RESULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES

SUR 8 SONDAGES DE L'EXPERIMENTATION CENTRALE

DU SITE IBSRAM DE LOUDIMA (CONGO)

COMPARAISON AVEC LES PARAMETRES PHYSIQUES

CHOIX DE SITES DE MESURE

B. Barthès. ORSTOM, Brazzaville. Septembre 1993.

REFERENCE 244 - LESC 07/93

AVANT-PROPOS

Dans le cadre d'un programme initié et financé par l'IBSRAM (International Board for Soil Research and Management), la DGRST (Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique) du Congo a mis en place une expérimentation agronomique de 2 ha sur le domaine du CRAL (Centre de Recherche Agronomique de Loudima), dans la vallée du Niari au Congo (IBSRAM, 1991).

Cette recherche se propose de comparer des systèmes de culture plus ou moins intensifiés à base manioc, avec pour objectifs:
- la détermination des conditions d'une exploitation optimale et durable des sols ferrallitiques argileux du Niari;
- l'étude du fonctionnement et de l'évolution de ces sols après leur mise en culture.

Plusieurs équipes de la DGRST et de l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération) sont associées dans la mise en oeuvre de ce programme pluridisciplinaire.

Ce document présente les resultats concernant des échantillons prélevés sur le site IBSRAM de Loudima lors d'une mission à la mi-janvier 1993.

B

ORSTOM
Centre Documentation
MONTPELLIER
09 NOV. 1994

remplace ex perdu

1. INTRODUCTION

Des dispositifs de mesures tensio-neutroniques et des capteurs de solution du sol sont en cours d'installation sur l'expérimentation centrale du site IBSRAM de Loudima (IBSRAM, 1991). Ces dispositifs permettront de comparer les traitements savane-témoin (noté 2), bas-intrants à "entrée" manioc (noté 4) et hauts-intrants à "entrée" manioc (noté 6). Une parcelle élémentaire par traitement est à équiper, soit 3 parcelles au total.

Pour que les comparaisons entre traitements culturaux soient valables, il importe que les parcelles équipées connaissent des conditions édaphiques initiales aussi voisines que possible, et relativement moyennes, au moins à l'échelle de l'expérimentation.

Il semblait opportun que ces parcelles équipées soient situées sur un même bloc, c'est-à-dire en situations topographiques comparables. Le bloc I est écarté, compte tenu de la proximité de la piste. Le bloc IV est également écarté, du fait de sa situation aval.

Il reste donc à départager les blocs II et III, sur la base de données physico-hydriques et chimiques. 6 situations sont considérées (fig. 1):
- 3 dans l'allée située juste à l'aval du bloc II, au regard des parcelles-traitements (2), (4) et (6), situations notées respectivement I, L et K;
- 3 dans l'allée située juste à l'aval du bloc III, au regard des parcelles-traitements (2), (4) et (6), situations notées respectivement C, H et E;
- 2 situations supplémentaires sont étudiées, l'une tout amont, près de la fosse A située dans l'allée séparant les blocs I et II, l'autre à l'aval, près de la fosse D, située à l'aval du bloc IV.

Deux rapports antérieurs comparaient ces différentes situations en termes hydriques et pénétrométriques (Barthès & al., 1993 a), et densitométriques (Hartmann, 1993).

On présente ici les résultats d'analyses chimiques et granulométriques. Ceux-ci doivent permettre de préciser le choix des parcelles et donc la localisation des dispositifs de mesures. Ils permettront également d'améliorer la caractérisation du site. Par ailleurs, des comparaisons avec les données physiques seront tentés.

