

Influence du travail du sol sur l'évolution physique d'un sol forestier ferrallitique après défrichage motorisé

Conséquence sur l'enracinement du maïs

A. Tamia ⁽¹⁾, R. Moreau ⁽¹⁾, M. Fortier ⁽²⁾ et G. Yoro ⁽³⁾

(1) : Laboratoire d'Étude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC), ORSTOM, B.P. 5045 - 911, Avenue Agropolis 34032 Montpellier CEDEX 01

(2) : Laboratoire d'agronomie UR-FCM CIRAD-CA, Avenue du Val de Montferrand - B.P. 5035 - 34032 Montpellier CEDEX 01.

(3) : IDEFOR- DCC, 01 B.P. 1827 Abidjan 01 République de Côte d'Ivoire

RÉSUMÉ

L'analyse du profil cultural, la résistance à la pénétration et la porosimétrie à mercure ont été utilisées pour préciser les modifications physiques d'un sol ferrallitique forestier de Basse Côte d'Ivoire, après un défrichage motorisé suivi d'une mise en culture avec ou sans travail du sol. Les conséquences sur l'enracinement du maïs ont été appréciées par le comptage et la cartographie des impacts racinaires.

La dégradation structurale avec la réduction de la porosité grossière (pores de diamètre équivalent > 6 µm) et l'augmentation de la résistance à la pénétration, qui affectent le sol cultivé sans labour, sont associées à un faible développement racinaire du maïs. Le travail du sol assure le maintien des caractères physiques favorables à l'enracinement, bien que des volumes compacts massifs liés à des phénomènes de tassement soient présents dans la couche labourée. Une corrélation significative entre les valeurs de résistance à la pénétration et de densité racinaire a pu être établie.

Mots clés

Sol ferrallitique, défrichage, labour, profil cultural, résistance à la pénétration, porosité, enracinement, maïs.

SUMMARY

INFLUENCE OF TILLAGE ON SOIL PHYSICAL CHARACTERISTICS AND ROOT DEVELOPMENT OF MAIZE IN A FERRALLITIC SOIL AFTER MECHANIZED FOREST CLEARING.

Influence of tillage on soil physical characteristics and root development of maize in a ferrallitic soil after mechanized forest clearing.

The physical characteristics of soil were compared in three different situations including a forest plot as a check situation (F) and two cultivated situations cleared with bulldozer four years prior to the study, in Southern Ivory Coast. The management conditions were zero-tillage for one situation (MS) and deep tillage with ridge making for the other one (ML); with crop succession including maize (Zea mays) and groundnut (Arachis hypogea) every year.

Analysis and mapping of soil profile and maize root development were carried out in the field at the time of harvesting. Separate homogeneous morphological units (UMH) were identified and characterized. Penetration resistance was measured horizontally with a conical



pocket penetrometer when soil water condition was around field capacity. Mercury intrusion was measured on oven dried samples (2 - 3 cm³) taken from each UMH type.

Soil profiles showed a clear differentiation in the morpho-structural characteristics and distribution of UMHs and in root development of maize according to the different studied situations. The mechanical penetration resistance (RMP) fitted well with the structural features of UMH and with the root density of maize. RMP markedly increased in the top of the no-till soil (MS) with degraded structure and was much lower in the Ap horizons of the ploughed soil (ML). Root density (roots/dm²) was closely related to RMP (kg/cm²). The total porosity decreased in the UMHs with degraded structure as the reduction in the coarse porosity (volume of pore > 6 µm in equivalent diameter) was greater than the increase in the fine porosity.

No-till soil (MS) showed the worst physical properties with the poorest root development of maize. Deep tillage (ML) improved root density and depth because of a greater volume of loose soil at the upper part though big compacted clods were unfavourable to root growing. Tillage turned out to be better than no-tillage as soil management practice for the soil type and the cropping system which were studied on the fourth year of cultivation.

Key-words

Ferrallitic soil, clearing, tillage, cropping profile, penetration resistance, porosity, root development, maize.

RESUMEN

INFLUENZA DEL LABOREO SOBRE LA EVOLUCIÓN FÍSICA DE UN SUELO FERRALÍTICO FORESTAL DESPUÉS DE UN DESMONTE MOTORIZADO. CONSECUENCIA SOBRE EL ENRAIZAMIENTO DEL MAÍZ

El análisis del perfil cultural, la resistencia a la penetración y la porometría con mercurio fueron usados para estimar las modificaciones físicas de un suelo ferralítico forestal de Baja Costa de Marfil, después de un desmonte motorizado seguido de un cultivo sin o con laboreo. Las consecuencias sobre el enraizamiento del maíz fueron apreciadas por conteo y cartografía de los puntos de raíces. La degradación estructural evaluada por la reducción de la porosidad gruesa (poros de diámetros equivalentes > 6µm) y el aumento de la resistencia a la penetración, que afectan el suelo cultivado sin laboreo están asociados a un pequeño desarrollo de las raíces del maíz. El laboreo asegura el mantenimiento de los caracteres físicos favorables al enraizamiento, aunque volúmenes compactos y masivos ligados a fenómenos de compactación están presentes en la capa laborada. Se estableció una correlación significativa entre los valores de resistencia a la penetración y de densidad de raíces fue establecida.

Palabras claves

Suelo ferralítico, desmonte, laboreo, perfil cultural, resistencia a la penetración, porosidad, enraizamiento, maíz.

Comme dans beaucoup de régions tropicales humides, l'extension des défrichements pour la mise en valeur agricole modifie profondément le milieu forestier de Basse Côte d'Ivoire. Si la végétation est la plus directement concernée, les modifications induites affectent également le sol et sa fertilité pour les cultures ultérieures.

Les perturbations du sol engendrées par les opérations pré-culturales (défrichement et préparation du sol) sont plus marquées lorsque le défrichement est réalisé au bulldozer (Blic et Moreau, 1979; Collinet et Valentin, 1979; Alègre *et al.*, 1986; Boka, 1986; Gnamba, 1986; Moreau, 1986; Zwieniecki et Newton, 1994; Marsili et Servadio, 1996). Ces perturbations affectent surtout les horizons supérieurs. Elles se caractérisent par la présence de microreliefs résultant de phénomènes de décapage, d'accumulation et de tassement dont l'intensité varie en fonction de l'état d'humidité du sol au moment de l'intervention (Yoro et Godo, 1990). Il a été montré, en Amazonie, que le tassement consécutif au défrichement motorisé de forêt est associé à une profonde modification des caractères de l'espace poral avec, comme conséquence, une réduction de l'activité microbiologique liée aux modifications de la dynamique des échanges gazeux et de l'écoulement de l'eau (Grimaldi *et al.*, 1993). Par ailleurs, la mise à nu ou l'insuffisance de couvert végétal et la baisse de l'activité biologique associées au jeu des alternances climatiques contribuent à la dégradation physique par destruction des agrégats et effondrement de la structure grumeleuse à la partie supérieure du sol (Martin, 1963; Oades, 1984; Grimaldi, 1986; Humbel, 1987).

Il apparaît, cependant, que l'importance des modifications physiques du sol et leurs conséquences sur le comportement des cultures restent mal connues et insuffisamment prises en considération pour le choix des modalités pratiques de mise en valeur des milieux forestiers tropicaux. Dans le cadre d'études portant sur l'influence des modes de défrichement et de mise en culture d'un sol forestier réalisées en Basse Côte d'Ivoire (Godo *et al.*, 1989), l'évolution des caractères morpho-structuraux du sol et le développement racinaire du maïs ont été récemment précisés pour différentes situations de culture (Tamia, 1997). Les résultats présentés dans cette note permettent de comparer l'influence du labour et celle de non travail du sol, après un défrichement motorisé réalisé quatre années auparavant.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le sol

L'étude est réalisée sur un sol ferrallitique forestier fortement désaturé (Godo *et al.*, 1989), dans la région de Bécédi au sud de la Côte d'Ivoire. La pluviométrie annuelle de 1600 mm

et de répartition bimodale caractérise un climat subéquatorial (De Boissezon, 1967). Le sol est développé sur schistes birimiens à filons de quartzites; ce qui lui confère un caractère graveleux variable (surtout graviers, plus rarement cailloux de quartzites et gravillons ferrugineux). Les caractères morphologiques du sol forestier sont schématisés à la figure 1(a).

