favorisent une incorporation profonde de la matière organique et une bonne pénétration des racines.

Les déterminations physiques, chimiques, biologiques et morphologiques réalisées sont aussi détaillées que possible et considèrent entre autres, la structure (macro et micro), la matière organique, l'activité biologique, le développement et l'orientation du système racinaire et la porosité (macro et micro). Elles sont réalisées par différentes techniques (micromorphologie, rétractométrie, porosimétrie au mercure..). Une partie de ces résultats sont présentés ici.

La Figure 5 montre la **distribution des volumes de solides et de vides** pour les différents intervalles de taille équivalente des pores sous les différents traitements appliqués (GP/GP, AP/AP, PD/PD, AP/PD). Le principal réflexe du tassement des couches superficielles observé et de l'augmentation de la densité, réside dans la diminution significative du volume de macropores (> 50 μ) et de micropores dans l'intervalle 3 à 50 μ , responsables respectivement, du mouvement et de la disponibilité en eau.

La figure 6 montre le **spectre de porosité** obtenu à partir de l'intrusion de mercure sous traitement conventionnel (GP/GP) et Semis-Direct (PD/PD); on constate une diminution globale du volume des pores des horizons supérieurs des deux traitements par rapport à l'horizon de profondeur microagrégé Bw; toutefois, cette diminution est nettement moindre dans le cas du Semis-Direct.

La Figure 7 montre la **stabilité des agrégats** (cinétique de dégradation sous eau). Une forte stabilité structurale des agrégats de diamètre supérieur à 2mm est observée pour tous les traitements. Le système conventionnel (GP/GP) montre néanmoins une stabilité moindre dans l'horizon Ap2, tassé. En général, le système du Semis-Direct (PD/PD) et la séquence (AP/PD) offrent une meilleure stabilité. Ces résultats sont à rapporter aux conditions structurales, aux plus fortes teneurs en matières organiques, et, à la très forte activité biologique observée dans le traitement par Semis-Direct.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATION

Les résultats obtenus dans cette expérience sont régulièrement présentés à la communauté scientifique et aux différents responsables brésiliens pour la mise en valeur rationnelle des sols des Cerrados (Blancaneaux Ph. et al, 1993b, 1993c; Freitas P.L.de et al, 1994). Ils servent même de référence aux différentes Associations chargées de promouvoir l'implantation du Semis-Direct sous irrigation pour la gestion des sols dans la région Centre-Ouest du Brésil.

Considérant les facteurs limitants du Biotope Cerrado du Centre-Ouest du Brésil, une production agricole soutenue à long terme des sols ferrallitiques tropicaux dépend de pratiques culturales alternées et de rotation des principales cultures économiques telles le maïs, le haricot, le soja, le riz, en visant à l'augmentation ou au maintien du stock organique et à l'amélioration des conditions structurales et du régime hydrique des sols.

Les résultats obtenus par l'analyse morphostructurale du sol permettent la recommandation du Semis-Direct comme système alternatif, associé à d'autres pratiques agroécologiques. Il apparaît comme un moyen de limiter l'utilisation de pesticide, de combustible et de fertilisants, tout en restant économiquement très performant. L'utilisation de cette technique est par ailleurs un moyen extrêmement efficace de contrôle de l'érosion (maintien d'une couverture morte sur le sol, meilleure infiltration de l'eau dans le sol etc..), et de protection globale de l'environnement.

Une liste non exhaustive des principaux travaux consultés pour cette étude est présentée dans la bibliographie.

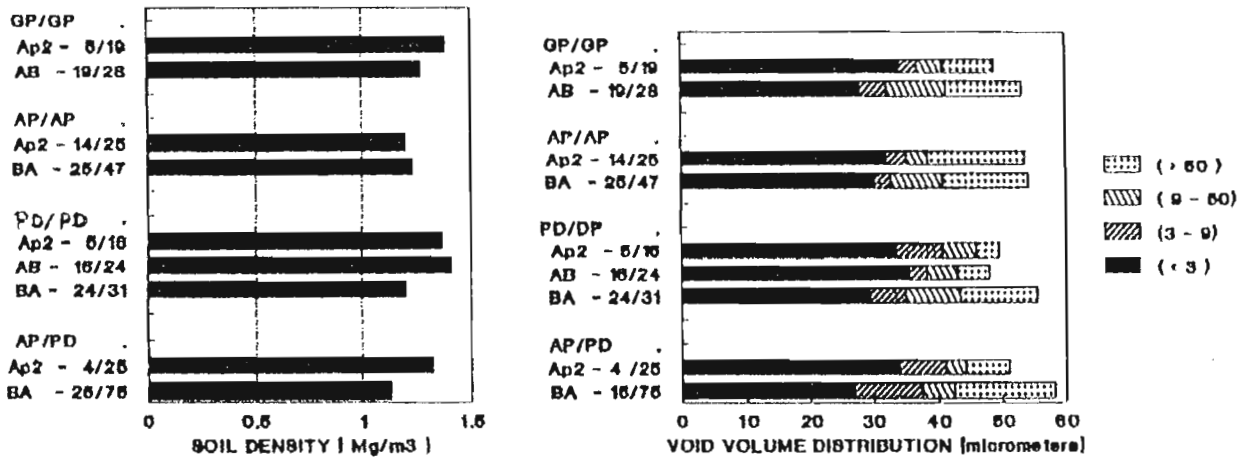


Figure 5. Soil solid and void volume distribution under different tillage systems

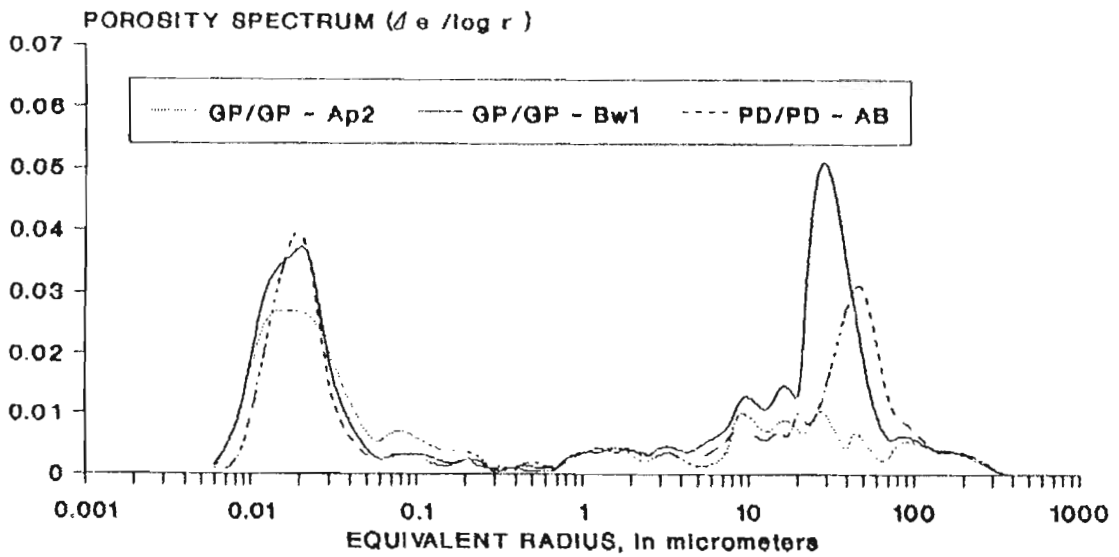


Figure 6. Porosity spectrum obtained by Mercury Intrusion under conventional tillage (GP/GP) and no-tillage (PD/PD)

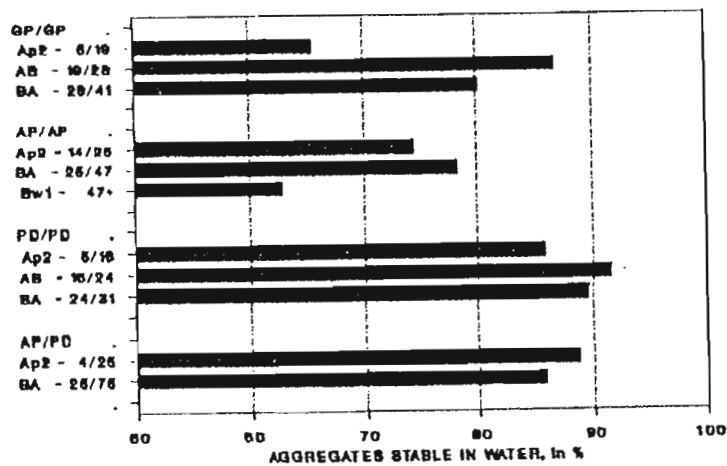


Figure 7. Wet stability of aggregates in the range of 2 to 8 mm

BIBLIOGRAPHIE

- Blancaneaux (Ph.), Freitas (P.L.de), Amabile (R.F.), 1991.** Sistematização e adaptação da metodologia para caracterização do Perfil Cultural. Reuniao de trabalho para corelação dos estudos do Perfil Cultural, Londrina, PR.
- Blancaneaux (Ph.), Freitas (P.L.de), Carvalho (A.M.de), Amabile (R.F.), Couret (S.), 1993a.** Plantio Direto como pratica de conservação dos solos sob vegetação de Cerrados do Centro-Oeste Brasileiro. **In:** Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 24., Goiânia, GO, 1993. (Resumos..., 463).
- Blancaneaux (Ph.), Freitas (P.L.de), Amabile (R.F.), Carvalho (A.M.de), Couret (S.), 1993b.** Le Semis-Direct et les méthodes alternatives comme pratique de conservation des sols sous végétation de Cerrados du Goiás, Brésil. **In:** Journées du Réseau EROSION, 10., Montpellier, ORSTOM, 1993. (Résumés).
- Blancaneaux (Ph.), Freitas (P.L.de), Amabile (R.F.), Carvalho (A.M.de), 1993c.** Le Semis-Direct comme pratique de conservation des Cerrados du Brésil Central. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., vol.XXVIII, n°2, 1993., Spécial EROSION (Sous Presse).
- Blancaneaux (Ph.), Freitas (P.L.de), Carvalho (A.M.de), Correia (J.R.), 1994.** Approche méthodologique utilisée pour les recherches agropédologiques dans les Cerrados du Brésil central et premiers résultats. **In:** 1ère Réunion du groupe thématique "Structure et Fertilité des Sols Tropicaux", ORSTOM, Montpellier, 6 Septembre 1993.
- Braudeau (E.), 1988.** Méthode de caractérisation pédo-hydrigue des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol.XXIV, n°3, 1988: 179-89.
- Bruand (A.), 1986.** Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. Sci. Sol., 24 (4): 351-362.
- Fies (J.C), Bruand (A.), 1990.** Textural porosity of a silty clay using pore volume balance estimation, mercure porosity and quantified backscattered electron image (BESI), Geoderma.
- Freitas (P.L.de), Blancaneaux (Ph.), Silva (L.T.da.C.), Amabile (R.F.), Silveira (P.M.), 1991.** Metodologia para o estudo do efeito de sistemas de manejo sobre a condição estrutural de solos. **In:** Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 23., Porto Alegre, RS, 1991. Anais., (Resumo...,154).
- Freitas (P.L.de), Blancaneaux (Ph.), Carvalho (A.M.de), Correia (J.R.), 1994.** No-Tillage System as a Means to Sustainability of Tropical Oxisols of "Cerrados" in Center-West Brazil. 15th. Internat. Congr. of Soil Science. ISSC-AISS-IBG-SICS., Acapulco, Mexico, July 10th. to 16th., 1994. Transactions., Comm.VI., vol.7b., pp: 43-44.
- Gautronneau (Y.), Manichon (H.), 1987.** Guide méthodique du Profil Cultural. Paris, Gears et Ceref., 71p.
- Henin (S.), Gras (R.), Monnier (G.), 1969.** Le Profil Cultural (2ème édition). Masson Ed. Paris.
- Kertzman (F.F), 1989.** Modification de la structure et des propriétés des couches superficielles d'un "Latossolo Roxo" (Guaira, Sao Paulo, Brésil) soumis à une irrigation par aspersion. Univ. P. & M. Curie., Univ. Nancy I., Univ. Franche Conté., ENSAR. D.E.A. Pédol., 48p.
- Sala (G.H.), Tessier (D.), 1993.** Importance de l'état énergétique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non saturés. C.R. Acad. Sci. Paris, t.316, sér. II, p: 231-236, 1993.

Stengel (P.), 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30 (1), 27-51.

Tessier (D.), 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse, Univ. Paris VII, INRA, Versailles Ed., 361p.

UTILISATION DU PROFIL CULTURAL POUR L'ETUDE DE LA COMPACTION DES SOLS FERRALLITIQUES DE L'ETAT DU PARANA (BRESIL).

RALISCH, Ricardo

TAVARES FILHO, João.

GUIMARÃES, Maria de Fatima.

MEDINA, Cristiane de Conti.

Universidade Estadual de Londrina

CCA / Dpto de Agronomia

Cx. Postal 6001

86051-970 - Londrina (Pr) - Brasil

RESUME

Ce travail présente quelques expériences de l'application de la méthodologie du profil cultural pour l'étude de la compaction des sols dans les conditions tropicales. Pour ceci, une adaptation de cette méthodologie aux conditions citées a été nécessaire. Nous présenterons donc :

- l'évolution de la méthodologie pour nos conditions,
- les applications actuelles de la méthodologie,
- et quelques exemples d'utilisation.

Un certain nombre d'écosystèmes terrestres, notamment les écosystèmes tropicaux, manquent de données scientifiques établies et utilisables pour entreprendre de manière rationnelle et optimale leur mise en valeur. Lorsqu'ils sont transformés en systèmes agro-sylvo-pastoraux, le besoin d'informations se fait ressentir chaque jour davantage. Les nécessités de production accrue et l'obligation d'un développement durable respectant l'environnement sont rarement compatibles avec des écosystèmes complexes comme c'est le cas dans les régions tropicales et, en particulier, au Brésil (LEPRUN, 1994).

L'Etat du Paraná, avec une surface qui équivaut seulement à 2,4% de la surface du territoire brésilien (8 500 000 Km²), produit près de 25% de la production céréalière de tout le pays et environ un tiers des produits agricoles exportés (DERPSCH *et al.*, 1991). Ceci est dû aux excellentes conditions climatiques et aux sols ferrallitiques qui sont parmi les plus riches et les plus productifs du Brésil.

Bien que les sols n'ont été mis en culture que depuis une période récente, souvent moins de cinquante ans, des problèmes de dégradation liés surtout à la densification sont de plus en plus détectés. L'équilibre entre les propriétés physiques, chimiques et biologiques semble être rompu, en indiquant une forte dégradation des sols, probablement parce que l'interaction avec le climat n'est pas prise en compte (BOLLER, 1990), outre le fait que la mise en valeur de ces sols se fait fréquemment de façon très intensive. Ces effets sont différents entre les types de sol et dans le même sol, selon les outils utilisés pour travailler le sol et aussi les conditions inadéquates de humidité où ces sols sont travaillés.

Vu la complexité pour étudier ces phénomènes dans les sols tropicaux et donner des réponses consistantes à ces problèmes, selon (GUIMARÃES *et al.*, 1993), des méthodologies qui permettent d'évaluer toutes les interactions existantes, et déterminer quelle est l'action et la forme d'exploitation la plus adéquate pour chaque sol, doivent être utilisées.

Ayant donc, comme préoccupation principale ces questions, un groupe multidisciplinaire a été formé à l'Université de Londrina pour étudier la compaction des sols ferrallitiques soumis aux différents labours, et la méthode du profil cultural [HENIN *et al.*, (1960 et 1969) ; MANICHON, (1982)] a été ainsi choisie comme méthode principale d'évaluation. Pour son utilisation, DERSIGNY *et al.* (1991) ont été conduits à adapter les critères d'interprétations aux conditions tropicales. Les premières études [CURMI (1990) ; TAVARES FILHO (1991), GUIMARÃES *et al.*, (1993) ; RALISCH *et al.*, (1991, 1993) ; RALISCH *et al.* (1994)] ont montré que le phénomène de dégradation dont il s'agit n'affecte pas seulement les premiers centimètres puisqu'une densification est observée parfois sur l'ensemble du profil, ou au moins jusqu'à 50 cm, et que ce phénomène présente des différences assez importantes entre les sols, dans un même sol, d'une région à l'autre et selon la façon dont le sol est travaillé.

Actuellement les évaluations du travail du sol avec les différents outils agricoles sont en train d'utiliser les critères préconisés par RALISCH (1995) et TAVARES FILHO (1995). Les deux auteurs ont préconisé une réduction des catégories (Tableau 1) en regroupant celles de comportement proche, permettant ainsi une visualisation plus facile des effets du travail du sol avec les différents outils, vue que la grande richesse de détails du profil cultural décrit par MANICHON (1982) rendait les observations difficiles.

En raison des conditions de retrait et de gonflement des sols et aussi des pluviométries très intenses dans ces régions tropicales, il est important de répéter les observations en saisons humides et sèches.

Application du profil cultural au milieu tropical :

Dans nos conditions, le profil cultural est utilisé actuellement pour :

- orienter l'échantillonnage, en prenant en considération la différenciation spatiale des sols,
- aider l'étude des effets des machines et outils agricoles sur le sol (étude du sol et d'adéquation des machines et outils agricoles aux conditions dites idéales de travail du sol),
- faciliter la visualisation des interactions physiques, chimiques et biologiques des sols,
- aider l'étude de la mécanique des sols sur place (étude des phénomènes des retrait, gonflement et cisaillement des sols sur place),
- étude de l'organisation structurale des sols.