2. CHIMIE DES SITES

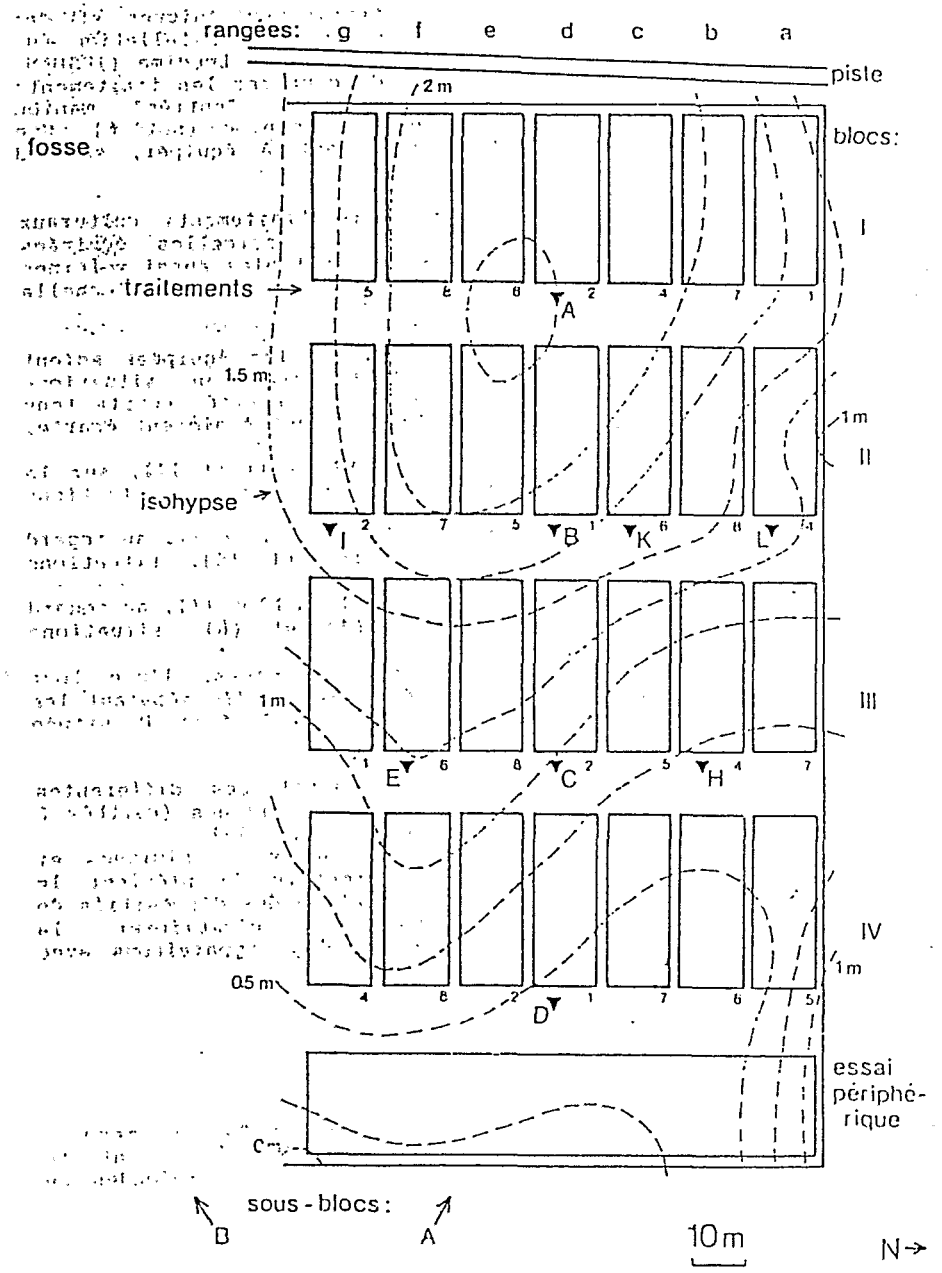
2.1 Matériels et méthodes

Lors de la mission effectuée en janvier 93, les mesures de résistance à la pénétration et de densité apparente ont été réalisées sur les fosses L, K, I, H, C et E, profondes de 150 cm.

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 40536
Cote : B ex 1 F 40536

FIG.1: SITE IBSRAM AU CRAL (d'après Nyeté, 1992)

EXPERIMENTATION CENTRALE



Les mesures de teneur en eau pondérale et les analyses chimiques ont été effectuées sur des échantillons prélevés sur des sondages à la tarière à main, profonds de 300 cm. Dans le cas des sites L, K, I, H et E, ces sondages ont été effectués à l'emplacement des fosses, la veille de leur ouverture. Dans le cas des sites A, C et D, les sondages ont été effectués à quelques mètres des fosses creusées en 1992, profondes à l'époque de 80 cm environ (la fosse C a été approfondie le lendemain des sondages).

Les sondages ont été creusés de 10 cm en 10 cm. Les analyses chimiques ont porté sur les profondeurs (en cm) 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 90-100, 150-160, 190-200, 250-260 et 290-300, notées respectivement (en particulier sur les graphes) 5, 15, 25, 35, 45, 95, 155, 195, 255 et 295 cm.

Sur les différents graphes présentés, les valeurs correspondant aux profondeurs 55, 65, 75 et 85 cm résultent d'extrapolations linéaires à partir de 45 et 95 cm; de même, celles correspondant aux profondeurs 105, 115, 125, 135 et 145 cm sont interpolées à partir de 95 et 155 cm; 165, 175 et 185 cm à partir de 155 et 195; 205, 215, 225, 235 et 245 cm à partir de 195 et 255 cm; 265, 275 et 285 cm à partir de 255 et 295 cm.

Les analyses, effectuées selon les méthodes normalisées pour l'agriculture, sont:

- la granulométrie (pipette Robinson, après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée et dispersion au pyrophosphate de Na);
- le pH (KCl et H_2O avec un rapport eau/sol de 1/2.5);
- la teneur en carbone total (méthode Walkey et Black);
- la teneur en azote total (méthode Kjeldahl);
- les teneurs en cations échangeables, à savoir calcium, magnésium, potassium et sodium (extraction à l'acétate d'ammonium et dosage par absorption atomique);
- la teneur en aluminium échangeable (extraction au KCl et dosage colorimétrique);
- la capacité d'échange cationique (= CEC = T) à pH 7 (extraction par $CaCl_2$ puis KNO_3 , dosage par complexométrie);
- la capacité d'échange au pH dit "du sol" (mêmes extraction et dosage que ci-dessus, mais l'extrait de départ est tamponné à 4 lorsque le pH eau du sol est compris entre 3.7 et 4.2 , à 4.5 lorsqu'il est compris entre 4.3 et 4.8);
- la teneur en manganèse échangeable à pH 7 (extraction à l'acétate d'ammonium et dosage colorimétrique).

On en déduit par calcul:

- l'acidité d'échange $pH(H_2O)-pH(KCl)$;
- le rapport C/N;
- la somme des bases échangeables (= SBE = S);
- le taux de saturation (= S/T = V), à pH 7 ou au pH "du sol".

Les mesures de la granulométrie, du pH et de la teneur en Al éch. ont porté sur tous les échantillons des sondages A, K, C et D (sites "centraux"), et jusqu'à 100 cm sur les sondages L, I, H et E.