Les traitements

L'étude s'appuie sur le dispositif mis en place en 1990, dans le cadre du projet IBSRAM (International Board for Soil Research and Management) sur les défrichements et la gestion des sols acides en Côte d'Ivoire (Godo *et al.*, 1989; Yoro et Godo, 1990). Le sol a été cultivé pendant quatre années consécutives après le défrichement d'une forêt secondaire sempervirente. Le défrichement a été réalisé au bulldozer (D8.R pesant 39 tonnes) en février - mars 1991, au cours de la grande saison sèche.

Deux cycles de culture : maïs (*Zea mays*) puis arachide (*Arachis hypogea*), se sont succédés chaque année sur les parcelles. L'étude réalisée la quatrième année compare deux parcelles défrichées contiguës et un témoin sous forêt (F). L'une des parcelles défrichées est cultivée sans travail du sol (MS) et l'autre est labourée puis billonnée à la houe (ML).

Sur la parcelle ML, le labour est réalisé une fois l'an, au mois d'avril, avant le semis du maïs. Pour des raisons pratiques, les labours ont été réalisés avec des moyens différents de 1991 à 1994 : disques lourds après le défrichement, en 1991; charrue bissoc travaillant sur environ 30 cm de profondeur, en 1993; labour à la houe, en 1992 et 1994.

Tous les travaux de semis, fertilisation, entretien et récolte sont réalisés manuellement. Les résidus de culture sont systématiquement laissés sur chaque parcelle, où ils se décomposent rapidement même lorsqu'ils ne sont pas enfouis par le labour. Malgré des apports d'engrais identiques, Tamia et Yoro (1994) ont constaté une différence des caractères de croissance et de rendement du maïs entre les parcelles sans travail du sol (MS) et les parcelles labourées (ML). En 1994, la production du maïs était de 2,83 t/ha pour MS contre 3,82 t/ha pour ML.

Les observations et déterminations

L'analyse des modifications morpho-structurales a été abordée à différents niveaux d'échelle selon une séquence d'observations stratifiées en considérant successivement la parcelle, le profil cultural, les unités morphologiques homogènes et les mottes (Manichon, 1982; Stengel, 1990; Ruellan et Dosso, 1993).

A l'échelle de la parcelle, l'observation portait sur l'aspect de la surface du sol. Deux types de surface ont été observés selon la couleur du sol : des zones localisées claires (brun jaunâtre), irrégulièrement réparties sur tout l'espace défriché, toujours associées à un faible développement du maïs, et des

zones sombres (brun sombre), représentant l'aspect le plus général, où le maïs avait un meilleur développement. Nous n'avons retenu, ici, que les zones sombres pour l'étude détaillée du profil cultural.

L'étude du profil cultural concerne les 40 premiers centimètres qui contiennent près de 90 % des racines du maïs (Yoro *et al.*, 1995). Un profil représentatif, choisi parmi trois profils observés et généralement comparables, a été étudié sur chaque parcelle. Les observations et les mesures sur le terrain ont été réalisées en fin de cycle de culture du maïs, dans la première quinzaine de septembre 1994 : c'est-à-dire quatre mois et demi après le labour à la houe et le billonnage qui ont précédé le semis.

Les investigations détaillées comprennent des caractères descriptifs (couleur, texture, structure, cohésion et porosité visible à l'oeil nu) permettant de délimiter des unités morphologiques homogènes (UMH). Les limites de ces UMH et la répartition des racines ont été cartographiées à l'aide d'une grille à maille carrée (2 cm x 2 cm), plaquée contre la paroi du profil étudié (Tardieu 1989). La résistance à la pénétration a été mesurée à l'aide d'un pénétromètre à cône de poche, type Yamanaka (*) DIK - 5551 Push - Cone, fonctionnant par pression manuelle. L'angle du cône du pénétromètre est de 25° 20' pour une hauteur de 4 cm. La résistance à la pénétration est exprimée en kg/cm². Dix mesures ont été effectuées horizontalement par unité morphologique homogène de sol, à une humidité du sol proche de la capacité au champ.

La porosimétrie à mercure, permettant d'évaluer le volume poral et la répartition des pores en fonction de leur diamètre équivalent d'accès au mercure, a été réalisée à l'aide d'un appareil Pore Sizer 9310, Micrométrics. La gamme de diamètre équivalent explorée par cet appareil s'étend de 400 à 0,006 µm. Ces mesures au porosimètre à mercure sont réalisées sur des échantillons non perturbés de 2 à 3 cm³, détachés des mottes de terre prélevées dans les unités morphologiques homogènes identifiées sur le terrain. En général, deux ou trois répétitions de la mesure ont été effectuées pour les horizons de surface, deux pour les horizons sous-jacents et une pour les horizons profonds.

RÉSULTATS

Les modifications de l'état physique du sol

Les caractères morphologiques et structuraux du sol montrent des différences importantes entre les profils observés sous forêt (F) et après quatre années de culture (MS et ML). On peut analyser les conséquences du défrichement et de la culture sans travail du sol en comparant MS à F, d'une part, et


l'effet du labour et du billonnage par rapport à la culture sans travail du sol en comparant ML à MS, d'autre part. La cartographie des UMH et celle des impacts racinaires permettent, en outre, d'apprécier les rapports entre les caractères de différenciation du profil cultural et le développement racinaire.


Le profil cultural


L'étude du profil cultural a permis d'identifier différentes unités morphologiques homogènes (UMH), variables selon le traitement appliqué. Une UMH peut correspondre ou non à un horizon continu. Les caractères distinctifs et la représentation cartographique des UMH identifiées dans les profils étudiés, ainsi que la cartographie des enracinements, sont présentés à la figure 1.


La légende de la figure 1 a été établie en privilégiant d'abord les caractères fondamentaux du matériel pédologique tels que la couleur, la texture, ainsi que le positionnement dans le profil. Ces caractères permettent d'établir, s'il y a lieu, des filiations entre les UMH du sol sous forêt et celles du sol sous


Légende la figure 1


 **A11** : brun à brun sombre (10 YR 4/3) ; feutrage racinaire ; sablo argileux ; grumeleux très net (5 - 10 mm) ; très boulant.


 **A12, A1(ms)** : brun jaunâtre sombre (10 YR 4/4) pour A12 et brun à brun sombre (10 YR 4/3) pour A1(ms) ; sablo-argileux, peu graveleux ; grumeleux net (5 - 10 mm), meuble et bouillant, pour A12 ; fragmentaire peu net à massif, plus cohérent, pour A1(ms).

 **A2, A2(ms)** : brun jaunâtre sombre (10 YR 4/6) ; sablo-argileux, 30 % d'éléments grossiers (EG) ; fragmentaire net, assez meuble, pour A2 ; fragmentaire peu net à massif, plus cohérent, pour A2(ms).

 **B2, B2(ms), B2(ml)** : brun (7.5 YR 5/4) pour B2 et brun vif (7.5 YR 4/4 à 4/6) pour B2(ms) et B2(ml) ; argilo-sableux, graveleux (EG > 50 %) et massif à fragmentaire peu net et anguleux, cohérent, pour les trois.

 **Ap1(ml)** : brun sombre (10 YR 3/3) ; sablo-argileux, graveleux (40 % de EG) ; terre fine et agrégats arrondis (jusqu'à 5 - 10 mm), très meuble et bouillant.

 **Ap2(ml)a** : brun sombre (10 YR 3/3) ; sablo-argileux, graveleux (50 % de EG) ; fragmentaire (terre fine et motte de type gamma), peu cohérent.

