

CONVENTIONS
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 39

1997

Mise en valeur des sols ferrallitiques des
massifs du sud de la Nouvelle-Calédonie

Suivi de l'évolution morphologique et physique de
deux faciès de sols ferrallitiques ferritiques sur glacis
à la suite de leur mise en culture

Emmanuel BOURDON
Thierry BECQUER
Sylvie DUPONT
Bernard BONZON
Patrick LAUBREAU

avec la collaboration de
William NIGOTE
Léon TAPUTUARAI

Convention Province Sud / ORSTOM
N° 53-PVF / DDR notifiée le 14 janvier 1991
Avenant n°5 du 29/12/1995

CONVENTION
SCIENCES DE LA VIE
AGROPÉDOLOGIE

N° 39

1997

Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du
sud de la Nouvelle-Calédonie

Suivi de l'évolution morphologique et physique de deux
faciès de sols ferrallitiques ferritiques sur glacis à la suite de
leur mise en culture

Emmanuel BOURDON
Thierry BECQUER
Sylvie DUPONT
Bernard BONZON
* Patrick LAUBREAU

avec la collaboration de
William NIGOTE
Léon TAPUTUARAI

* CREA

Convention Province Sud / ORSTOM
N° 53-PVF / DDR notifiée le 14 janvier 1991
Avenant n°5 du 29/12/1995



L'INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

CENTRE DE NOUMÉA

© ORSTOM, Nouméa, 1997

/Bourdon, E.
/Becquer, T.
/Dupont, S.
/Bonzon, B.
Laubreau, P.

Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Nouvelle-Calédonie. Suivi de l'évolution morphologique et physique de deux faciès de sols ferrallitiques ferritiques sur glacis à la suite de leur mise en culture

Nouméa : ORSTOM. juillet 1997. 55 p.
Conv. Scie Vie ; Agropédol. ; 39

SOL FERRALLITIQUE FERRITIQUE ; TRAVAIL DU SOL ; PHYSIQUE DU SOL ; MORPHOLOGIE ;
STRUCTURE DU SOL ; POROSITE ; RETENTION D'EAU ; COMPACITE / NOUVELLE
CALEDONIE

Imprimé par le Centre ORSTOM
Juillet 1997

 ORSTOM Nouméa
REPROGRAPHIE

RESUME

Cette note présente les résultats des recherches visant à évaluer l'impact des systèmes de culture sur l'évolution des caractéristiques physiques de la fertilité. Cette approche montre que les deux faciès de sol ferrallitique ferritique de glaciaires, qui présentent un gradient textural marqué, ont cependant des caractéristiques hydrauliques initiales sensiblement identiques. Lorsqu'ils sont soumis à un même travail du sol, ils expriment des comportements physiques et morphologiques différents après deux cycles culturaux. Le faciès, à texture plutôt limoneuse, à faible charge en éléments grossiers (gravillons), marque une sensibilité plus forte au tassement que celui à texture sablo-limoneuse et à charge élevée en éléments grossiers. Cependant, la variabilité de l'enracinement et de la croissance du maïs, observée sur ces deux faciès de sol, ne semble pas être une conséquence directe de cette différence de sensibilité au tassement. Cette variabilité serait plutôt liée aux types d'apports organiques et minéraux appliqués au sol, en particulier, à l'apport de 4 t/ha de phosphore et de 20 t/ha de compost qui montre un effet positif sur la croissance et l'enracinement du maïs. Les résultats du troisième cycle de culture, en cours d'analyse, permettront de confirmer ou infirmer ces observations.

AVANT - PROPOS

Le développement agricole de la Province Sud s'oriente en partie, depuis quelques années, vers la mise en valeur de certaines zones des massifs du Sud, zones qui sont encore peu exploitées du fait de leur très faible fertilité naturelle, mais qui présentent l'avantage d'être bien arrosées et situées à proximité de Nouméa.

L'étude des problèmes soulevés par la mise à niveau de la fertilité de ces sols, questions qui intéressent à la fois la Province Sud et l'ORSTOM, a donc fait l'objet d'une convention de recherche entre ces deux partenaires avec, comme finalité, **"l'étude des facteurs de la fertilité et des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre"**.

Cette note présente les résultats des études visant à évaluer l'impact des systèmes de culture sur l'évolution des caractéristiques physiques de la fertilité au cours des deux premiers cycles de culture. Cette étude a été définie dans le cadre de l'opération 1 de l'avenant 5 de la convention Province Sud - Orstom pour la caractérisation des sols des massifs du sud de la Grande Terre. Ce travail repose sur une analyse morpho-pédologique et des critères physiques.

L'équipe du CREA, sous la responsabilité de P. Laubreau, a assuré la mise en place et le suivi technique de l'expérimentation au champ du site de Ouénarou.

Les analyses chimiques et physiques ont été réalisées par les personnels du Laboratoire Commun d'Analyse de l'Orstom-Nouméa sous la responsabilité de J.L. Duprey.

La duplication de ce rapport a été confiée à l'atelier de reprographie du Centre Orstom de Nouméa (responsable : J.P. Mermoud).

Nous remercions la Direction du Développement Rural d'avoir mis à notre disposition une zone située dans le parc provincial de la Rivière Bleue.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	
I - CARACTÉRISATION DU SITE D'EXPÉRIMENTATION	6
1.1 - Le choix du site d'expérimentation	6
1.2 - Le descriptif du site	6
1.3 - La parcelle d'expérimentation	7
<i>1.3.1 - Les sols du champ d'expérimentation</i>	7
<i>1.3.2 - Le dispositif d'expérimentation</i>	7
II - MATÉRIELS ET MÉTHODES	9
2.1 - Les méthodes d'étude	9
2.2 - Analyse des données	11
III - RÉSULTATS	12
3.1 - Caractérisation morpho-structurale des sols du champ d'expérimentation	12
<i>3.1.1 - Sous végétation naturelle</i>	12
<i>3.1.2 - Après deux cycles de culture</i>	12
3.2 - Caractérisation de la porosité des volumes structuraux	14
<i>3.2.1 - Granulométrie et porosité des volumes structuraux</i>	14
<i>3.2.2 - Porosité et rétention en eau des volumes structuraux</i>	16
3.3 - Caractérisation de la compacité des volumes structuraux	19
<i>3.3.1 - Sous végétation naturelle</i>	21
<i>3.3.2 - Sous culture</i>	21
<i>3.3.3 - Effet des traitements et des cycles culturels sur la compacité des volumes structuraux</i>	21

3.4 -Caractérisation hydraulique des volumes structuraux	23
3.4.1 - <i>Sous végétation naturelle</i>	25
3.4.2 - <i>Sous culture</i>	26
3.4.3 - <i>Effet des traitements et des cycles culturaux sur la perméabilité des volumes structuraux</i>	26
3. 5 - Enracinement et croissance du maïs	28
3.5.1 - <i>Enracinement du maïs</i>	28
3.5.2 - <i>Croissance du maïs</i>	29
IV - DISCUSSION	30
4.1.1 - Evolution des caractéristiques physiques des volumes structuraux : conséquences sur l'enracinement et la croissance du maïs	30
4.1.2 - Effet des traitements sur les caractéristiques physiques des volumes structuraux : conséquences sur l'enracinement et la croissance du maïs	32
V- CONCLUSION	32
BIBLIOGRAPHIE	34
ANNEXE I : MATÉRIEL ET MÉTHODE	38
a - Relations de base entre les différentes phases du sol	39
b - Matériel et mesure de l'état énergétique de l'eau dans le sol	43
c - Protocole d'observations, de mesures et de prélèvements	48
ANNEXE II : ANALYSE DES DONNÉES	52
a - Tableau d'analyse de variance pour les différentes fractions granulométriques	53
b - Tableau d'analyse de variance de "l'effet traitement et cycle" sur le flux matriciel	54

c - Tableau d'analyse de variance de "l'effet traitement et cycle" sur la pénétrométrie	54
d - Tableau d'analyse de variance de "l'effet rang et inter-rang" sur la pénétrométrie	55
e - Tableau d'analyse de variance de "l'effet traitement" sur l'enracinement	55
f- Tableau d'analyse de variance de "l'effet traitement" sur la croissance et le nombre de feuilles du maïs	55

INTRODUCTION

Les sols ferrallitiques ferritiques (CPCS, 1967) ou ferrallisol (RPF, 1990) de Nouvelle-Calédonie, développés sur les roches ultramafiques, sont connus pour leur très faible fertilité chimique et pour les problèmes que cela pose lors de leur mise en valeur agricole (Latham *et al.*, 1978). En outre, les diverses études cartographiques menées sur ces sols ont également montré l'existence d'horizons relativement compacts pouvant gêner la pénétration racinaire. Des travaux ont donc été entrepris afin :

- d'observer l'évolution morphologique et physique de ces sols sous végétation naturelle et au cours de deux cycles culturaux,
- d'analyser l'incidence de différents apports organiques (compost urbain) et minéraux (phosphore, scories) et l'effet du travail du sol sur cette évolution,
- de relier ces observations avec l'enracinement d'une plante-test, un maïs (*Zea mays*).

I - CARACTÉRISATION PÉDOLOGIQUE DU SITE D'EXPÉRIMENTATION

1.1 - Le choix du site d'expérimentation

La cartographie des sols de deux zones de référence au 1/25 000^{ème} (Bourdon et Becquer, 1992a, 1992b, Bourdon *et al.*, 1993) a mis en évidence deux grandes unités morpho-pédologiques dérivées du substrat ultramafique : celle de montagne (montagne *sensu stricto*, piedmonts, glacis) et celle de plaine basse (terrasses alluviales récentes). Hormis les zones de montagne, ces différents faciès de sol sont susceptibles d'être cultivés. Le choix du site d'expérimentation agronomique correspond d'une part aux zones susceptibles d'être mise en valeur, d'autre part aux conditions de sol proches que celles observées chez les agriculteurs.

1.2 - Le descriptif du site

Le site, retenu pour les expérimentations, se situe à Ouénarou dans le parc provincial de la Rivière Bleue. Ce site se compose en amont d'un piedmont puis, en l'aval, d'une zone de transition constituée par un glacis alluvio-colluvial et d'une terrasse alluviale (Bourdon *et al.*, 1994). Les piedmonts sont généralement soumis à des processus de rajeunissement (décapage) ; les matériaux s'accumulent en bas de pente. Par ailleurs, en bas de pente, ces matériaux peuvent être soumis à un battement de nappe temporaire à semi-permanente.

La végétation (Jaffré, 1980) suit en grande partie la zonation morpho-pédologique. Elle est constituée : d'un maquis ligno-herbacé fortement dégradé sur le piedmont, d'un maquis paraforestier sur le glacis alluvio-colluvial et d'un maquis ligno-herbacé semi-humide sur la terrasse alluviale.

1.3 - La parcelle d'expérimentation

1.3.1 - Les sols du champ d'expérimentation

Les sols du champ d'expérimentation sont des sols ferrallitiques ferritiques d'apports colluvio-alluviaux. Ils se différencient de la façon suivante (Fig.1) :

- **en haut de la parcelle** (profil Oué 6), par des *atterrissements* massifs d'éléments grossiers (graviers, pierres, blocs) et fins (argiles et limons) dans les horizons de surface et dans les horizons de profondeur.

- **en bas de la parcelle** (profil Oué 10), par des *dépôts* issus de colluvionnement dominés par des sables grossiers et des graviers .

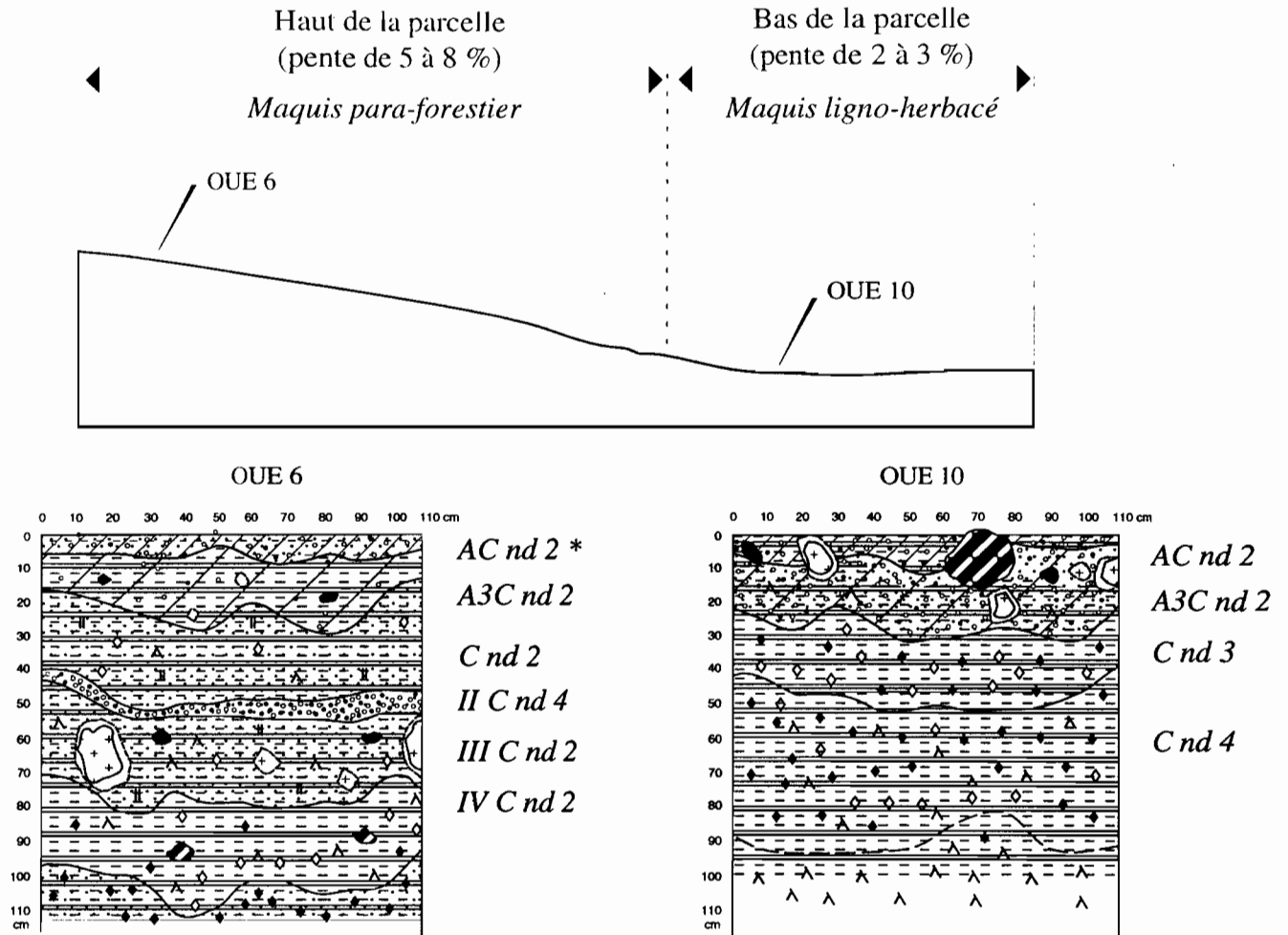
Par ailleurs, ces sols présentent des capacités d'échanges cationiques limitées aux horizons organiques. La somme de leurs bases échangeables (calcium, magnésium, potassium, sodium) reste faible à nulle. Leur pH est généralement acide. Leur minéralogie est constituée essentiellement d'oxydes et d'hydroxydes de fer associés à des métaux de transition (Ni, Co, Mn) et dans une moindre proportion de silicates magnésiens (Quantin *et al*, 1997).

1.3.2 - Le dispositif d'expérimentation

En annexe à l'essai principal, permettant le suivi de l'évolution en plein champ des arrières-effets de doses croissantes de phosphore (Bonzon *et al.*, 1997), une bande de culture a été retenue pour le suivi de l'évolution géochimique et des propriétés physiques des sols du champ d'expérimentation. Cette bande de culture a été subdivisée perpendiculairement au gradient pédologique en douze sous-parcelles soit 6 sous-parcelles correspondant respectivement au sol du type Oué 6 (haut de parcelle) et Oué 10 (bas de parcelle). Ce découpage a permis de faire 2 répétitions pour chacun des 3 traitements qui ont été appliqués :

- un apport de 4 t / ha de P₂O₅ sous forme de phosphate super triple,
- un apport de 4 t / ha de P₂O₅ plus 20 t / ha de compost urbain ,
- un apport de 4 t / ha de P₂O₅ plus 20 t / ha de scories du nickel (silicate de magnésium).