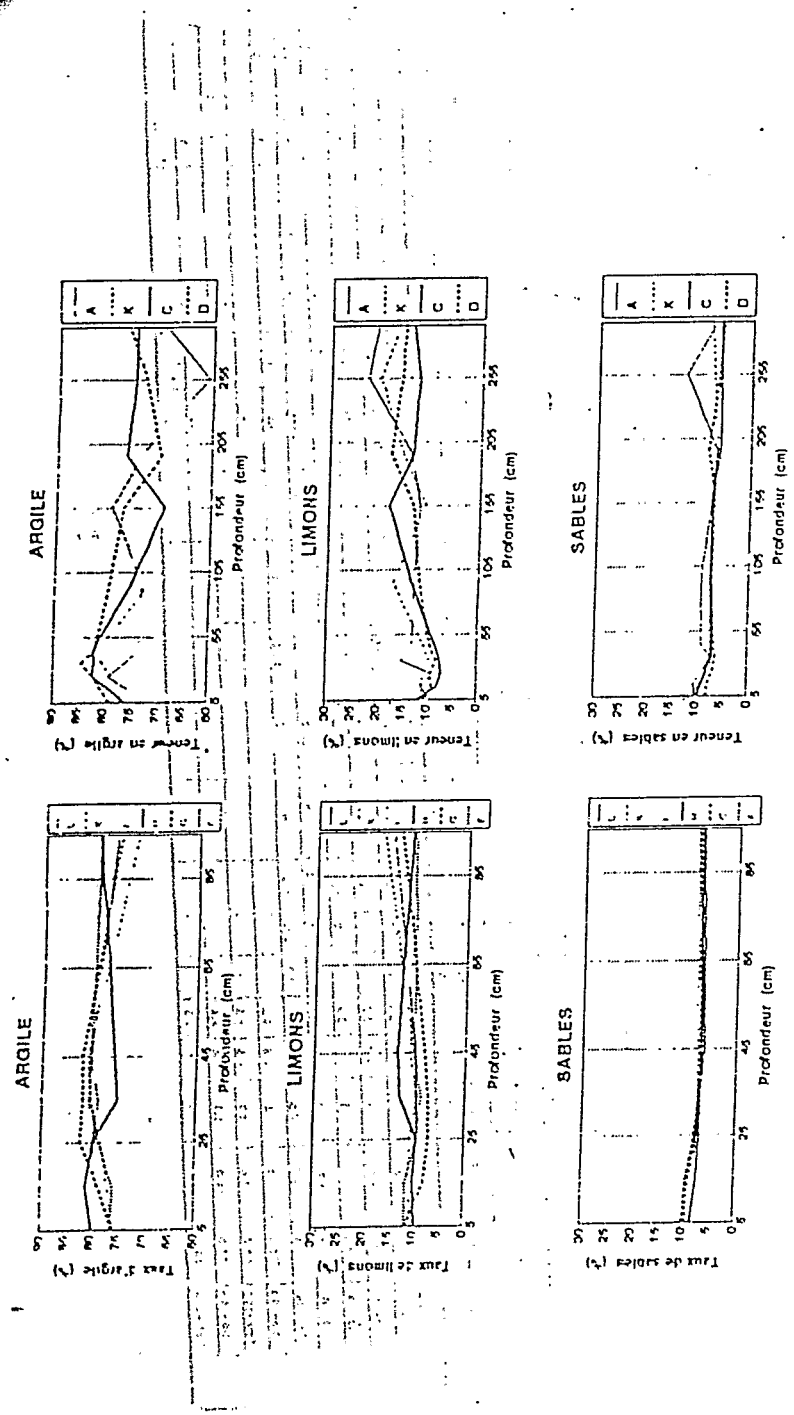


FIG. 2 : TEXTURES

Les mesures de teneurs en C, N, cations échangeables et capacité d'échange à pH 7 ont porté sur tous les sondages jusqu'à 100 cm.

Les mesures de teneurs en Mn éch. ont porté sur les échantillons jusqu'à 100 cm des sondages A, C, D et H.

Les mesures de capacité d'échange au pH "du sol" ont porté sur les échantillons jusqu'à 100 cm des sondages K, L, I et E.

2.2 Résultats

Les résultats d'analyse sont présentés dans le tableau 1. Sur les figures, on distinguera en général:

- les graphes de gauche, qui présentent les résultats jusqu'à 95 cm pour les 2 allées centrales, en bordure des blocs II et III (sites L, K, I, H, C et E);
- les graphes de droite, qui présentent les résultats jusqu'à 295 cm pour les stations médianes (sites A, K, C et D).

2.2.1 Granulométrie (fig. 2)

ARGILE. Dans l'ensemble, les teneurs en argile sont très élevées, entre 60 et 85 % Elles sont de l'ordre de 75 à 79% en surface, passent par un léger maximum entre 20 et 50 cm (78 à 84 %), puis tendent à diminuer avec la profondeur (69 à 76 % à 295 cm; les 60 % notés pour A à 255 cm pourraient être erronés). Les maxima notés entre 20 et 50 cm semblent correspondre aux niveaux les plus cohérents (Barthès & al., 1993 b). On remarque que ce maximum est plus superficiel en H.

LIMONS. Dans l'ensemble, les teneurs en limons sont comprises entre 8 et 23%. Voisines de 10 % en surface, elles passent par des minima peu marqués vers 25-35 cm (8 à 11 %), puis tendent à augmenter avec la profondeur (environ 15-20 % à 295 cm). On notera que les minima semblent correspondre aux niveaux cohérents. On notera aussi que ce minimum est plus superficiel dans le cas de H. La distinction entre limons fins et grossiers, non présentée ici, montre le plus souvent une dominance des limons fins.