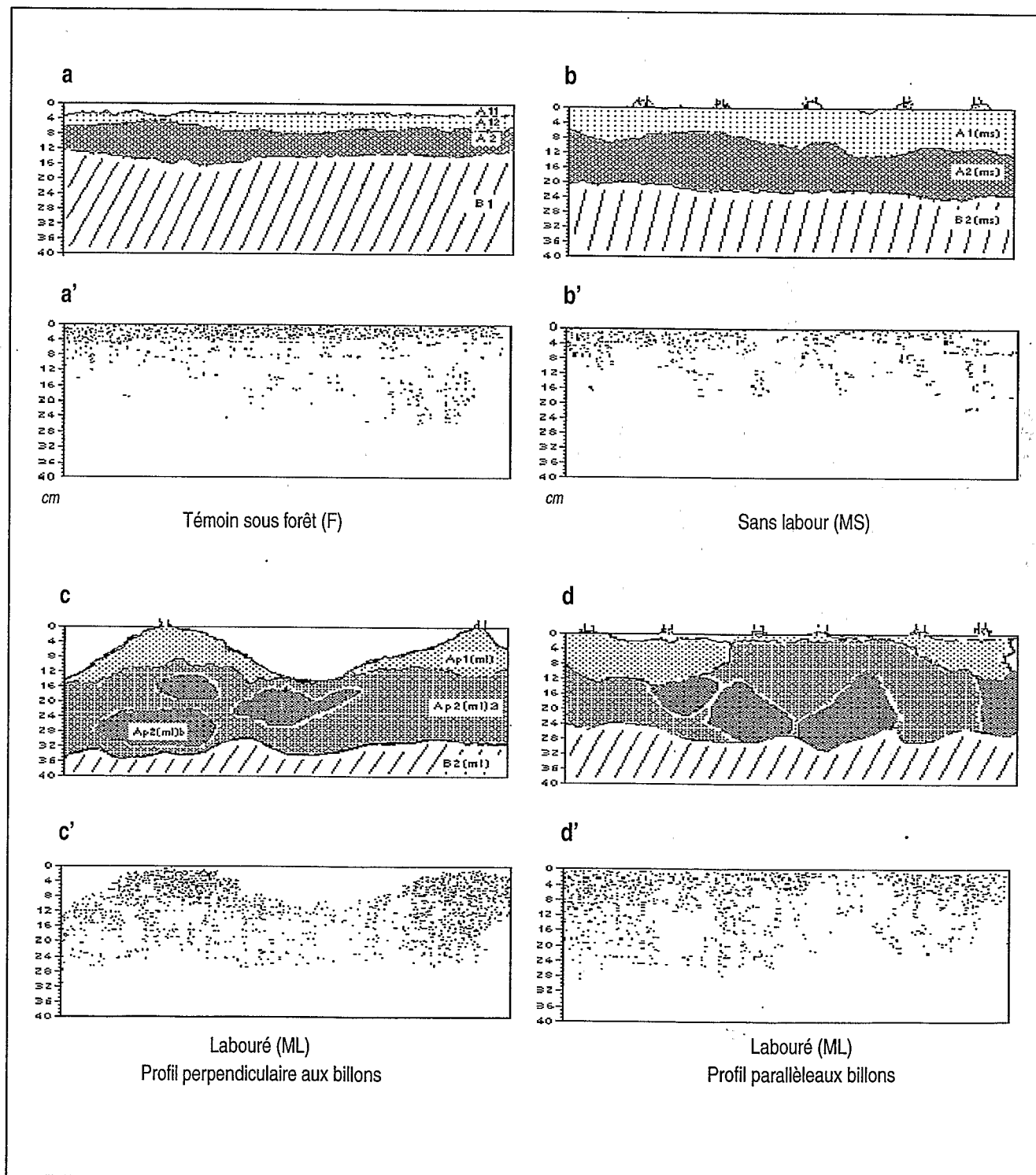
 **Ap2(ml)b** : brun jaunâtre sombre (10 YR 4/4) ; sablo-argileux avec inclusions sombres de matière organique, peu graveleux ; massif, motte de type delta, très cohérent.

 Limite de labour.

(*) : Le pénétromètre Yamanaka a fait l'objet de normalisation au Japon.

Figure 1 - Cartographie des unités morphologiques homogènes (a, b, c, d) et de la distribution des racines (a', b', c', d') pour les trois situations étudiées.

Figure 1 - Sketch of homogeneous morphological units (a, b, c and d) and root distribution (a', b', c' and d') in the three studied situations : forest (F), no-tillage (MS) and deep tillage (ML).



culture. Les caractères structuraux conduisent à un deuxième niveau de distinction entre ces unités; ils rendent plus précisément compte de modifications résultant de la mise en culture. Les UMH sont désignées par les lettres A ou B suivies d'un numéro d'ordre correspondant à la désignation des horizons pédologiques sous forêt ou à la désignation d'UMH correspondant à d'anciens horizons de sol forestier restés en place après le défrichement. Dans ce dernier cas, on adjoint un indicatif (ms) ou (ml) respectivement pour les situations de défrichement sans labour (MS) ou avec labour (ML). L'appellation Ap suivie d'un numéro d'ordre et de l'indicatif (ml) est attribuée à la couche labourée. Deux types d'UMH de l'horizon Ap2 (ml) sont différenciés par les indicatifs complémentaires a ou b.

Dans le cas de la situation MS (figure 1b), le défrichement et la mise en culture sans labour se traduisent par la disparition de l'horizon de surface A11. Trois types d'horizons : A1 (ms), A2 (ms) et B2 (ms) caractérisent le sol. La similitude de positionnement dans le profil, de couleur et de texture de ces horizons avec les horizons A12, A2 et B2 sous forêt (F) suggère qu'il s'agit d'anciens horizons du sol forestier restés en place après le défrichement; la différence de profondeur observée entre les transitions A2/B2 et A2 (ms)/B2 (ms) étant un caractère commun de la variabilité du sol à l'échelle du site d'étude. Ces horizons montrent, en particulier pour A1 (ms) et A2 (ms), des caractères morphologiques bien différents de ceux des horizons correspondants sous forêt (figure 1a).

A1 (ms) présente une couleur et une texture comparables à celles des horizons A11 et A12 sous forêt. Par contre, la structure à tendance massive est très différente de la structure grumeleuse à faible cohésion du sol sous forêt. L'activité faunique, matérialisée par des cavités et galeries de termites, de fourmis et de vers de terre y est faible par rapport à celle des horizons A11 et A12.

A2 (ms) est aussi de couleur et de texture comparables à celles de A2 sous forêt. La différence de structure avec le sol forestier est moins prononcée que dans le cas de l'horizon supérieur A1 (ms); mais elle se traduit aussi par une diminution de développement structural, avec une cohésion plus élevée. L'activité faunique y est très faible, voire inexistante, contrairement à A2 où les traces de macrofaune sont abondantes.

L'horizon B2 (ms) présente les mêmes caractères texturaux et structuraux que B2 sous forêt, mais contrairement à celui-ci, on n'y observe aucune trace d'activité faunique.

Dans le cas du sol travaillé de la parcelle ML (figure 1c), l'existence d'UMH discontinues définit un profil bien différent de celui de la parcelle non labourée MS. En comparant l'épaisseur de la couche labourée (environ 30 cm) à celle des horizons en place de la parcelle non labourée contigüe MS, on peut estimer que les unités Ap proviendraient du remaniement des horizons A1, A2 et B2 (sur une dizaine de centimètres d'épaisseur) du sol forestier existant initialement à l'emplacement de la parcelle ML. Ce rema-

niement, auquel s'ajoute l'enfouissement des résidus organiques, se traduit par des caractères de couleur et de structure des UMH Ap différents de ceux des horizons existants à profondeur équivalente dans le sol cultivé sans labour (MS).

Ap1 (ml) présente une couleur plus sombre et une structure de terre fine meuble bien différente de la structure à tendance massive de A1 (ms) du sol non labouré. Des traces d'activité faunique sont visibles sous forme de galeries et de turrucules.