Glacis colluvio-alluvial



Légende des figures et symboles

Matériaux meuble	Eléments grossiers	Rocheux	Traits pédologiques
Organique	Sesquioxydes	Cailloux ; Pierres	Oxydo-réduction (Taches)
Peu organique	Gravillons et graviers indurés	Blocs de péridotite	Revêtements (Fe Mn) (*)
Sableux	Gravillons et graviers faiblement indurés	Blocs indéterminés	Ponctuations (Fe Mn)
Limoneux	Cailloux ; Pierres (Fragments de cuirasse)		Volumes (Fe Mn)
Argileux	Cailloux (Galets)		Imprégnations (Fe Mn)
Altération roche basique			

(*) Ferro-manganique

* D'après BEAUDOU (1990, in *Référenciel Pédologique Français*) la quantité d'éléments grossiers ou "nodule" noté *nd* (gravillons, concrétions) peut être définie : *nd 1* (0 - 5 %), *nd 2* (5 - 15 %), *nd 3* (15 - 30 %), *nd 4* (30 - 55 %).

Figure 1 - Caractérisation morpho-pédologique du champ d'expérimentation.

En outre, l'ensemble du champ a reçu un amendement de 1,4 t / ha de CaO sous forme de croûte calcaire.

La plante-test utilisée pour l'ensemble des essais est un hybride double de maïs X-L 80. Une plante de couverture (un sorgho fourrager) occupe l'inter-cycle cultural.

Par ailleurs, Les travaux aratoires (tableau 1) réalisés pour la préparation du sol sont ceux habituellement pratiqués par les agriculteurs. L'ensemble de la parcelle a été travaillé de la même façon.

Premier cycle de maïs (T1)	Inter-cycle (sorgho)	Deuxième cycle de maïs (T2)
<ul style="list-style-type: none"> - gyrobroyeur ; - épiérage ; - rotavator (4 passages) ; - charrue à disques (2 passages) avant et après l'épandage des amendements ; - herse vibrante ; - houe rotative ; - semis du maïs. 	<ul style="list-style-type: none"> - pulvérisateur à disques ; - rotavator ; - semis du sorgho ; - fauche (2) ; - pulvérisateur à disques ; - rotavator. 	<ul style="list-style-type: none"> - chisel lourd (5 dents) ; - chisel lourd (5 dents) ; - herse vibrante (2 passages) ; - semis du maïs.

Tableau 1 - Passage des différents outils pour la préparation du sol avant chaque cycle cultural.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 - Les méthodes d'étude

Sur chaque type de sol (haut et bas de parcelle) la description et la caractérisation des profils culturaux nécessitent différentes méthodes d'observations et de mesures :

. **l'observation macro-morphologique** des profils culturaux (Hénin *et al.*, 1969 ; Manichon, 1982 ; de Blic, 1990) dans les 50 premiers centimètres du sol permet de caractériser les différents volumes structuraux qui les composent à partir, notamment, de la description de la structure, de la texture et de la couleur de chaque volume ;

. **la mesure de compacité** du sol est effectuée avec un pénétromètre de poche à aiguille conique de type Yamanaka (Moreau et Nagumo, 1995) sur l'ensemble du profil en suivant une maille de 10 x 5 cm et à une humidité du sol proche de la capacité au champ. Les mesures de pénétrométrie sont exprimées en millimètre (mm) d'enfoncement de l'aiguille conique dans le sol ou en kg/ cm² de pression exercée. Une représentation cartographique des données est ensuite réalisée à l'aide du logiciel SPYGLASS V 3.0 (Spyglass, Inc.) ;

. **le relevé des racines** est réalisé à partir d'un comptage des impacts racinaires observées sur une face du profil (Tardieu et Manichon, 1986).

Afin de caractériser la perméabilité et la porosité des sols deux méthodes sont retenues :

. **l'infiltrométrie** permet, à partir d'un dispositif expérimental (cf annexe Ib) conçu par Clothier et White (1981) et Perroux et White (1988), de réaliser des mesures *in situ* d'infiltration sous charge négative constante qui donnent accès à deux paramètres essentiels du comportement rhéologique de l'eau dans le sol : la *conductivité hydraulique* (écoulement gravitaire de l'eau dans le sol) et la *sorptivité capillaire* (attraction capillaire exercée par le sol).

La conductivité hydraulique (cf. annexe I b) est calculée à partir de l'expression de Wooding (1968). Cette expression montre que le flux d'infiltration émanant d'une surface circulaire de rayon r , alimentée en eau sous une pression effective (négative, nulle ou positive) tend vers un régime permanent. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$q_0 = K_0 + 4 \phi_0 / \pi \cdot 1/r$$

où q_0 est le flux matriciel,

K_0 est la conductivité hydraulique du sol,

ϕ_0 le potentiel de flux matriciel.

Pour ces essais d'infiltration, trois pressions différentes sont utilisées (-0.5 cm, -5 cm et -15 cm) qui permettent d'obtenir 4 valeurs de K_0 (Duwig *et al.*, 1996) : $K(0.5)_{0.5-5}$, $K(5)_{0.5-5}$, $K(5)_{5-15}$ et $K(15)_{5-15}$. L'estimation d'un $K(5)$ moyen est calculée à partir d'un couple de valeurs tel que $K(5) = (K(5)_{0.5-5} + K(5)_{5-15}) / 2$.

La sorptivité capillaire (cf. annexe I b) est calculée à partir des travaux de Reichart *et al.* (1972), Brutseart (1979), Vauclin et Haverkamp (1985), White et Sully (1987) qui ont admis une relation exponentielle de la diffusivité capillaire avec la teneur volumique en eau. Le potentiel de flux matriciel s'exprime :

$$\phi_0 = \frac{b S_0^2}{\theta_0 - \theta_n}$$

où S_0 est la sorptivité capillaire ;

θ_0 et θ_n sont les teneurs initiales et finales en eau du sol;

b un paramètre dont la valeur pour les sols ferrallitiques est égale à 0,55 (Vauclin et Chopart, 1992).

3 essais d'infiltration sont réalisés pour chaque pression et pour chaque volume structural des profils.

. **la porosité et la teneur en eau** (cf. annexe Ia) des volumes structuraux est déterminée sur des cylindres de sol non remanié qui sont soumis à différentes pressions dans une appareil d'extraction à plaques poreuses. En effet, l'énergie qu'il faut appliquer pour extraire de l'eau d'une gamme de pore peut être évaluée par la pression (ou succion) qu'il faut exercer sur l'échantillon. Cette pression peut s'exprimer en hauteur de colonne d'eau ou pF [$pF = - \log_{10} h$ (cm)]. Une relation a été établie entre l'énergie nécessaire pour extraire l'eau et les diamètres capillaires où est située cette eau (loi de Laplace et Jurin). Les pF 1, 2, 2,5, 3 et 4,2 appliqués aux sols correspondent respectivement à des diamètres de pores de 300 μm , 30 μm , 10 μm , 3 μm et 0,19 μm . Cette détermination permet également de déterminer le volume occupé par l'eau dans l'échantillon pour un pF donné.

Cependant, les travaux de Tessier (1980) ont montré que la maîtrise expérimentale du volume des échantillons (densité apparente) traités est délicate dans le cas de matériaux argileux. La référence au volume du solide V_s (densité réelle), apparaît donc plus judicieuse pour comparer la porosité et la teneur en eau de différents faciès de sol. Ainsi, l'indice d'eau ($\theta = V_w / V_s$) et l'indice des vides ($e = V_v / V_s$) font référence au volume du solide V_s (cf. annexe Ia) et permettent de suivre l'évolution des porosités et teneurs en eau des sols de la parcelle.

En complément à ces observations et mesures, une prise d'échantillon est effectuée afin de déterminer la granulométrie des volumes structuraux.

L'ensemble de ces observations et mesures nécessite un protocole d'intervention détaillé qui est décrit en annexe technique (Ic).

2.2 - L'analyse des données

L'exiguïté des sous-parcelles et la variabilité pédologique intra-parcellaire d'une part, l'importance du travail nécessaire à la caractérisation morphologique et physique des profils culturaux d'autre part, ne permettent pas un nombre de répétitions nécessaire pour comparer l'effet des traitements sur l'évolution structurale des sols de la parcelle.

Par contre, le nombre de mesures des différents paramètres quantitatifs (granulométrie, pénétrométrie, flux matriciel, nombre de racines) réalisées sur chaque traitement est satisfaisant pour appliquer une analyse de variance afin de mettre en évidence l'incidence de ces traitements sur les paramètres physiques et leurs conséquences sur l'enracinement du maïs. Ceci rend alors possible l'analyse des évolutions morphologiques et physiques des volumes structuraux observées sous

végétation naturelle et au cours des deux cycles culturaux. Le programme d'analyse statistique Statview II (Abacus Concepts. Inc) est utilisé pour cette analyse.

III - RÉSULTATS

3.1 - Caractérisation morphologique des volumes structuraux

3.1.1 - Sous végétation naturelle

L'observation des profils Oué 6 et Oué 10 (Fig. 2) montre la séquence des volumes structuraux suivants :

- de 0 à 5 cm (Oué 6) et de 0 à 25 (Oué 10), les **volumes Pa Gr** sont définis par la juxtaposition de deux types de structures : la première est particulaire et la seconde grumeleuse. L'agencement de ces deux structures définit des vides d'entassement entre les agrégats et/ou les particules. Cet assemblage a une très faible cohésion ;

- de 5 à 25 cm, le **volume Sa** (à structure sub-anguleuse) est défini par un emboîtement de polyèdres irréguliers à arêtes émoussées. Cet emboîtement a une très faible cohésion d'ensemble et permet l'individualisation soit de vides d'entassement et/ou d'arrangement. Par ailleurs, la porosité est tubulaire et intra-agrégats. Ce volume n'apparaît pas dans le profil Oué 10 ;

- de 25 cm à 45 cm et au-delà, les **volumes M1** et **M2** ne présentent pas un développement structural net. Les types de vides sont étroitement liés à la nature des matériaux d'apport. Dans un premier cas, les apports à texture plutôt limoneuse se caractérisent par une porosité tubulaire fine à très fine et dans un second cas, pour les matériaux à texture plutôt sableuse, par des vides d'entassement. La cohésion de ces matériaux est faible à assez forte pour le premier cas et forte pour le second.

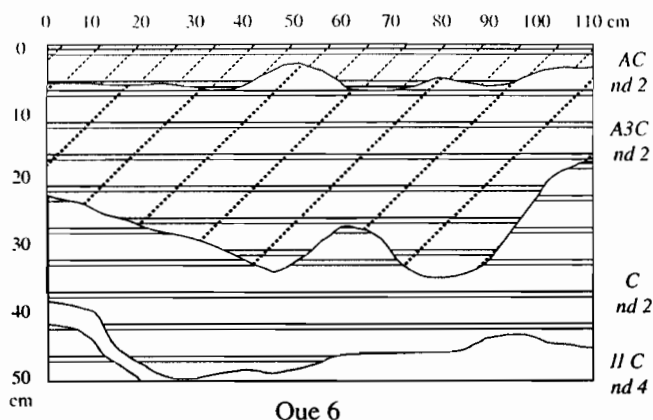
3.1.2 - Après deux cycles culturaux

L'observation des profils Oué 37 et Oué 41 indique une transformation des volumes Pa Gr et Sa et montre la séquence de volumes structuraux suivants :

- de 0 à 10 cm, les **volumes Pa Gr (Sa)** et **Pa (Gr sa)** présentent une juxtaposition de trois types de structures : la première est particulaire, la seconde grumeleuse et troisième sub-anguleuse. Cependant, la proportion des types de structures diffère de haut en bas de la parcelle. En effet, dans le profil Oué 41, la structure dominante est de type particulaire. Toutefois, l'agencement de ces trois structures définit des vides d'entassement entre les agrégats et/ou les particules qui confèrent à l'ensemble de ces volumes une très faible cohésion ;

Haut de la parcelle

To sous maquis para-forestier

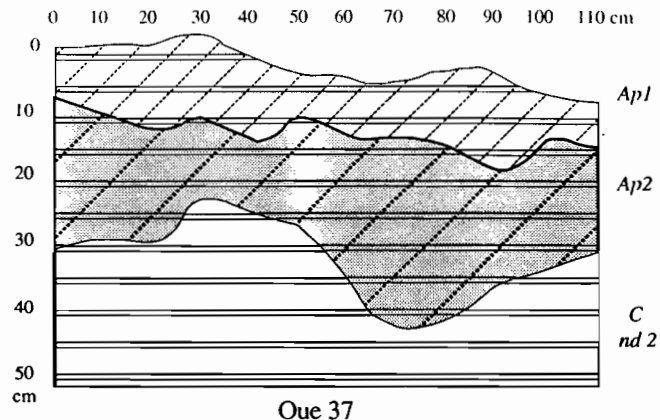


Volumes Pa Gr : L.a.S ; 10 R 3/2 (rouge sombre) en frais ; structure particulière juxtaposée à une structure grumeleuse fine à très fine ; volume des vides très important entre les particules ; porosité intra-agrégats faible, quelques pores très fins ; très meuble.

Volume Sa : L.a.S ; 2,5 YR 3/2 à 3/4 (rouge sombre à brun rougeâtre foncé) en frais ; structure subanguleuse moyenne à fine ; volume des vides très important entre les agrégats ; porosité intra-agrégats faible, quelques pores très fins ; meuble.

Volume M1 : L.a.S ; 2,5 YR 3/4 (brun rougeâtre foncé), en frais ; structure massive ; volume des vides faible ; porosité tubulaire importante, pores fins à très fins abondant traversant le volume ; meuble à assez cohérent.

T2 après le deuxième cycle de culture

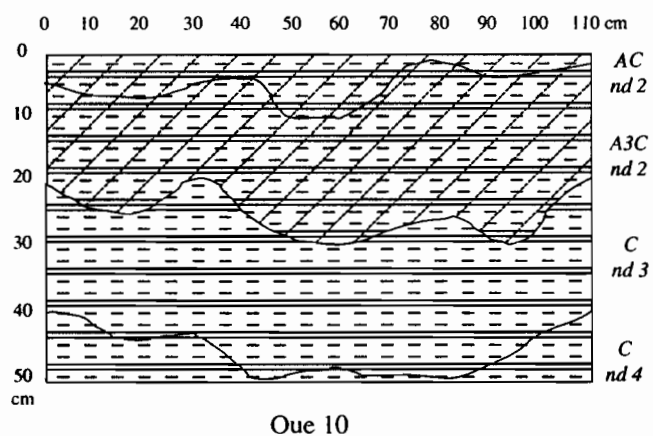


Volumes Pa Gr (Sa) : L.a.S ; 2,5 YR 3/2 (rouge sombre) en frais ; structure particulière à grumeleuse (fine à très fine) juxtaposée à une structure sub-anguleuse moyenne à fine ; volume des vides très important entre les particules et les agrégats ; porosité intra-agrégats faible, rares pores très fins ; très meuble.

Volume MF Sa : L.a.S ; 2,5 YR 3/2 à 3/3 (rouge sombre) en frais ; structure sub-anguleuse moyenne à fine sous les rangs passant atéralement à une structure massive fissurée sous l'inter-rang ; volume des vides faible entre les agrégats ; porosité intra-agrégats assez importante, pores très fins ; assez cohérent.

Bas de la parcelle

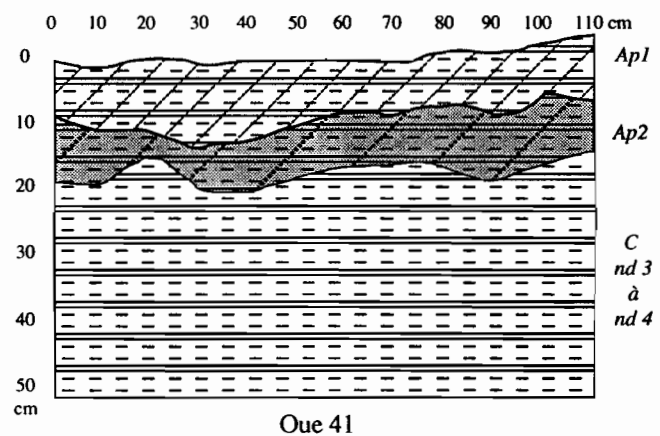
To sous savane ligno-herbacée



Volume Pa Gr : S.L ; 10 R 3/3 (rouge sombre) en frais ; structure particulière à grumeleuse (fine à très fine) ; volume des vides très important inter-particulaire ; très meuble.