SABLES. Les teneurs en sables sont faibles et peu variables; elles varient entre 6 et 12 %. Elles sont de 8-10 % en surface, diminuent un peu jusqu'à 25, 35 ou 45 cm (6-7 %), puis varient très faiblement au-delà (le pic à 12.5 % noté pour A à 255 cm semble erroné). Les minima relatifs de subsurface semblent également correspondre aux niveaux plus cohérents. On remarque que ce minimum est plus superficiel pour le site H. La distinction entre sables fins et grossiers, non présentée ici, montre que les sables fins dominent dans tous les cas.

EN CONCLUSION, les textures sont peu variables dans l'ensemble, avec des teneurs de l'ordre de 70-80 % pour l'argile, 10-20 % pour les limons et 5-10 % pour les sables. On note en profondeur un certain appauvrissement en argile, compensé par un enrichissement en limons. Les niveaux les plus argileux semblent correspondre aux niveaux les plus cohérents.

TAB. I : RESULTATS ANALYTIQUES

SITE	PROF cm	ARG %	LIM %	SAB %	pH H2O	pH KCl	C g/100	N g/100	C/N	Ca échange mé/g	Mg échange mé/g	K échange mé/g	Na échange mé/g	SBE mé/g	CEC pH7 mé/g	V pH7 %	CEC pH5.8 mé/g	V pH5.8 %	Al échange mé/g	Mn échange mm
A	0-10	75.2	8.9	9.9	4	3.8	32	1.2	18.3	0.29	0.04	0.26	0	0.62	13.86	4.5			2.15	68
	10-20	75.1	10.8	10.1	4	3.8	32	1.2	18.5	0.29	0.04	0.28	0.01	0.55	13.27	4.1			2.15	84
	20-30	79.0	8.7	8.5	4	3.8	13	0.8	15.7	0.29	0.02	0.04	0.01	0.38	8.81	4.3			1.82	33
	30-40	75.8	15.1	9.0	4.1	3.9	12	0.8	14.5	0.29	0.02	0.05	0.02	0.38	9.4	4.0			1.55	33
	40-50	73.2	12.9	8.8	3.8	3.7	8.8	0.9	9.8	0.2	0.02	0.04	0	0.26	6.78	3.8			1.29	22
	50-100	72.9	12.7	9.1	4.7	4.4	5.5	0.8	7.4	0.15	0.02	0.03	0	0.2	4.75	4.2			0.57	11
	100-150	78.9	11.9	7.3	4.8	4.4									4.42				0.76	
	150-200	73.9	13.7	8.4	5	4.4									2.52				0.79	
	200-250	80.5	22.8	12.8	4.5	4.1									3.29				1.19	
	250-300	69.2	20.8	6.8	5	4.3									2.69				0.97	
L	0-10	79.1	10.5	8.3	3.9	3.4	21	1.2	16.5	0.6	0.12	0.22	0.01	0.9	14.15	6.4	4.19	21.5	0.72	
	10-20	79.7	9.1	7.1	4.4	3.9	15	1	14.5	0.75	0.06	0.14	0	0.47	11.47	4.1	2.84	8.5	1.05	
	20-30	78.9	9.5	5.9	4.5	4	13	1	13.3	0.13	0.04	0.1	0	0.27	9.42	2.9	1	5.8	1.05	
	30-40	80.3	9.9	6.7	4	3.8	8.7	0.9	10.1	0.15	0.03	0.09	0	0.25	5.27	3.5	0.56	43.1	1.06	
	40-50	75.8	15.1	9.9	4.8	4.3	4.5	0.7	6.3	0.2	0.02	0.06	0	0.3	3.57	8.4	1.76	16.9	0.44	
	50-100																			
K	0-10	78.1	10.3	9.9	3.8	3.4	25	1.5	16.3	0.33	0.1	0.22	0.01	1.06	12.95	8.2			2.22	
	10-20	78.7	10.9	9.0	3.8	3.5	18	1.2	15.5	0.33	0.06	0.17	0	0.54	11.8	4.8	5.15	10.9	2.44	
	20-30	78.3	10.7	8.2	4	3.8	13	1.1	12.8	0.2	0.04	0.09	0	0.33	9.84	3.5	2.95	11.2	2.01	
	30-40	80.3	9.4	7.5	3.8	3.8	10	0.9	11.3	0.13	0.02	0.04	0.05	0.24	8.17	3.2	2.21	11.8	1.86	
	40-50	80.9	10.3	8.9	3.7	3.5	8.9	0.9	10.1	0.13	0.02	0.07	0	0.22	6.78	2.5	2.91	11.5	1.99	
	50-100	71.7	17.0	7.3	4.3	4.1	4.2	0.8	5.7	0.06	0.02	0.07	0	0.17	4.39	3.8	1.26	13.5	0.89	
	100-150	79.3	10.7	8.8	4.8	4.2														
	150-200	72.9	15.4	6.5	4.2	4.1														
	200-250	66.0	20.3	7.1	4.8	4														