Quelques exemples d'utilisation du profil cultural :

RALISCH (1995) a étudié sur sols ferrallitiques, trois types d'utilisation agricole successive (charrue à soc, semis direct et herse lourde) depuis huit années, en comparaison avec une glèbe reboisée avec *Pinus elliotys* depuis 17 ans. Cette étude avait par but une vision macroscopique de la distribution des structures des sols. L'auteur a trouvé que c'est le semis direct, considéré comme une pratique de conservation des sols, qui a affecté le plus significativement le profil des sols étudiés. Une compaction a été détectée jusqu'à 50 cm. Sous charrue à soc, a été observé un développement racinaire du blé assez important et homogène dans l'ensemble du profil, tandis que sous herse lourde le développement racinaire a été peu répandu. Par rapport à l'aire reboisée, l'auteur a pu montrer que le sol n'a pas pu revenir aux états de structure naturelle. Les données de densité du sol sont croissantes pendant cette période de huit ans pour les traitements étudiés.

TAVARES FILHO (1995) a étudié sous deux sites différents (Cascavel et Palotina), l'évolution de sols ferrallitiques du Paraná mise en culture de façon très intensive depuis une vingtaine d'années. Pour chaque site, une zone de forêt a pu servir de témoins, de façon à obtenir des éléments de comparaison avec le sol cultivé avec deux pratiques culturales : l'une

où le sol est cultivé avec la charrue à soc, l'autre où les cultures sont réalisées avec la minimum de travail du sol (semis direct). Les études reposant sur l'approche du profil cultural ont permis d'étudier l'action spécifique des pratiques et des sollicitations auxquelles sont soumis les sols depuis leur mise en valeur. L'auteur a conclu que la mise en culture provoque une dégradation des propriétés physiques (compaction) dans l'ensemble du profil jusqu'à 50 cm., c'est-à-dire une diminution importante et rapide de l'espace poral des sols par rapport à la forêt. Ces effets sont très différents d'un sol à l'autre en fonction des pratiques. Il apparaît qu'à Cascavel, le sol plus évolué sur le plan de la pédologie, la technique du semis direct se montre bien appropriée ; par contre pour le site de Palotina, le sol moins évolué sur le plan pédologique, c'est la charrue à soc qui est la moins dégradante pour le sol. L'action de la plante semble aussi être un facteur rapide d'évolution des propriétés des sols en extrayant de l'eau et consolidant le sol dès lors que celui est fortement desséché. Au total ce travail a montré que la connaissance du mécanisme de l'évolution des propriétés physiques des sols tropicaux exige de prendre en compte des données de nature variée. Cela va du suivi de pratiques culturales à long terme avec l'étude des profils culturaux correspondants, à l'étude de l'ambiance physico-chimique, la nature des constituants et des différents niveaux d'organisation de la phase solide et des pores.

Tableau 1 : Classification de l'organisation du profil cultural pour sols ferrallitiques du Brésil TAVARES FILHO (1995) ; RALISCH (1995).

Premier niveau d'analyse	Deuxième niveau d'analyse	Caractéristiques
Non compacté	O	Présence de petites mottes, ou d'agrégats, sans aucune cohésion. Terre fine et porosité structurale importante due à l'anthropisation et/ou à la faune du sol.
Compacté (C)	Δ	Pas de porosité structurale ou porosité très peu développée (Porosité visible à l'oeil absente). On ne peut pas individualiser de mottes (Aspect continu - Faces de fragmentation peu rugueuses. Cohésion à sec très élevée).
	$\Delta\mu$	Aspect "proche de Δ ", mais cassure légèrement différente et porosité visible qui varie de légère à faible. Cohésion à l'état sec élevée.
	U	Aspect discontinu (on peut individualiser les mottes, qui sont séparées par des cavités importantes, notamment entre bandes de labour). Issu de Δ et $\Delta\mu$ avec amorces de fissures sous l'action d'une fragmentation. Porosité fissurale visible. Cohésion à l'état sec moyenne.
Horizon Pédologique	μ	Etat naturel non anthropisé, porosité visible très forte - faible cohésion à l'état sec.

BIBLIOGRAPHIE

- BOLLER, W. (1990) - Desenvolvimento para semeadura em solo sob preparo reduzido. Santa Maria, Dissertação de Mestrado (UFSM), 150p.
- CURMI P. (1990) - Profil cultural sur les "Latosolo Roxo" du Parana. Compte rendu de mission au Brésil dans le cadre de l'accord CAPES / COFECUB - 35/87.
- DERPESCH R. ; ROTH C.H. ; SIDIRAS N. et KÖPKE U. (1991) - Controle de erosão no Paraná, Brasil : Sistema de cultura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. 272p.
- DERSIGNY C. ; GUIMARAES M.F. et VISINTIN T.M.R. (1990) - Observação do estado estrutural e da repartição espacial do sistema radicular do milho cultivado num Latosolo roxo. Resumos, Londrina, 1990.
- GUIMARAES M.F. ; RALISCH R. et MEDINA C.C. (1993) - O perfil cultural e as modificações da estrutura do solo. In : XXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Cerrados : Fronteira agrícola no século XXI. RESUMOS, Volume I. Goiania (GO). Pags.23-25.
- HENIN S. ; FEODOROFF A. ; GRAS R. et MONNIER G. (1960) - Le profil cultural. 1^{ère} éd., Masson, Paris, 320p.
- HENIN S. ; FEODOROFF A. ; GRAS R. et MONNIER G. (1969) - Amélioration du profil cultural. II - Le travail du sol (chapitre IV). In : "Le profil cultural". 2^{ème} éd., Masson, Paris, pags 173 - 198.
- LEPRUN, J.C. (1994) - Effets de la mise en culture sur la dégradation physique des sols. Bilan du ruissellement et de l'érosion de quelques grands écosystèmes brésiliens. In : Etude et gestion des sols. AFES, 1(1) : 45-65.
- MANICHON H. (1982) - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Docteur Ingénieur INA-PG, 241p. + annexes.
- RALISCH R. ; MEDINA C.C. ; GUIMARAES M.F. ; TAVARES FILHO J. ; DERSIGNY C.G. et VISINTIN L.M.B. (1991) - O método do perfil cultural para auxiliar na avaliação dos efeitos do preparo sobre a estrutura do solo. In : XX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. RESUMOS, 58. Londrina (PR). Pag. 68.
- RALISCH R. ; GUIMARAES M.F. ; BALBINO L.C. ; MEDINA C.C. ; TAVARES FILHO J. ; DERSIGNY C.G. et VISINTIN L.M.B. (1993) - Estudos dos efeitos da realização sucessiva de um mesmo tipo de manejo, sobre perfil cultural e o e Engenharia Agrícola. ANAIS, V.III, Ilheus (BA), pags 2122-2135.
- RALISCH R. et GUIMARAES M.F. (1994) - Avaliação do comportamento do solo através do perfil cultural. In : II Seminario sobre a cultura do milho "safinha". RESUMOS, 59. Assis (SP). Pags. 9 - 15.

RALISCH, R. (1995) - Efeito de três sistemas de manejo no estado estrutural de um Latossolo roxo. Botucatu, Dissertação de Mestrado (UNESP), 61p.

TAVARES FILHO J. ; GUIMARAES M.F. ; RALISCH R. ; MEDINA C.C. ; DERSIGNY C.G. et VISINTIN L.M.B. (1991) - Utilização do método do perfil cultural para avaliação do desenvolvimento de uma cultura. In : XXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. RESUMOS (157). Porto Alegre (RS). Pag.142.

TAVARES FILHO, J. (1995) - Organisation et comportement des Latosols du Paraná (Brésil). Influence de leur mise en culture. Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I, 229p.

**EFFETS DE LA STRUCTURE ET DES RACINES
DANS UN SOL FERRALLITIQUE ARGILEUX
SUR LE CYCLE DE L'EAU EN MILIEU FORESTIER AMAZONIEN**

A. Chauvel

LEST Centre ORSTOM de Bondy, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy CEDEX

Cet exposé reprend le contenu d'une communication présentée par A. Chauvel et al., en 1992, au VII Congrès Brésilien de météorologie, à São Paulo. Les références des annales de ce Congrès figurent dans la liste bibliographique.

RESUME

L'étude des relations sol-eau-racines est ici abordée dans un profil de sol ferrallitique argileux, profond de plus de 6 mètres, sous forêt amazonienne, dans la région Nord de Manaus.

L'analyse des données portant sur : 1- la distribution des racines, 2- les variations verticales de la structure et de la porosité, 3- le profil hydrique et 4- les mouvements de l'eau (révélés par marquage au tritium), indique un prélèvement d'eau important par les racines, en saison sèche, dans la partie médiane du profil et à la base de l'horizon B Ferrallitique argileux, à plus de 6 mètres de profondeur. L'hypothèse d'une régulation inter-annuelle du cycle de l'eau dans l'écosystème forestier est suggérée.

MOTS CLES : structure, racines, cycle de l'eau, forêt, Amazonie.

INTRODUCTION

En Amazonie Brésilienne, des travaux récents (Luizão et al. 1992), mettent en évidence le caractère saisonnier des racines et, en particulier des plus fines, ainsi que la présence de racines atteignant plusieurs mètres de profondeur (Cerri et Volkoff 1987 ; Nepstad et al. 1994), dans les latosols argileux recouverts par la forêt tropicale humide. Par ailleurs, les travaux de Pimentel da Silva et al., hydrologues, (1992), indiquent que la végétation prélève des quantités importantes d'eau en dessous de 2 m, ce qui conduit à examiner en détail les relations sol-eau-racines dans les horizons profonds. Dans ce travail, nous nous proposons d'examiner simultanément les données disponibles sur la distribution des racines, sur la dynamique de l'eau et sur les caractéristiques porosimétriques d'un profil de latosols argileux de près de 7 m de profondeur dans la région Nord de Manaus.

LE MILIEU PHYSIQUE

Le climat est de type tropical humide (Af selon la classification de Köppen). Les précipitations pluviométriques annuelles varient largement d'une année sur l'autre (de l'ordre de 1000 mm entre les extrêmes) ; leur moyenne est voisine de 2100 mm, tandis que leur distribution présente un très net caractère saisonnier : pendant 1 à 4 mois chaque année, le plus souvent entre juin et octobre, les pluies n'atteignent pas 60 mm/mois alors que l'évaporation totale dépasse 100 mm/mois (Cabral 1991). Le bilan hydrique du sol est alors nettement déficitaire.

Les sols ferrallitiques, classés "Latosolos amarelos, álicos, textura muito argilosa" dans la classification brésilienne (Camargo & Rodrigues 1979), recouvrent de bas plateaux. Développés sur des sédiments continentaux (formation Alter do Chão), ils sont composés principalement de Kaolinite (jusqu'à 80 %), d'hydroxydes de fer et d'aluminium et de 5 à 15 % de quartz. La limite inférieure de l'horizon B ferallitique, située entre 6 et 7 m de profondeur, sub-horizontale contournée, marque le passage avec les horizons nodulaires sous-jacents (Lucas 1989). De nombreux résultats relatifs au fonctionnement hydrique de ces sols (Cabral 1991), indiquent que, sous forêt, le drainage est entièrement vertical.

La végétation, connue sous le nom de "floresta de terra firme", est une forêt dense humide sempervirente (Prance et al. 1976).

LA DISTRIBUTION VERTICALE DES RACINES

Le poids et la longueur des racines, extraites jusqu'à 6 m de profondeur, ont été mesurés, en fin de saison sèche (novembre 1991). Pour cela, une tranchée (2m x 1m) et de 6,5 m de profondeur a été creusée et des blocs de 15 dcm² ont été retirés de chacune des parois opposées (distantes de 2 m l'une de l'autre). Après pesée de ces blocs, les racines en ont été séparées par tamisage dans l'eau, sur des tamis de 2 mm et de 250 µm. Un tri manuel, à l'oeil nu et sous loupe binoculaire, a permis de séparer les racines en classes de diamètres de : 1-5 mm, 0,2-0,5 mm et < 0,2 mm. Les racines de diamètre supérieur à 5 mm, distribuées de façon très irrégulière, n'ont pas été prises en compte dans les résultats présentés. Les racines ont été ensuite séchées à l'étuve à 70° et pesées. Les mesures de longueur ont été faites sur des aliquotes des échantillons (séparées avant séchage) pour chaque classe de diamètre retenu. La relation entre le poids et la longueur des racines pour chaque aliquote a été utilisée pour l'évaluation de la longueur des racines extraites de chaque bloc. Les valeurs retenues sont les moyennes de celles obtenues pour les deux blocs.

Les racines sont observées depuis la surface jusqu'à la limite inférieure de la tranchée. Les concentrations les plus fortes se situant dans les horizons les plus superficiels (fig 1 a). Dans les trente premiers cm sont ainsi mesurés près de 70 km de racines/m³, dont 78 % de racines de diamètre inférieur à 0,2 µm. La quantité de racines diminue fortement avec la profondeur et, à partir de 1 m, les longueurs de racines restent inférieures à 3 km/m³ sauf aux profondeurs de 3 m et de 6 m marquées par des accumulations notables de racines, avec des valeurs respectives de 6 et de 3,5 km/m³. Les racines les plus fines, déjà prédominantes en surface, contribuent pour plus de 90 % au total de la longueur des racines profondes du sol.

LE SOL

Il est constitué, en dessous de l'horizon A humifère, d'une dizaine de cm de profondeur, par un ensemble d'horizons B ferrallitiques, très argileux, meubles, limités à 6-7 m de profondeur, par une transition rapide subhorizontale contournée avec l' horizon à nodules hématitiques et gibbsitiques sous-jacents.

Le profil a été étudié en détail par Y. Lucas (1989), et par d'autres auteurs dont les données analytiques sont ici utilisées. Pour caractériser la porosité fine ($< 100 \mu\text{m}$) la distribution dimensionnelle des vides a été déterminée par la technique d'injection de mercure (Grimaldi et al. 1990). Les résultats obtenus sont représentés sous forme d'histogrammes de distribution des vides en différentes classes définies par un accroissement constant du logarithme décimal de r .

L'ensemble des résultats disponibles, et en particulier les spectres de porosité (fig 1 b), met en évidence la différenciation verticale suivante :

- dans les 40 cm superficiels se concentre la plus grande partie des nutriments, de la matière organique, des racines et de la biomasse microbienne. L'activité biologique maintient une porosité grossière à fine importante ;
- entre 0,4 et 3,5 m de profondeur, la structure micro-agrégée délimitée par un réseau de fines fissures, explique le caractère bimodal du spectre de porosité (fig 1 b) : les pores les plus petits ($< 0,1 \mu\text{m}$) sont situés entre les particules de kaolinite, tandis que les plus grands ($n \times 10 \mu\text{m}$) correspondent aux microfissures inter-microagrégats. Cette porosité fissurale diminue progressivement, avec la profondeur, de même que la micro-agrégation ;
- entre 3,5 et 5 m, la porosité est essentiellement interparticulaire, de diamètre inférieur à $0,1 \mu\text{m}$;
- entre 5 et 6,5 m apparaissent, en quantités croissantes avec la profondeur, dans des volumes verticaux en forme de doigts de gant, des nodules hématitiques et gibbsitiques caractéristiques de l'horizon nodulaire sous-jacent. La dégradation progressive de ces nodules, de bas en haut (Lucas 1989), est à l'origine de vides de dissolution qui se manifestent par le développement d'une porosité de dimensions comprises entre 1 et $100 \mu\text{m}$ visibles sur les spectres de porosité. Ces processus de dissolution qui affectent seulement des nodules hématitiques et gibbsitiques ne libèrent toutefois pas de nutriments.

LES VARIATIONS SAISONNIERES DU PROFIL HYDRIQUE

Les résultats des mesures d'humidité pondérale des échantillons prélevés par sondages jusqu'à 6 m de profondeur sont représentés sur la fig 1 c. La première courbe caractérise la fin de la saison des pluies (moyennes du 6/05/91) tandis que la seconde correspond au maximum de saison sèche (moyennes du 22/11/91). Les variations d'humidité permettent de caractériser quatre ensembles superposés :

- entre 0 et 40 cm, les teneurs en eau et l'amplitude de leurs variations entre les extrêmes sont maximales en superficie, et diminuent progressivement vers le bas ;
- de 0,4 m à 3,5 m les humidités relevées au maximum de sécheresse (liées aux teneurs en argile) varient peu en fonction de la profondeur, tandis que celles mesurées en fin de saison des pluies (plus dépendantes de la structure) diminuent progressivement vers le bas, de même que le stock d'eau disponible ;
- de 3,5 à 5 m, les deux courbes tendent à se confondre et les taux d'humidité diminuent faiblement avec la profondeur ;
- en dessous de 5 m, les teneurs en eau au maximum de sécheresse continuent à diminuer avec la profondeur, mais celles qui sont caractéristiques de la fin de saison des pluies se maintiennent, puis augmentent fortement vers le bas dès qu'apparaissent des concentrations de nodules. L'amplitude des variations entre les valeurs extrêmes présente un maximum à la base des horizons B, comparable à celui observé en surface. A l'observation, on constate que les surfaces observées à la limite de l'horizon nodulaire, présentent un aspect brillant révélateur de la présence d'un film d'eau libre.