Volume M2 : L.S ; 10R 3/3 (rouge sombre) à volumes 10 R 3/6 (rouge foncé), en frais ; structure massive ; volume des vides assez faible ; porosité tubulaire très importante, pores moyens, fins et très fins abondant traversant le volume ; très cohérent.

T2 après le deuxième cycle de culture



Volume Pa (Gr, sa) : S.L ; 10 R 3/2 (rouge sombre) en frais ; structure particulière juxtaposée à une structure grumeleuse à sub-anguleuse ; volume des vides important inter-agrégats ; porosité intra-agrégats faible, quelques pores très fins ; meuble.

Volume MF (Sa) : S.L ; 10 R 3/2 à 3/3 (rouge sombre) en frais ; structure massive fissurée sous l'inter-rang à sub-anguleuse moyenne à fine peu nette sous les rangs ; volume des vides assez important entre les agrégats ; porosité intra-agrégats faible, quelques pores très fins ; cohérent.

Figure 2 - Caractérisation morpho-structurale des sols du site d'expérimentation, sous végétation naturelle (To) et à la suite de deux cycles culturaux (T2).

- de 10 à 25 cm, les volumes **MF Sa** et **MF (Sa)** présentent une juxtaposition de deux structures : la première est massive fissurée et la seconde sub-anguleuse. Cette dernière est mieux exprimée sous les rangs de culture. Les types de vides sont étroitement liés à la nature des matériaux d'apports. Dans le premier cas, pour les matériaux à texture plutôt limoneuse, les vides d'entassement et/ou d'arrangement sont relativement faibles. Dans le second cas, pour les matériaux à texture plutôt sableuse, les vides d'entassements et/ou arrangement sont assez important. Ces assemblages ont une assez forte cohésion ;

- au-delà, de 35 cm, les volumes M1 et M2 n'ont pas subi de modifications structurales notables.

3.2 - Caractérisation de la porosité des volumes structuraux

Les descriptions morphologiques ont permis d'identifier deux faciès de sols ayant chacun une organisation structurale à laquelle sont associés des types de vides qui semblent liés à la nature des matériaux.

Une première analyse de situation est réalisée à partir des données texturales et de la porosité totale calculée à partir de la densité apparente des volumes structuraux. Par ailleurs, une analyse de variance est appliquée aux données granulométriques des sols sous culture.

Une seconde analyse permet de préciser la répartition des classes de pores des différents volumes structuraux à partir des mesures de pF.

3.2.1 - granulométrie et porosité totale des volumes structuraux

. Sous la végétation naturelle

En haut de la parcelle (tableau 2), les volumes *Pa Gr* et *Sa* présentent des teneurs en limon supérieures à 60 % et un faible gradient pour leurs teneurs en sable qui sont respectivement de 17 et 20 %. Par ailleurs, la porosité totale du volume *Pa Gr* est légèrement supérieure à celle du volume *Sa* .

En bas de la parcelle (tableau 2), les teneurs en limon des volumes *Pa Gr* et *M1* sont respectivement de 45 et 42 %. La teneur en sable est supérieure à 40 % et présente un écart de 5 % entre les volumes. La porosité totale est relativement constante d'un volume à l'autre.

	Granulométrie			Densité apparente	Porosité totale exprimée en %
	Argile %	Limons %	Sables %		
Haut de la parcelle					
<i>To sous maquis para-forestier (Oué 6)</i>					
0 à 15 cm : volumes Pa Gr et Sa	18	64	17	0,85	75
15 à 35 cm : volumes Sa et M1	10	69	20	0,97	70
<i>T2 fin du deuxième cycle de culture (Oué 37)</i>					
0 à 15 cm : volume Pa Gr (Sa)	11	53	35	1,09	67
15 à 35 cm : volume MF Sa	15	56	28	1,15	65
Bas de la parcelle					
<i>To sous maquis ligno-herbacé (Oué 10)</i>					
0 à 15 cm : volume Pa Gr	10	45	44	1,05	73
15 à 35 cm : volume M2	8	42	49	1,55	72
<i>T2 fin du deuxième cycle de culture (Oué 41)</i>					
0 à 15 cm : volume Pa (Gr sa)	12	54	32	1,01	67
15 à 35 cm : volume MF (Sa)	11	28	60	1,12	62

Tableau 2 - Caractérisation des sols du haut et du bas de la parcelle, sous végétation naturelle (Oué 6 et oué 10) et après deux cycles de culture (Oué 37 et Oué 41).

. Sous culture

En haut de la parcelle, la teneur en limon des volumes *Pa Gr (Sa)* est de 53 %, celle du volume *MF Sa* de 56 %. Les teneurs en sables sont respectivement pour ces deux volumes de 35 et 28%.

En bas de la parcelle, la teneur en limon du volume *Pa (Gr, sa)* est de 54 % et celle du volume *MF (Sa)* de 28 %. Les teneurs en sable sont respectivement de 32 et 60 % pour ces volumes.

Par ailleurs, l'analyse de variance (annexe II a) réalisée sur 44 échantillons de sol confirme une différence très significative ($p < 0,0001$) des teneurs en sables et limons entre le haut et le bas de la parcelle. L'analyse comparative (Fig.3) précise cette variation texturale et la classe granulométrique qui s'applique seulement aux volumes *MF Sa* et *MF (Sa)*. En effet, pour le premier volume les teneurs moyennes en limon fin sont de 35 % et pour le second de 25 %. Inversement, les teneurs moyennes en sable grossier sont de 17 % pour le volume *MF Sa* et de 37 % pour le volume *MF (Sa)*.

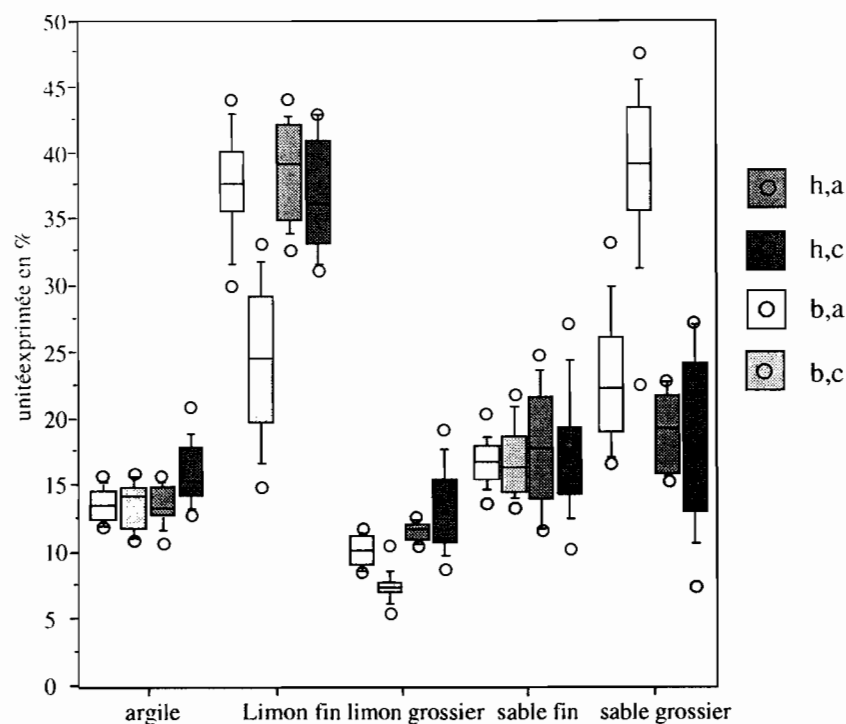


Figure 3 - Analyse comparative de la granulométrie des volumes structuraux de la parcelle après deux cycle de culture (h) haut de la parcelle ; (b) bas de la parcelle ; (a) prélèvement de sol entre 0 et 15 cm ; (c) prélèvement de sol entre 15 et 35 cm).

Le gradient morpho-pédologique observé du haut vers le bas de la parcelle se confirme au niveau de la texture (tableau 2) où une différence marquée des teneurs en limons et sables a été observée pour les volumes *MF Sa* et *MF (Sa)*.

La porosité totale des volumes structuraux initiaux observés sous végétation naturelle est peu différente entre les deux faciès de sol. Cependant elle diminue après deux cycles de culture (tableau 2) : en haut de la parcelle cette diminution de porosité est de 5 à 8 % et de 5 à 10 % en bas de la parcelle.

3.2.2 - Porosité et rétention en eau des volumes structuraux

La porosité et la rétention en eau des volumes structuraux sont obtenues par des mesures de pF (Cf. paragraphe 2.1). La méthode utilisée permet de comparer les deux faciès de sol à partir des indices des vides, d'eau et d'air. Ces indices sont étroitement liés à l'organisation des classes de pores. Fairbridge et Finel (1979) ont défini ces classes :

- en macroporosité pour les diamètres de pores supérieurs à 200 μm ,
- en mésoporosité grossière pour les diamètres de pores compris entre 200 μm et 60 μm ,
- en mésoporosité moyenne pour les diamètres de pores compris entre 60 μm et 20 μm

- en mésoporosité fine pour les diamètres de pores compris entre 20 μm et 6 μm ,
- en microporosité pour des diamètres de pores compris entre 6 μm et 0,2 μm
- en porosité matricielle, pour des diamètres de pores inférieurs à 0,2 μm

. En haut de la parcelle (Fig. 4)

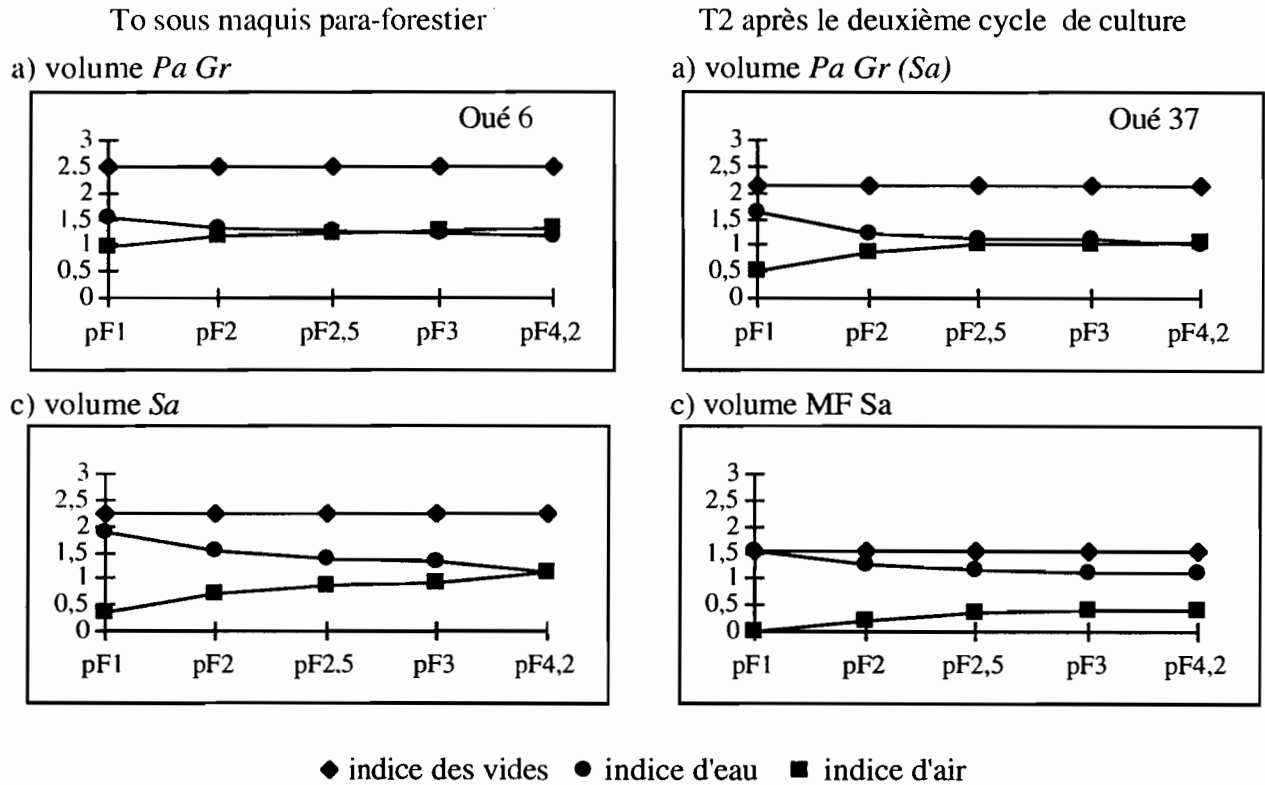


Figure 4 - Evolution des indices des vides, d'eau et d'air des volumes structuraux (a, c) du haut de la parcelle ; sous végétation naturelle (To), sous culture (T2).

Sous végétation naturelle (To), la porosité totale (indice des vides) du volume *Pa Gr* est importante (2,5) et se caractérise par une macroporosité dominée par des pores supérieurs à 300 μm de diamètre qui perdent très rapidement leur eau (indice d'air >1 à pF 1). L'entrée d'air se poursuit ensuite assez rapidement jusqu'à pF 2,5. Ceci correspond à la vidange des mésopores grossiers à fins (de 300 à 10 μm de diamètre). Au-delà du pF 2,5, la faible diminution de l'indice d'eau correspond à des mésopores fins et micropores (3 à 0,19 μm de diamètre) d'importance réduite.

La porosité totale du volume *Sa* est également importante mais dominée par une mésoporosité grossière à moyenne (pores de 300 μm à 30 μm de diamètre) qui est soulignée par un indice d'air proche de 0,5 à pF 1. L'entrée d'air se poursuit de façon plus lente et régulière de pF 1 jusqu'à pF 4,2. Ceci correspond à la vidange des mésopores moyens à fins (de 30 à 3 μm de diamètre) d'égale importance.

Sous culture, l'indice des vides du volume *Pa Gr (Sa)* proche de 2 indique une diminution de la porosité totale et en particulier de la macroporosité (indice d'air égale à 0,5 à pF 1). La porosité se caractérise par le maintien d'une mésoporosité grossière moyenne (indice d'air égale à 1 à pF 2). Au-delà de pF 2 l'entrée d'air diminue et correspond à une vidange réduite des mésopores fins et micropores.

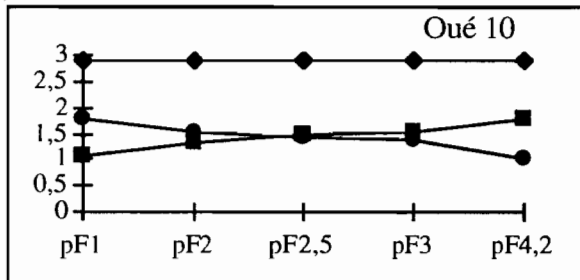
Sous culture, le volume *MF Sa* se caractérise par une forte diminution de la porosité totale et la disparition de la macroporosité (indice des vides égale à 1,5 et indice d'air proche de zéro à pF 1). Par ailleurs, l'indice d'eau égale à 1,5 à pF1 et inférieur à 1,5 à pF 2 suggère également une diminution de la mésoporosité grossière et moyenne. Au-delà de pF 2,5, l'indice d'air reste constant. Cela suppose que la vidange n'est plus fonctionnelle ou qu'il y a une plus forte rétention de l'eau dans les mésopores fins et les micropores.