	250-300	70.8	16.5	7.8	4.8	4.3														
I	0-10	78.1	11.0	9.7	4.2	3.8	21	1.3	16.1	0.38	0.06	0.22	0	0.68	11.51	5.9				
	10-20	78.7	10.0	9.4	4.2	3.8	16	1.2	13.5	0.35	0.04	0.15	0	0.42	10.36	4.1	4.28	9.4	1.91	
	20-30	80.7	9.4	7.8	4.1	3.7	13	0.9	13.7	0.13	0.02	0.06	0	0.24	9.56	2.5	2.94	6.2	1.6	
	30-40	80.6	9.7	7.3	4.2	3.9	11	0.9	12.2	0.13	0.02	0.04	0	0.24	7.77	3.1	1.85	13.0	1.9	
	40-50	79.8	11.0	7.5	4.3	3.9	10	0.8	12.1	0.06	0.02	0.06	0	0.16	7.19	2.5	3.7	4.9	0.93	
	50-100	79.1	10.7	7.8	4.7	4.2	5.6	0.7	8.1	0.06	0.02	0.04	0.03	0.19	4.14	4.5	2.24	8.3	1.24	
H	0-10	79.8	9.5	8.1	4	3.5	20	1.2	16.4	0.34	0.06	0.28	0.03	0.71	13.57	5.2			2.78	
	10-20	81.0	9.6	7.1	4.1	3.8	14	1	14.0	0.2	0.04	0.17	0.04	0.45	10.58	4.3			2.31	14
	20-30	79.3	9.4	8.7	4.1	3.9	11	1	11.2	0.15	0.02	0.14	0.03	0.34	8.01	4.2			2.01	11
	30-40	75.1	12.9	8.7	4.2	4	9.5	0.9	10.6	0.15	0.02	0.14	0.06	0.38	6.94	5.4			1.56	28
	40-50	75.8	13.5	8.8	4.2	3.7	8.5	0.9	9.9	0.15	0.02	0.17	0.04	0.36	6.18	5.1			1.18	28
	50-100	78.2	11.0	6.5	4.5	4.4	4.7	0.7	6.2	0.15	0.02	0.06	0.04	0.29	3.29	7.7			1.07	22
C	0-10	75.9	11.3	9.2	4	3.6	24	1.3	18.3	0.29	0.06	0.14	0.01	0.5	13.6	4.4			0.75	17
	10-20	78.5	7.9	8.6	4	3.6	25	1.1	20.4	0.2	0.04	0.15	0.01	0.4	14.33	2.8			2.42	65
	20-30	82.1	7.0	7.7	4	3.7	15	1	14.7	0.15	0.02	0.08	0.01	0.27	11.17	2.4			2.55	44
	30-40	81.8	7.5	8.7	4.1	3.8	12	1	11.5	0.06	0.02	0.08	0	0.16	9.35	1.9			2.2	28
	40-50	81.9	8.1	8.7	4.2	3.9	11	0.9	11.4	0.15	0.02	0.07	0.01	0.25	7.54	3.3			1.75	17
	50-100	75.0	13.3	7.1	4.7	4.5	5.7	0.8	6.7	0.06	0	0.06	0	0.12	5.1	3.3			1.51	22
	100-150	80.0	12.1	7.0	4.8	4.5									4.04				0.56	11
	150-200	78.4	13.4	5.2	4.8	4.2									4.28				0.75	
	200-250	74.9	12.3	5.7	4.9	4.3									7.39				0.95	
	250-300	74.8	13.7	5.8	4.8	4.3									3.02				0.97	
E	0-10	75.8	11.4	9.0	4.2	3.6	21	1.2	17.2	0.38	0.06	0.16	0.02	0.64	13.27	4.8	5.01	13.8	2.09	
	10-20	75.8	11.4	9.1	4.2	3.7	20	1.1	17.8	0.33	0.04	0.11	0	0.48	12.58	3.8	4.51	10.6	1.87	
	20-30	78.5	8.5	7.4	4.4	3.9	14	1	13.4	0.2	0.02	0.04	0	0.26	9.43	2.8	4.04	5.4	1.75	
	30-40	80.2	8.7	7.1	4.4	3.9	11	0.8	13.8	0.2	0.02	0.02	0	0.24	7.65	3.1	3.96	5.0	1.09	
	40-50	80.4	10.1	8.1	4.5	4.1	9	0.8	10.0	0.2	0.02	0.01	0	0.25	7.45	3.1	2.42	8.5	1.37	
	50-100	78.8	10.5	7.7	4.5	4.1	5.1	0.7	7.2	0.25	0.02	0.02	0	0.29	4.96	5.8	0.26	33.0	1	
D	0-10	78.5	10.7	7.7	4.2	3.6	26	1.5	18.7	0.32	0.05	0.16	0.01	1.5	16.95	7.7			2.11	105
	10-20	80.5	8.9	7.6	4.1	3.8	25	1.5	17.7	0.45	0.1	0.09	0	0.62	15.19	4.1			2.4	85
	20-30	81.9	9.0	8.4	4.1	3.7	14	1	14.5	0.2	0.02	0.1	0	0.32	11.78	2.7			2.15	28
	30-40	84.2	8.0	6.1	4.1	3.8	12	0.9	13.4	0.2	0.02	0.12	0	0.34	9.4	3.5			1.85	28
	40-50	81.8	9.2	6.2	4.1	3.8	11	0.9	12.2	0.15	0.02	0.11	0.02	0.3	8.48	3.5			2.04	28
	50-100	78.1	11.7	7.0	4.9	4.4	4.2	0.8	5.2	0	0.02	0.03	0	0.05	5.83	1.3			0.75	1
	100-150	78.8	13.2	8.8	4.8	4.3									3.45				0.84	
	150-200	79.7	17.8	8.0	4.8	4.3									3.17				0.8	
	200-250	73.0	18.0	5.1	4.8	4.4									4.85				0.91	
	250-300	78.5	15.4	5.5	5	4.3									5.32				1.02	