LES MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE SOL

Le marquage artificiel de l'eau par l'isotope de l'hydrogène a été largement utilisé pour mesurer la vitesse d'infiltration et le stockage de l'eau dans les sols. Dans la recherche réalisée en collaboration entre l'INPA et l'AIEA, (Rozanski et al. 1992), l'injection de tritium (activité 420 μCi et 560 μCi) a été faite sur parcelles de 3 x 3 m en avril 1990, suivie par un apport de 300 l d'eau non marquée pour faire entrer l'eau marquée dans le profil et éviter la perte de tritium par évaporation. Les échantillons de sol ont été prélevés 59, 114 et 377 jours après l'injection de tritium. L'extraction de l'eau et les analyses isotopiques ont été réalisées au "Laboratoire d'Hydrologie Isotopique de l'AIEA".

Les résultats (fig 1d) montrent une infiltration lente de l'eau marquée en fin de saison des pluies : après 59 jours, le pic de tritium se situe seulement à près de 1 m de profondeur. Ce pic se déplace peu durant la saison sèche si bien qu'en octobre, 114 jours après l'injection, il se localise encore à près de 1,5 m de profondeur. Entre octobre 1990 et mai 91, période recouvrant toute la saison des pluies, le pic d'eau marquée atteint 3,5 m de profondeur dans le sol. On observe une perte de près de 40 % du tritium entre 1,5 et 3,5 m de profondeur, qui indique une absorption significative de l'eau du sol par les racines existantes entre ces niveaux. La vitesse d'infiltration de l'eau, calculée à partir du déplacement du tritium est ainsi

variable au cours de l'année : près de 3 fois plus grande en saison des pluies (30 à 40 cm/mois) que pendant la saison sèche (13 cm/mois).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Ainsi considéré, le système sol-eau-racines semble pouvoir être subdivisé en quatre étages principaux superposés :

- dans les 40 cm superficiels, une forte activité biologique et des apports de litière, permettent le maintien d'une bonne structure et de teneurs en matière organique élevée à l'origine d'une capacité de rétention pour l'eau utile, et pour les nutriments, importante. Sont ainsi maintenues, en période de pluies fréquentes, des conditions favorables à l'absorption de l'eau et des éléments minéraux. Dès que les pluies cessent durant plus d'une semaine, les réserves en eau disponible s'épuisent et certaines plantules faiblement enracinées se flétrissent. Luizão et al. (1992) ont montré que dans ces horizons superficiels, la biomasse racinaire diminue fortement en saison sèche ;
- entre 0,4 et 1,4 m, la micro-agrégation est bien développée ; elle diminue progressivement de 1,4 à 3,5 m, en même temps que la porosité fissurale inter-agrégats (de quelques 10 μm de large) assurant la rétention d'eau disponible. Selon Van Wambecke (1974), la conductivité hydraulique de ces horizons oxiques diminue brusquement dès que la tension dépasse 1000 cm d'eau (vidage d'une grande partie de la porosité inter-microagrégats). Les racines doivent alors se développer en direction des volumes contenant encore de l'eau disponible. On suppose que le maximum de racines fines observé en fin de saison sèche à 3,5 m de profondeur, correspond au front de propagation de ces racines absorbantes en fin de saison sèche. Les résultats obtenus par marquage de l'eau au tritium montrent que le stock d'eau disponible accumulé entre 0,4 et 3,5 m de profondeur, relativement important, provient des pluies de l'année climatique en cours ;
- entre 3,5 et 5 m, la réduction de la porosité de taille supérieure à 0,1 μm limite la disponibilité de l'eau pour les racines, sans cependant empêcher une circulation verticale lente de l'eau en régime pseudo-permanent (selon P. Audry, communication orale). A ce niveau, la densité de racines est minimale ;
- en dessous de 5 m de profondeur, l'existence d'une discontinuité (entre le matériel argileux ferrallitique et l'horizon nodulaire), ainsi que le développement de vides de dissolution de quelques dizaines de μm de large à la périphérie des nodules (Lucas, 1989), permet l'accumulation d'eau libre. En saison humide, cette eau, non absorbée par les racines (qui trouvent plus haut des réserves importantes), s'accumule à la base de l'horizon B ferrallitique.

Au maximum de la saison sèche, à l'inverse, les réserves disponibles dans la partie supérieure du profil s'épuisent et les taux d'humidité s'y stabilisent (Pimentel da Silva et al. 1992). Ce serait alors en profondeur, à la base de l'horizon ferrallitique, exploitée par de fines racines, que la forêt puiserait les réserves en eau qui lui permettent de maintenir son évapotranspiration (Nepstad et al. 1994). Les résultats du marquage de l'eau par le tritium (Rozanski et al. 1992, fig 1 d) indiquent que ces ressources hydriques profondes proviennent des précipitations des années antérieures à l'expérimentation, ce qui impliquerait une régulation inter-annuelle du cycle de l'eau dans l'écosystème forestier amazonien. L'effet exercé par la déforestation en Amazonie sur les changements climatiques régionaux, étudié par Nobre et al. (1991), s'explique sans doute, pour une part, par l'aptitude des racines des arbres, mais non de celles de la végétation herbacée des pâturages (Pimentel da Silva et al. 1992), à recycler dans l'atmosphère les ressources en eau de la profondeur des horizons B ferrallitiques, issues des pluies des années précédentes.

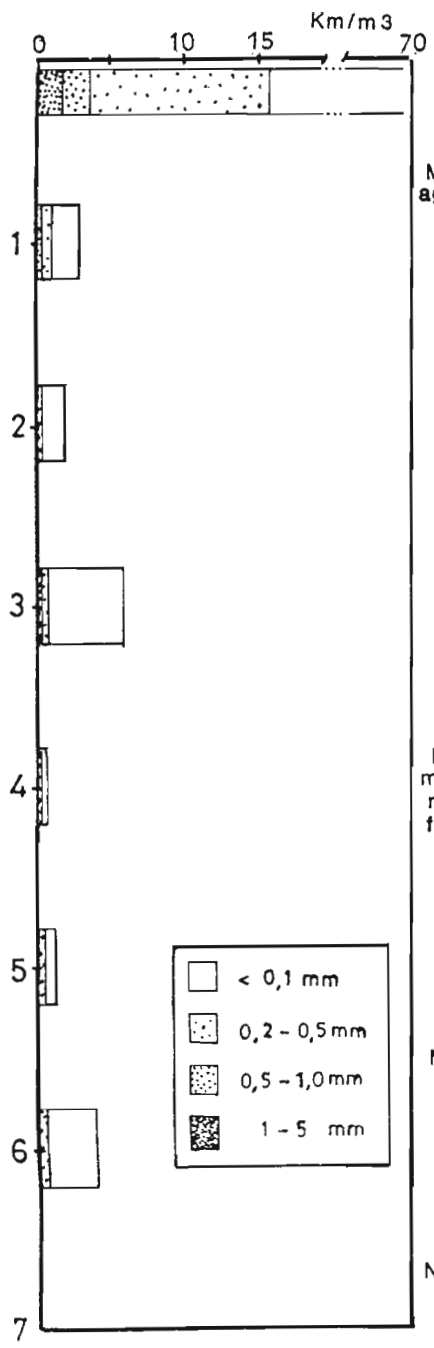
BIBLIOGRAPHIE

- Cabral O (1991) - Armazenagem de água num solo com floresta de terra firme e com seringal implantado. Dissertação de Mestrado, INPE : 104 p.
- Camargo M N & Rodrigues T E (1979) - Guia de Excursão, XII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Manaus, EMBRAPA : 72.
- Chauvel A, Vital A R T, Lucas Y, Desjardins T, Franken W K, Luizão F J, Araguas L A, Rozanski K & Bedmar A P - O papel das raízes no ciclo hidrológico da floresta amazônica. VII Congresso Brasileiro de Meteorologia. 28/9 - 2/10 1992 : 298-302.
- Cerri C C & Volkoff B (1987) - Carbon content in a yellow latosol of Central Amazon Rain Forest. *Acta Oecol.*, 8 : 29-42.
- Grimaldi M, Sarrazin M, Chauvel A, Luizão F J, Nunes N, Lobato Rodrigues M de R, Amblard & Tessier (1990) - Effets de la déforestation et de diverses cultures sur la structure des latosols argileux d'Amazonie Brésilienne. *Cahiers Agriculture*, 2 : 36-47.
- Lawrence G P (1977) - Measurement of pore sizes in fine textures-textures soils : a review of existing techniques. *J. Soil Sci.*, 28 : 527-540.
- Lucas Y (1989) - Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne : équilibres, déséquilibres et transformations. Thèse Doct., Univ. Poitiers, 211 : 157 p.
- Luizão F J, Luizão R C, Chauvel A (1992) - Premiers résultats sur la dynamique des biomasses racinaires et microbiennes dans un latosol d'Amazonie Centrale (Brésil) sous forêt et sous pâturages. *Cah. ORSTOM*, XXVII : 69-79

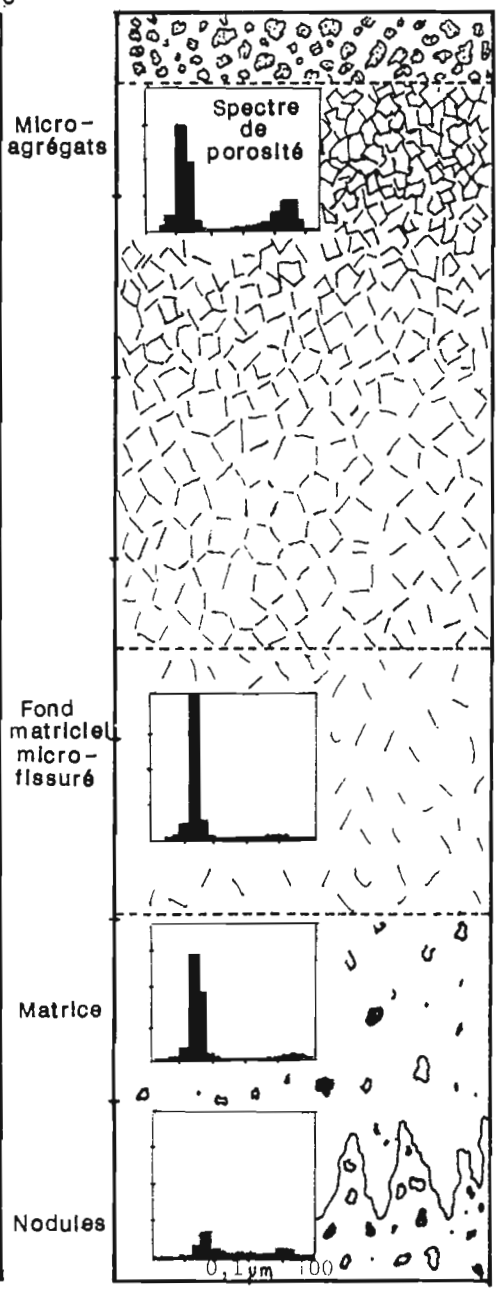
- Nepstad D C, Carvalho C R, Davidson E A, Jipp P H, Lefebvre P A, Negreiros G H, Silva E D da, Stone T A, Trumbore S E & Vieira S (1994) - The role of deep roots in hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*. vol. 372 : 666-669.
- Nobre C, Sellers P J & Shukla J (1991) - Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of climate*. 4 : 957-987.
- Rozanski K, Araguas Araguas L, Plata Bedmar A, Tancredi A C, Franken W (1992) - Downward movement of soil moisture in the Central Amazon region traced by means of hydrogen isotopes. *Intern. Symp. on Use of Stable Isotopes in Plant Nutrition, Soil Fertility and Environmental Studies*. IAEA.
- Van Wambeke A (1974) Les propriétés agricoles des oxisols. *Pédologie* 24 : 191-195.

Liste des figures

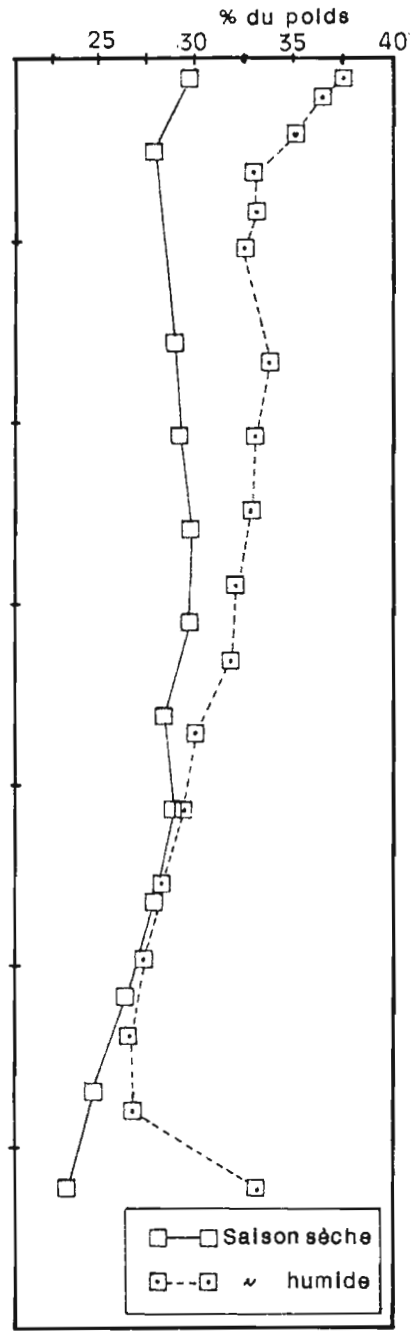
Fig. 1 Diagramme du profil de sol ferrallitique montrant : a/ la distribution des racines, b/ la structure de sol et le spectre de porosité, c/ les profils hydriques de saison sèche et de saison humide, d/ l'infiltration de l'eau marquée par le tritium.



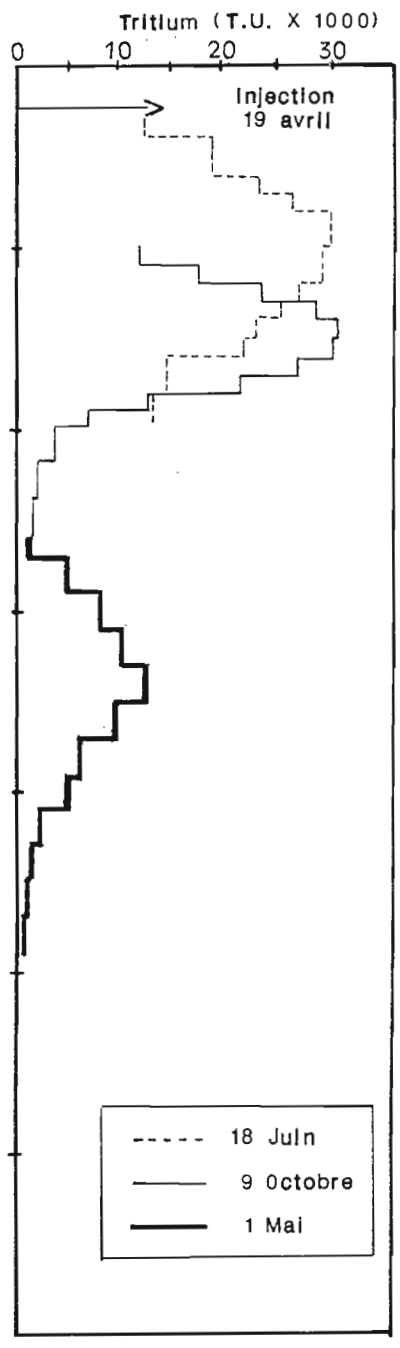
a/ Distribution des racines



b/ Morphologie du sol et spectre de porosité



c/ Profils hydriques



d/ Infiltration de l'eau marquée au tritium

Indicateurs de l'évolution de la fertilité physique des sols en jachère sur les hauts plateaux boliviens. Questions de méthodes.

HERVE Dominique

ORSTOM, Casilla 9214, La Paz, Bolivie.

RESUME

Des indicateurs de l'évolution de la fertilité physique de sols en jachère longue sont recherchés afin de disposer de références pour le pilotage d'une réduction de la durée de la jachère, sur les hauts plateaux boliviens. La question principale est de savoir si des modifications de l'état physique du sol sont décelables sur un pas de temps supérieur au cycle annuel, et en absence d'intervention culturale au cours de la jachère. Les difficultés d'une telle évaluation proviennent de la comparaison des états physiques, dans l'espace et dans le temps. La discussion se limitera aux méthodes d'observation du profil cultural, des états de surface et de détermination de l'instabilité structurale.

Mots-clefs: fertilité physique, profil cultural, état de surface, instabilité structurale, jachère, Altiplano bolivien.

PROBLEMATIQUE

L'objectif d'évaluer l'effet d'une non culture longue sur l'état du milieu, afin de disposer de références pour le pilotage d'une réduction de la durée de la jachère, inverse l'approche classique d'évaluation de l'effet sur le milieu des interventions culturales. D'où la question: dispose-t-on d'outils et de méthodes adaptés pour une telle évaluation?