Ap2 (ml)a est de couleur comparable à Ap1 (ml), plus foncée que celle de A2 (ms) du sol non labouré. Cette UMH composée de terre fine et de petites mottes est bien différente de A2 (ms) à structure mal développée et à plus forte cohésion. L'activité faunique est semblable à celle de Ap1 (ml).

Ap2 (ml)b se répartit de façon discontinue dans Ap2 (ml)a. Ce type de UMH représente 23 % de Ap2. La couleur est plus claire que celle de Ap2 (ml)a, mais des inclusions organiques noirâtres sont présentes. Les caractères de structure massive et de cohésion élevée tranchent aussi fortement avec ceux de Ap2 (ml)a. Sous la limite de travail, B2 (ml) paraît tout à fait comparable à B2 (ms) du sol cultivé sans labour.

Résistance à la pénétration des unités morphologiques homogènes

Les mesures de résistance mécanique à la pénétration RMP (en kg/cm²) montrent des différences de valeurs significatives entre les UMH (tableau 1). Mais aucune relation significative n'a pu être établie entre la teneur en éléments grossiers et RMP.

Sous forêt, les valeurs de RMP augmentent de façon significative du sommet vers le bas du profil, en concordance avec les variations de structure et de cohésion observées en fonction de la profondeur. On notera le saut de valeur important, avec un facteur d'ordre 6, en passant de A12 à A2.

En profondeur, on n'observe pas de différence significative de la résistance à la pénétration entre les trois situations étudiées : B2, B2 (ms) et B2 (ml). Les valeurs de RMP y sont parmi les plus élevées de toutes celles qui ont été mesurées.

Sur la parcelle cultivée sans travail du sol (MS), la résistance à la pénétration des deux horizons supérieurs est plus élevée que sous forêt F. L'élévation est particulièrement importante et significative pour A1 (ms), où la valeur de RMP est plus du double de celle de A12 sous forêt. L'augmentation est relativement plus faible pour A2 (ms) où RMP atteint, cependant, une valeur comparable à celle des horizons B2.

Dans le cas du sol travaillé (ML), les valeurs de résistance à la pénétration de Ap1 (ml) et Ap2 (ml)a sont respectivement 7 et 5 fois plus faibles que celles de A1 (ms) et A2 (ms) et aussi 3 et 4 fois plus faibles que celles de A12 et de A2 sous forêt. Ap2 (ml)b se distingue, par contre, par une résistance à la pénétration bien plus élevée, équivalent à 7 fois celle de Ap2 (ml)a. Cette forte résistance est en accord avec la forte cohésion de cette UMH.

Tableau 1 - Résistance mécanique à la pénétration RMP (Kg/cm²) et densité racinaire (nombre de racines/dm²) dans les unités morphologiques homogènes (UMH).*Table 1* - Mechanical penetration resistance RMP (Kg/cm²) and root density (root number/dm²) in the homogeneous morphological units (UMH).

Parcelles	UMH	Taux d'occupation (%) sur les 40 premiers cm	RMP (en Kg/cm ²)		Comparaison RMP globale	Nombre de racines /dm ²		Comparaison globale des densités de racines de maïs
Forêt (F)	A11	6	0,6	a	a	434	c	
			<i>0,0</i>			<i>13</i>		
	A12	10	1,4	a	b	94	b	
			<i>0,2</i>			<i>11</i>		
	A2	21	7,8	b	de	35	a	
			<i>0,8</i>			<i>5</i>		
	B2	63	10,6	c	ef	20	a	
			<i>1,4</i>			<i>4</i>		
Motorisée sans labour (MS)	A1(ms)	20	3,8	a	d	123	c	c
			<i>0,7</i>			<i>17</i>		
	A2(ms)	36	10,1	b	ef	27	b	b
			<i>1,3</i>			<i>4</i>		
	B2(ms)	44	10,3	b	ef	0	a	a
			<i>1,3</i>			<i>0</i>		
Motorisée labourée (ML)	Ap1(ml)	15	0,5	a	a	291	c	e
			<i>0,1</i>			<i>33</i>		
	Ap2(ml)a	55	2,1	a	bc	130	b	c
			<i>0,2</i>			<i>10</i>		
	Ap2(ml)b	16	14,1	c	f	49	a	b
			<i>1,1</i>			<i>8</i>		
	B2(ml)	14	10,5	b	ef	2	a	a
			<i>1,8</i>			<i>2</i>		

Pour chaque colonne, des lettres différentes indiquent une différence statistique significative au seuil de 5% selon le test de Newman et Keuls pour la résistance et selon le test de Bartlett pour l'enracinement. Les écart-types sont inscrits en italique.

Les caractéristiques porales

La porosité totale obtenue au porosimètre à mercure diminue avec la profondeur, quelle que soit la situation considérée (tableau 2). Elle diminue aussi en passant de la forêt (F) aux parcelles défrichées (MS et ML), pour les horizons supérieurs. S'agissant de l'influence des graviers, l'analyse de régression a montré une relation négative significative entre la porosité totale Hg et les éléments grossiers uniquement lorsque ces derniers atteignent et dépassent 30 %.

Le diamètre médian, c'est-à-dire le diamètre équivalent de pore pour lequel le volume poral est rempli à 50 %, décroît également avec la profondeur tant sur la parcelle sous forêt F que sur les parcelles sans travail du sol (MS) et labourée (ML)

(tableau 2), indiquant une augmentation relative de la porosité fine.

Les unités morphologiques homogènes de MS, de même que Ap2 (ml)b de ML, se distinguent par un très faible diamètre médian (1,7 à 3,2 µm). Quant aux autres UMH Ap de ML, les valeurs de diamètre médian (10,6 à 11,4 µm) sont plus proches de celles des horizons supérieurs sous forêt (7,3 à 16 µm). Pour chacune des trois situations, les horizons B2 ont le plus faible diamètre médian. Cependant, B2 (ms) et B2 (ml) ont des diamètres médians pratiquement identiques (0,3 µm) et inférieurs à celui de B2 sous forêt (5 µm).

Les courbes de distribution porale (ou spectre poral) dérivées des courbes cumulées (figure 2) montrent des répartitions

Tableau 2 - Caractéristiques porales et répartition de la porosité selon le diamètre poral dans les unités morphologiques homogènes (UMH).

Table 2 - Poral characteristics and porosity distribution according to pore diameter in the homogeneous morphological units.

UMH	Éléments grossiers (%) volumique	Porosité totale (%)	Diamètre médian (µm)	Classes de diamètre de pore (µm)							
				< 0.3 µm		0.3 - 6 µm		6 - 60 µm		60 - 400 µm	
				Porosité matricielle		Microporosité		Mésoporosité		Macroporosité	
A11	3,3	45,4	16,0	7,2*	15,9**	7,0*	15,4**	19,6*	43,2**	11,6*	25,6**
A12	28,9	42,3	12,8	9,9	23,4	6,5	15,4	16,6	39,2	9,3	22,0
A2	19,0	37,3	7,3	11,2	30,0	7,1	19,0	13,6	36,5	5,5	14,7
B2	61,0	36,1	4,9	14,2	39,3	6,5	18,0	9,5	26,3	5,9	16,3
A1(ms)	6,8	39,7	2,6	15,6	39,3	12,0	30,2	9,3	23,4	2,7	6,8
A2(ms)	0,7	40,4	1,7	18,8	46,5	10,2	25,2	8,0	19,8	3,4	8,4
B2(ms)	6,0	36,9	0,4	20,2	54,7	9,2	24,9	5,9	16,0	1,6	4,3
Ap1(ml)	24,5	40,0	11,4	9,8	24,5	7,9	19,8	14,2	35,5	8,2	20,5
Ap2(ml)a	52,5	39,4	10,6	11,7	29,7	6,9	17,5	12,9	32,7	7,8	19,8
Ap2(ml)b	0,0	37,7	3,2	15,1	40,1	11,1	29,4	9,9	26,3	1,5	4,0
B2(ml)	73,9	27,1	0,3	14,9	55,0	5,2	19,2	4,3	15,9	2,5	9,2

* en valeur absolue (cm³/100 cm³)

** en valeur relative (% de la porosité totale)

porales qui diffèrent selon les UMH. Mais toutes ces courbes présentent deux modes principaux séparant la porosité en deux catégories de volume poral distinctes, de part et d'autre d'un diamètre moyen de l'ordre de 0,3 µm. Cette valeur de diamètre est comparable à celle observée sur d'autres sols ferrallitiques (Carvalho *et al.*, 1991; Hartmann, 1991) ou ferrugineux (Colleuille, 1993).