. En bas de la parcelle (fig. 5)

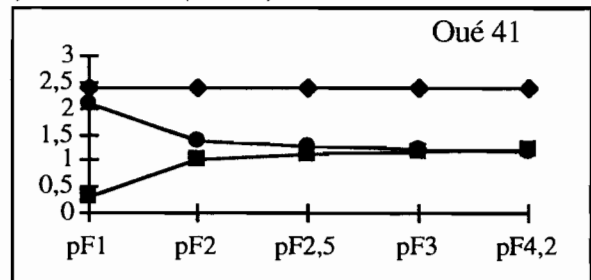
To sous maquis ligno-herbacé

T2 après le deuxième cycle de culture

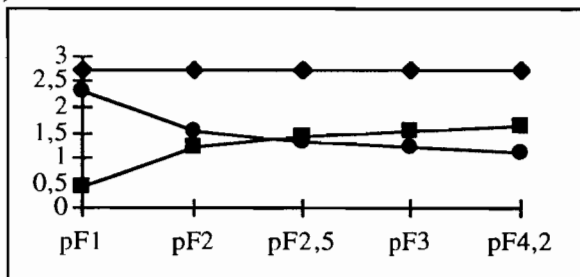
a) volume *Pa Gr*



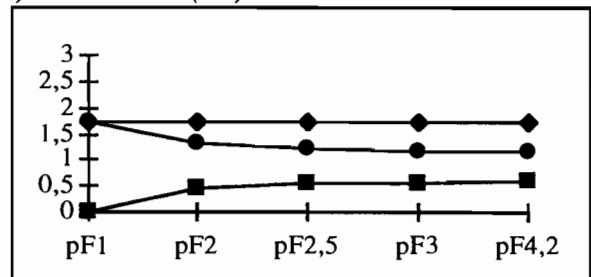
a) volume *Pa (Gr sa)*



c) volume *M2*



c) volume *MF (Sa)*



◆ indice des vides ● indice d'eau ■ indice d'air

Figure 5 - Evolution des indices des vides, d'eau et d'air des volumes structuraux (a, c) du bas de la parcelle ; sous végétation naturelle (To), sous culture (T2) .

Sous végétation naturelle (To), la porosité totale du volume *Pa Gr* est très importante (indice d'air proche de 3) et se caractérise par une macroporosité dominée par des pores très grossiers

supérieurs à 300 µm de diamètre. Au-delà de pF 2 la faible modification de l'indice de vide indique une vidange réduite de la mésoporosité et de la microporosité.

La porosité totale du volume *M2* est également très importante (supérieure à l'indice 2,5) et se caractérise par une mésoporosité grossière dominée par des pores de 300 µm de diamètre. Au-delà de pF 2, l'entrée d'air assez importante correspond à une très faible rétention de l'eau entre les pF 2,5 et 4,2.

Sous culture, la porosité totale du volume *Pa (Gr sa)* se caractérise par une diminution importante de la macroporosité (indice d'air inférieur à 2,5) mais le maintien de la mésoporosité grossière, moyennes et fine dominée en grande partie par des pores de 300 µm de diamètre (indice des vides inférieur à 0,5 à pF1). L'entrée d'air réduite entre les pF 2,5 et 4,2 indique une faible vidange de la mésoporosité (moyenne à fine) et de la microporosité .

Sous culture, *MF (Sa)* se caractérise par une mésoporosité grossière et moyenne (indice d'air proche de zéro à pF 1). Cependant l'indice d'eau compris entre 1,5 et 2 indique une diminution de cette mésoporosité. Au-delà de pF 2, l'indice d'air augmente très faiblement. Ceci suppose que la vidange est peu fonctionnelle ou qu'il y a une forte rétention de l'eau dans les mésopores fins et les micropores (indice d'air égale à 0,5 à pF 2,5 et supérieur à 0,5 à pF 4,2).

Ces indices de vide, d'air et d'eau montrent que la mise en culture a sensiblement modifié la porosité des volumes structuraux initiaux observés sous végétation naturelle. Ces modifications se remarquent par une forte diminution de la macroporosité (pores > à 300 µm) et une faible diminution de la mésoporosité des volumes initiaux *Sa et M2*. Cependant cette diminution de la mésoporosité semble moins importante dans le volume *M2* que dans le volume *Sa*.

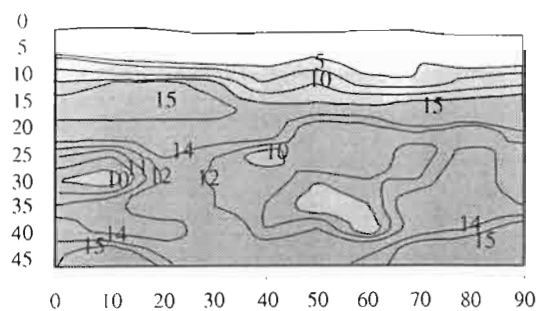
3.3 - Caractérisation de la compacité des volumes structuraux

Les deux situations sont décrites à partir de cartes d'isovaleurs de compacité de quatre profils, deux sous végétation naturelle et deux sous culture (fin deuxième cycle), présentés à titre d'exemple dans la Figure 6. L'analyse comparative des données est ensuite réalisée à partir des profils étudiés sous les différents traitements appliqués au sol et au cours des deux cycles culturaux.

Les cartes d'isovaleurs complètent les descriptions morphologiques et soulignent des zones de compacité des profils qu'il est difficile de mettre en évidence à partir d'une appréciation qualitative. De ce fait il peut exister un décalage entre les volumes structuraux observés et les cartes d'isovaleurs.

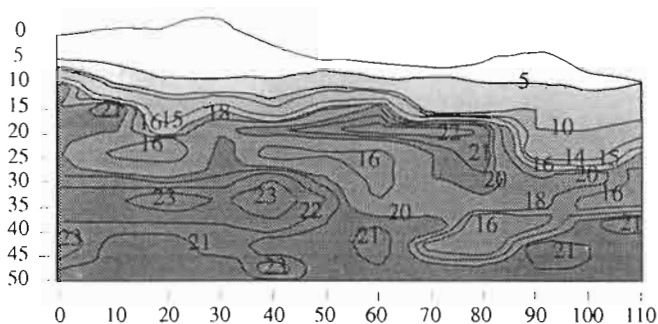
Haut de parcelle

To sous maquis para-forestier



Oué 6

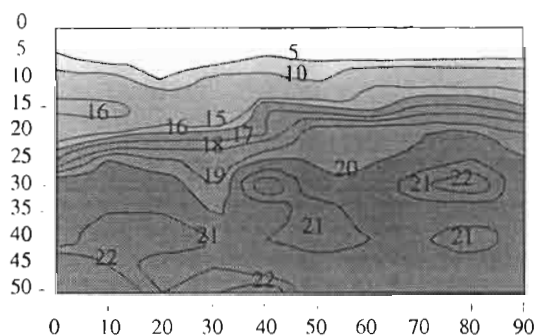
T2 après le deuxième cycle de culture



Oué 37

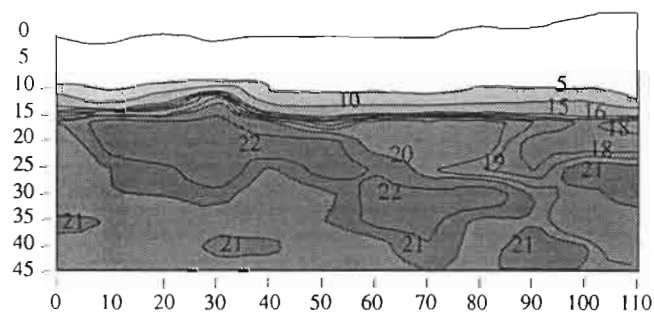
Bas de parcelle

To sous maquis ligno-herbacé



Oué 10

T2 après le deuxième cycle de culture



Oué 41

Valeurs de compacité ou de dureté obtenues, avec un pénétromètre de type Yamanaka, à une humidité du sol proche de la saturation

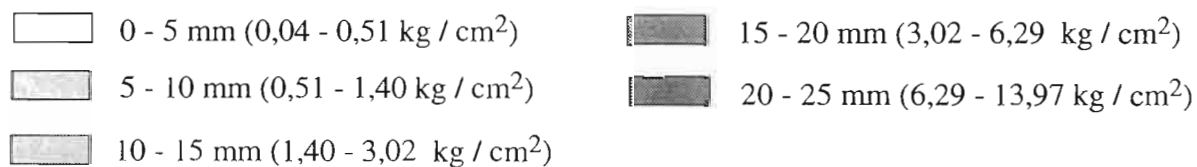


Figure 6 - Cartes d'isovaleurs de compacité des volumes structuraux.

3.3.1 - Sous végétation naturelle

. *En haut de la parcelle*, sous le maquis para-forestier, les valeurs de compacité sont comprises entre 0 et 5 mm pour le volume *Pa Gr*. Les volumes *Sa* et *M 1* présentent des valeurs communes qui se situent entre 5 et 15 mm. De ce fait, le découpage morpho-structural n'apparaît pas sur la carte d'isovaleur.

. *En bas de la parcelle*, sous le maquis ligno-herbacé, la carte d'isovaleur correspond au découpage morpho-structural. En outre les valeurs de compacité précisent en fonction de la profondeur les zones de plus forte cohérence pour les volumes *Pa Gr* (0 à 5 mm, 5 à 15 mm) et *M 2* (15 à 20 et supérieur à 20 mm).

Ces cartes montrent également une situation très contrastée entre le haut et le bas de la parcelle notamment une différence de compacité importante entre les volumes *MI* et *M 2*.

3.3.2 - Sous culture

Sous culture, les cartes de compacité correspondent mieux au découpage morpho-structurale. Le volume *Pa Gr (Sa)* du haut de la parcelle et *Pa (Gr, sa)* du bas de la parcelle, ont des valeurs de compacité identiques comprises entre 0 et 5 mm. Sous l'effet du travail du sol, les volumes *MF Sa* et *MF (Sa)* présentent également des valeurs de compacité similaires. En effet, ces volumes se caractérisent par des valeurs comprises entre 15 et 20 mm et supérieures à 20 mm pour les zones de plus forte compacité.

Ces cartes montrent que le travail du sol a sensiblement modifié la compacité des volumes structuraux initiaux observés sous végétation naturelle. Ces modifications concernent essentiellement les volumes *Pa Gr, Sa* et *M 1* et se remarquent par une augmentation des valeurs de compacité en haut de la parcelle et un maintien de celles-ci en bas de la parcelle. Par ailleurs, cette évolution de compacité affecte les volumes se situant entre 5 et 35 cm de profondeur.

3.3.3 - Effet des traitements et des cycles culturaux sur la compacité

L'analyse de variance (annexe II c et II d) de "l'effet traitement et cycle" réalisée sur l'ensemble des mesures pénétrométriques montre une différence très significative ($p < 0,0001$) entre les valeurs de compacité des sols sous végétation naturelle et sous culture. Cette différence semble surtout liée aux cycles de culture et à la profondeur. L'effet des traitements est moins marqué bien qu'une différence significative existe ($p = 0,0015$).

Cependant l'analyse comparative des valeurs pénétrométriques moyennes présentée ci-dessous permet de préciser ces différences de compacité en fonction des situations des profils observés (haut et bas de parcelle) et des traitements. Pour cette analyse deux profondeurs sont retenues : a (5 à 20 cm) et c (25 à 35 cm).

. *En haut de la parcelle* (Fig. 7), pour la profondeur a, les valeurs médianes obtenues sont voisines de 13 mm pour To (sous végétation naturelle) et comprises entre à 11 mm et 13 mm pour les traitements P4, PC et SC. Ceci confirme que les traitements ont peu modifié la compacité de cette couche de sol, notamment l'apport de compost.

L'effet du cycle semble également avoir peu d'incidence sur la compacité de la profondeur a. En effet, les valeurs moyennes sous végétation naturelle (To,a) et après les deux cycles de culture (II,a) sont identiques.

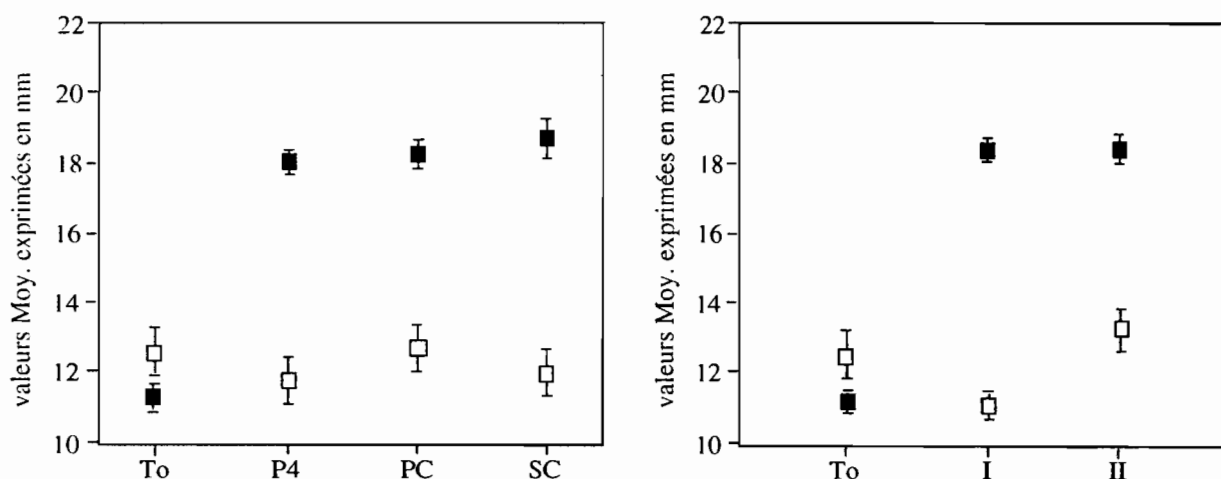


Figure 7 - Evolution des valeurs moyennes de compacité des volumes structuraux du haut de la parcelle. P4 apport de 4 t/ha de phosphore ; CP apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de compost ; SC apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de scorie. To témoin sous végétation naturelle ; I fin du premier cycle ; II fin du second cycle. □ (a) mesure pénétrométrique pour une profondeur comprise entre 5 et 20 cm ; ■ (c) mesure pénétrométrique pour une profondeur comprise entre 25 à 35 cm.

Par contre pour la profondeur c la valeur pénétrométrique moyenne, qui est de 13 mm sous végétation naturelle (To,c), passe à 18 mm sous les traitements P4, PC et SC. Par ailleurs, cette valeur est commune aux différents traitements. L'effet du cycle est significatif pour cette couche de sol et cela dès le premier cycle de culture (I,c).

. *En bas de la parcelle* (Fig. 8), il n'y a pas de changement notable des valeurs pénétrométriques entre les profondeurs témoins (To a, To c) et celles obtenues sous cultures (P4 a, P4 c, PC a, PC c ...).

En effet, la valeur pénétrométrique moyenne de la profondeur **a** est de 15 mm sous le témoin (To a) et reste constante quels que soient les traitements. Les valeurs pénétrométriques de la profondeur **c** sont comprises entre 19 et 21 mm. L'effet du cycle semble également avoir peu modifié la compacité des profondeurs **a** et **c**.

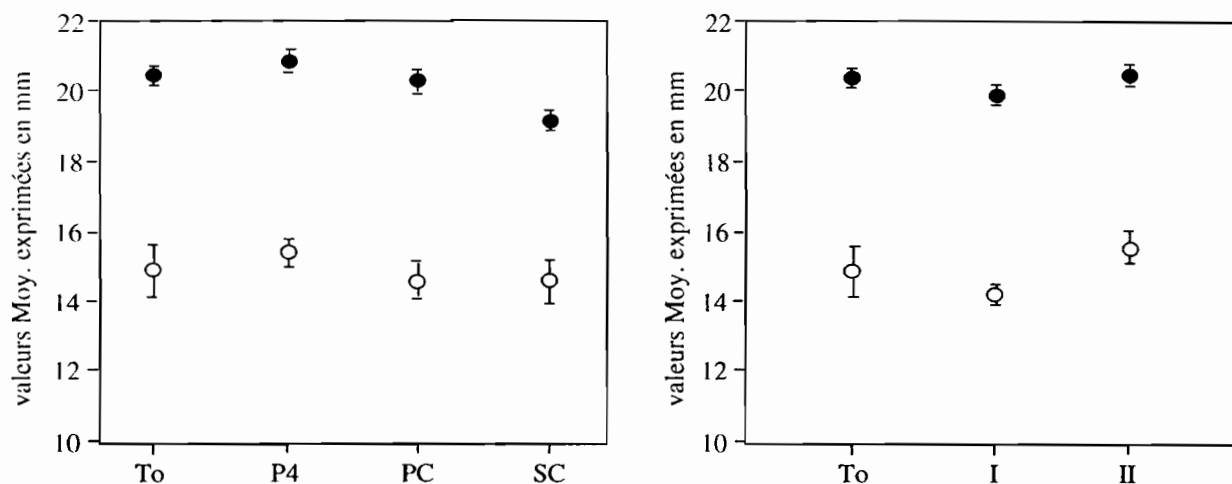


Figure 8 - Evolution des valeurs moyennes de compacité des volumes structuraux du bas de la parcelle. P4 apport de 4 t/ha de phosphore ; CP apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de compost ; SC apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de scorie. To témoin sous végétation naturelle ; I fin de premier cycle ; II fin de second cycle. ○ (a) mesure pénétrométrique pour une profondeur comprise entre 5 et 20 cm ; ● (c) mesure pénétrométrique pour une profondeur comprise entre 25 à 35 cm.