La jachère étudiée est une interculture pluriannuelle pâturée par les ovins essentiellement. Elle fait suite en général à trois années de culture, pomme de terre puis céréales ou quénopodes ou à plusieurs années consécutives d'orge. La norme communale fixe, sur la partie du territoire gérée collectivement, le nombre d'années successives de culture (3 ans), qui ne peut pas être modifié à cette altitude, et la durée de la jachère (10 ans). Cette jachère longue est en train d'être réduite dans les Andes Centrales de 10-15 ans à 4-8 ans (Hervé, 1993). Les conséquences d'une telle réduction sont l'objet de cette étude. La problématique est donc inversée par rapport aux nombreux travaux réalisés en zone tropicale humide d'Afrique de l'Ouest concernant les conséquences du défrichement et brulis du couvert forestier et cherchant à déterminer les raisons de la mise en jachère après un nombre variable d'années de culture (Feller, Milleville, 1977; Moreau, 1983). De plus, ces recherches ont été menées essentiellement sur sols ferragineux et ferralitiques. Elles ne sont pas directement applicables, même si elles apportent des éléments de référence méthodologiques, pour suivre, en milieu tropical de montagne, l'évolution de l'état physique du sol après la dernière culture de la rotation.

Comment peut être appréhendée l'évolution de l'état physique du sol sur un pas de temps long? Quels indicateurs, sensibles à cette évolution, pourraient constituer en quelque sorte des marqueurs? Comment étudier en parallèle, comme le suggérait Le Blic (1994), "des séquences évolutives structurales et végétales (dynamique des jachères, par exemple)"?. La structure du sol peut-elle être "une mémoire" de pratiques culturales antérieures (Manichon et Roger-Estrade, 1990:53) et d'une fertilité physique "acquise" (Boiffin, Monnier, 1982).

En tant qu'agronome, la préoccupation n'est pas de comprendre les mécanismes ni de classer les sols, sinon de réaliser un diagnostique au champ, en valorisant pour cette raison un échantillon de parcelles étudiées in situ. L'exposé se limitera à discuter de l'utilisation de trois méthodes connues: le profil cultural, la caractérisation des états de surface, la mesure de l'instabilité structurale, cette dernière n'ayant pas encore donné lieu à des résultats sur l'altiplano bolivien.

CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE: ALTIPLANO CENTRAL BOLIVIEN

Les sols colluviaux alluviaux de la région étudiée sont classés comme Lithic Ustochrept, Typic Ustochrept, Fluventic Ustochrept, Lithic Ustorthent, Typic Haplustalf, Lithic Paleustalf par Blancosoto (1989) et d'Aridisols par Orsag (1989). En général déstructurés et très pauvres en matière organique (<1%), ils présentent des combinaisons de limons et de sables qui les rendent particulièrement sensibles

tant à la compactation qu'à la dégradation de surface (Figure 1). Ils sont labourés plus profondément une seule fois dans la rotation, pour la culture de pomme de terre, à la charrue à disques ou à l'araire de traction bovine.

L'état structural observable sous jachère est hérité des trois années de culture; il évolue ensuite sous l'effet d'un climat semi-aride d'altitude (3800 m d'altitude, 400 mm de précipitation annuelle, en 3 à 5 mois; température moyenne de 10°C avec de forts écarts journalier, forte incidence du gel, mais pendant la période sèche) et du système racinaire de la végétation qui recolonise la jachère. Jusqu'à 6 ans, ce sont des graminées annuelles (en particulier *Bouteloua simplex*) puis à partir de dix ans des arbustes de la famille des composées, *Baccharis incarum* et *Tetraglochin cristatum*, au système racinaire pivotant et très profond.

Ribstein (1992) relève à La Paz (580 mm annuels) des intensités de 20mm/h avec une fréquence de 10 ans et 30mm/h avec une fréquence de 20 ans, 40 mm de précipitation maximale journalière décennale et 95 jours de pluviométrie supérieure à 0.5 mm. Les autres particularités sont l'amplitude extrême des températures journalières, la possible influence du gel et de la grêle sur les organisations superficielles. Le taux de sable plafonne à 75%; la présence de matière organique (voisine de 1%) et de 15% d'argile (8 à 20%) expliquent que la capacité d'échange cationique ne soit pas trop basse. Le fait que le calcium présente près de la moitié de cette capacité d'échange et que le sodium soit négligeable laissent présager une bonne stabilité structurale. On note par ailleurs dans la plupart des sols une activité biologique intense: galeries de fourmillères, sous les cailloux en particulier (Hervé, Valentin, 1994).

METHODES

Profil cultural

La caractérisation de l'état structural d'un sol, sur la base d'une description morphologique, doit être "en relation aussi directe que possible avec les facteurs de structuration anthropiques" (Manichon, Roger-Estrade, 1990: 27). Selon ces auteurs, les effets cumulatifs des systèmes de culture sont appréhendés par "la fréquence et l'intensité des actions de compactage et de fragmentation", en cherchant à distinguer ce qui ressort d'actions anthropiques actuelles, anciennes ou d'effets d'agents naturels. Les effets spécifiques des précédents culturaux n'ont été mis en évidence que par l'intermédiaire des travaux (nature et dates de réalisation) qu'ils impliquent. Il n'est rien dit des effets éventuels des intercultures, ni du temps de rémanence des effets des travaux culturaux.

L'évolution structurale pendant la jachère dépend des intensités de pluie, de l'activité faunique, des alternances humectation-dessiccation, du gel, de l'aptitude de la terre à la fissuration, de l'installation des systèmes racinaires de la végétation colonisatrice (Boiffin, Guérif, Stengel, 1990: 55-56). Elle dépend donc autant de facteurs imputables à la jachère que d'aptitudes du sol ou d'événements climatiques. Par ailleurs, une analyse fine de la porosité (Stengel, 1990) et des réseaux de fissuration paraît lourde à réaliser au champ; les évolutions que l'on cherche à mettre en évidence sont en effet probablement moins nettes que celles résultant d'un travail du sol, elles-même parfois délicates à mettre en évidence (Feller et Milleville, 1977). De plus, comme il est hors de question de mener une étude diachronique au champ pendant une dizaine d'années, peut-on détecter des évolutions passées à partir de la seule description d'un état final, sans contrôle sur l'état initial ?

Instabilité structurale

La détermination des indices d'instabilité structurale permet de prévoir une tendance à une certaine désagrégation; elle fait partie de l'évaluation de la fertilité physique d'un sol (Boiffin, Monnier, 1982). Combeau et Quantin (1962) ont montré en zone tropicale humide que la stabilité structurale variait au cours de l'année, jusqu'à 50 à 60% de sa valeur moyenne, entre la saison pluvieuse et la saison sèche. Pour comparer des parcelles, on devra donc prendre les échantillons aux mêmes dates. Feller et Milleville (1977) ont détecté au Sénégal Oriental, avec l'indice I_s de Hénin, une dégradation de la structure du sol après les deux premières années de culture. Moreau (1984-85) trouve en Côte d'Ivoire, en comparant une parcelle témoin forestière et une parcelle cultivée, d'un même couple implanté avant défrichement, des variations relatives élevées pour I_s .

Sebillotte (1968) signale que la stabilité structurale n'est pas indépendante de l'humidité récente des mottes: "...l'histoire récente du sol en place (sécheresse, humidité) modifie le comportement des échantillons vis-à-vis des tests" (Hénin, 1976). La dessiccation rapide de la surface du sol constatée sur l'altiplano bolivien, même entre des périodes pluvieuses, jusqu'à des humidités de 2 à 3 %, suggère que les mécanismes de désagrégation prépondérants sont, dans ces conditions, l'humectation et la désagrégation par éclatement, du fait de la pression exercée sur l'air piégé. Le test de Hénin paraît donc approprié et on peut s'attendre à un effet protecteur des matières organiques du sol.

Etats de surface

La dégradation de l'état de surface est déjà amorcée au cours des cycles culturaux. La densité apparente (0-20 cm) atteint dès la première année de jachère des valeurs élevées dans certaines parcelles (Figure 2). Mais ce critère n'est peut-être pas pertinent pour des structures polyédriques à massives de l'horizon superficiel (Le Blic, 1994: 12-13; figure 4). Le problème n'est donc pas de savoir comment s'est formée une croûte superficielle, et à quelle vitesse, sinon, le stade de dégradation atteint, et comment celui-ci évolue dans le temps, au cours de la jachère, et contribue au ruissellement superficiel. La difficulté consiste à isoler le facteur durée de jachère de facteurs conjoncturels car dépendant de l'année, tels que la quantité et intensité des pluies, la durée de la saison pluvieuse, la colonisation par des graminées puis des composées arbustives.

On peut s'attendre, durant la jachère, à des effets contradictoires: d'une part, une diminution du microrelief superficiel, une évolution des proportions respectives des zones de ruissellement croustées et des zones d'infiltration, des dépôts de sables éoliens, d'autre part la création de porosité par l'action des fourmillères, la rupture de la croûte superficielle par le piétinement des ovins au pâturage, la microfissuration par le système racinaire dense des graminées annuelles puis la création de porosité verticale par les racines à pivot très profond des composées arbustives.

Les principales variables prises en compte, pour caractériser les états de surface, sur les parcelles en jachère, sont: l'âge de la jachère, la dernière culture en fin de succession, le type de travail du sol (disques ou araire), la position topographique, la pente, la texture, la matière organique, la garniture ionique et la salinité, la pierrosité, le micro-relief, le type de croûte superficielle, l'activité faunique, les indices d'érosion (vésicules indiquant une infiltrabilité restreinte, collerettes sur les pierres incrustées dans la croûte). La pierrosité superficielle est à prendre en compte; les éléments grossiers simplement posés sur le sol augmentent l'infiltrabilité alors que les éléments inclus dans une croûte interviennent plutôt en augmentant le ruissellement (De Ploey et Bryan, 1986).

RESULTATS ET DISCUSSION

Profil cultural

Afin de comparer des parcelles d'âge de jachère différent, en limitant autant que possible l'hétérogénéité des terrains et des sols, on a procédé par la méthode des couples. Des profils ont été creusés perpendiculairement à la frontière commune entre chaque couple de parcelles voisines, situées dans la même position topographique, et dont on sait qu'elles ont été travaillées avec le même outil (charrue à disques ou araire), mais de durée de jachère très différente (Figure 3). La comparaison des mêmes horizons, entre profils culturaux, ou au sein d'un même profil différencié (Figure 4) peut poser certains problèmes: profondeur différente des horizons, pierrosités variables, lecture d'une densité d'enracinement d'une végétation "naturelle" dont la répartition spatiale n'est pas "ordonnée" en surface, ni clairement différenciée par espèces au sein du profil. La situation de Tuntachavi permet de comparer les 15 premiers centimètres de sol entre des âges différents de jachère (Figure 4).

Il a été observé en sols limoneux sous jachère de quelques années des éléments structuraux fortement tassés à espace poral structural très faible à nul, assimilés à des mottes Delta (Manichon, 1982). Ces éléments hérités du labour précédent, réalisé au disque en conditions humides, restaient intacts dans le profil (Hervé, Condori, Brugioni, Fernandez, 1994). La teneur pondérale en mottes Delta peut être en effet un critère d'évolution des états internes, peu dépendant des fluctuations intra annuelles (Manichon, Roger-Estrade, 1990: 49), pour des textures suffisamment riches en limon. Par contre, le résultat du travail de l'araire, en général superficiel (10-15 cm), laisse peu de repères et la traction bovine ne crée pas de tassements.

On utilisera donc le profil cultural pour localiser des unités morphologiques sur lesquelles porteront des mesures de porosité, pénétrométrie ou densité apparente et pour vérifier l'homogénéité des horizons à comparer par des analyses chimiques.

Instabilité structurale

La détermination sur l'altiplano bolivien des indices d'instabilité structurale en fonction de l'âge de la jachère est en projet. Quels effets de la jachère peut-on attendre? L'histoire culturale et l'histoire hydrique des agrégats recueillis ont leur influence (Kemper, Rosenau, 1984). Parmi les propriétés du sol ayant une influence sur la stabilité structurale, la matière organique et la composition ionique (en particulier, les cations sodium et calcium) peuvent varier selon l'âge de la jachère. Monnier et Stengel (1982) indiquent que l'influence de la matière organique sur la stabilité structurale ne s'exerce qu'au delà d'un certain rapport: $\% \text{ matière organique} \times 100 = 7 \times \% \text{ argile}$, ce qui est le cas pour environ la moitié des parcelles échantillonnées.

Les textures dominantes, limono-sableuses, sont stables si l'on se réfère aux classes d'instabilité selon la composition granulométrique des sols (Monnier, Stengel, 1982). Mais, comme le signale Valentin (1986), les matériaux sableux présentent, du fait de leur faible cohésion, une forte instabilité sous l'impact des gouttes de pluie. Kemper et Noonan (1970), cités par Casenave et Valentin (1989), "observent les ruissellements les plus forts pour des sols encroutés contenant entre 50 et 80% de sable". Les sols étudiés sur l'altiplano bolivien ont des taux de sable compris entre 40 et 80%, avec des combinaisons variables de sables et limons (Figure 1).

États de surface

Une reconnaissance rapide des états de surface (Hervé, Valentin, 1994), suivant la méthode suivie par Casenave et Valentin (1989), a permis d'identifier trois grands types de croûte: structurales, grossières et d'érosion.

- Les croûtes structurales, après avoir incorporé dans leur masse de grosses mottes cohérentes, présentent au cours de la jachère plusieurs micro - horizons. Les croûtes structurales sableuses présentent en surface un micro - horizon constitué de sable grossier, recouvrant un micro - horizon de sable fin pris en masse, et une mince pellicule d'éléments plus fins (limon et argile). Des vésicules abondantes sont observées entre sable fin et pellicule. Les croûtes structurales limoneuses présentent un micro - horizon de limon grossier et parfois de sable très fin, piégé dans la microrugosité superficielle, qui recouvre en y adhérant une pellicule constituée de limon fin et d'argile. Des vésicules abondantes indiquent également une infiltrabilité restreinte. Des limons fins, blancs, en surface, sont le symptôme d'instabilité structurale.

- Les croûtes grossières rencontrées sont également sableuses ou limoneuses, très semblables aux croûtes à plusieurs micro - horizons. Les éléments grossiers insérés dans la croûte sont plus nombreux que ceux posés sur la surface. Prélevés de la surface, dans laquelle ils sont incrustés, ces cailloux ou pierres présentent des collerettes où apparaissent clairement les trois micro-horizons et les vésicules. Le ruissellement augmente avec la taille des éléments grossiers et la proportion d'éléments inclus dans la croûte.

- Les croûtes d'érosion sableuses correspondent à l'érosion par le vent et le décapage par ruissellement des deux micro - horizons de la croûte sableuse à plusieurs micro-horizons. Elles présentent également une porosité vésiculaire et se caractérisent par une quasi absence de micro-relief. Leur dureté empêchant la levée des semences, elles constituent des plaques dénudées de 2 à 5 mètres de diamètre. On peut distinguer parmi les croûtes limoneuses des croûtes de ruissellement et de dépôts, ce qui suppose un transport et des croûtes de décantation dues à une ségrégation sur place, qui se forment en lamelles convexes (présence d'argile et moins de 20% de limon).

Il apparaît que la texture, en particulier des combinaisons variables de sables et de limons, a un effet déterminant sur le type de croûte, même indépendamment des précipitations.

De l'état de surface dépend pour une grande part la possibilité d'implantation par graine des jeunes plants de composées. La modalité de semis (en lignes ou à la volée) et la nature de la dernière espèce cultivée de la rotation ainsi que les variations d'états de surface entre parcelles, même de texture

identique, expliqueraient le net effet "parcelle" sur la colonisation initiale des plants de *Baccharis incarum* (Figure 3). Entre les anciens billons et sous les composées se maintiennent des zones d'infiltration. Au début de la jachère, les billons servent d'impluviums; leur hauteur, surface et fragilité sont à prendre en compte. Il se forme des croûtes de dépôts dans les inter billons, fractionnées par la suite, par les racines de la végétation herbacée qui les colonise. La végétation naturelle, spontanée, tend à se concentrer dans ces interbillons lorsque ce modelé superficiel s'est maintenu, probablement du fait de la concentration du ruissellement et des graines. Dans ce cas, même si la couverture végétale est faible, inférieure à 30%, une disposition des billons perpendiculaire à la pente peut contribuer à diminuer significativement le ruissellement

CONCLUSION

A partir de cette analyse préliminaire de quelques méthodes disponibles, on ne peut que constater le manque d'outils adaptés au diagnostic au champ de l'évolution de la fertilité physique du sol sur des pas de temps longs. L'attention a été centrée jusqu'à présent sur la succession des opérations culturales et beaucoup moins sur la jachère. La même constatation s'applique autant pour les caractères physiques du sol que pour les processus biologiques (microbiologie, nématologie par exemple). Des études diachroniques sont sans doute nécessaires en milieu contrôlé, mais on ne peut recourir, in situ, qu'à des études synchroniques de situations très contrastées quant à leur histoire culturale. Une des difficultés est alors de séparer les propriétés permanentes et des propriétés conjoncturelles.

BIBLIOGRAPHIE

BLANCO SOTO, F., (1989) - Estudio de suelos. Levantamiento integrado de los recursos naturales. Ayo Ayo, provincia Aroma. CIPCA, La Paz.

BOIFFIN, J., GUERIF, G., STENGEL, P., (1990) - Les processus d'évolution de l'état structural du sol: quelques exemples d'études expérimentales récentes, in: La structure du sol et son évolution, Laon (France), Paris, INRA, Les Colloques de l' INRA, n° 53, 37-69.