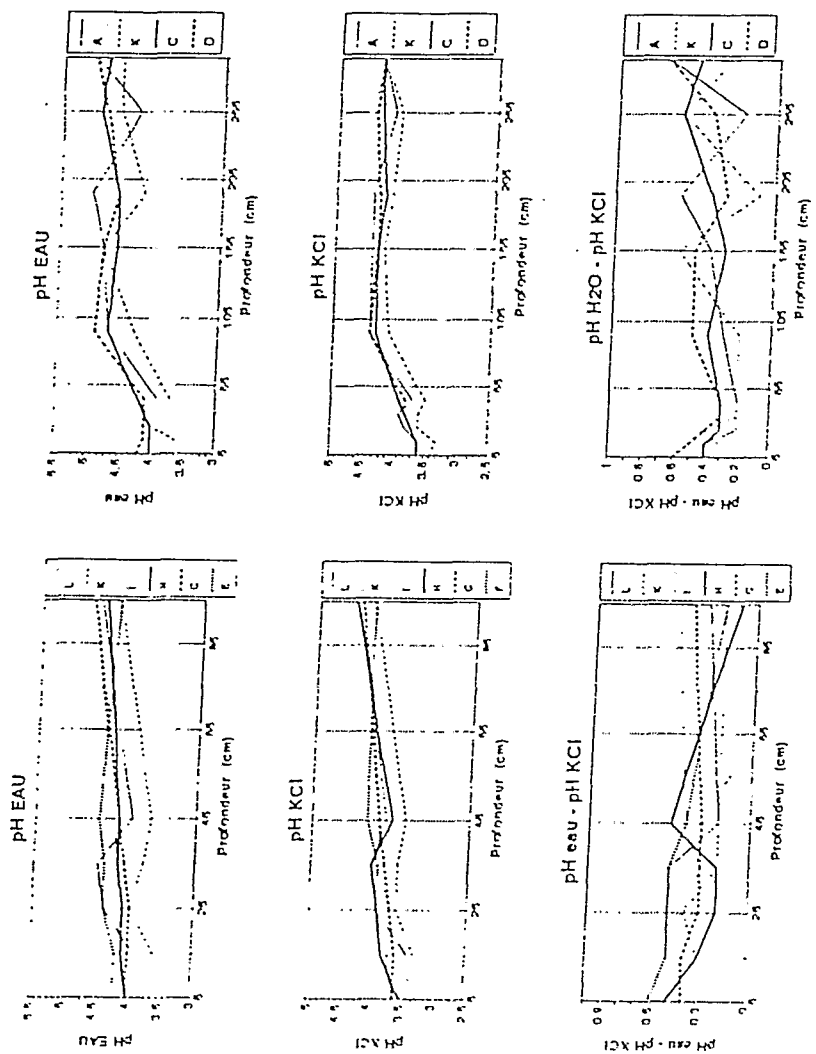


FIG. 3 : ACIDITE

On note que ce niveau plus argileux et moins limoneux est plus superficiel pour H, et l'allure des courbes semble indiquer que le sol aurait subi un décapage d'une vingtaine de centimètres en H (près de l'axe de drainage). Cette hypothèse avait déjà été formulée en examinant les données de résistance à la pénétration (Barthès & al., 1993b). A l'exception de ce site H, où l'installation des appareils de mesure est décommandée, les variations de texture avec la topographie sont peu marquées.

2.2.2 Acidité (fig. 3)

pH eau. Ils sont compris entre 3.6 et 5 , et sont donc très acides. Jusqu'à 55 cm, ils sont compris entre 3.6 et 4.5, avec des variations peu marquées sur chaque site. A partir de 95 cm, ils sont plus élevés, et varient entre 4.2 et 5, avec également des variations peu importantes pour chaque site (< 0.7 unité pH).

Quelques différences peuvent être notées entre sites. Ainsi, les pH eau sont sensiblement plus faibles en K, et tendent à être un peu plus élevés en D (vers l'aval).

On remarque que tous ces pH sont plus faibles (de 0.5 à 0.9 unité pH) que ceux mesurés jusqu'à 40 cm en mai et octobre 1992 (Barthès & al., 1992 et 1993 b). Cette plus forte acidité en janvier pourrait être due à l'augmentation de l'activité biologique lors des pluies. Toutefois, ces variations concordent mal avec celles notées par G. Martin (1967), présentant un pH maximum vers février-mars, durant les pluies, et un minimum vers mai-juin, en début de saison sèche.

pH KCl. Ils sont compris entre 3.3 et 4.4 . Il est également possible de distinguer:

- les niveaux superficiels, jusqu'à 55 cm, qui présentent des pH plus bas (3.4 à 4.1), croissant généralement avec la profondeur;
- les niveaux plus profonds, à partir de 95 cm, dont les pH sont plus forts (4.1 à 4.4), stables et peu différents entre sites.

On peut aussi distinguer la fosse K, qui présente des valeurs systématiquement plus faibles que les autres sites.

On note enfin que les pH KCl relevés ici sont plus faibles (de 0.3 à 0.5 unité pH) que ceux mesurés jusqu'à 40 cm en mai et octobre 1992 (Barthès & al., op. cit.).

pH eau - pH KCl. Ce paramètre nous renseigne sur l'acidité d'échange. La différence entre pH eau et pH KCl est comprise entre 0.1 et 0.6 unité pH, ce qui est modéré. Elle diminue depuis la surface (0.4 à 0.6), jusqu'à un minimum situé entre 25 et 95 cm (0.1 à 0.4 unité pH); elle tend ensuite à remonter (0.1 à 0.7 unité pH), avec des variations marquées sur chaque site.

Par ailleurs, on n'observe pas de variation nette avec la topographie.

Enfin, les acidités d'échange relevées ici sont plus faibles (de 0.2 à 0.6 unité pH) que celles relevées en mai et octobre 1992 (Barthès & al., op. cit.).