Le premier volume poral (D < 0,3 µm) correspond à la porosité matricielle développée en général par l'assemblage des particules les plus fines du sol. Le mode se situe à une valeur moyenne de diamètre de 0,04 µm, relativement constante.

Le second volume poral (D > 0,3 µm) correspond à la porosité ménagée par l'assemblage des agrégats entre eux. Cette partie des courbes présente en général une allure monomodale irrégulière pour les UMH de surface A12, A1 (ms), Ap1 (ml), mais aussi pour les UMH A2 et Ap2 (ml)b, et plutôt bimodale pour les UMH sous-jacentes Ap2 (ml)a, A2 (ms), B2 (ml), B2 (ms) et B2. On observe ainsi que les UMH A1 (ms) et Ap2 (ml)b présentent des spectres poraux pratiquement similaires.

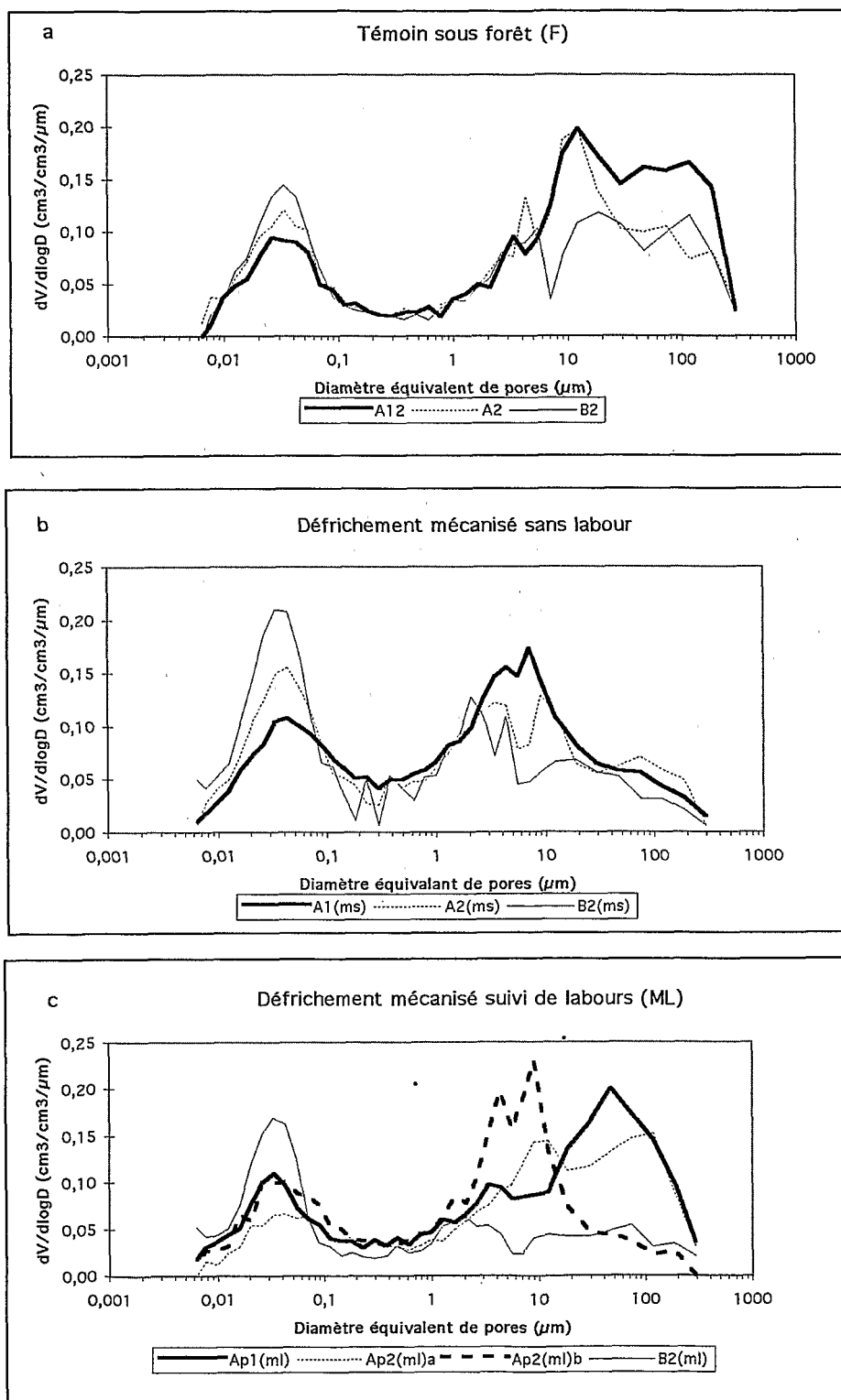
L'existence de sous-classes porales peut être attribuée à la présence d'assemblages, plus ou moins compacts, d'agrégats incluant plus ou moins de sables et limons grossiers (Colleuille, 1993). La nature graveleuse des échantillons pourrait exacerber ce phénomène. Devant la difficulté à généraliser des limites de classes, nous avons opté pour l'utilisation d'une dis-

tribution de la porosité en quatre classes de diamètre équivalent de pore, fonctionnelles par rapport à l'eau (Chamayou et Legros, 1989; Kay, 1990), qui permet de comparer les traitements F, MS et ML (*tableau 2*). La valeur limite maximale de 400 µm, liée au porosimètre à mercure, ne permet pas de prendre en compte toute la macroporosité, alors que de gros pores sont souvent nettement visibles.

Le sol cultivé sans être travaillé (MS) montre, quel que soit l'horizon, une diminution de la macroporosité et de la mésoporosité et une augmentation de la microporosité et de la porosité matricielle par rapport au sol forestier (*tableau 2*). La diminution de la macroporosité est de l'ordre de 70 %, 40 % et 70 % respectivement pour A1 (ms), A2 (ms), et B2 (ms) par rapport à A12, A2 et B2; celle de la mésoporosité est de l'ordre de 40 % dans les trois cas.

Avec la pratique du labour, sur la parcelle ML, la macroporosité et la mésoporosité de Ap1 (ml) et Ap2 (ml)a se maintiennent à des valeurs élevées, tandis que la microporosité et la porosité matricielle restent plus faibles qu'en MS. Au total, le spectre poral de ces deux UMH se trouve proche de celui de A12 et A2 sous forêt (*figure 2*). L'UMH compacte Ap2 (ml)b se distingue de Ap2 (ml)a par une porosité plus importante dans les classes de pores de diamètre inférieur à 6 µm et plus faible dans les classes de pores de grand diamètre (60-400 µm).

Figure 2 - Distributions porales des unités morphologiques homogènes
 Figure 2 - Porosity distribution in the homogeneous morphological units.



En-dessous de la limite de labour, la porosité de B2 (ml) est plus faible que celle de B2 (ms); elle-même peu différente de B2 sous forêt. Mais, dans les deux cas de mise en culture, le volume relatif des pores supérieurs à 6 μm est plus faible et celui de la porosité matricielle plus élevé que sous forêt.

Les conséquences sur l'enracinement du maïs

L'étude comparative de la répartition racinaire en fonction de la différenciation du profil n'a d'intérêt que dans le cas des situations cultivées en maïs : MS et ML. On fera simplement remarquer, pour la situation F, la forte densité des racines (racines fines) limitées aux tout premiers centimètres du sol (figure 1a et tableau 1), comme on l'observe toujours sous forêt tropicale humide (Moreau, 1993). Dans les deux situations cultivées MS et ML, l'enracinement du maïs est peu profond et dépasse rarement 30 cm; mais les densités de développement sont bien différentes dans l'un et l'autre cas (figures 1 b, 1 c et tableau 1).