BOIFFIN, J., MONNIER G., (1982) - Etats, propriétés et comportements des sols: recherche et utilisation des critères de fertilité physique. Bull. Tech. Info., n° 370-372, 401-407.

CASENAVE, A., VALENTIN, Ch., (1989) - Les états de surface de la zone sahélienne, influence de l'infiltration, Paris, ORSTOM, Col. Didactiques, 229 p.

COMBEAU, A., QUANTIN, P., (1962) - Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale.

DE PLOEY, J., BRYAN R.M., (1986) - Time to runoff as a function of slope angle. in: assessment of surface sealing and crusting, F. Callebaut, D. Gabriels, M. De Boodt eds., Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, 106-119.

FELLER, Ch., MILLEVILLE, P., (1977) - Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal Oriental), Cah. ORSTOM, sér. Biol., vol. XII, n°3, 199-211.

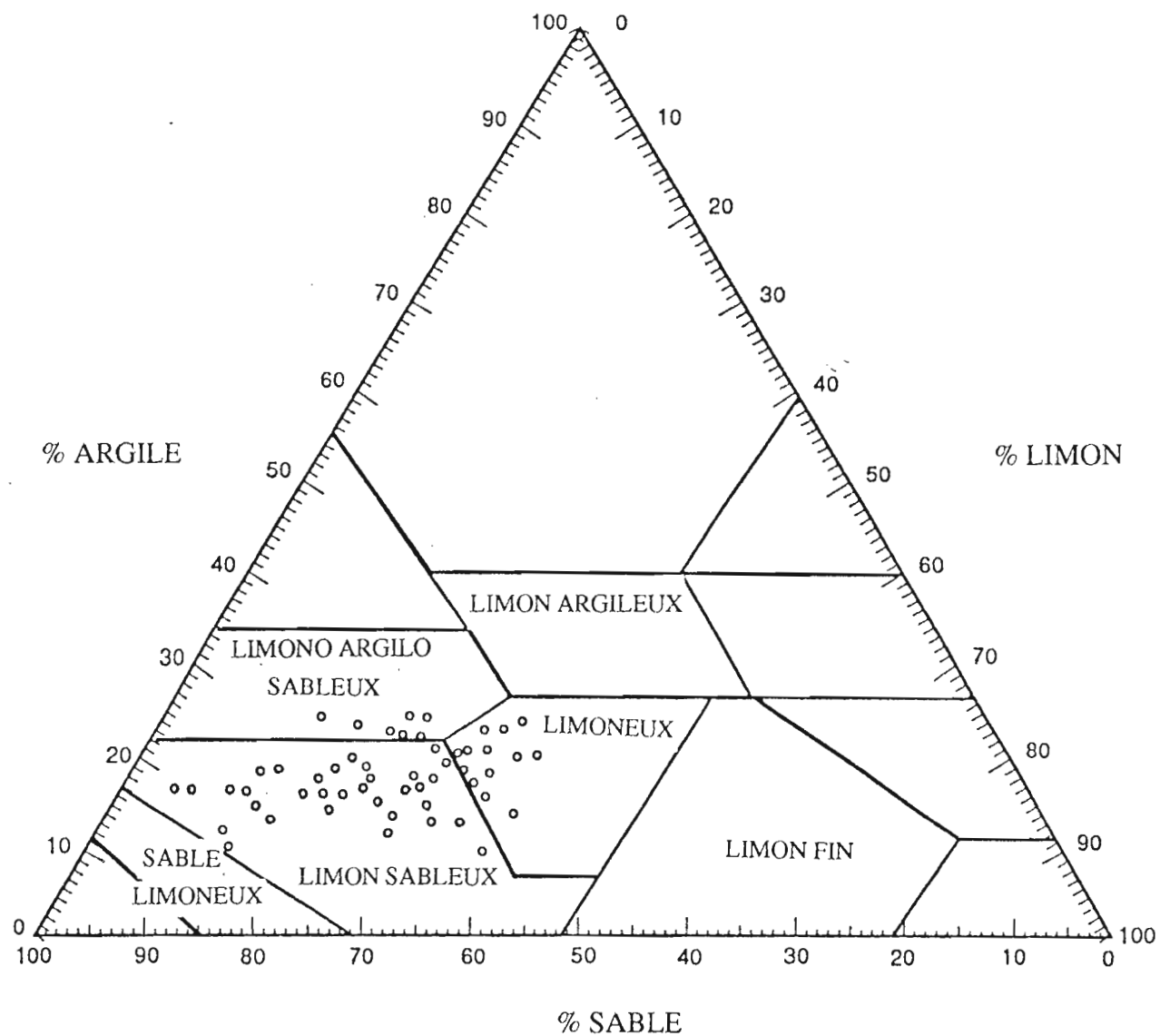
HENIN, S., (1976) - Cours de physique du sol. I texture - structure - aération. Bruxelles, ORSTOM-EDITEST, Initiations - Documentations Techniques n° 28, 159 p.

HERVE, D., (1993) - Evolution de la pratique de la jachère longue pâturée dans les Andes. in: La jachère en Afrique de l'Ouest, Ch. Floret et G. Serpantié eds., Atelier international de Montpellier, 2-5/12/1991, ORSTOM, Coll. Colloques et séminaires, 193-206.

HERVE, D., CONDORI, D., BRUGIONI, I., FERNANDEZ G., 1994.- Decisiones de labranza, consecuencias sobre el suelo y los cultivos. Problematica del altiplano boliviano. Cochabamba, Revista de Agricultura, Año 50, N° 24, 12-22.

- HERVE, D., VALENTIN, Ch., (1994) - Projet "Evolution des états de surface des sols sous jachère", La Paz, ORSTOM-IBTA, 9 p., multigr.
- KEMPER, W. D., NOONAN, L., (1970) - Runoff as affected by salt treatments and texture. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 126-130.
- KEMPER, W. D., ROSENAU, R.C., (1984) - Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Sci. Soc. of Amer. Journal*, 48, 1001-1006.
- LE BLIC, Ph., (1994) - L'organisation macrostructurale du sol: intérêt et limites d'une approche morphologique, méthode d'étude. in: 1ème réunion thématique structure et fertilité des sols tropicaux, 6/09/1993, Montpellier, ORSTOM, 5-17.
- MANICHON, H., (1982) - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Docteur Ingénieur, INAPG, Paris, 214 p. multigr., 154 réf. + annexes.
- MANICHON, H., ROGER-ESTRADE J., (1990) - Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture, in: *Les systèmes de culture*, L. Combe, D. Picard Coord., Paris, INRA, 27-55.
- MONNIER, G., (1985) - Recherches sur la stabilité structurale. Exemples d'applications. in: *Livre jubilaire du cinquantenaire*, A.F.E.S., Paris, 293-297.
- MONNIER, G., STENGEL, P., (1982) - La composition granulométrique des sols: un moyen de prévoir leur fertilité physique. *Bull. Tech. Info.*, n° 370-372, 503-512.
- MOREAU, R., (1983) - Evolution des sols sous différents modes de mise en culture en Côte-d'Ivoire forestière et préforestière. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XX, n°4, 311-325.
- MOREAU, R., (1984-1985) - Etude sur parcelles comparatives de l'évolution des sols ferrallitiques sous différents modes de mise en culture en zones forestière et pré-forestière de Côte d'Ivoire, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXI, n°1, 43-56.
- MOREAU, R., (1993) - Influence de la mise en culture et de la jachère forestière sur l'évolution des sols forestiers tropicaux. in: *La jachère en Afrique de l' Ouest*, Atelier international Montpellier, 2-5/12/91, Ch. Floret, G. Serpantié Present., Paris, ORSTOM, Coll. Colloques et séminaires, 245-256.
- ORSAG, V., (1989) - Características del regimen aereo de un aridosol del altiplano central de Bolivia, La Paz, Instituto de Ecología, UMSA, *Ecología en Bolivia* 13, 11-21.
- RIBSTEIN, P., (1992) - Aspectos hidrológicos de la cuenca de La Paz. Ciclo de conferencias "La Paz, limites y esperanzas en el altiplano boliviano", 12/08/1992, ORSTOM-IBTA, La Paz, Casa de la cultura.
- SEBILLOTTE, M., (1968) - Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture, *Ann. Agron.*, 19, 4, 403-414.
- STENGEL, P., (1979) - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation des sols in situ, *Ann. Agron.*, 30, 1, 27-51.
- STENGEL, P., (1990) - Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. in: *La structure du sol et son évolution*, Laon (France), Paris, INRA, Les Colloques de l' INRA, n° 53, 15-36.
- VALENTIN, C., (1986) - Surface crusting of arid sandy soils. in: *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Proc. of the Symposium held in Ghent, Belgium, 1985, F. Callebaut, D. Gabriels, M. de Boet eds., Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, 9-17, 40-47.

Figure 1 Texture des sols échantillonnés à Pumani en 1992



USA CONSERVATION SOIL SERVICE

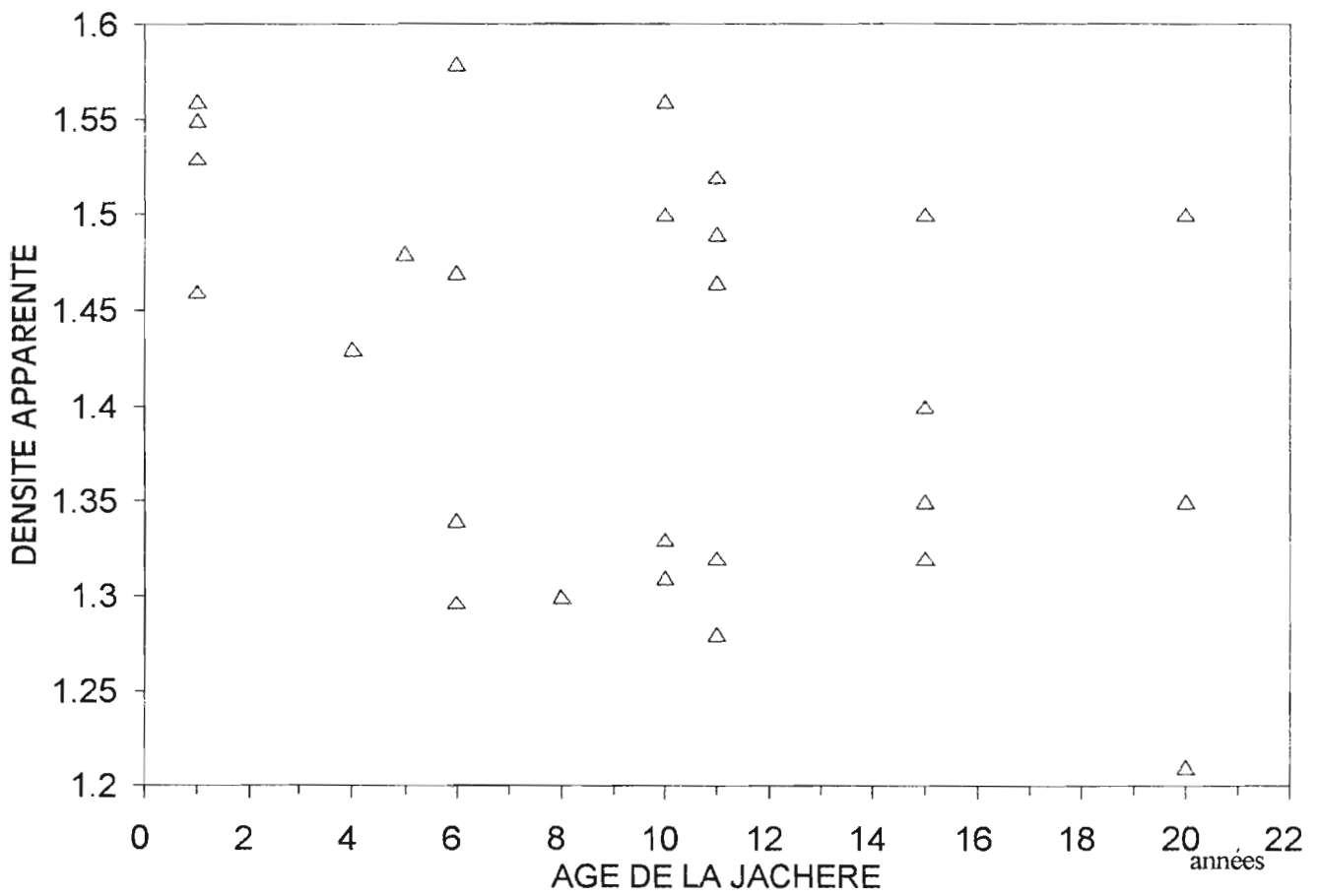
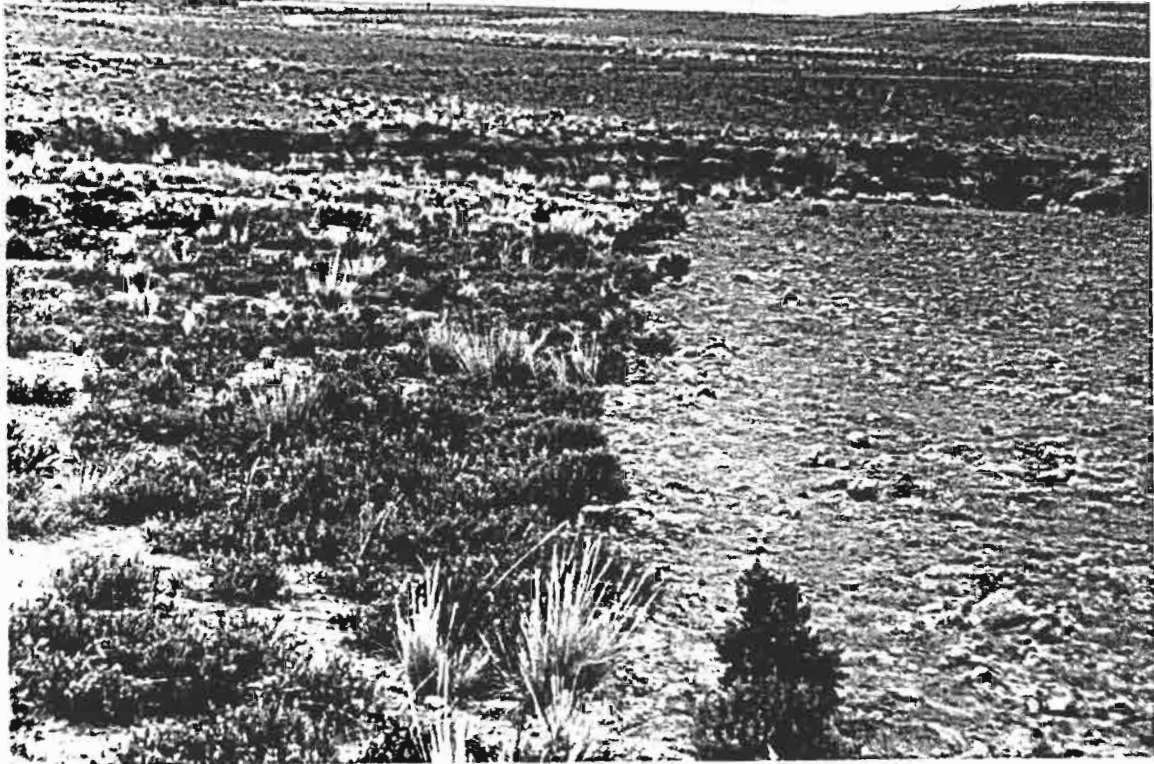


Figure 2 RELATION
DENSITE APPARENTE - AGE DE LA JACHERE

Figure 3. Parcelles en jachère

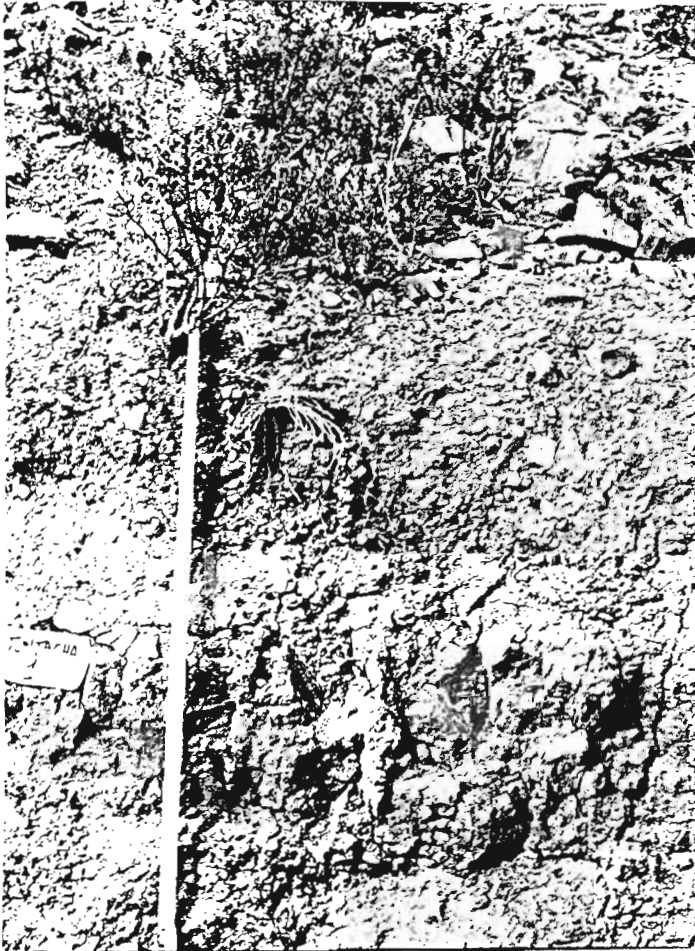
Couple de parcelles jointives d'âge de jachère différent: 15 ans / 0 (post récolte)



Peuplement de *Baccharis incarum* aligné suivant les anciens sillons



Figure 4. Profils. Tuntachavi (D. Hervé, R. Bosseno)



Haut de versant. 14 ans de jachère

0-15 cm. 10YR5/3 sec
Limono-sableux, 64% >2mm
dont 46% >10mm, structure
polyédrique arrondie, fine, friable,
bonne porosité tubulaire, racines.