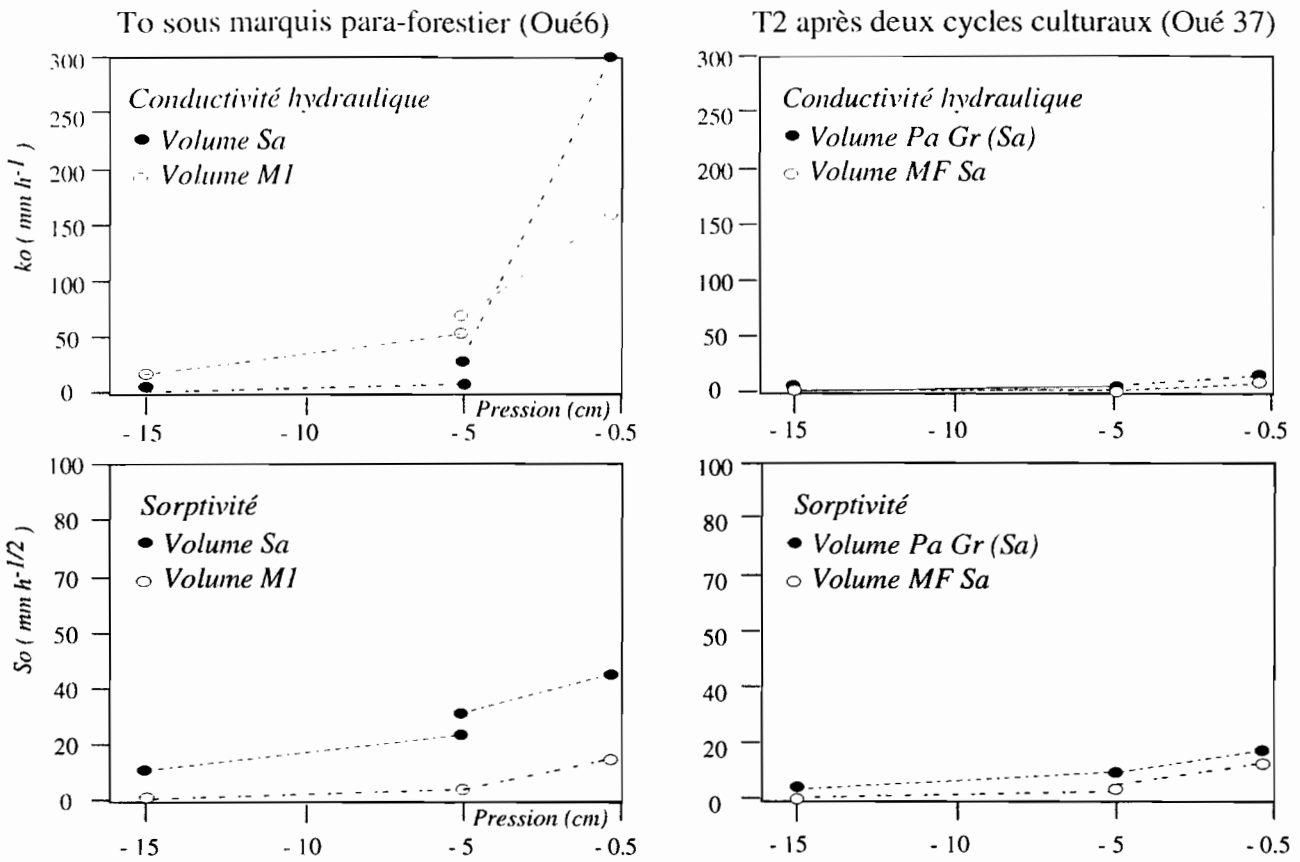
Par ailleurs, cette analyse de situation réalisée sur les mesures pénétrométriques indique que :

- les valeurs moyennes de compacité sont plus faibles en haut qu'en bas de la parcelle. Elles sont respectivement de 13 et 15 mm pour la profondeur **a**, 18 mm et 20 mm pour la profondeur **c** ;
- l'effet des traitements n'ont pas d'effet sur les valeurs moyennes de compacité ;
- l'incidence du travail du sol est remarquable seulement en haut de la parcelle et sur la profondeur **c**, où la compacité du sol passe de 11 à 18 mm.

3.4 - Caractérisation hydraulique des volumes structuraux

La caractérisation du comportement de l'eau dans le sol est également présentée, à titre d'exemple, à partir de quatre profils : deux sous végétation naturelle et deux sous culture à la fin du deuxième cycle (Fig. 9). Les mesures d'infiltration aux différentes pressions (-0.5 cm, -5 cm et -15 cm) permettent de calculer les paramètres du comportement rhéologique de l'eau (conductivité hydraulique et sorptivité capillaire) dans les volumes structuraux. Cependant la teneur importante en matière organique des horizons de surface, notamment sous végétation naturelle, induit une certaine

Haut de la parcelle



Bas de la parcelle

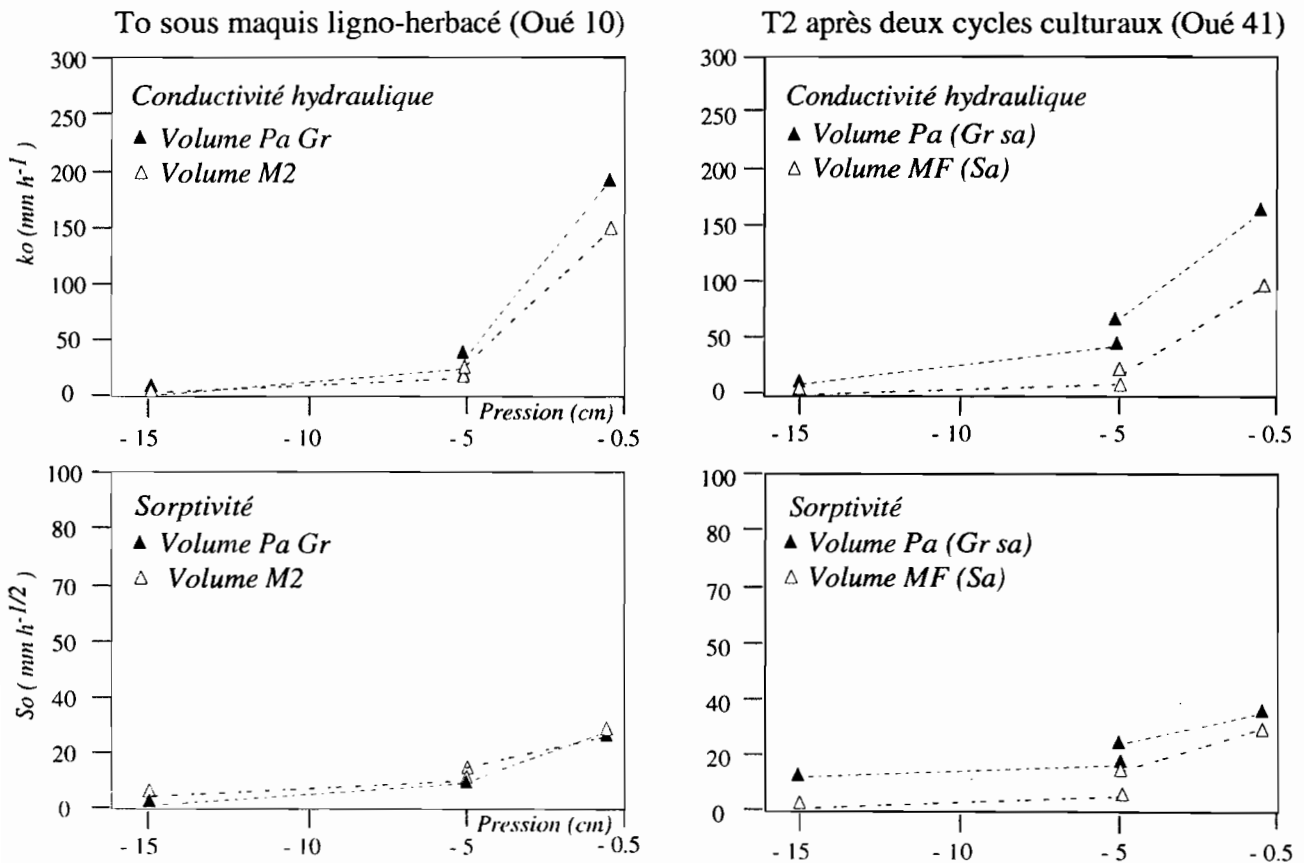


Figure 9 - Caractéristiques hydrauliques des sols de la parcelle d'expérimentation sous végétation naturelle (To) et après deux cycles culturaux (T2).

hydrophobicité du sol (Duwig et al., 1996) et un écoulement de l'eau très faible lorsque l'infiltromètre est soumis à des pressions de -5 et -15 cm. De ce fait, les profondeurs 10 à 15 cm et 25 à 30 cm sont prises en compte pour la caractérisation des volumes structuraux observés sous végétation naturelle et sous culture.

L'analyse comparative des données est ensuite appliquée à l'ensemble des mesures de flux d'infiltration (à la pression -0,5 cm) qui ont été réalisées sur les traitements et au cours des deux cycles de culture.

3.4.1 - Sous végétation naturelle

Sous végétation naturelle, les valeurs de conductivité et de sorptivité sont peu différentes entre le haut de la parcelle (sous maquis para-forestier) et le bas de la parcelle (sous maquis ligno-herbacé).

. **En haut de la parcelle**, la conductivité hydraulique (K_0) du volume *Sa* (profondeur 10 à 15 cm) est supérieure à 300 mm h⁻¹ à la pression - 0.5 cm, 17 mm h⁻¹ à la pression -5 cm et 4 mm h⁻¹ à la pression -15 cm. Le volume *M1* (profondeur 25 à 30 cm) présente respectivement aux différentes pressions les valeurs de conductivité hydrauliques suivantes : 160 mm h⁻¹, 60 mm h⁻¹ et 15 mm h⁻¹.

La sorptivité (S_0) du volume *Sa* pour les pressions -0.5 cm, -5 cm et -15 cm est de 15 mm h^{-1/2}, 3 mm h^{-1/2} et 2 mm h^{-1/2}. Celle du volume *M1* est respectivement de 45 mm h^{-1/2}, 27 mm h^{-1/2} et 13 mm h^{-1/2}.

Ces volumes présentent donc des caractéristiques hydrauliques différentes notamment à la plus faible pression (-0,5 cm) proche de la saturation.

. **En bas de la parcelle**, la conductivité hydraulique (K_0) du volume *Pa Gr* aux différentes pressions est de 150 mm h⁻¹, 20 mm h⁻¹ et 5 mm h⁻¹. Celle du volume *M2* est respectivement de 190 mm h^{-1/2}, 30 mm h^{-1/2} et 2 mm h^{-1/2}.

La sorptivité (S_0) des volumes *Pa Gr et M2* est peu différente. En effet, à la pression -0.5 cm la sorptivité est de 33 mm h^{-1/2}. Elle est comprise entre 5 et 8 mm h^{-1/2} à la pression -5 cm ; 4 à 8 mm h^{-1/2} à la pression -15 cm.

En bas de la parcelle, les caractéristiques hydrauliques ne présentent pas d'écart important d'un volume à l'autre.

En haut et en bas de la parcelle, ces conductivités hydrauliques et sorptivités indiquent un écoulement gravitaire très rapide de l'eau et une forte sorptivité capillaire dans les volumes structuraux.

3.4.2 - Sous culture

. **En haut de la parcelle**, la conductivité hydraulique des volumes structuraux *Pa Gr (Sa)* et *MF Sa* est de 14 mm h^{-1} à la pression -0.5 cm , comprise entre 4 et 7 mm h^{-1} à la pression -5 cm et de 3 mm h^{-1} à la pression -15 cm .

La sorptivité des volumes *Pa Gr (Sa)* et *MF Sa* est peu différente. En effet, à la pression -0.5 cm la sorptivité est de $15 \text{ mm h}^{-1/2}$. Elle est comprise entre 7 et $11 \text{ mm h}^{-1/2}$ à la pression -5 cm ; 9 à $11 \text{ mm h}^{-1/2}$ à la pression -15 cm .

Les volumes *Pa Gr (Sa)* et *MF Sa* présentent donc de faibles différences entre leurs caractéristiques hydrauliques.

. **En bas de la parcelle**, aux différentes pressions, la conductivité hydraulique du volume *Pa (Gr sa)* est respectivement de 85 mm h^{-1} , comprise entre 10 et 18 mm h^{-1} et de 3 mm h^{-1} . Pour le volume *MF (Sa)*, elle est de 168 mm h^{-1} , comprise entre 44 et 59 mm h^{-1} et de 10 mm h^{-1} .

La sorptivité des volumes *Pa (Gr sa)* et *MF (Sa)* est peu différente pour chaque pression.

En haut de la parcelle, la mise en culture semble avoir fortement ralenti l'écoulement gravitaire de l'eau et diminuée la sorptivité capillaire dans les volumes structuraux initiaux observés sous végétation naturelle. En particulier, la conductivité hydraulique à la pression -0.5 cm passe de plus de 300 mm h^{-1} à 14 mm h^{-1} dans les volumes de surface. Par contre, ces paramètres sont peu modifiés en bas de la parcelle.

3.4.3 - Effet des traitements et des cycles culturels sur la perméabilité des volumes structuraux

L'analyse de variance (annexe II b) de "l'effet traitement et cycle" réalisée sur les mesures du flux matriciel montrent une différence très significative ($p < 0,0001$) entre les valeurs moyennes de flux d'infiltration sous végétation naturelle et sous culture.

Cependant l'analyse comparative des valeurs moyennes de flux matriciel présentées ci-dessous permet de préciser ces différences en fonction des situations des profils observés (haut et

bas de parcelle) et des traitements. Pour cette analyse deux profondeurs sont retenues : a (10 à 15 cm) et c (25 à 30 cm).

. *En haut de la parcelle* (Fig. 10), le flux matriciel diminue fortement pour les deux profondeurs étudiées a et c dès le premier cycle de culture I. Ce flux, qui était respectivement de 60 et 40 mm h⁻¹ sous végétation naturelle (To), se stabilise autour de 5 mm h⁻¹ au cours des cycles I et II.

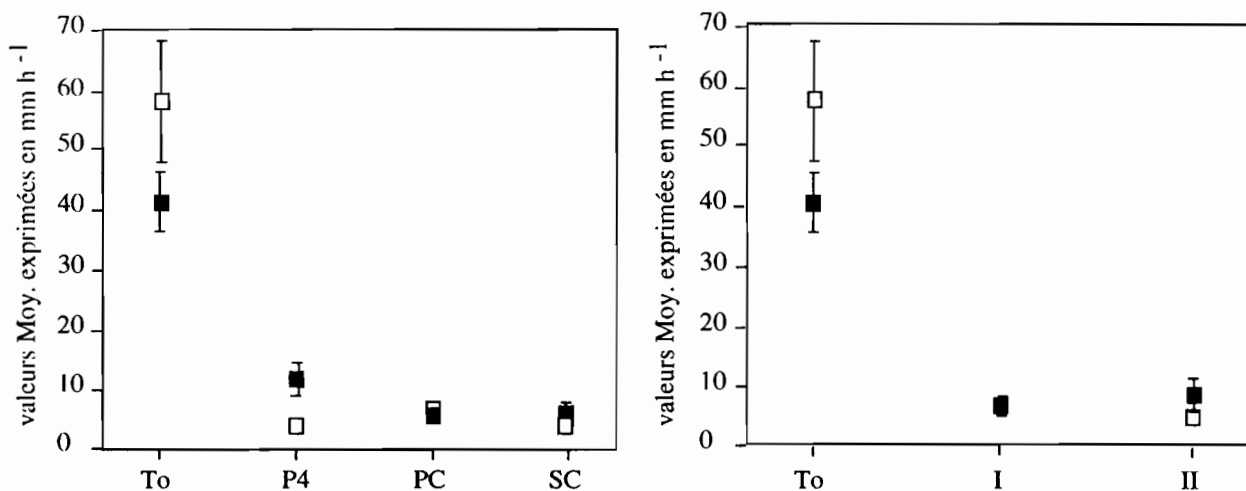


Figure 10 - Effet de la mise en culture sur le flux d'infiltration moyen des volumes structuraux du haut de la parcelle. P4 apport de 4 t/ha de phosphore ; CP apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de compost ; SC apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de scorie. To témoin sous végétation naturelle ; I fin du premier cycle ; II fin du second cycle. □ (a) mesure du flux matriciel pour une profondeur comprise entre 10 et 15 cm ; ■ (c) mesure du flux matriciel pour une profondeur comprise entre 25 à 30 cm.