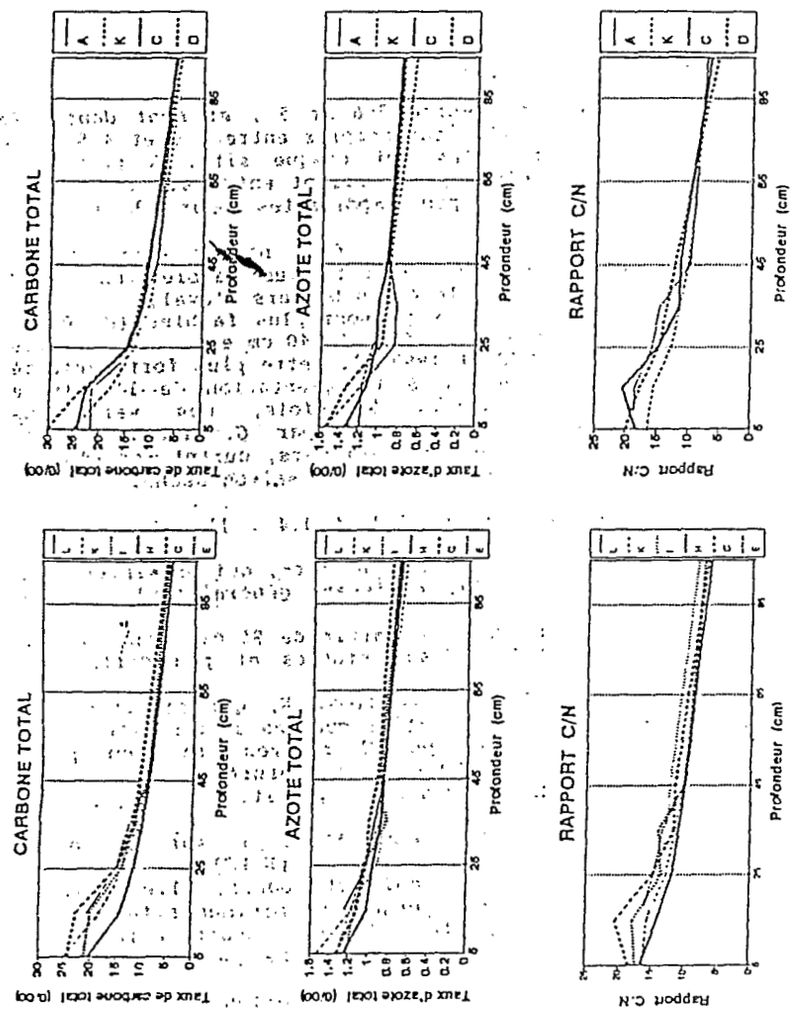


FIG. 4 : MATIERE ORGANIQUE

EN CONCLUSION, les sols étudiés sont très acides. En janvier, le pH eau n'y excède jamais 5, et dépasse rarement 4 dans le demi-mètre supérieur. Le pH tend à augmenter jusque vers 1 m, puis reste à peu près stable (surtout pH KCl). L'acidité d'échange (pH eau - pH KCl) s'avère souvent modérée.

L'acidité est plus marquée ici que sur les échantillons de mai et octobre 1992, de l'ordre de 0.5 à 1 unité pH pour le pH eau, de la moitié pour le pH KCl. L'acidité plus forte de janvier (milieu de saison des pluies) est donc due pour l'essentiel à des protons "libres" supplémentaires, sans doute du fait de l'activité biologique accrue.

Pour ce qui concerne l'installation des dispositifs de mesures, on relève que la station K présente des pH sensiblement plus faibles qu'ailleurs; l'implantation de sites de mesures y est donc déconseillée. Pour le reste, les variations avec la topographie sont peu nettes.

2.2.3 Matière organique (fig. 4)

CARBONE TOTAL. Les teneurs en carbone total diminuent avec la profondeur. Elles passent de 20-25 % en surface, ce qui est assez élevé, à 4-6 % à 95 cm, ce qui reste relativement important, avec une décroissance plus marquée entre 15 et 25 cm, parfois dès 5 cm (stations H, K et D).

La station H, près de l'axe de drainage, présente systématiquement des valeurs plus faibles que les autres sites. Toutefois, les différences entre stations demeurent faibles, et parmi les autres stations, on distingue difficilement les stations "aval" (C, D et E), plus riches en carbone, des stations "amont" (A, I, K et L).

Par ailleurs, les teneurs relevées ici sont souvent plus élevées, quoique voisines, de celles mesurées jusqu'à 40 cm en mai et octobre 1992; on y distinguait plus nettement l'amont de l'aval.

AZOTE TOTAL. Les teneurs en azote total sont correctes, et diminuent avec la profondeur. Elles passent de 0.12-0.15 % en surface, à 0.06-0.08 % à 95 cm, avec une décroissance plus rapide au sommet des profils, jusqu'à 15 ou 25 cm.

La distinction entre stations "amont" et "aval" est très difficile ici, et dans l'ensemble, les différences entre sites, à une profondeur donnée, sont faibles.

Par ailleurs, les valeurs notées ici sont très voisines de celles de mai et octobre 1992, surtout entre 10 et 40 cm.

C/N. Les C/N tendent à diminuer lorsque la profondeur augmente, de 16-20 en surface, ce qui est élevé, à 5-8 à 95 cm. Toutefois, certains sites (A, C et E) présentent un maximum à 15 cm. H, près de l'axe de drainage, présente un C/N toujours un peu plus faible que les autres sites.