15-20cm. 10YR 6.5/3 sec
Limono-sableux, blanc, massif,
36% >2mm dont 26% >10 mm,
très friable et poreux.

20-40cm. 7.5 YR 5/4 sec
Limoneux fin, 40% >2mm dont
35% >10mm, structure colonnaire
prismatique, avec nombreuses
fentes de retrait dans les prismes,
fissures colonisées par les racines,
bonne porosité.

40-60cm. 7.5 YR 5/4 sec
Limono-sableux, 95% >2mm dont
42% >10mm, ciment argileux
entre les graviers ronds, sables
gros, structure polyédrique
anguleuse, racines dans les
microfissures.



Versant: à gauche, 14 ans de jachère,
Baccharis incarum
à droite, 6 ans de jachère,
Bouteloua simplex

0-20 cm. 10YR 5/3 sec
Limono-sableux, 60 à 70%
>2mm, structure polyédrique
arrondie, fine et friable, bonne
porosité tubulaire, racines.

20-50 cm. 7.5 YR 4/4 sec
Limoneux, 65% >2mm dont
53% >10 mm (grès, quartzites,
quartz blanc), structure
polyédrique angulaire, peu friable,
assez poreux.

Le pénétromètre Yamanaka et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés

MOREAU R. et NAGUMO F.

INTRODUCTION

Les descriptions de sol réalisées au Japon comprennent de façon systématique, pour chaque horizon décrit, une indication chiffrée de « dureté », accompagnant les données classiques telles que couleur, texture, structure... Ce type de donnée est obtenu avec un pénétromètre de poche normalisé dont l'emploi sur le terrain est généralisé.

Le pénétromètre *Yamanaka* (du nom de son créateur) est utilisé depuis plusieurs dizaines d'années au Japon, où de nombreuses données ont été obtenues dans des situations variées. D'importants travaux d'analyse et de synthèse ont été réalisés, montrant l'intérêt des mesures pénétrométriques dans les études à finalités agronomiques, en particulier pour l'évaluation des possibilités de développement racinaire. Plus récemment, le pénétromètre *Yamanaka* a été aussi utilisé dans diverses études réalisées en zone tropicale, dans le cadre de la coopération japonaise.

On se propose ici de donner quelques indications sur l'appareil et ses applications. Il ne faut pas y voir une analyse exhaustive des données disponibles tant la richesse de l'expérience japonaise en la matière est grande, mais simplement des éléments d'information pouvant être utiles à tous ceux qui s'intéressent à la physique du sol et à ses rapports avec la fertilité et plus particulièrement aux mesures pénétrométriques.

ASPECT HISTORIQUE

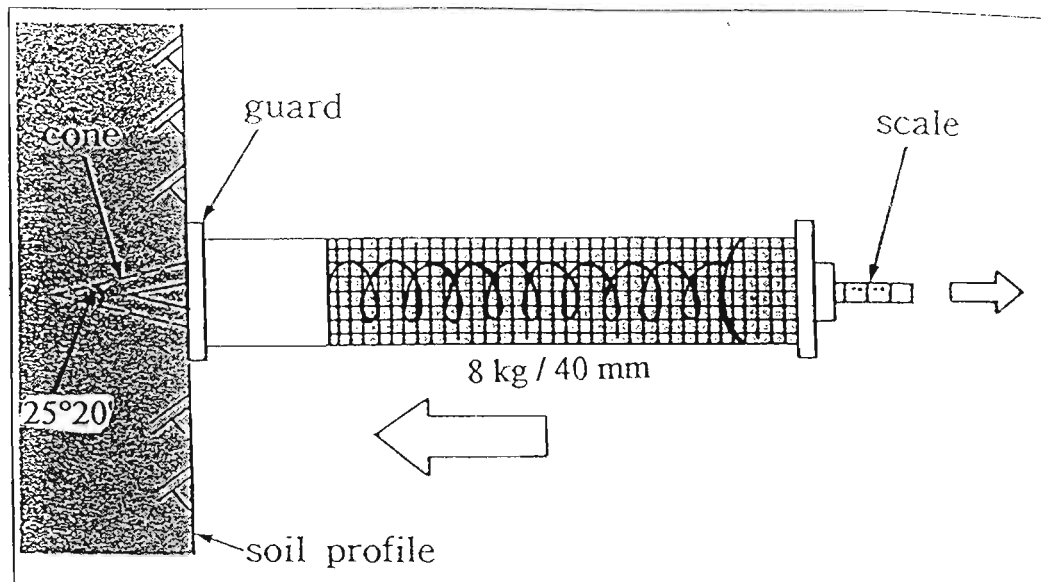
Le pénétromètre *Yamanaka* a été présenté pour la première fois dans une revue scientifique en 1962 (YAMANAKA K. et MATUO K.). Les auteurs souhaitaient avoir un outil permettant d'obtenir de façon aisée et précise une évaluation chiffrée de la dureté (ou compacité) des horizons de sol pour faciliter l'analyse des relations entre ce paramètre et la pénétration des racines. Il s'agissait d'obtenir une évaluation quantitative de la dureté du sol considérée comme un des facteurs limitant de l'enracinement des plantes cultivées.

Peu de temps après son développement, le pénétromètre *Yamanaka* a été utilisé dans le cadre d'un vaste programme de recherche de base portant sur la productivité des terres et de ses facteurs ; ce programme s'est développé dans l'ensemble du Japon au cours des années soixante. Un nombre considérable de données ont été recueillies et analysées, et cela a certainement contribué à la diffusion de l'appareil et à sa normalisation. De nos jours, la mesure pénétrométrique *Yamanaka* est considérée comme une donnée indispensable dans toute l'étude de profil de sol au Japon.

PRINCIPE ET UTILISATION DU PENETROMETRE

Les caractéristiques principales du pénétromètre à cône *Yamanaka* sont indiquées à la figure 1. Le ressort se comprime plus ou moins en fonction de la résistance du sol à la pénétration du cône, lorsque celui-ci est appliqué de façon à assurer un contact étroit entre la garde de l'appareil et la surface du profil où s'effectue la mesure. La somme de la longueur de pénétration du cône et de la longueur de compression du ressort reste toujours égale à 40 mm ; si le cône ne pénètre dans le sol que de 1 mm, la longueur de compression du ressort sera de 39 mm. On peut toujours effectuer une mesure, même si le sol est très dur.

Figure 1 - Schéma et caractéristiques du pénétromètre *Yamanaka*



Dimensions : L 220 mm x Ø 40 mm

Weight : 250 g

Measuring range : 0 \approx 500 kg/cm²

La lecture de la longueur de compression du ressort en millimètres, se fait au moyen d'une réglette coulissante placée à l'extrémité opposée au cône (cas de la fig. 1) ou bien d'un curseur situé sur un côté de l'appareil, selon les modèles proposés par différents fabricants. La dureté du sol est évaluée par un indice correspondant soit à la longueur de compression lue sur l'appareil (X en mm), soit à la résistance à la pénétration (P en kg/cm²). La conversion des valeurs de X en P s'établit d'après la formule : $P = 100 X / 0,7952 (40 - X)^2$. Dans la pratique, une abaque permet de faire rapidement cette conversion. Au Japon, c'est la forme d'expression en fonction de X (mm) qui est la plus couramment utilisée.

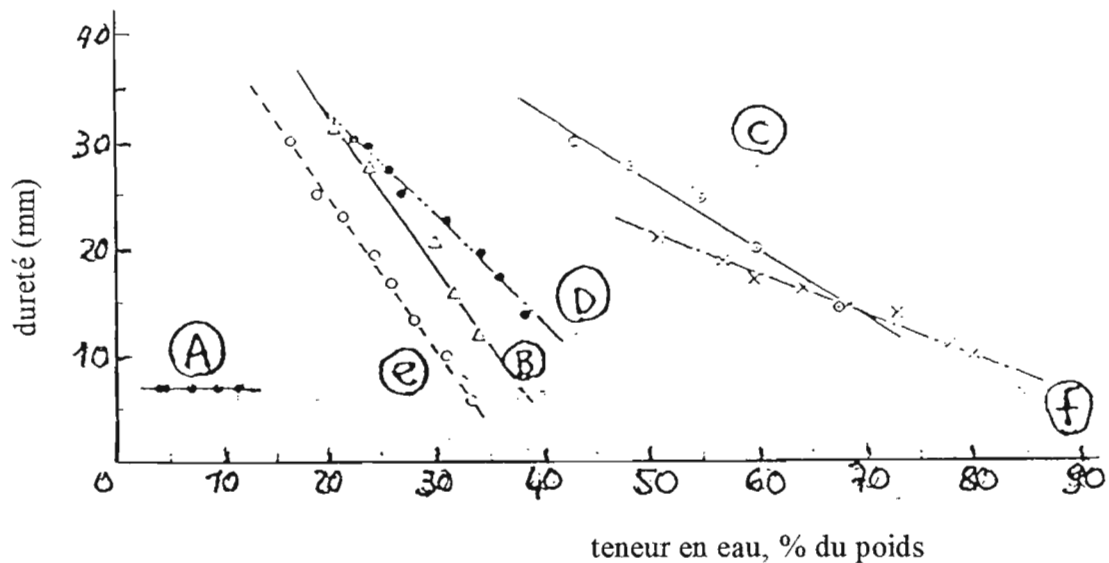
En fait, la dureté du sol mesurée par l'instrument correspond à une résistance à la compaction. C'est le travail nécessaire pour rendre plus compact un sol donné. Cela traduit ainsi la relation entre la dureté du sol et sa compaction.

S'il n'y a pas de loi bien établie contrôlant la dureté du sol, il est généralement admis que la force impliquée dans la résistance à la pénétration est liée à la friction et à la cohésion. On sait que cette résistance dépend de différents facteurs tels que la texture, la structure, la densité apparente, l'état hydrique. L'interprétation des données pénétrométriques ne peut se faire sans tenir compte de ces variables qui peuvent être très différentes d'une situation à

l'autre ; pour un même type d'horizon, l'état hydrique en particulier peut varier dans des proportions importantes en entraînant de forte variation des mesures pénétrométriques (fig. 2).

Figure 2 - Relation entre la teneur en eau et les données du pénétromètre *Yamanaka* (mm), pour différents horizons de sols

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| A : Sable alluvial | D : horizon sup. argilo-limoneux |
| B : Alluvions limono-argileuses | E : horizon prof. argilo-limoneux |
| C : Limon | F : horizon sup. limono-argileux |



Il faut préciser qu'en mettant son appareil au point, YAMANAKA s'efforçait d'évaluer l'influence du degré de compacité des horizons situés au-dessous de l'horizon de travail, sur le développement des racines en profondeur, dans les sols cultivés. Par ailleurs, sous les climats humides du Japon, l'état hydrique de ces horizons ne varie que dans des limites assez étroites. YAMANAKA indiquait lui-même que l'on pouvait considérer que leur humidité se maintient au voisinage de la capacité au champ tout au long de l'année.

D'un point de vue pratique, il est recommandé de réaliser les mesures sur le terrain lorsque les conditions d'humidité sont favorables à un développement actif des végétaux, si possible au plus près de la capacité au champ. Pour des études répétées sur les mêmes types de sol, à l'échelle régionale, il est souhaitable de disposer de courbes liant les valeurs d'humidité ou de pF aux valeurs de pénétrométrie, pour les principales catégories texturales et les principaux types d'horizon. Ces courbes peuvent être établies à partir de mesures réalisées sur le terrain ou au laboratoire (sur des échantillons non perturbés placés à différents états d'humidité). Elles sont nécessaires pour comparer et interpréter les données pénétrométriques obtenues dans des conditions d'humidité différentes du sol. Les études réalisées dans des conditions d'humidité contrôlée se réfèrent généralement à des valeurs d'humidité équivalent à pF 3.

RELATION ENTRE DONNEES PENETROMETRIQUES ET ENRACINEMENT

De nombreuses études ont été conduites sur les relations entre la résistance à la pénétration du sol et l'enracinement des plantes cultivées, soit par l'analyse statistique de données de terrain ou par approche expérimentale sur des sols diversement compactés, en utilisant le pénétromètre *Yamanaka*.

Ces études associent généralement l'analyse de plusieurs facteurs physiques de l'enracinement, selon une démarche intégratrice se rapportant au concept de : « Non-limiting Water Range : NDLWR » (LETEY, 1985). Outre la densité apparente et l'humidité du sol, les chercheurs japonais accordent aussi une grande importance à la proportion respective des 3 phases solide, liquide et gazeuse qui est déterminée de façon très courante, au moyen d'un appareillage spécifique utilisant des échantillons non perturbés prélevés en cylindre.

Il faut citer, parmi les études les plus importantes, celles de MIYOSHI (1972) qui définit les conditions favorables au développement racinaire dans les sols exondés, à partir des données obtenues dans le cadre du programme général sur la productivité des terres du Japon, précédemment indiqué.

L'analyse des relations entre les données physiques et la distribution des racines dans les profils de sol a conduit à identifier des valeurs critiques définissant des états favorables ou non pour le développement des racines. Ces valeurs sont apparues comparables à celles obtenues en expérimentation, avec des sols remaniés en conditions contrôlées (différents degrés de compaction). Par exemple, les valeurs seuils qui sont admises pour un enracinement sans contraintes importantes sont les suivantes :

- dureté (mesure <i>Yamanaka</i>)	< 22-23 mm (10 kg/cm ²)
- phase solide (pour les sols non volcaniques)	< 52-53 % (sableux) < 53-55 % (limoneux) < 54-57 % (argileux)
- phase liquide	> 18-23 %
- phase gazeuse	> 13-17 %.

Dans des conditions défavorables pour le développement racinaire, les valeurs élevées de la phase solide et la dureté du sol sont généralement associées à une forte compacité ; les valeurs seuils observées marquent une diminution importante de la porosité. Toutefois, dans le cas de sols volcaniques, il n'apparaît pas de valeur critique nette pour la phase solide, en raison des propriétés particulières de ces sols où il peut exister en profondeur des horizons résistant à la pénétration sans que la phase solide y soit très élevée.

En ce qui concerne l'appréciation des conditions de développement des racines, la dureté du sol (ou la résistance à la pénétration) semble être d'une portée plus générale que la porosité, lorsqu'on considère différents types de sols, volcaniques ou non.

Tableau 1 - Relation entre la dureté du sol (pénétrömètre *Yamanaka*, en mm) et l'enracinement (en % du développement optimal, pour différentes espèces cultivées sur sols exondés)

Dureté (mm)	12, 13	14, 15	16, 17	18, 19	20, 21	22, 23	24, 25	26, 27	28, 29	Cultures
Sableux	100	100	90	82	82	32	5	2	0	Blé
	100	88	96	82	80	63	12	8	8	riz pluvial
	82	100	82	76	79	68	70	18	0	patate douce
	80	86	92	78	60	28	16	0	0	arachide
	90	88	87	72	82	38	16	16	16	tomate
	100	100	100	100	92	66	8	0	0	aubergine
	100	100	100	100	86	86	30	8	2	citrouille
	100	82	93	74	85	19	12	0	0	poivre vert
	100	100	83	87	73	38	8	0	2	poire
	78	88	60	54	92	40	0	6	3	raisin
	100	84	76	82	86	41	19	0	0	concombre
	100	81	73	93	93	43	12	0	0	pastèque
80	80	83	92	76	68	22	16	3	graminée fourragère	
limoneux	91	91	92	92	80	29	22	0	0	Blé
	100	93	80	95	59	59	17	10	4	patate douce
	80	92	79	72	72	80	48	8	0	arachide
	100	92	80	73	73	80	38	18	0	aubergine
	84	94	94	86	82	76	12	16	0	laitue
	100	100	100	100	67	7	18	8	4	taro
	100	100	80	60	58	56	18	8	2	graminée fourragère
Argileux	100	79	76	72	59	36	13	13	6	Fraise
	100	100	92	-	-	-	-	-	-	féverole
	86	86	86	86	80	30	19	8	4	concombre
	100	82	86	62	62	6	0	0	0	laitue
	100	85	80	57	63	39	0	0	0	orange
	100	100	92	88	76	80	36	10	2	trèfle
Cendres volcaniques	100	100	82	90	86	40	12	6	6	Blé
	100	100	100	82	83	82	10	0	0	patate douce
	100	100	96	96	94	48	0	0	0	arachide

Il existe des tableaux synthétiques des correspondances entre les valeurs de dureté du sol et l'importance du développement racinaire pour différents types de cultures et de situations considérées. Ces tableaux sont à l'origine des critères d'évaluation de la dureté du sol qui sont utilisés dans la pratique.