A la suite du défrichage et de la culture sans labour, sur la parcelle MS, l'enracinement du maïs apparaît faiblement développé dès la partie supérieure du sol et se réduit rapidement avec la profondeur. De 123 racines/dm² pour l'horizon A1 (ms), la densité racinaire se réduit à 27 racines/dm² pour A2 (ms), entre 8 et 24 cm. Aucune racine n'est observée au-dessous de 20 cm, dans l'horizon B2 (ms).

Le développement racinaire est plus important dans le cas de la parcelle labourée ML, où l'on compte 291 racines/dm² pour Ap1 (ml), au niveau du billon, et encore 130 racines/dm² pour Ap2 (ml)a, entre 4 et 30 cm; c'est-à-dire autant que pour A1 (ms) sur la parcelle non labourée MS. Par contre, le nombre de racines est beaucoup plus réduit au niveau des unités isolées Ap2 (ml)b, avec une moyenne de 49 racines/dm². L'enracinement est pratiquement nul, au-dessous de la limite de labour, dans l'horizon B2 (ml).

DISCUSSION

On se trouve naturellement confronté au problème de la variabilité des éléments grossiers existant dans le sol de Bécédi, pour interpréter les différences observées entre les caractères du sol dans les trois situations comparées F, MS et ML. Les conséquences de cette variabilité ne peuvent pas être cernées de façon précise. Mais on cherchera quand même à voir, pour un paramètre donné du sol, dans quel sens peut jouer l'inégalité des teneurs en éléments grossiers dans les échantillons comparés; selon qu'il se trouve en opposition ou en conformité avec la différence ressortant des mesures réalisées sur ces mêmes échantillons, le résultat renforcera ou affaiblira l'hypothèse d'un effet des traitements considérés (mise en culture sans travail du sol, culture avec labour et billonnage) pour expliquer les différences constatées.

La mise en culture sans travail du sol

Les éléments grossiers sont généralement en plus faible quantité dans le sol de la parcelle MS que dans le sol sous forêt F, comme on le voit au tableau 2 pour les échantillons soumis à la porosimétrie à mercure. On ne peut pas invoquer leur influence pour expliquer l'ensemble des caractères (faible développement de la structure, cohésion et résistance à la pénétration plus fortes, réduction de la porosité grossière de diamètre équivalent $\geq 6 \mu\text{m}$ au profit de la porosité fine) qui marquent les horizons A1 (ms) et A2 (ms) par rapport aux horizons A1 et A2 sous forêt. Ces caractères manifestent, de façon très concordante, une détérioration de l'état physique du sol forestier au terme de quatre années de mise en culture sans travail du sol.

Différentes causes peuvent être évoquées pour expliquer l'évolution physique du sol sur la parcelle MS, sans qu'il soit possible d'en apprécier séparément les effets dans les conditions de réalisation de l'étude. D'abord au moment du défrichage, même si les perturbations mécaniques ont été limitées, comme les horizons supérieurs du sol retrouvés en place peuvent le laisser penser, les travaux n'ont certainement pas été réalisés sans avoir d'effet direct sur le sol, ne serait-ce que par les phénomènes de compression exercés à la surface du sol par le bulldozer.

Ensuite à plus long terme, la déforestation modifie l'action des facteurs climatiques et biologiques intervenant sur l'état physique du sol. Avec la disparition de la couverture forestière, les restitutions organiques sont réduites et plus discontinues. Les régimes thermique et hydrique se trouvent également modifiés à la partie supérieure du sol, s'accompagnant d'une élévation de la température moyenne et aussi d'amplitudes thermiques et de variations d'humidité plus importantes que sous forêt (Godefroy, 1974).

Avec ces modifications environnementales, la densité et la diversité des macro-invertébrés du sol diminuent fortement (Tamia, 1997). Le nombre de vers de terre, en particulier, diminue beaucoup avec la mise en culture et ceux-ci n'ont plus un rôle aussi important dans la structuration des horizons supérieurs du sol que sous forêt (Bachelier, 1963). En Basse Côte d'Ivoire, ils peuvent rejeter jusqu'à 50 t/ha/an de turricules à la surface d'un sol forestier comparable au sol étudié (Roose, 1981). A Bécédi, on compte en moyenne 535 vers de terre par m² sur les 30 cm supérieurs du sol sous forêt, tandis que leur nombre se réduit d'au moins 80 % dans le sol des parcelles cultivées MS et ML. On n'observe pas de différence significative de la faune du sol entre ces deux situations de culture.

Ainsi, l'évolution défavorable de l'état physique du sol de la parcelle MS paraît résulter de plusieurs causes dont les effets se seraient conjugués. D'une part, l'action de facteurs bénéfiques à la structuration du sol s'est trouvée réduite ou a disparu; il s'agit par exemple de la diminution de l'activité fau-

nique, de la disparition des racines horizontales dans l'horizon A1, en particulier celles des fines racines entrelacées occupant l'horizon A11 (Moreau, 1993), et de la réduction des quantités de substances transitoires de l'humification favorisant la stabilité structurale (Godefroy, 1974). D'autre part, des facteurs de dégradation de la structure ont été activés, comme l'action des agents atmosphériques et notamment de la pluie sur le sol moins bien protégé, ou induits, comme les phénomènes de tassement mécanique au moment du défrichement ou du fait du passage répété de la main d'oeuvre pour les différents travaux de culture. L'influence de ces divers facteurs a été d'autant plus importante qu'on s'adresse à des horizons plus proches de la surface, comme le sont aussi les modifications du sol MS par rapport au sol sous forêt.

Au niveau de l'horizon B2 (ms), mais aussi B2 (ml), les modifications par rapport à B2 sont discrètes : réduction de la porosité grossière et du diamètre médian (tableau 2). On notera que les valeurs de porosité totale Hg vont aussi dans le sens d'une réduction de la porosité globale sous l'effet de la mise en culture : d'une part, il n'y a pas de différence de valeur entre B2 (ms) et B2 (ml) alors que ce dernier contient beaucoup plus d'éléments grossiers (61 %) ; d'autre part, si la différence de teneur en éléments grossiers peut expliquer la faible porosité de B2 (ml) par rapport à B2 (ms), elle ne rend pas compte de l'écart de valeur important existant avec B2. Ces modifications de porosité sont à mettre en parallèle avec la réduction d'activité biologique observée dans tous les profils de sol des parcelles cultivées, même si on ne peut pas exclure, à ce niveau, tout effet de compression par le bulldozer au moment du défrichement.

La mise en culture avec travail du sol

Dans la parcelle ML, le travail du sol avec labour et billonnage a mélangé le matériel pédologique provenant des trois horizons supérieurs du sol sous forêt. Cependant, la couche travaillée se compose d'UMH de consistance bien différente et n'est pas homogène. Les UMH occupant le plus d'espace : Ap1 (ml) et Ap2 (ml)a, ont des caractères d'ameublissement qui manifestent bien l'effet du travail au sol, par rapport au sol non travaillé : A1 (ms) et A2 (ms). Ainsi, malgré une plus grande quantité d'éléments grossiers, la porosité totale Hg de Ap1 (ml) et Ap2 (ml)a n'est pas inférieure à celle de A1 (ms) et A2 (ms) et, surtout, le spectre poral y est plus équilibré (tableau 2). Finalement, en favorisant la fragmentation et la porosité grossière au détriment de la porosité fine, le travail du sol tend à donner aux volumes ameublés des caractères de porosité, mais aussi de résistance à la pénétration, plus proches de ceux des horizons supérieurs du sol sous forêt que du sol cultivé sans labour.

La fragmentation et les caractères physiques liés à l'ameublissement mécanique du sol restent encore bien marqués à la fin du cycle cultural du maïs, c'est-à-dire quatre mois après les derniers labour et billonnage. Cette persistance de l'effet du

travail du sol traduit une certaine stabilité de la structure existant encore après quatre années de culture. L'enfouissement de matière végétale et l'entretien d'une vie faunique dans le sol peuvent également jouer en faveur du maintien des effets du labour.