Sous les différents traitements la valeur moyenne du flux matriciel est également de 5 mm h⁻¹ pour les deux profondeurs étudiées. Aucune différence notable n'apparaît donc entre les traitements.

. *En bas de la parcelle* (Fig.11), pour une profondeur donnée, les valeurs moyennes de flux matriciel sont variables d'un traitement à un autre. En effet, Les valeurs moyennes les plus faibles sont obtenues sous le traitement P4 pour les profondeurs a et c et les plus élevées sous les traitements PC et SC pour les profondeurs c et a.

Cependant une variation des valeurs moyennes du flux d'infiltration des profondeurs étudiées (a, c) apparaît au cours des cycles culturaux et par rapport à la valeur moyenne obtenue sous végétation naturelle. En effet sous végétation naturelle la valeur moyenne du flux matriciel se situe autour de 30 mm h⁻¹, diminue fortement au premier cycle (10 mm h⁻¹) et se stabilise au second cycle (25 mm h⁻¹).

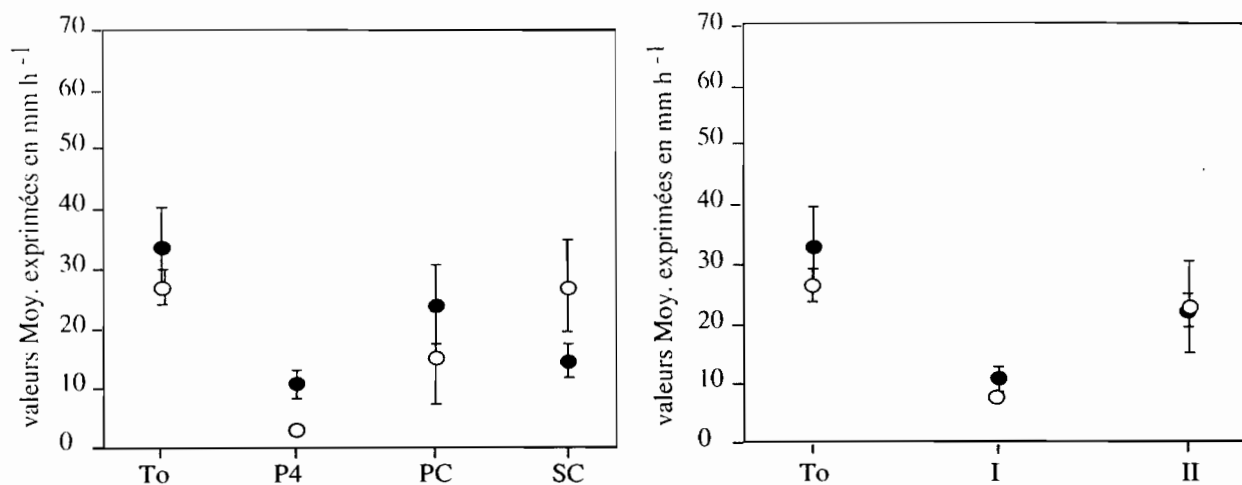


Figure 11 - Effet de la mise en culture sur le flux d'infiltration moyen des volumes structuraux du bas de la parcelle. P4 apport de 4 t/ha de phosphore ; CP apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de compost ; SC apport de 4 t/ha de phosphore et 20 t/ha de scorie. To témoin sous végétation naturelle ; I fin du premier cycle ; II fin du second cycle. ○ (a) mesure du flux infiltration pour une profondeur comprise entre 10 et 15 cm ; ● (c) mesure du flux matriciel une profondeur comprise entre 25 à 30 cm.

Ces variations sont probablement dû aux conditions hydriques du sol lors de la préparation du sol avant les semis ou à la préparation de la parcelle avant mise en culture (défrichage, épierrage).

Cette analyse comparative confirme les différences de comportement rhéologique de l'eau dans les différents volumes structuraux entre le haut et le bas de la parcelle, notamment pour la pression -0.5 cm. En haut de la parcelle, une forte diminution du flux matricielle apparait dès le premier cycle de culture et se maintient au cours du second cycle. En bas de la parcelle, cette diminution est moins prononcée et semble réversible.

3.5 - Enracinement et croissance du maïs

3.5.1 - Enracinement du maïs

A la fin du premier cycle de culture, le comptage des racines n'a pu être réalisé en raison de la présence de nombreux débris organiques (fragments de tiges, de racines etc...), due au défrichage, rendant le dénombrement des racines du maïs délicat. L'analyse de variance des valeurs de densité racinaire obtenues à la fin du second cycle (annexe II e) indique un effet très significatif ($p < 0,0001$) du rang et de la profondeur sur l'enracinement. De plus des effets significatifs ont été observés entre le haut et le bas de la parcelle ($p < 0,003$) et entre les traitements ($p < 0,01$).

Par ailleurs l'analyse comparative (Fig.12) montre :

- une densité racinaire des rangs et des inter-rangs similaire en haut et bas de la parcelle pour la profondeur a ;
- une densité racinaire relativement plus élevée des rangs et des l'inter-rangs en bas de la parcelle pour les profondeurs c.

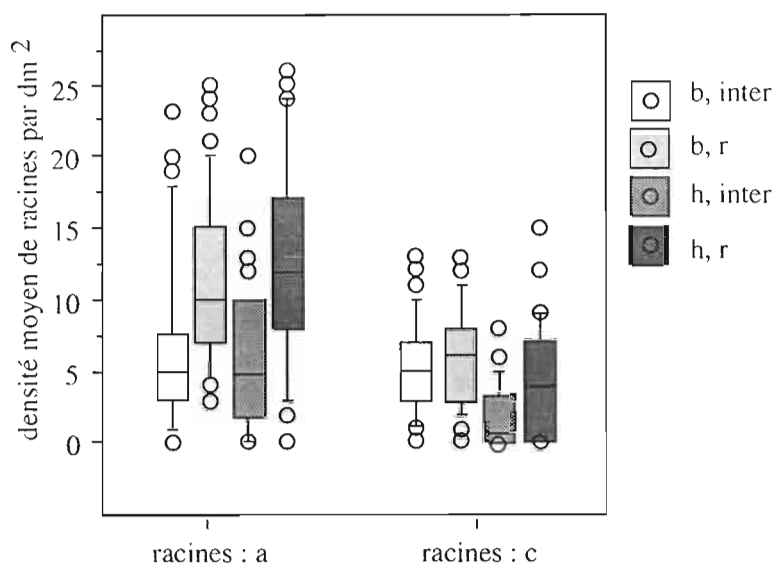


Figure 12 - Enracinement du maïs dans les sols du haut (h) et du bas (b) de la parcelle à la fin du deuxième cycle. Densité racinaire pour les profondeurs a (5- 20 cm), c (25 -35 cm), sous le rang (r) et l'inter-rang (inter).

3.5.2 - Croissance du maïs

L'effet des traitements sur la croissance du maïs (annexe II f) est très significatif. L'analyse de variance indique également des différences très significatives ($p < 0,0001$) de la hauteur et du nombre de feuilles du maïs entre le haut et le bas de la parcelle.

L'analyse comparative (Fig.13) permet de distinguer et de préciser l'effet des traitements et l'effet du sol (haut et bas de parcelle) sur la croissance du maïs.

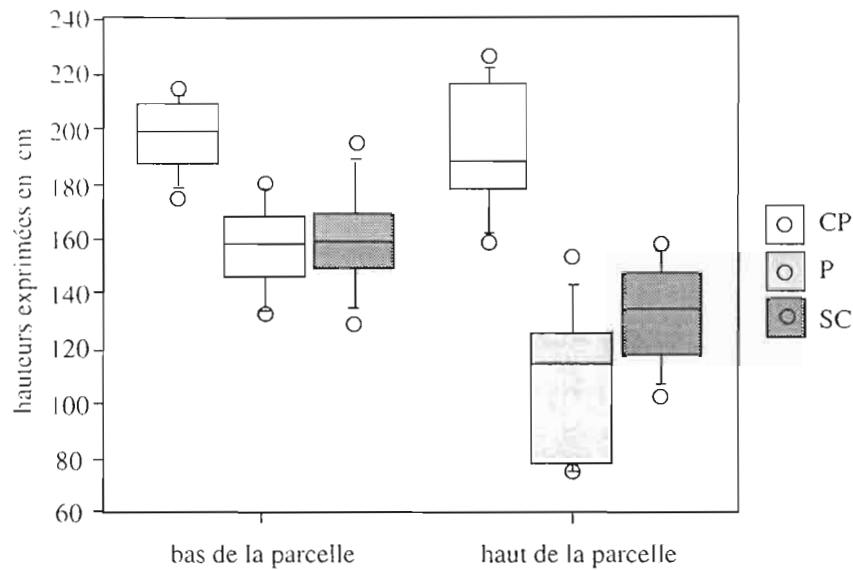


Figure 13 - Hauteurs des maïs au stade épisaison. CP apport de compost et de phosphore ; P phosphore seul ; SC scorie et phosphore.

En effet le maïs présente une croissance en hauteur plus importante avec un apport de compost. Par ailleurs, la différence de croissance entre les traitements P et SC est faible. Cependant, pour ces traitements les hauteurs moyennes sont de 160 cm en bas de la parcelle et comprises entre 120 cm et 130 cm en haut de la parcelle.

IV - DISCUSSION

Ces différentes méthodes permettent de décrire l'état structural et physique du sol d'une part, d'identifier *in situ* les modifications importantes inhérentes aux travaux du sol et aux apports d'amendements minéraux et organiques d'autre part.

Sous culture, les caractéristiques physiques des volumes structuraux observés marquent une nette différence par rapport à leurs états initiaux. Cependant l'enracinement et la croissance du maïs ne semble pas étroitement lié à ces caractéristiques physiques.

4.1.1 - Evolution des caractéristiques physiques des volumes structuraux : conséquences sur l'enracinement et la croissance du maïs

Le gradient granulométrique présent sur la parcelle permet difficilement de comparer les deux faciès de sols. Les différences granulométriques observées, en particulier la teneur en sables grossiers, peuvent influencer la mesure de la pénétrométrie. Les valeurs obtenues indiqueraient une

*compacité*¹ pour le haut de la parcelle et une *dureté*² des matériaux pour le bas. Les différences observées sur l'enracinement du maïs montrent qu'il n'y a pas de relation directe entre les valeurs pénétrométriques et les densités racinaires entre le haut et le bas de la parcelle notamment pour les volumes *Pa Gr (Sa)* et *Pa (Gr sa)* (profondeur a). Par contre, les valeurs pénétrométriques moyennes des volumes *MF Sa* et *MF (Sa)* (profondeur c) qui pourraient limiter l'enracinement des maïs suggèrent des seuils pénétrométriques variables en fonction de la granulométrie :

- pour les volumes, à teneur en limons fins supérieure 35 % , un seuil inférieur à 20 mm,
- pour les volumes, à teneur en sables grossiers supérieure à 40 %, un seuil supérieur à 20 mm.

Poss (1983) indique en effet que dans le cas des sols ferrallitiques à horizons compacts, la charge en éléments grossiers permet le maintien d'une certaine porosité et confère aux horizons gravillonnaires des propriétés physiques plus favorables à l'enracinement des végétaux.

Par ailleurs, l'augmentation des valeurs moyennes de compacité du volume *MF Sa* en haut de la parcelle serait en partie liée à la diminution de la mésoporosité grossière. En bas de la parcelle, le maintien de la compacité du volume *MF (Sa)* serait dû à une moindre diminution de cette classe de pores.

Les caractéristiques hydrauliques ne sont pas étroitement liées à la compacité des volumes structuraux (cf. paragraphes 3.3 et 3.4). En effet, les écoulements gravitaires de l'eau et la sorptivité capillaire dans les volumes *Pa Gr Sa* et *MF Sa* sont très différents bien que leurs valeurs de compacité soient proches. La diminution de la macroporosité et de la mésoporosité influence donc les caractéristiques hydrauliques des volumes structuraux. Cette diminution de porosité peut favoriser un engorgement local et contribuer à augmenter la biodisponibilité du nickel et du manganèse sur ces sols (Becquer *et al.* 1995, 1997 ; L'huillier et Edighoffer, 1996). La présence de silicates de magnésium nickélifères (Quantin *et al.*, 1997) dans ces matériaux d'apports et les modifications de circulation de l'eau dans ces sols pourrait être alors des facteurs déterminant sur la biodisponibilité du nickel.

¹ La diminution de la macroporosité et de la conductivité hydraulique indiquent un tassement des matériaux à charge faible en éléments grossiers. Les valeurs pénétrométriques obtenues exprimeraient une sensibilité au tassement ou à la compacité de ces matériaux.

² La diminution de la macroporosité mais le maintien de la conductivité hydraulique n'indiquent pas une sensibilité au tassement des matériaux à charge élevée en élément grossier. Les valeurs pénétrométriques obtenues exprimeraient une rigidité ou une dureté de ces matériaux.

4.1.2 - Effet des traitements sur les caractéristiques physiques des volumes structuraux : conséquences sur l'enracinement et la croissance du maïs

Les analyses comparatives montrent que les différents traitements ont peu contribué à modifier les caractéristiques physiques des sols de la parcelle en particulier l'apport de compost. Mais elles confirment l'effet du travail du sol (effet du cycle) sur ces caractéristiques physiques des volumes structuraux initiaux.

L'incorporation dans le sol de nombreux débris organiques lors du défrichage et l'apport de 20 t/ha de compost (pour le traitement PC) ont sensiblement modifié la vitesse d'écoulement. Par contre, l'effet du travail du sol indique une forte diminution des vitesses d'écoulement de l'eau dans le sol du haut et un maintien de l'infiltration dans celui du bas de la parcelle. Ces différences de comportement sont liées à la nature des matériaux et à l'évolution de la matière organique au cours des cycles culturaux.

Cependant, le traitement PC montre un effet positif sur la croissance du maïs (paragraphe 3.5.2). Les traitements P4 et SC n'expriment pas de différence significative hormis entre le haut et le bas de la parcelle. Cette différence de croissance du maïs entre les traitements P4 SC et PC serait due à l'absorption de nickel et de manganèse par la plante (L'huillier, 1994).

L'analyse de situation *in situ* appliquée aux observations morphologiques, aux données de porosité, de pénétrométrie et sur les essais d'infiltration (flux matriciel) permet de mettre en évidence la part effective des traitements et du travail du sol sur les modifications du comportement physique des sols. En effet, quels que soient les traitements appliqués aux sols, les variations concomitantes de compacité, de porosité et de vitesse d'infiltration soulignent l'effet du travail du sol aux cours des deux cycles culturaux observés.

Les variations d'enracinement et de croissance du maïs entre les différents traitements ne peuvent pas être une conséquence directe des modifications physiques des volumes structuraux. L'étude des caractéristiques minérales et chimiques (Becquer et *al*, travaux en cours) permettra de préciser les éléments intervenant sur la croissance du maïs : biodisponibilité des métaux de transition, effet de la matière organique sur la rétention du phosphore par le sol ...