Le tableau 1 donne un exemple de valeurs obtenues pour différentes espèces cultivées sur sols exondés. Malgré des différences assez sensibles entre les cultures, le tableau met bien en évidence la diminution d'enracinement avec l'augmentation de la dureté du sol et, pour cette dernière, des valeurs critiques bien regroupées. Il est en effet remarquable de constater la position charnière de la colonne 22-23 mm (pénétrömètre *Yamanaka*), qui marque une diminution nette de l'enracinement pour beaucoup d'espèce, et la colonne 24-25 mm où la faiblesse de l'enracinement se manifeste pour la quasi-totalité des espèces cultivées.

Dans la pratique, on considère que les valeurs de mesures pénétrométriques *Yamanaka* doivent rester inférieures à 22 mm, pour avoir des conditions de développement racinaire favorables (valeurs obtenues sur des horizons au voisinage de la capacité au champ). En général, le développement des racines se réduit très rapidement lorsque les valeurs atteignent et

dépassent 24-25 mm. Dans le cas des plantes à tubercule, la qualité de la production diminue à partir de 22-23 mm et il est souhaitable d'avoir des valeurs inférieures à 18 mm.

Pour les sols de rizière inondée, on considère souhaitable d'avoir des valeurs inférieures à 24 mm dans l'horizon travaillé. Dans l'horizon sous-jacent, on se réfère à deux valeurs limites : une limite supérieure de 24 mm, au-dessus de laquelle l'élongation des racines de riz est fortement réduite, et une limite inférieure de 14 mm au dessous de laquelle l'eau n'est pas suffisamment retenue dans la partie supérieure du sol et où la portance devient insuffisante pour l'utilisation des machines en culture mécanisée.

Dans une étude réalisée sur cinq sites de sols ferrallitiques désaturés des Cerrados (latosols) au Brésil, KUBOTA et al. (1983) attribuent la limitation du développement des racines de soja, en profondeur, à la compacité de l'horizon situé sous l'horizon de travail, plutôt qu'à des caractères chimiques défavorables de cet horizon (acidité, toxicité aluminique). Cet horizon compact se distingue par des valeurs élevées de résistance à la pénétration, mesurées au champ (en saison humide) et au laboratoire (pF 3), toujours supérieures à 25 mm (variations de 15 à 25 kg/cm²). Ces valeurs sont associées à une forte réduction de la porosité, en particulier des pores supérieurs à 100 µm de même qu'à la diminution du coefficient de diffusion gazeuse. Ce coefficient de diffusion gazeuse qui évalue les conditions de circulation des gaz et en particulier du renouvellement de l'oxygène dans le sol se rapporte à un facteur physique ayant une action directe sur le développement des racines (LETEY, 1985). C'est aussi un paramètre fréquemment pris en considération pour l'analyse des relations sol-enracinement, avec les autres paramètres physiques tels que la résistance à la pénétration, à laquelle il apparaît également lié (MATSUMOTO et al., 1992).

EN CONCLUSION

Le pénétromètre *Yamanaka* est utilisé de façon très courante par les agronomes et pédologues japonais, pour évaluer et comparer la dureté (compacité) des horizons du sol. La conception et la validation de ce type de pénétrométrie se sont référées à un domaine de préoccupations bien défini : l'évaluation de la dureté (compacité) des horizons de sol et de ses effets vis-à-vis du développement des racines.

Le pénétromètre *Yamanaka* est utilisé comme un outil de diagnostic dans les études de caractérisation des sols et de leurs aptitudes, mais aussi dans les études d'évolution des sols en fonction des traitements culturels, ou encore dans des expérimentations sur modèle destinés à analyser la capacité de pénétration des racines de différentes espèces végétales dans des horizons plus ou moins compactés.

On peut s'étonner d'obtenir des valeurs seuils assez comparables pour différentes cultures et situations (22-23 mm). Cela n'est probablement pas dû au hasard ; l'existence d'un régime hydrique peu contrasté, sous les conditions de climat humide du Japon, ayant certainement par ailleurs facilité la mise en évidence d'une telle convergence de résultats.

Les données pénétrométriques apparaissent liées à différents paramètres physiques du sol, en particulier à la porosité, à l'état hydrique, au coefficient de diffusion gazeuse. La pénétrométrie peut refléter les qualités de ces paramètres, en particulier à l'égard de l'enracinement, tout en étant bien plus facilement et rapidement mesurable que chacun d'eux.

Il reste qu'en pratique, on doit forcément tenir compte de l'influence de l'humidité du sol pour interpréter les données pénétrométriques en rapport avec l'état structural et la mécanique du sol ; l'idéal étant de se reporter à un état d'humidité comparable (dans une

gamme d'humidité compatible avec le développement des plantes, si possible au voisinage de la capacité au champ).

Nonobstant ce problème d'influence de l'état d'humidité du sol, le pénétromètre *Yamanaka* peut être utilisé avec profit pour l'analyse du profil structural, où l'appréciation de la cohésion (ou compacité) du sol par enfoncement d'une lame à la main reste une donnée entachée d'un fort coefficient personnel. La pénétrométrie peut y être un élément de diagnostic très utile pour différencier et caractériser les volumes morphologiquement homogènes du profil cultural et faciliter la comparaison des résultats obtenus dans différents profils d'un même site ou de sites différents (s'il est tenu compte de l'état d'humidité).

Au niveau des volumes morphologiquement homogènes, elle peut aussi être très utile pour étudier l'influence de facteurs physiques sur l'enracinement. La recherche des relations avec des caractères fondamentaux de l'état structural : microstructure, système poral, et certaines fonctions du sol : disponibilité de l'eau et de l'oxygène, devrait y faire l'objet d'études approfondies.

BIBLIOGRAPHIE

YAMANAKA K. et MATUO K., 1962 - A study on soil hardness (first report). Relationship between soil hardness and water content. *Jpn. J. Soil. Sci. Plant Nutr.*, Vol. 33, n° 7, pp. 343-347.

MIYOSHI H., 1972 - Effective layer for upland field from a view point of suitable soil condition for root development. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, Vol. 43, n° 3, pp. 92-97.

KUBOTA T., BRANCO J.L. C., IKE M., 1983 - Prevention of root development of soybean by compacted layer of oxisol in the Serado. *Journal of Japan soil and plant nutrition*. Vol. 54, n° 5, pp. 389-395.

LETEY J., 1985 - Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, pp. 277-294.

MATSUMOTO J., KUBOTA T., KATOU H., OSAZAWA S., ARIHARA J. et AE N., 1992 - Penetration of Pigeon Pea Roots into compacted soils. *Soil Phys. Cond. Plant. Growth*, Jpn, 64, pp. 3-9.

EVALUATION DE LA COMPACTITE DES SOLS FERRALLITIQUES FERRITIQUES DE NOUVELLE-CALÉDONIE - RELATION AVEC L'ENRACINEMENT.

BOURDON Emmanuel, BECQUER Thierry et EDIGHOFFER Sylvie

ORSTOM, Laboratoire d'Agropédologie,
B.P. A5 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie.

RESUME

Les sols ferrallitiques ferritiques (Ferrallisol) de Nouvelle-Calédonie, développés sur les roches ultramafiques, sont connus pour leur très faible fertilité chimique et pour les problèmes que ceci pose lors de leur mise en valeur agricole. Toutefois, les diverses études cartographiques menées sur ces sols ont montré l'existence d'horizons relativement compacts pouvant gêner la pénétration racinaire. Nous avons donc entrepris une étude visant à analyser les relations entre la compacité, estimée de deux façons, d'une part par la mesure de la porosité et d'autre part par des mesures pénétrométriques, et l'enracinement. Ce travail a été réalisé sur une toposéquence sous végétation naturelle comprenant trois des principaux faciès de sols utilisables pour l'agriculture, les sols de piedmonts, les sols de glacis colluvio-alluvial et les sols de terrasse alluviale. Les résultats obtenus semblent montrer une bonne concordance des deux méthodes de mesure de la compacité du sol. Un seuil pénétrométrique, de 6,29 kg / cm² (ou 20 mm), semble indiquer la limite à partir de laquelle les racines de la végétation naturelle ne peuvent plus pénétrer dans le sol. Les horizons concernés sont les horizons de profondeur (au-delà de 20 cm) sur piedmont. Les horizons de glacis et de terrasse alluviale sont situés en dessous de cette limite. Il n'a pas été possible de dégager une relation précise entre les données pénétrométriques et la texture du sol bien que les valeurs les plus fortes correspondent à des horizons dont la teneur en limons est toujours située au-delà de 50 %. Ces résultats ne nous permettent cependant pas, pour le moment, de savoir si la compacité est, en soit, un facteur limitant de l'enracinement ou si la fertilité chimique, extrêmement réduite de ces horizons, empêche toute possibilité de colonisation racinaire et donc toute amélioration de la fertilité physique.

Mots-clefs : Sols ferrallitiques ; Nouvelle-Calédonie ; compacité ; pénétrométrie ; enracinement.

INTRODUCTION

Un développement de l'agriculture sur les sols ferrallitiques ferritiques (Ferrallisols) du Sud de la Nouvelle-Calédonie est souhaité par la Province. Outre les limites chimiques à la fertilité de ces sols, nous nous sommes intéressés aux contraintes physiques pouvant intervenir. Une caractérisation physique de différents profils disposés le long d'une toposéquence représentative de ces sols a donc été entreprise. D'une part, nous avons réalisé des observations sur la morphologie des profils de sol et l'enracinement des plantes en milieu naturel. D'autre part, ces observations ont été complétées par des mesures pénétrométriques, de densité et d'humidité et par des

analyses de granulométrie. Cette étude a pour objectif i) d'analyser l'incidence de la compacité du sol sur l'enracinement et ii) d'étudier la pertinence du pénétromètre à cône (type Yamanaka) comme outil de caractérisation de cette compacité.

PRESENTATION DU MILIEU

Le paysage et le modelé

La cartographie des sols de deux zones de référence au 1/25 000^{ème} (BOURDON et BECQUER, 1992a, 1992b, 1993) a permis de mettre en évidence deux grandes unités morpho-pédologiques dérivées de substrats ultrabasiques : celle de montagne (montagne *sensu stricto*, piedmonts, glacis) et celle de plaine basse (terrasses alluviales récentes). Hormis les zones de montagne (*sensu stricto*), ces différents faciès de sol sont susceptibles d'être cultivés.

La toposéquence étudiée (fig. 1) se compose en amont d'un piedmont, en aval d'une terrasse alluviale et d'une zone de transition constituée par un glacis alluvio-colluvial. Le piedmont est soumis à des processus de rajeunissement (décapage) alors que les matériaux s'accumulent en bas de pente. Par ailleurs, ces derniers peuvent être soumis à un battement de nappe temporaire à semi-permanente.

Les sols

Les sols de ces faciès (fig 1) sont des sols ferrallitiques ferritiques (C.P.C.S, 1967) ou ferrallicol (R.P.F, 1990). Dans les conditions de l'étude, les sols sont meubles avec :

- sur le piedmont, des sols fortement désaturés riches en gravillons ferrugineux,
- sur le glacis, des sols peu évolués, non climatiques, d'apport colluvio-alluvial riches en gravillons ferrugineux,
- sur la terrasse, des sols peu évolués, non climatiques, d'apport alluvial.

Ces sols présentent des capacités d'échanges cationiques limitées aux horizons organiques. La somme de leurs bases échangeables (calcium, magnésium, potassium, sodium) reste faible à nulle. Leur pH est généralement acide. Leur minéralogie - constituée d'oxydes et d'hydroxydes de fer associés à des métaux lourds - se caractérise par l'absence d'argile de néoformation.

METHODES

La méthode de cartographie des différentes unités morpho-pédologiques est celle décrite par BOULET *et al.* (1982). Les descriptions morphologiques ont été faites en se référant aux travaux de DE BLIC (1976). A l'échelle du profil, ces descriptions définissent les composantes de chaque volume¹ que sont les assemblages des agrégats, la répartition des racines et l'agencement des vides.

Les déterminations physiques complètent ces descriptions morphologiques. La porosité totale (Pt) est calculée d'après la relation $Pt = 1 - Da / Dr$ avec, Da la densité

¹ En condition naturelle les volumes correspondent souvent à l'horizon pédologique. Par contre, sous culture, plusieurs volumes peuvent coexister dans les horizons travaillés.

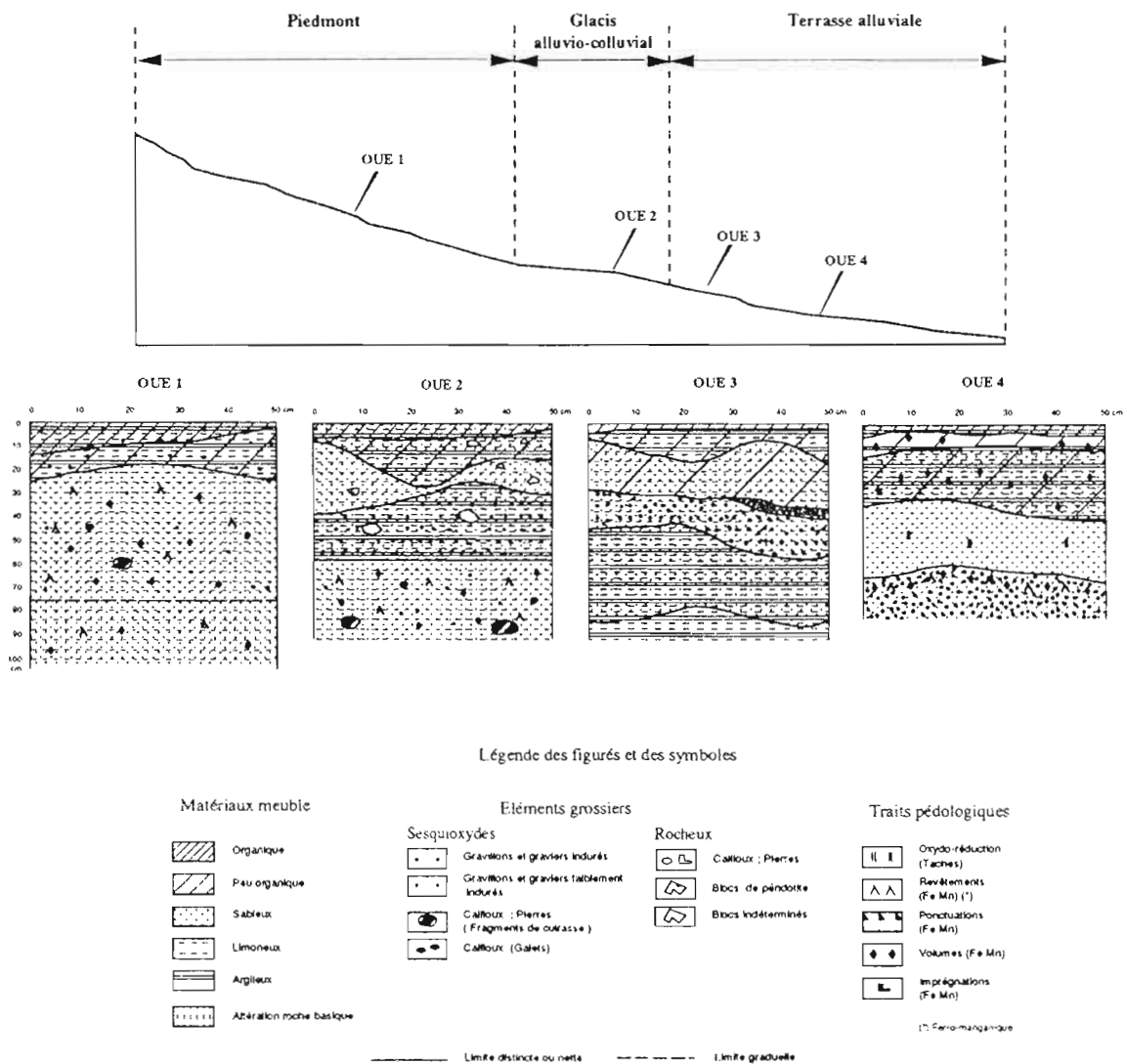


Figure 1 : Localisation des différents faciès de sol dans la toposéquence et description morphologique des profils pédologiques.

apparente mesurée au cylindre et D_r la densité réelle. La micro, méso et macro-porosité (HUMBEL, 1974) sont obtenues à partir des mesures des pF 4.2 et 2.5, ramenés à la densité apparente. La compaction, mesurée par un pénétromètre de poche à aiguille conique de type Yamanaka, s'effectue selon un carroyage (par maille 10 cm) sur l'ensemble du profil.

Le comptage racinaire (nombre, diamètre) est fait sur un carré de 10 cm de côté, avec cinq répétitions par horizon. La répartition, exprimée en pourcentage, est calculée à partir du nombre total de racines présentes dans le sol.

RELATIONS ENTRE LA STRUCTURE, LA POROSITE ET L'ENRACINEMENT

Morphologie des sols et enracinement

De l'observation des profils sur la toposéquence se dégage quatre types d'assemblages structuraux et deux types d'arrangements poraux qui s'organisent de la façon suivante :

- **sur piedmont (OUE1)**, dans l' horizon de surface (0-10 cm), l'agencement des éléments de deux types de structures, particulaire et grumeleuse, définit des vides d'entassement entre les agrégats et/ou les particules. Cet assemblage a une très faible cohérence. Dans les horizons de profondeur (à partir de 15 cm) l'emboîtement d'une structure fine à polyèdres réguliers aboutit à une sur-structure massive présentant une très forte cohérence qui ne permet pas l'individualisation de vides d'entassement et/ou d'arrangement. Cependant ces derniers peuvent être observés lors de phases de forte dessiccation. Par ailleurs, la porosité est tubulaire et intra-agrégats.