Le billonnage à la houe est à l'origine de l'affinement de structure et de l'aération du sol plus prononcés en Ap1 (ml) qu'en Ap2 (ml)a. Ce qui se traduit aussi par une résistance à la pénétration sensiblement plus faible, avec des valeurs respectivement comparables pour l'une et l'autre de ces UMH à celles de A11 et A12 sous forêt (tableau 1).

Les mottes massives Ap2 (ml)b, incluses dans Ap2 (ml)a, ont une différenciation porale comparable à celles de A1 (ms) et A2 (ms). Leur existence révèle que des phénomènes de compactage peuvent affecter durablement l'état physique du sol dans la couche travaillée. Ces mottes représentent un volume appréciable de Ap2 et il faudrait en comprendre l'évolution pour en éviter l'extension ; mais il est difficile, dans le contexte de l'étude, de savoir exactement comment elles se sont formées. Au vu de leurs caractères, avec la présence d'inclusions organiques, on peut supposer que des phénomènes de tassement mécanique ont d'abord affecté la partie du sol, au moment de travaux motorisés. L'analogie de couleur et de spectre poral avec A1 (ms), où les effets du sarclage et de l'activité biologique plus développée au voisinage de la surface peuvent expliquer la résistance à la pénétration plus faible, suggèrent que de tels phénomènes ont pu se produire au cours des travaux de défrichement, en 1991 ; mais l'existence de tassements au moment du labour au tracteur, en 1993, n'est pas non plus à exclure (Gautronneau Y et Manichon H., 1987).

La taille grossière et le nombre des mottes Ap2 (ml)b suggèrent aussi que les volumes compacts ont été importants avant d'être disloqués en éléments distincts, mélangés à la terre ameublée, sous l'effet du labour (Coulomb *et al.*, 1993). Ces mottes n'ont pratiquement pas été fractionnées en petits éléments, et cela implique un faible nombre de labour après l'enfouissement. La disposition des mottes, dont certaines sont au contact de la limite de labour, indiquerait qu'elles ont été reprises ou formées au moins au moment du labour ayant atteint la limite de travail observée en 1994 : probablement celle du labour à la charrue à soc réalisé en 1993.

Le développement racinaire du maïs

L'enracinement du maïs apparaît fortement influencé par la différenciation des UMH qui caractérisent le profil cultural. Le faible développement des racines est toujours associé à une structure mal développée, avec une porosité grossière relativement faible et une résistance à la pénétration élevée, comme on l'observe dans le sol non travaillé : A1 (ms) et A2 (ms) et aussi dans les mottes compactes : Ap2 (ml)b. Il en est de même dans les horizons B2 (ms) et (ml), où l'enracinement pourrait aussi être gêné par la présence d'aluminium échan-

geable; bien que le taux de saturation aluminique n'y excède pas 40 % (Sanchez, 1976). Ce taux ne dépasse pas 30 % dans les horizons supérieurs.

Dans l'horizon de travail Ap2, les UMH Ap2 (ml)a et Ap2 (ml)b ont des caractères chimiques comparables, avec un taux de saturation aluminique faible (15 %). La faible densité racinaire de Ap2 (ml)b, trois fois moins importante que dans Ap2 (ml)a, est surtout imputable à l'état physique, montrant la gravité des conséquences du tassement à l'encontre du développement des racines. A l'inverse, la densité racinaire, pratiquement cinq fois plus élevée dans Ap2 (ml)a que dans A2 (ms), illustre l'effet bénéfique de l'ameublissement du sol par le labour sur l'enracinement du maïs.

De nombreux auteurs ont déjà constaté la liaison entre le développement racinaire du maïs et les caractères physiques du sol. Tardieu 1989, Nicoulaud *et al.* (1995) et Freitas *et al.* (1998), par exemple, ont montré que les horizons tassés limitent fortement la croissance racinaire du maïs. L'importance de la résistance mécanique à la pénétration pour l'enracinement a été souvent soulignée, notamment par Maertens (1964 a et b), Taylor et Ratliff (1969), Tardieu et Manichon (1987), Moreau et Nagumo (1994). Dans le cas de cette étude, elle s'exprime par une corrélation de forme logarithmique liant la densité racinaire du maïs (Rac/dm^2) à la résistance mécanique à la pénétration RMP (Kg/cm^2) dans les 40 cm supérieurs du sol*, selon l'équation : $Rac/dm^2 = -93.62 \ln RMP + 237.36$; avec $r = 0.9015$ ($P < 0.001$) et $ddl = 24$.

Les valeurs de résistance à la pénétration atteignant $7 kg/cm^2$ sont toujours associées à un développement racinaire réduit du maïs. Au Japon, la valeur de $10 kg/cm^2$ a été définie comme le seuil de contrainte très sévère à l'enracinement, pour diverses cultures et sur différents types de sol où les mesures sont réalisées à des états d'humidité proches de la capacité au champ (Miyoshi, 1972). Certes, les valeurs de résistance à la pénétration existant au moment de la croissance des racines du maïs pouvaient être différentes des valeurs de RMP mesurées à la fin du cycle cultural; mais elles devaient déjà être bien différenciées selon les UMH établissant des conditions discriminantes ou non pour l'enracinement.

Dans tous les cas, la densité racinaire se réduit avec la diminution de la porosité grossière de diamètre équivalent supérieur à $6 \mu m$, c'est-à-dire avec la détérioration des conditions d'aération et de drainage associées au volume des pores exploitables par les racines (Callot *et al.*, 1982; Chamayou et Legros, 1989; Kay, 1990). Ces résultats diffèrent sensiblement de ceux obtenus par Grimaldi *et al.* (1993), en Amazonie, où la réduction de volume poral affectait l'ensemble des pores de

diamètre équivalent supérieur à $0,1 \mu m$, alors que la microporosité se trouve ici épargnée.

CONCLUSION

Cette étude comparative menée à différentes échelles d'appréhension montre une bonne adéquation entre les résultats obtenus sur le terrain (données descriptives, pénétrométrie, densité d'enracinement du maïs), et au laboratoire (porosimétrie à mercure). Elle permet de mieux comprendre, en précisant les caractères spécifiques des unités morphologiques homogènes, l'influence du mode de travail du sol sur la différenciation du profil cultural et sur les conditions de développement racinaire du maïs.

Les résultats obtenus avec la culture sans travail du sol ne conduisent pas à recommander ce mode de culture à Bécédi. Au terme de quatre années, les horizons supérieurs sont mal structurés et les racines de maïs ne s'y développent que faiblement. Ce résultat ne concorde pas avec ce que Tavarès-Filho et Tessier (1998) ainsi que Freitas *et al.* (1998) ont constaté au Brésil sur d'autres sols ferrallitiques désaturés, il est vrai plus argileux, où le semis direct s'avère préférable à la pratique du labour.

A Bécédi, le travail du sol paraît nécessaire pour ameublir la partie supérieure du profil et améliorer le développement racinaire et la production du maïs. Cependant, l'existence de mottes compactes oblige à tempérer le jugement favorable que l'on pourrait porter sur la technique de culture avec travail du sol; d'autant plus que le labour annuel n'a été réalisé au tracteur que deux années sur quatre et que le sol n'a certainement pas encore atteint un état d'équilibre dynamique en rapport avec les contraintes découlant de la culture mécanisée. Une étude de l'évolution du sol à plus long terme serait nécessaire pour mieux saisir, en laissant les effets cumulatifs se révéler, les conséquences du travail du sol avec labour au tracteur sur le profil cultural.