V- CONCLUSION

Cette approche montre que les deux faciès de sol ferrallitique ferritique de glaci, qui présentent un gradient textural marqué, ont cependant des caractéristiques hydrauliques initiales sensiblement identiques. Lorsqu'ils sont soumis à un même travail du sol, ils expriment des comportements physiques et morphologiques différents après deux cycles culturaux. Le faciès à

texture plutôt limoneuse, à faible charge en éléments grossiers (gravillons), marque une sensibilité plus forte au tassement que celui à texture sablo-limoneuse et à charge élevée en éléments grossiers. Par ailleurs, la variabilité de l'enracinement et de la croissance du maïs ne semble pas être une conséquence directe de cette sensibilité au tassement de ces types de sol. Cette variabilité serait plutôt liée aux types d'apports organiques et minéraux, en particulier à l'apport de 4 t/ha de phosphore et de 20 t/ha de compost qui montre un effet positif sur la croissance et l'enracinement du maïs. Les résultats du troisième cycle de culture, en cours d'analyse, permettront de confirmer ou infirmer ces observations.

BIBLIOGRAPHIE

Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar T. et Horton R., 1991 - Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 : 467-470

Becquer T., Bourdon E. et Pétard J., 1995 - Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 321, Série IIa, 7 : 585-592.

Becquer T., Bourdon E. et L'Huillier, L. 1997 - Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie. *Deuxième Conférence Internationale sur l'Ecologie des Milieux Serpentiniques*, Nouméa, 31 juillet - 5 août 1995.

Blic Ph. de, 1990 - L'examen du profil cultural : un outil pour mieux comprendre le comportement du sol soumis à des travaux aratoires. In : *Organic matter management and tillage in humid and subhumid Africa. IBSRAM Proceedings*, 10 : 349-351.

Bonzon. B, Dupont S., Bourdon E., Becquer T., L'huillier L. et Laubreaux P., 1997 - Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Evaluation des effets de doses croissantes de phosphate sur une culture de maïs installée sur un faciès ferritique de glaci. Nouméa : ORSTOM. *Conv. Sci. Vie : Agropédol.*, 36 ; 50 p., multigr.

Bourdon E., Becquer T., Edighoffer S. et Bonzon B., 1994 - Evaluation de la compacité des sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie (relation avec l'enracinement). Nouméa : ORSTOM. *Conv. Sci. Vie : Agropédol.*, 26 ; 32 p., multigr.

Bourdon E. et Becquer T., 1992 a - Etude préliminaire de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Grande Terre : zone de La Coulée et de la Lembi. Nouméa : ORSTOM. *Conv. Sci. Vie : Agropédol.*, 12 ; 19 p., multigr.

Bourdon E. et Becquer T., 1992 b - Etude de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Grande Terre : zone de La Coulée et de la Lembi. Caractérisation physico-chimique des sols. Nouméa : ORSTOM. *Conv. Sci. Vie : Agropédol.*, 16 ; 88 p., multigr.

Bourdon E., Becquer T. et Tortelier M.C., 1993 - Mise en valeur des sols des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Etude de l'organisation des sols : bassin amont de la rivière des Pirogues. Nouméa : ORSTOM. *Conv. Sci. Vie : Agropédol.*, 19 ; 72 p., multigr.

Brutseart W., 1979 - Universal constants for scaling the exponential soil water diffusivity. *Water Resour. Res.*, 15 : 481-483.

Clothier B. E. et White I., 1981 - Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 45, 241-245.

Duwig C., Becquer T., Bourdon E., Nigote W. et Taputuarai L., 1996 - Suivi hydro-chimique sous différents systèmes de culture à Maré. *Doc. Sci. Tch.*, III 1, ORSTOM- Nouméa, 57 p.

C.P.C.S., 1967 - Classification des sols. Grignon. 87 p.

Fairbridge R.W. et Finel C.W., 1979 - The encyclopedia of soil science. Dowden Hutchinson Ross Stroudsburg, U.S.A.

Gardner W.R., 1958 - Some steady - state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85 : 228-232.

Hénin S., Gras R. et Monnier G., 1969 - Le profil cultural. Masson, Paris, 2^e édition.

Jaffré T., 1980 - Végétation des roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. *Trav. et Doc.*, 124. ORSTOM-Paris, 275 p.

Latham M., Quantin P. et Aubert G., 1978 - Etude des sols de la Nouvelle-Calédonie. Nouvel essai sur la classification, la caractérisation, la pédogenèse et les aptitudes des sols de Nouvelle-Calédonie. *Notice explicative*, 78. ORSTOM-Paris, 138 p.

L'Huillier L., 1994 - Biodisponibilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie. Effets toxiques de Ni sur le développement et la physiologie du maïs. Thèse Doc. Université de Montpellier II, 249 p.

L'Huillier L. et Edighoffer S., 1996 - Extractability of nickel and its concentration in cultivated plants in Ni rich ultramafic soils of New Caledonia. *Plant and soil*, 186 : 255 -264 .

Manichon H., 1982 - L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. *Science du sol*, 3 : 203-219.

Moreau R. et Nagumo F., 1995 - Le pénétromètre et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés. Deuxième réunion du groupe thématique structure et fertilité des sols tropicaux. Montpellier, 12 - 13 septembre 1994.

Perret S., 1993 - Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. facteurs d'évolution des horizons culturaux, implication agronomiques et écologiques. Thèse Doct. ENSA de Montpellier, 279 p + annexes.

Perroux K.M et White I., 1988 - Design for disk permeameters. Soil Sci. Soc. Am. J., 52 : 1205-1215.

Poss R. 1983 - La modélisation de la porosité des horizons gravillonnaires à partir des lois d'assemblage. Cah. ORSTOM., sér. Pédol., vol XX, (2) : 147-153.

Quantin P., Bourdon E. et Becquer, T. 1997 - Minéralogie et contraintes édaphiques des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. Deuxième Conférence Internationale sur l'Ecologie des Milieux Serpentiniques, Nouméa, 31 juillet - 5 août 1995.

Reichardt K. D., Nielsen D. R. et Biggar J. W., 1972 - Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36 : 240-245.

R.P.F., 1990 - Référenciel Pédologique Français. 3ème proposition avril 1990. INRA.

Scotter D.R., Clothier B.E et Harper E.R, 1982 - Measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity using twin rings. Aust. J. Soil Res. Vol. 20 : 295-304.

Tardieu F. et 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.

Tessier D., 1980 - Sur la signification de la limite de retrait des matériaux argileux. C.R. Académie de Sciences. T. 291, septembre 1980, série D : 377-380.

Thony J.L, Vachaud G., Clothier B.E, Angulo-Jaramillo R., 1991- Field measurement of the hydraulic properties of soil. Soil. Techno., 4 : 111-123

Vauclin M. et Chopart J-L., 1992 - L'infiltrométrie multidisques pour la détermination *in situ* des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-Ivoire. Agronomie Tropicale, 46, (4) : 1-11.

Vauclin M. et Haverkamp R., 1985 - Solution quasi analytique de l'équation d'absorption de l'eau par le sol non saturé. II. Problème inverse : détermination de la diffusibilité capillaire. Agronomie, 5 : 607-611.

White I. et Sully J., 1987 - Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. Water Resour. Res. 23 : 1514-1522.

Wooding R. A., 1968 - Steady infiltration from shallow circular pond. Water Resour. Res. 4 : 1259-1273.

ANNEXE I : MATÉRIEL ET MÉTHODE

**I a - Relations de base entre les différentes phases du sol
(solide, liquide et gazeuse)**

Relations entre volume et masse des phases du sol ¹

. Notations

Tout matériau est constitué d'une phase solide représentée par des unités diverses (particules minérales ou organiques, agrégats élémentaires...) dont l'assemblage délimite un espace partiellement occupé par des fluides (solution et air du sol). Deux modes de description sont possibles : une description massique et une description volumique.

Les symboles suivants sont utilisés pour décrire les trois phases :

V : volume

W : masse

γ : masse volumique

Les indices a, w et s indiquent que les notations concernent respectivement l'air, l'eau et le solide. L'indice t indique que le paramètre se rapporte à toutes les phases (échantillon complet), l'indice v indique que le paramètre se rapporte au vide ménagé entre les particules solides (porosité).

. Relation de base : approche pondérale et volumique

Des relations de bases sont établies à partir de ce modèle :

ainsi, le volume totale peut s'écrire : $V_t = V_a + V_w + V_s$

la masse totale peut s'écrire : $W_t = W_a + W_w + W_s$

on admet généralement que W_a est négligeable

on peut définir le volume des vides : $V_v = V_a + V_w$

A partir de ces données, on peut définir d'autres paramètres :

la masse volumique apparente sèche ou densité apparente sèche : $\gamma_d = W_s / V_t$

la masse volumique du solide ou densité réelle (poids spécifique) : $\gamma_s = W_s / V_s$

¹ d'après la thèse de PERRET S., 1993 - " Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. facteurs d'évolution des horizons culturaux, implication agronomiques et écologiques". CIRAD, n°01/93 : 54-55.

l'indice des vides : $e = V_v / V_s$ (1)

l'indice d'eau : $\vartheta = V_w / V_s$ (2)

n étant la porosité totale : $n = V_v / V_t$

Enfin deux expressions de l'humidité du sol :

la teneur en eau pondérale : $W = W_w / W_s$

la teneur en eau volumique : $\theta = V_w / V_t$

pour l'eau du sol on admet que : $\gamma_w = 1$

Citons quelques relations déduites des précédentes :

$$W = \theta / \gamma_d$$

$$\theta = \vartheta / (e + 1)$$

$$\gamma_s = \vartheta / W$$

$$e = (\gamma_s / \gamma_d) - 1 \quad (3)$$

Relation entre teneur en eau volumique et porosité ²

La loi de JURIN a montré que dans un sol la succion matricielle est inversement proportionnelle à la taille des pores, assimilés à des tubes capillaires.

$$2\gamma \cos\theta / r = h \cdot \rho_w \cdot g$$

où γ est la tension superficielle de l'eau soit $72 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ à 20°C

$\cos\theta$ (égal à 1) est l'angle de raccordement de l'eau à la paroi interne du tube capillaire

r le rayon du tube capillaire

h la hauteur d'eau

ρ_w masse volumique de l'eau

g l'accélération de la pesanteur

² d'après la thèse de PERRET S.

L'énergie qu'il faut appliquer pour extraire de l'eau d'une gamme de pores (à partir d'un rayon) peut être évalué par une équivalence à une hauteur de colonne d'eau (pF). Le rayon de pore équivalent est calculé en exprimant le potentiel d'eau par la valeur de succion nécessaire pour extraire l'eau qui lui correspond soit :

$$r = 2\gamma \cos\theta / h \cdot \rho_w \cdot g \quad (4)$$

A partir des relations (1) (2) (3) il est possible de déterminer l'indice des vides, d'eau et d'air pour chaque mesure de pF. La relation (4) permet de relier ces indices aux différentes classes de pores en fonction de la pression exercée.

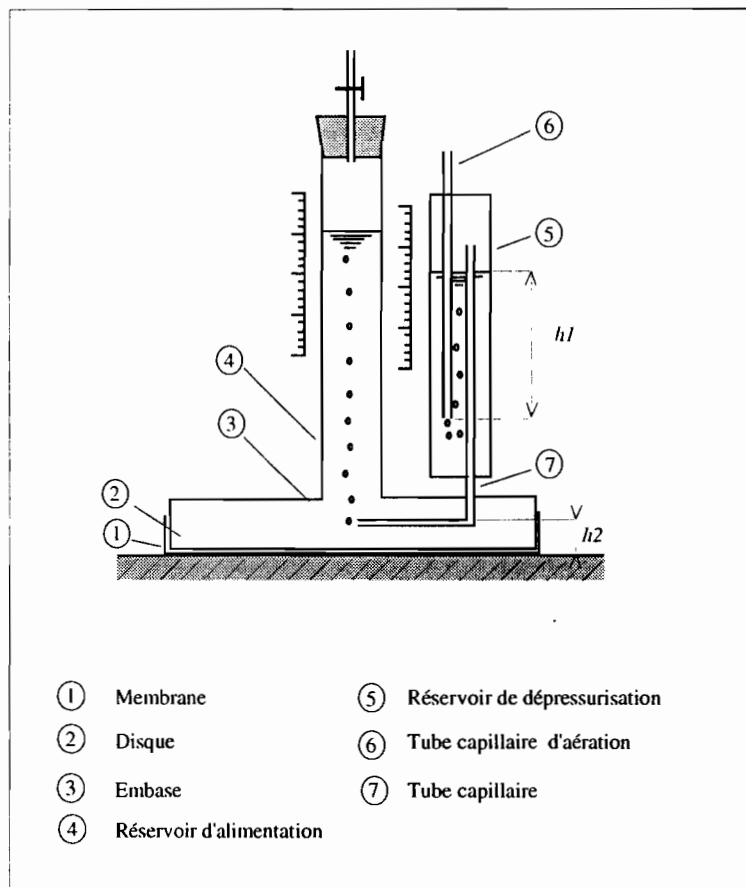
I b - Matériel et mesure de l'état énergétique de l'eau dans le sol

L'infiltromètre multidisque

. Dispositif¹

Ce dispositif expérimental, conçu d'après Clothier et White (1981) et Perroux et White (1988), a été mis au point par le groupe Hydrologie de l'Institut de Mécanique de Grenoble (Thony, 1991). Il permet de réaliser *in situ* des essais d'infiltration sous charge négative constante. Le dispositif comporte trois disques, respectivement de 250 mm, 80 mm et 48,5 mm de diamètre, qui déterminent l'aire de la surface de contact au sol.

L'infiltromètre se compose d'une embase (3) sur laquelle est emboîté un disque (2). Sous celui-ci, une membrane (1) en Nylon (maille de 20 microns) est tendue et assure le contact avec le sol.



Ce dispositif est surmonté par un réservoir d'alimentation (4) gradué qui peut être hermétiquement fermé à son sommet par un bouchon dans lequel est inséré un petit tube muni d'un tuyau souple et d'une pince de Mohr.

¹ Extrait de la notice technique d'utilisation de l'infiltromètre à disque

Cet ensemble est complété par un réservoir latéral de dépressurisation (5) partiellement rempli d'eau et constitué d'un tube gradué dans lequel peut coulisser un capillaire d'aération (6). Un deuxième capillaire assure la communication entre le réservoir de dépressurisation et l'embase (7). Enfin l'étanchéité de l'appareil est assurée par des joints toriques.

. Principe

Si h_1 est la hauteur d'eau surmontant l'extrémité du tube (6), h_2 la différence de niveau entre l'extrémité basse du tube (7) et le plan constitué par la membrane (2), la pression de l'eau h_0 exprimée en hauteur d'eau par rapport à la pression atmosphérique est, au niveau de la membrane :

$$h_0 = h_2 - h_1.$$

On observe que h_0 est négatif lorsque h_1 est supérieur à h_2 . Cette valeur dépend du positionnement du tube (6) et détermine la succion imposée pour un essai d'infiltration donné. Ce dispositif constitue un vase de Mariotte à charge constante, indépendante du niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation.

L'appareil autorise des valeurs h_0 comprises entre 0 (succion nulle) et 200 mm (équivalent à 19,6 millibars ou pF 1,3).

État énergétique de l'eau dans le sol

. Notation

L'état d'arrangement des constituants du sol (particules minérales ou organiques, agrégats élémentaires...) délimite un espace partiellement occupé par des fluides (solution et air du sol). Cette espace définit également des états poraux. La circulation de l'eau dans le sol est soumise à des forces de succion matricielle inversement proportionnelle à la taille des pores et assimilés à des tubes capillaires (Loi de Jurin). L'infiltromètre, sous charge négative, donne accès à deux paramètres essentiels du comportement rhéologique de l'eau dans le sol :

- la conductivité hydraulique K

- la sorptivité capillaire S

. Approche du flux d'infiltration (Vauclin et Chopart, 1992) ²

² Extrait de Vauclin. M et Chopart J - L., 1992 (cf. bibliographie)

Le flux d'infiltration émanant d'une surface circulaire de rayon r , alimentée en eau sous une pression effective h_0 (négative, nulle ou positive), tend vers un régime permanent dont la valeur est donnée par l'expression suivante (Wooding, 1968) :

$$Q = \pi r^2 K_0 + 4 \phi_0$$

où ϕ_0 est le potentiel de flux matriciel (Gardner, 1958) défini par :

$$\phi_0 = \int_{\theta}^{\theta^n} D(\theta) d\theta = \int_{h^n}^{h^0} K(h) dh$$

Dans ces équations, K_0 est la conductivité à la pression h_0 telle que $K_0 = K(h_0)$, D est la diffusivité capillaire qui dépend de la teneur en eau volumique θ . Les indices 0 et n correspondent aux conditions initiales et finales de chaque essai. Alors que le premier terme du membre de droite de l'équation représente la distribution gravitaire verticale à l'écoulement sous la surface d'apport, le second rend compte de l'effet de capillarité.