Le comportement des racines suit l'organisation structurale de ces horizons. En effet, seul l'horizon de surface est colonisé par un lacs racinaire qui pénètre peu (jusqu'à 20 cm) dans les horizons de profondeur.

- **sur glacis et plaine (OUE 2 à OUE 4)**, dans les horizons de surface (0 à 25 cm), deux types de structures se juxtaposent : des polyèdres fins à moyens à arêtes vives et de formes irrégulières et des agrégats grumeleux. L'agencement de ces deux structures définit des vides d'entassement mais également d'arrangement. Une porosité tubulaire fine, intra-agrégats, est associée à la structure polyédrique. Dans les horizons de profondeur (au-delà de 25 cm et jusqu'à 60 cm) la structure est massive. Les types de vides sont étroitement liés à la nature des matériaux d'apport. Dans le premier cas les apports, à texture plutôt sableuse, se caractérisent par des vides d'entassement. Dans le second cas une porosité tubulaire, fine à moyenne, se développe dans des matériaux à texture plutôt limoneuse. La cohérence de ces matériaux est très faible pour le premier et faible à assez forte pour le second.

Dans les horizons de surface, les racines se développent entre et dans les éléments structuraux. Elles pénètrent assez fortement les horizons sous-jacents et participent à la structuration. Il faut également noter que sur ces zones de bas de pente l'activité faunistique du sol n'est pas négligeable et intervient de façon prépondérante sur l'agrégation. La limite de la pénétration racinaire se situe vers 40 - 60 cm.

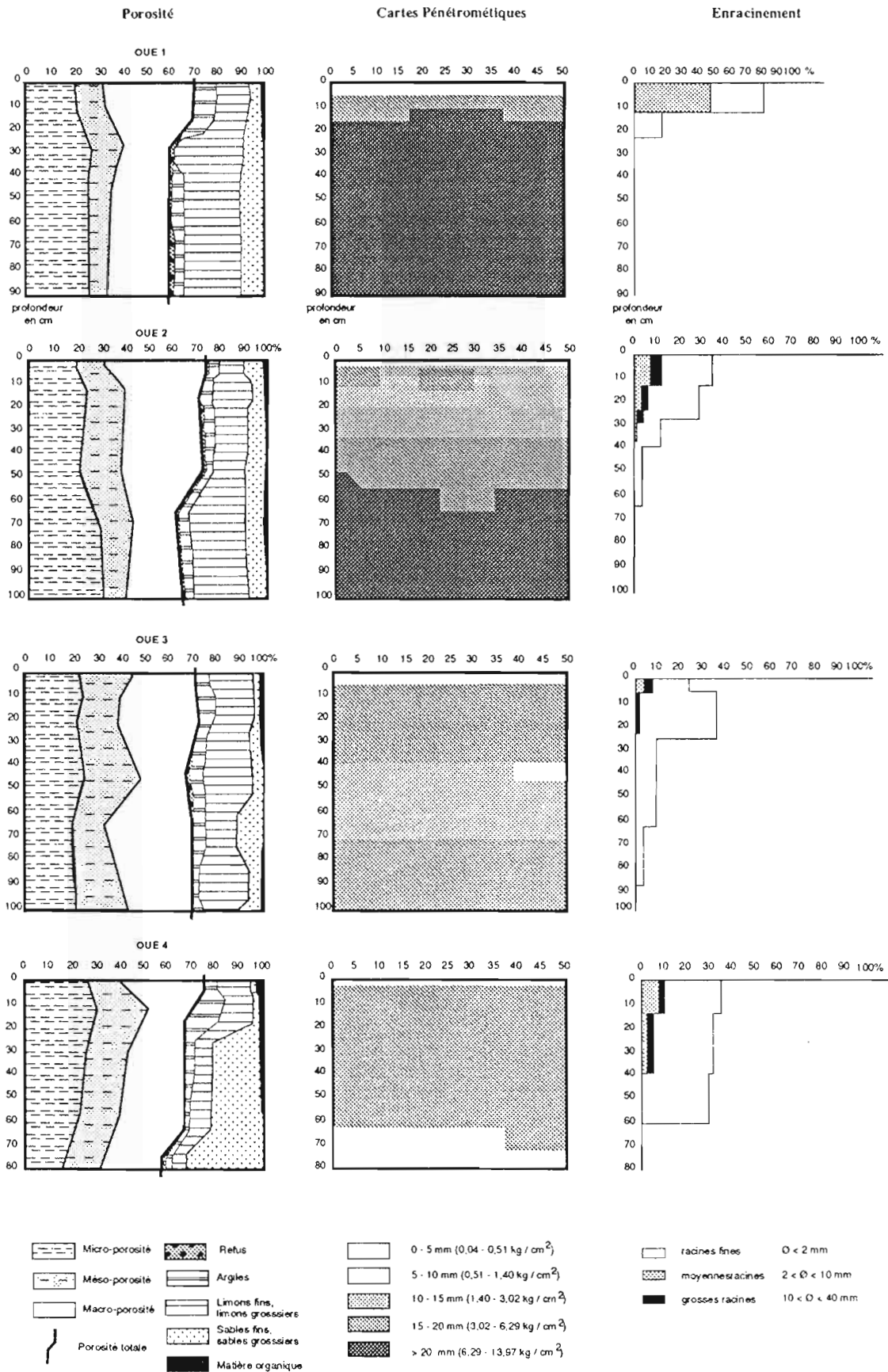


Figure 2 : Comparaison entre la porosité, la pénétrométrie et l'enracinement

Relation entre la compacité et l'enracinement

La compacité, évaluée à partir de deux méthodes : la mesure de la porosité totale et la pénétrométrie, est comparée à l'enracinement (fig. 2).

Le volume poral total est de 70% pour les horizons de surface(0-20 cm) et de 50 à 60 % pour les horizons sous-jacents de OUE 1. Dans le profil OUE 2, la porosité reste proche de 70 % sur 50 cm et diminue ensuite. Ceci caractérise le passage entre les horizons du glacis qui recouvrent ceux du piedmont, ces derniers étant plus riches en limons (fins et grossiers). Ce volume reste constant, autour de 70 %, sur l'ensemble des profils OUE 3 et OUE 4. Toutefois certaines variations existent et correspondent à des différences granulométriques.

La comparaison entre les variations des volumes poraux et les valeurs pénétrométriques montre qu'il existe une bonne concordance entre ces deux méthodes de mesure. Une relation significative ($r = 0,75$) met en évidence une liaison entre la diminution du volume poral et l'accroissement de la compacité des horizons [3 horizons de surface, OUE 11, OUE 21 et OUE 31 ainsi qu'un horizon de profondeur uniquement gravillonnaire, OUE 45, ont été exclus de la comparaison].

Enfin, la comparaison entre les valeurs de compactage (exprimées en mm ou kg/cm^2) et l'enracinement montre que le développement racinaire est arrêté pour des valeurs supérieures à 20 mm ($6,29 \text{ kg}/\text{cm}^2$).

Relation entre la compacité et la texture du sol

Les analyses granulométriques sur la partie fine du sol mettent en évidence trois grands groupes texturaux (Fig. 3). Le premier concerne les horizons de surface à texture Limono-argilo sableuse (LAS), le second ceux à texture limono- sablo argileuse(LSa) et le troisième ceux à texture plutôt sableuse (Sa à SS).

Nous constatons qu'une même texture peut avoir des valeurs pénétrométriques et des densités apparentes différentes. Bien qu'il soit prématuré de proposer des valeurs critiques de pénétrométrie qui soient fonction de la granulométrie des sols, les valeurs les plus fortes sont obtenues sur les horizons texturaux à teneur en limons située au-delà de 50%.

CONCLUSION

Ces différentes méthodes, nous ont permis d'évaluer la compacité de trois faciès de sol ferrallitique ferritique, l'un étant situé sur piedmont et les autres sur glacis et terrasse alluviale. Elles nous montrent qu'il existe une bonne concordance entre la caractérisation morphologique des différents assemblages structuraux, les mesures physiques (densité, pénétrométrie) et l'enracinement. En effet à un seuil de pénétrométrie de $6,29 \text{ kg}/\text{cm}^2$, pour un volume poral inférieur ou égale à 60 %, les racines de la végétation naturelle ne peuvent plus pénétrer dans le sol. Sur piedmont la profondeur maximale explorée par les racines n'excède guère 20 cm tandis que sur glacis elle se situe entre 40 et 60 cm. La description morphologique reste donc un outil essentiel pour apprécier, *in situ*, l'état structural des sols et les contraintes qui y sont associées.

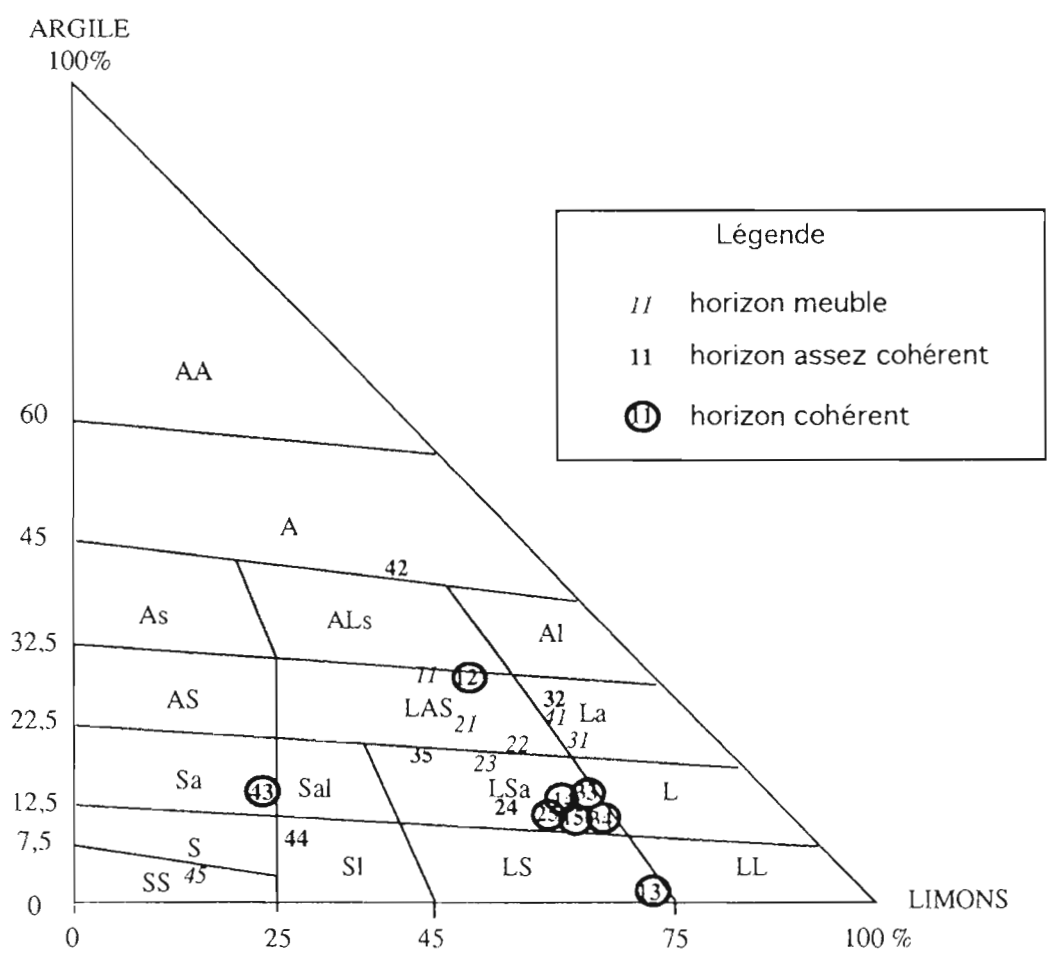


Figure 3 : Relation entre les textures et les valeurs pénétrométriques

Le pénétromètre de type Yamanaka semble être un outil intéressant pour apprécier le degré de compaction des sols et la profondeur maximale explorée par les racines. Toutefois, des analyses complémentaires sont encore indispensables pour, d'une part, évaluer l'effet de la teneur en eau sur la mesure et, d'autre part, analyser l'effet de la texture, ce qui permettrait de proposer des indices de sensibilité au compactage. Cependant, dans le cadre d'un suivi de l'évolution des caractéristiques physiques des sols sous culture, cet outil risque d'être peu précis pour mesurer, en particulier, le passage entre l'horizon cultivé, le fond de labour et les horizons pédologiques. La pénétrométrie à partir de la surface pourrait être plus adaptée. Il convient d'effectuer ces deux types de mesures et de les comparer.

Toutefois, la comparaison entre le complexe d'échange du sol et le pourcentage de racines présentes dans chaque horizon montre également que le développement racinaire décroît de la même façon que la capacité d'échange cationique. Pour le moment, il est donc difficile de savoir si cette déficience à la pénétration est essentiellement mécanique, chimique ou bien être la combinaison de ces deux facteurs.

BIBLIOGRAPHIE

- BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F.X et LUCAS Y., 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., vol. XIIX n° 4, 1982: 323-339.
- BOURDON E. et BECQUER T., 1992 - Etude préliminaire de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Grande Terre : zone de La Coulée et de la Lembé. Convention Science de la vie-Agropédologie n° 12, ORSTOM Nouméa, 19 p.
- BOURDON E. et BECQUER T., 1992 - Etude de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Grande Terre : zone de La Coulée et de la Lembé. Caractérisation physico-chimique des sols. Convention Science de la vie - Agropédologie n° 16, ORSTOM-Nouméa, 88 p.
- BOURDON E. et BECQUER T., 1993 - Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Etude de l'organisation des sols : bassin amont de la rivière des Pirogues. Convention Science de la vie - Agropédologie n° 19, ORSTOM-Nouméa, 70 p.
- C.P.C.S., 1967 - Classification des sols, Grignon, 87p., multigr.
- DE BLIC Ph. , 1976 - Le comportement de sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire après défrichement et mise en culture mécanisée : rôle des traits hérités du milieu naturelle. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., vol. XIV n° 2, 1976 : 113-130.
- HUMBEL F.X., 1974 - La compacité de sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., vol. XII n° 1, 1974 : 73 - 101.
- R.P.F., 1990 - Référentiel Pédologique Français, 3 ème proposition, avril 1990, INRA.

**LISTE DES PARTICIPANTS A LA REUNION
DU GROUPE STRUCTURE ET FERTILITE DES SOLS TROPICAUX
DU 12/09/94 ET DU 13/09/94**

1. J. ASSELINE	ORSTOM	911 avenue Agropolis - BP 5045 34032 Montpellier cedex 1
2. B. BARTHES	ORSTOM	911 avenue Agropolis - BP 5045 34032 Montpellier cedex 1
3. T. BECQUER	ORSTOM	BP A5 - Nouméa - NOUVELLE-CALEDONIE
4. G. BELLIER	ORSTOM	32 avenue Henri Varagnat - 93143 Bondy cedex
5. P. BLANCANEAUX	ORSTOM	SNLCS-EMBRAPA Rua Jardin Botanico - 1024 - 22460 Rio - BRESIL
6. P. DE BLIC	ORSTOM	01 BP 182 - Ouagadougou 01 - BURKINA
7. E. BRAUDEAU	ORSTOM	BP 1386 Dakar - Hann - SENEGAL
8. A. CHAUVEL	ORSTOM	32 avenue Henri Varagnat - 93143 Bondy cedex
9. N. COURTAILLAC	CIRAD	Avenue Agropolis - BP 5035 - 34032 Montpellier
10. B. DENIS	ORSTOM	213 rue la fayette - 75480 Paris cedex 10
11. M. FORTIER	CIRAD	Avenue Agropolis - BP 5035 - 34032 Montpellier
12. D. HERVE	ORSTOM	CP 9214 - 00095 La Paz - BOLIVIE
13. C. LARRE-LARROUY	ORSTOM	911 avenue Agropolis - BP 5045 34032 Montpellier cedex 1
14. J.P. LEFEBVRE	ORSTOM	32 avenue Henri Varagnat - 93143 Bondy cedex
15. J.C. LEPRUN	ORSTOM	17 rue de Fegersheim - 67100 Strasbourg
16. H. MANICHON	CIRAD	Avenue Agropolis - BP 5035 - 34032 Montpellier
17. R. MOREAU	ORSTOM	911 avenue Agropolis - BP 5045 34032 Montpellier cedex 1
18. R. OLIVER	CIRAD	Avenue Agropolis - BP 5035 - 34032 Montpellier
19. C. PLEUVRET		41 place de la principale - 84000 Avignon
20. R. RALISCH	Univ. de Londrina	UEL/Depto agronomia CX Postal 6001 CEP 86051 - Londrina - Parana - BRESIL
21. G.H. SALA	ORSTOM	911 avenue Agropolis - BP 5045 34032 Montpellier cedex 1
22. TAVARES	Univ. de Londrina	UEL/Depto agronomia CX Postal 6001 CEP 86051 - Londrina - Parana - BRESIL
23. J.F. VIZIER	ORSTOM	911 avenue Agropolis - BP 5045 34032 Montpellier cedex 1
24. P. ZANTE	ORSTOM	32 avenue Henri Varagnat - 93143 Bondy cedex