BIBLIOGRAPHIE

- Alègre J. C., Cassel D. K. and Bandy D. E., 1986 - Effect of land clearing and subsequent management on soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 50, 1986. 1378-1384.
- Bachelier G., 1963 - La vie animale dans les sols. Documentations techniques. ORSTOM. Paris, 3, 279 p.
- Blic Ph. de et Moreau R., 1979 - Structural Characteristics of Ferrallitic Soils under Mechanical Cultivation in the Marginal Forest Areas of the Ivory Coast. In *Soil Physical and Crop Production in the Tropics*. John Wiley and Sons Ltd. 111-122.
- Boissezon P. de, 1967 - Etude pédologique de la zone vulnérable de l'ROBO. ORSTOM, Ministère de l'Agriculture (Convention forestière) T. 1, 78 p. multigr.
- Boka A. M. Th., 1986 - Modifications physiques d'un sol ferrallitique sous l'effet du défrichement lourd motorisé. Mémoire de DIAT (ESAT). Montpellier. 48 p. multigr.

* La corrélation reste significative si on ne considère que les 30 cm supérieurs, sans B2 (ml) ni B2 (ms) : $Rac/dm^2 = -88,28 \ln RMP + 239,65$; avec $r = 0,8722$ ($P < 0,001$) et $ddl = 16$

- Callot G., Chamayou H., Maertens C. Salsac L., 1982 - Mieux comprendre les interactions Sol-Racines. Incidence sur la nutrition minérale. INRA, Paris, 325 p.
- Carvalho S. R. *et al.*, 1991 - Tassement des sols ferrallitiques podzolicos vermelho amarelo sous culture de canne à sucre. Apport d'une analyse de la porosité associée à une connaissance détaillée de la phase minérale. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol XXVI n°3, 195 - 212
- Chamayou, H. et Legros JP., 1989 - Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Collection Techniques Vivantes. Agence de Coopération Culturelle et Technique. P. U. F. Paris.
- Coleuille H., 1993 - Approche physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales. Thèse en Pédologie Paris VI, 353 p.
- Collinet J. et Valentin C., 1979 - Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives, applications agronomiques. Cah. ORSTOM Sér. Pédol., Vol. XVII, n°4, 1979. 183 - 328.
- Coulomb I., Caneill J. et Manichon H., 1993 - Comportement du sol au labour : méthode d'analyse et évaluation des conséquences de l'état initial du sol sur l'état transformé par le labour. Agronomie (1993) 13, 45-56.
- Freitas P.L. de, Blancaneaux Ph. et Moreau R., 1998 - Caractérisation structurale de sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) sous différents modes d'utilisation agricole. Etude et Gestion des Sols, 5, 2, 93-105.
- Gautronneau Y et Manichon H., 1987 - Guide méthodique du profil cultural. CEREF GEARA Lyon, 69 p
- Gnamba A. S., 1986 - Quelques effets du défrichement motorisé sur certains types de sol de Côte d'Ivoire. Mémoire pour l'obtention du D. A. A. Option Agropédologie (ENSA, ABIDJAN), 55 p. Multigr.
- Godefroy J., 1974 - Evolution de la matière organique du sol sous culture de bananier et de l'ananas. Relation avec la structure et la capacité d'échange cationique. Thèse Docteur Ingénieur. Université Nancy I, 166 p.
- Godo G., Yoro G., Goue B., Aïfou Y., 1989 - Caractérisation physique et socio-économique du site expérimental IBSRAM de Bécédi Sous Préfecture de Sikensi. Rapport technique n°1 IBSRAM, ORSTOM Adiopodoumé, 32 p.
- Grimaldi M., 1986 - Effet d'un compactage dynamique sur un matériau limoneux. Modification de sa structure. Sci. Sol 24, pp. 269-284.
- Grimaldi M., Sarrazin A., Chauvel F., Luizao N., Nunes M., Rosario L. R. de, Amblard P., Tessier D., 1993 - Effet de la déforestation et des cultures sur la structure des sols argileux d'Amazonie brésilienne. Cahiers Agricultures, 2, 36 - 47.
- Hartmann C., 1991 - Evolution et comportement de sols sablo-argileux ferrallitiques sous culture de palmier à huile. Cas de la plantation R. Michaux à Dabou (Côte d'Ivoire). Thèse, Paris VI. 201 p.
- Humbel F. X., 1987 - Relation entre la porosité et le pédoclimat dans des sols du domaine ferrallitique au Cameroun. IBSRAM Proceedings n°4, 39-52.
- Kay B. D., 1990 - Rate of change of soil structure under different cropping systems. Adv. Soil Sci. 12, 1 - 41.
- Maertens C, 1964 a - Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. Sci. Sol, 2, 1-11.
- Maertens C., 1964 b - La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. Ann. Agron., 15, 539-554.
- 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.
- Marsili A., Servadio P., 1996 - Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils. Soil and Tillage Research 37, 37-45.
- Martin G., 1963 - Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. Cah. Orstom 2 - 8-14.
- Miyoshi H., 1972 - Effective layer for upland field from a view point of suitable soil condition for root development. Jpn. J. Soil Sci. Plant Nut., Vol 43, n°3, 92 - 97.
- Moreau R., 1986 - Effect of methods of deforestation and soil management on properties of some soils in Ivory Coast. In Land Clearing and Développement in the tropics. A. N. Balkema, Rotterdam, 247-264.
- Moreau R., 1993 - Influence de la mise en culture et de la jachère forestière sur l'évolution des sols tropicaux. In La jachère en Afrique de l'Ouest. Floret C. et Serpantié G. Eds. Colloques et Séminaires ORSTOM Paris, 245-256.
- Moreau R. et Nagumo F., 1994 - Le pénétromètre Yamanaka et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés. In Structure et fertilité des sols tropicaux, ORSTOM Montpellier, 12 et 13 septembre 1994, 85-91.
- Nicoulaud B., Darthout R., Duval O., 1995 - Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. AFES. Etude et Gestion des Sols, 2, 3, 183-200.
- Oades J. M., 1984 - Soil organic matter and structural stability mechanisms and implications for management. Plant and Soil 76, 319-337.
- Roose E., 1981 - Dynamiques actuelles des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Travaux et Documents techniques de l'ORSTOM. 130, 569 P.
- Ruellan A. et Dosso M., 1993 - Regard sur le sol - Les Editions Foucher, Paris, 192 p.
- Sanchez P., 1976 - Properties and management of soil in the tropics. John Wiley and sons, New york, 618 p.
- Stengel P., 1990 - Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Laon (France), les colloques de l'INRA, n°53, 15 - 36.
- Tamia A. and Yoro G., 1994 - Influence of clearing methods and tillage practices on the phenology of maize plants. In Strategies for the Management of Upland Soils of Humid and Subhumid Africa (IBSRAM/AFRICALAND) - Network Document n°9, 247-254.
- Tamia A., 1997 - Modifications physiques d'un sol ferrallitique sous différents modes de mise en culture en Côte d'Ivoire forestière. Conséquences sur le développement du maïs. Thèse, Paris XII, 246 p.
- Tardieu F. et Manichon H., 1987 - Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. I. Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. Agronomie, 7 (2), 123-131.
- Tardieu F., 1989 - Etat structural de la couche labourée et enracinement. Les Racines : Méthodologie d'étude. Perspectives Agricoles ITCF, tirés à part n°119, 122, et 128, 13 - 16.
- Taylor H. M. and Ratliff L. F., 1969 - Root growth pressure of cotton, peas and peanuts. Agron. J., 61, 398-402.
- Tavarès-Filho J. Et Tessier D., 1998 - Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sols du Parana (Brésil). Etude et Gestion des Sols, 5, 1, 61-71.
- Yoro G. et Godo G., 1990 - Identification de la microvariabilité après défrichement motorisé d'un sol ferrallitique issu de sables tertiaires. IBSRAM Proceedings n°10, 401 - 414.
- Yoro G., Tamia A. et Gnonhouré G. Ph., 1995 - Technical report on land sustainable agriculture in Côte d'Ivoire. Results from Bécédi site 1990 - 1994, IBSRAM Africaland Network., 76 p.
- Zwieniecki M. A. and Newton M., 1994 - Root distribution of 12 years old forests at rocky sites in southwestern Oregon : Effects of rock physical properties. Canadian Journal of Forest research. Revue Canadienne de Recherche Forestière. 24 : 9, 1791-1796.