. méthode de calcul des données

La méthode utilisée pour dépouiller les données des essais d'infiltration avec un disque soumis à différentes pressions (h) est celle décrite par Duwig *et al.* (1996) d'après les travaux d'Ankeny *et al.* (1991).

L'équation de Wooding basée sur la relation $K(h)$ en exponentiel (K : conductivité hydraulique (en $m s^{-1}$) et h pression ou succion (en m) donne le flux d'infiltration Q en $m^3 s^{-1}$) :

$$Q = \pi r^2 K_0 + 4 \phi_0 \quad (1)$$

avec :

r : le rayon du disque de l'infiltromètre

ϕ_0 : le flux matriciel donné par l'équation

$$\phi_0 = \int_{\theta}^{\theta^n} D(\theta) d\theta = \int_{h^n}^{h^0} K(h) dh \quad (2)$$

On suppose de plus que :

$$K(h) / \phi(h) = \alpha \quad (3)$$

α : (en m^{-1}) est une constante

La mesure des flux pour deux succions différentes permet la détermination de

$$\alpha = \frac{\ln(Q(h_1)/Q(h_2))}{h_1 - h_2} \quad (4) \text{ grâce à l'équation (1) et (2)}$$

et donc :

$$K(h) = \frac{Q}{\pi + 4r/\alpha} \quad (5)$$

Pour ces essais, trois pressions différentes sont utilisées (-0.5 cm, -5 cm et -15 cm) qui permettent obtenir 4 valeurs de K_0 (Duwig *et al*, 1996) : $K(0.5)_{0.5-5}$, $K(5)_{0.5-5}$, $K(5)_{5-15}$ et $K(15)_{5-15}$. L'estimation d'un $K(5)$ moyen est calculé à partir d'un couple de pressions tel que $K(5) = (K(0.5)_{0.5-5} + K(5)_{5-15}) / 2$.

Ensuite, d'après la relation (2) et l'hypothèse que la conductivité suit une relation exponentielle en fonction de la pression, on obtient :

$$\phi_0 = \frac{b S_0^2}{\theta_0 - \theta_n} \quad (6)$$

où S_0 est la sorptivité capillaire ;

θ_0 et θ_n est la teneur en eau du sol initiale et finale ;

b un paramètre dont la valeur pour les sols ferrallitiques est égale à 0,55 (Vauclin et Chopart, 1992).

Avec l'équation (1) qui nous donne ϕ_0 , on peut donc déterminer S_0

I c - Protocole d'observations, de mesures et de prélèvements

Introduction

Pour cette étude, deux observations sont réalisées par cycle cultural. Elles sont accompagnées par des mesures physiques tant sur le terrain (infiltrométrie, pénétrométrie) qu'au laboratoire (pF, granulométrie, densité, humidité). Cette note présente dans un premier temps le dispositif d'observation des profils culturaux et dans un second la chronologie des interventions que nous sommes amenés à faire sur le terrain.

Présentation du dispositif d'observation des profils culturaux (Fig. 14)

Le nombre totale d'observations est de 12 par cycle cultural. Ces observations se répartissent sur les parcelles et les sous-parcelles selon les traitements définis par B. Bonzon et T. Becquer pour le protocole d'expérimentation. Elles sont positionnées sur les bandes prévues pour le suivi de l'évolution de la lixiviation et des propriétés physiques.

En début de cycle (stade 5-6 feuilles), 6 observations sont réalisées sur 6 sous-parcelles et se répartissent, selon les traitements, de la façon suivante :

- 3 observations sur les sous-parcelles du haut de la parcelle et pour les traitements P4+S20, P4, P4+C20,
- 3 observations sur les sous-parcelles du bas de la parcelle et pour les traitements P4+C20, P4, P4+S20.

En fin de cycle, ces observations sont répétées sur les mêmes sous-parcelles. Par ailleurs, l'emplacement de ces fosses est déterminé de telle manière que le sol a reçu en principe la même quantité d'eau au lieu des observations et pendant toute la durée d'un cycle cultural.

réalisation technique des observations et mesures sur le terrain

Descriptif des opérations

Chaque observation est réalisée dans une fosse de 110 cm par 80 cm et d'une profondeur de 50 cm. L'ensemble de la parois à observée est quadrillée selon une maille de 10 cm par 5 cm. A la suite de ces travaux, la **première opération** débute:

- dans un premier temps, par une description fine de l'état structural du sol,
- dans un deuxième temps, les différents volumes constituant le profil cultural sont mesurés et reportés sur un croquis,
- dans un troisième temps, un comptage des racines est réalisé sur chaque maille du quadrillage et sur l'ensemble du profil. Les points d'impact racinaire, ainsi comptés, sont reportés sur le croquis précédent.

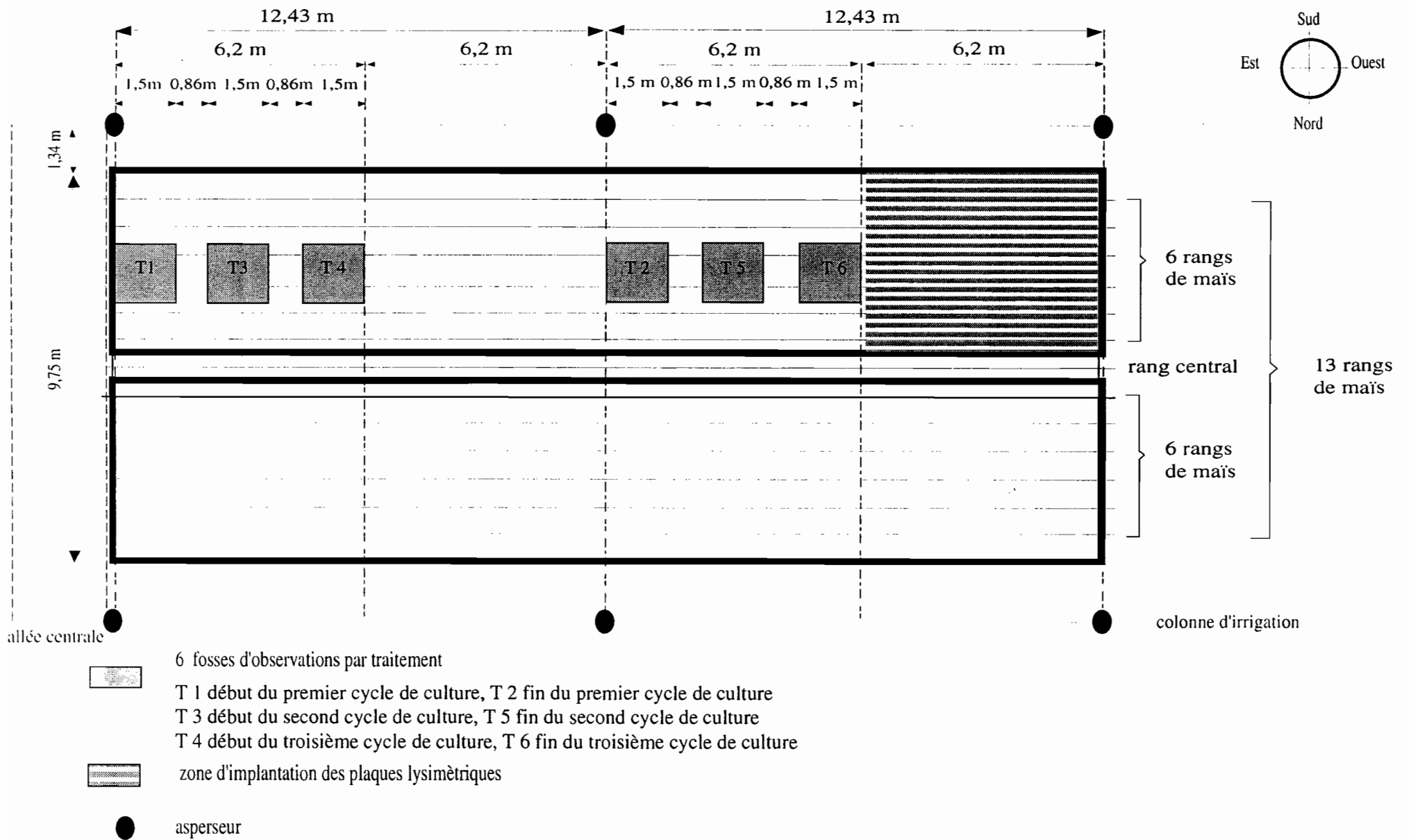


Figure 14 - Dispositif d'observation des profils culturaux sur une sous parcelle

La **deuxième opération** consiste à effectuer deux types de mesures physiques sur chaque fosse :

- la première à mesurer, selon le plan de carroyage et sur l'ensemble de la parois observée, le degré de compacité du sol à l'aide d'un pénétromètre de poche à aiguille cônica de type Yamanaka.

- la seconde mesure la conductivité hydraulique du sol par un infiltromètre. Cette mesure se fait en surface, à 20 cm et 35 cm avec un type d'anneau soumis à trois succions différentes. Pour chaque profondeur elle sera répétée 3 fois pour chaque pression.

La **troisième opération** consiste à échantillonner, sur chaque profil observé, le sol de la façon suivante :

- à chaque mesure de conductivité hydraulique deux prises de terre sont réalisées (l'une pour apprécier l'état d'humidité initiale du sol et l'autre l'état d'humidité finale de celui-ci après infiltration),

- six prises de terre au cylindre pour mesurer les densités apparentes et réelles par volume de sol rencontré et par profil,

- deux prises de terre (la première comprise entre 0 et 20 cm, la seconde entre 20 et 40 cm) pour suivre l'évolution des caractéristiques chimiques et physiques des sols des parcelles d'expérimentation.

Enfin sur chaque site d'observation et par traitement, la hauteur de dix plants de maïs et leur nombre de feuilles sont mesurés puis ces plants sont prélevés et analysés. A la fin du premier cycle, cette opération sera répétée.

Itinéraire technique des opérations

S'agissant d'observations à caractère destructif nous procédons de la façon suivante pour réaliser ces opérations :

- les fosses sont creusées et la terre extraite est mise sur une bâche à l'opposé de la parois à observer. Au préalable les pieds de maïs sont mesurés, coupés et ensachés. L'entrée dans les sous-parcelles s'effectue selon le plan du dispositif d'observation,

- les mesures pénétrométriques et d'infiltration sont réalisées et suivies des descriptions des profils culturaux,

- l'échantillonnage pour les analyses chimiques et physiques est suivi de la fermeture des fosses d'observation.

ANNEXE II : ANALYSE DES DONNÉES

II a - Analyse de variance pour les différentes fractions granulométriques par profondeurs (a, c), entre le haut (h) et le bas (b) de la parcelle

argile	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
h-b	1	20,280	6,979	,0114
a-c	1	16,101	5,541	,0231
h-b * a-c	1	19,177	6,600	,0137
résidus	44	2,906		

limon fin	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
h-b	1	555,424	27,040	<,0001
a-c	1	675,000	32,861	<,0001
h-b * a-c	1	412,310	20,072	<,0001
résidus	44	20,541		

limon grossier	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
h-b	1	161,113	48,730	<,0001
a-c	1	2,530	,765	,3865
h-b * a-c	1	46,966	14,205	,0005
résidus	44	3,306		

sable fin	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
h-b	1	5,782	,467	,4980
a-c	1	,980	,079	,7798
h-b * a-c	1	1,015	,082	,7760
résidus	44	12,385		

sable grossier	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
h-b	1	1715,303	56,825	<,0001
a-c	1	691,753	22,916	<,0001
h-b * a-c	1	828,673	27,452	<,0001
résidus	44	30,186		

II b - Tableau d'analyse de variance de "l'effet traitement et cycle" sur le flux matriciel

	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
traitement	3	3000,312	30,414	<,0001
profondeur	1	80,852	,820	,3685
traitement * profondeur	3	1029	10,434	<,0001
h-b	1	,752	7,624E-3	,9307
traitement * h-b	3	235,145	2,384	,0769
profondeur * h-b	1	115,052	1,166	,2840
traitement * profondeur * h-b	3	262,772	2,664	0,548
résidus	68	98,648		

	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
cycle	2	4657,216	43,733	<,0001
profondeur	1	1,701	,016	,8998
cycle * profondeur	2	1376,883	12,929	<,0001
h-b	1	2,335	,022	,8827
cycle * h-b	2	62,522	,587	,5586
profondeur * h-b	1	195,312	1,834	,1799
cycle * profondeur * h-b	2	214,879	2,018	,1404
résidus	72	106,493		

II c - Tableau d'analyse de variance de "l'effet traitement et cycle" sur la pénétrométrie

	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
traitement	3	99,417	5,181	,0015
profondeur	1	5038,049	262,541	<,0001
traitement * profondeur	3	115,057	5,996	,0005
h-b	1	2092,780	109,058	<,0001
traitement * h-b	3	141,300	7,363	<,0001
profondeur * h-b	1	47,302	2,465	,1167
traitement * profondeur * h-b	3	146,251	7,621	<,0001
résidus	1037	19,190		

	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
cycle	2	272,499	14,422	<,0001
profondeur	1	3609,760	191,046	<,0001
cycle * profondeur	2	228,862	12,113	<,0001
h-b	1	2013,036	106,540	<,0001
cycle * h-b	2	159,895	8,462	,0002
profondeur * h-b	1	108,955	5,766	,0165
cycle * profondeur * h-b	2	209,873	11,107	<,0001
résidus	1041	18,895		

II d - Tableau d'analyse de variance de " l'effet rang et inter-rang " sur la pénétrométrie

	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
traitement	2	6,834	,257	,7734
profondeur	1	2301,603	86,590	<,0001
traitement * profondeur	2	20,875	,785	,4567
r-inter	1	30,380	1,143	,2857
traitement * r-inter	2	32,100	1,208	,3001
profondeur * r-inter	1	,034	1,289E-3	,9714
traitement * profondeur * r-inter	2	7,763	,292	,7469
h-b	1	436,973	16,440	<0,001
traitement * h-b	2	16,435	,618	,5394
profondeur * h-b	1	4,852	,183	,6695
traitement * profondeur * h-b	2	34,170	1,286	,2777
r-inter * h-b	1	3,379	,127	,7216
traitement * r-inter * h-b	2	19,154	,721	,4871
profondeur * r-inter * h-b	1	13,237	,498	,4808
traitement * profondeur * r-inter * h-b	2	32,572	1,225	,2948
résidus	373	26,581		

II e - Tableau d'analyse de variance de " l'effet traitement " sur l'enracinement

	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
traitement	2	96,376	4,476	,0120
profondeur	1	1988,186	92,346	<,0001
traitement * profondeur	2	5,078	,236	,7900
r-inter	1	1321,863	61,397	<,0001
traitement * r-inter	2	26,903	1,250	,2878
profondeur * r-inter	1	523,423	24,312	<,0001
traitement * profondeur * r-inter	2	13,006	,604	,5471
h-b	1	183,539	8,525	,0037
traitement * h-b	2	69,732	3,239	,0403
profondeur * h-b	1	202,414	9,402	,0023
traitement * profondeur * h-b	2	146,001	6,781	,0013
r-inter * h-b	1	107,477	4,992	,0261
traitement * r-inter * h-b	2	108,962	5,061	,0068
profondeur * r-inter * h-b	1	3,977	,185	,6676
traitement * profondeur * r-inter * h-b	2	98,564	4,578	,0109
résidus	373	21,530		

II f - Tableau d'analyse de variance de l'effet traitement sur le développement végétatif du maïs : sur la hauteur (a), sur le nombre de feuilles (b)

a)	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
traitement	2	20843,317	52,927	<,0001
h-b	1	9601,350	24,380	<,0001
traitement * h-b	2	1911,350	4,853	,0115
résidus	54	393,813		
b)	DDL	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de P
traitement	1	22,317	16,949	<,0001
h-b	2	12,150	9,228	,0037
traitement * h-b	2	3,150	2,392	,1010
résidus	54	393,813		