Les C/N élevés au sommet du profil témoignent d'une mauvaise décomposition de la matière organique. Celle-ci pourrait être liée à la teneur en aluminium échangeable, dont l'évolution avec la profondeur est comparable à celle du C/N. On reviendra sur ce point au 3.

Par ailleurs, les valeurs de janvier 1993 sont peu différentes de celles de mai et octobre 1992.

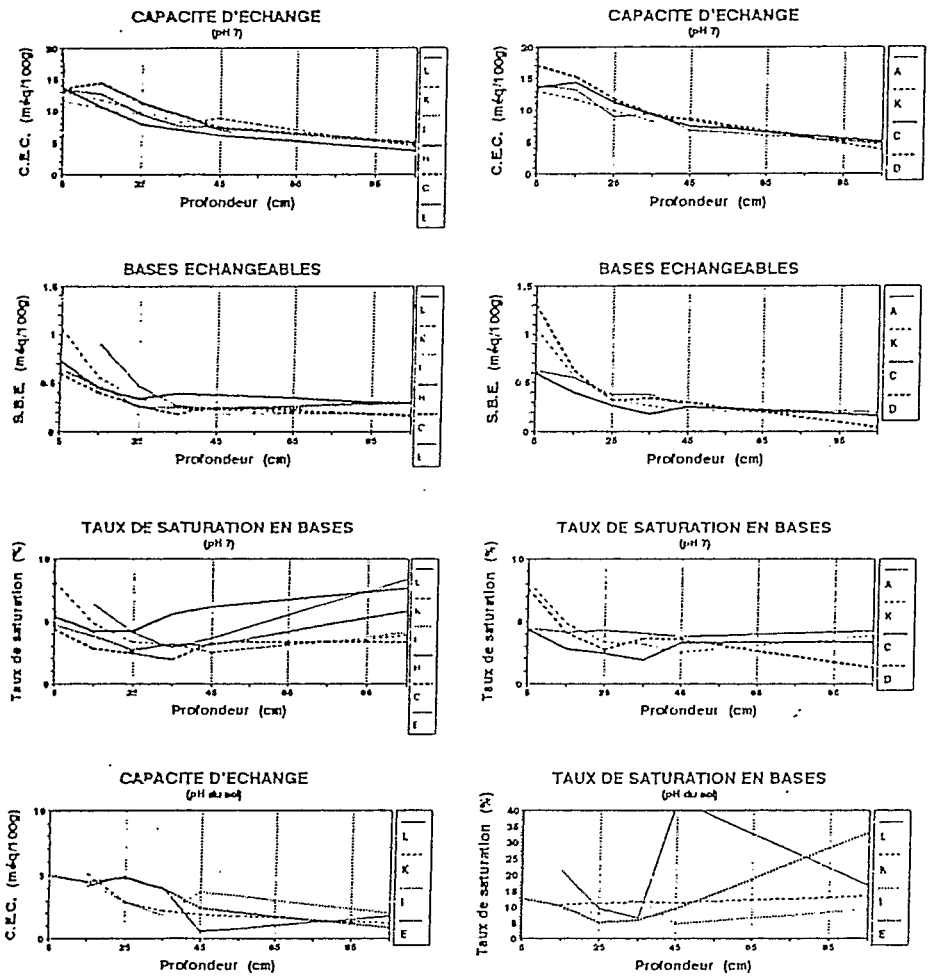


FIG. 5 : COMPLEXE D'ECHANGE

EN CONCLUSION, les teneurs en carbone total sont élevées, avec de faibles différences entre stations à partir de 35 cm. Les teneurs en azote total sont correctes, et voisines pour tous les sites. Les C/N sont élevés, surtout au sommet des profils, et semblent varier avec la profondeur comme les teneurs en aluminium échangeable.

Ces valeurs, relevées en janvier (saison des pluies), sont peu différentes de celles de mai et octobre (fin et début de saison des pluies), ce qui témoigne de variations saisonnières limitées, au moins pour les périodes considérées. On notera toutefois que les teneurs en carbone total sont un peu plus fortes en janvier.

Par ailleurs, la station H, près de l'axe de drainage, présente des teneurs en carbone total et des C/N toujours plus faible que les autres stations; l'implantation des dispositifs de mesure y est donc décommandée.

2.2.4 Complexe d'échange (fig. 5)

CAPACITE D'ECHANGE A pH 7. Le plus généralement, les capacités d'échange décroissent lorsque la profondeur augmente. Elles passent de 11-17 méq/100g en surface à 3.5-5 méq/100g à 95 cm. La diminution est généralement faible de 5 à 15 cm, plus marquée jusqu'à 35 cm (où ont été mesurées des compacités élevées), puis très faible au-delà. A partir de 45 cm, les différents sites présentent des valeurs très voisines.

Les variations entre sites ou avec la profondeur sont comparables à celles notées pour le taux de carbone total (ce point sera repris au 3). Ainsi, la station H, qui a le taux de carbone total le plus faible, a également la capacité d'échange la plus faible (sauf à 5 cm).

Les valeurs relevées ici sont généralement un peu plus fortes que celles de mai et octobre 1992, comme dans le cas du carbone total.

CAPACITE D'ECHANGE AU pH DU SOL. Les données sont peu nombreuses, et semblent assez hétérogènes. Elles montrent que les capacités d'échanges au pH du sol sont beaucoup plus faibles que celles mesurées à pH 7, de l'ordre respectivement de 5 méq/100g contre 14 méq/100g au sommet du profil, 2 méq/100g contre 5 méq/100g à 95 cm. Dans les deux cas, on note une diminution avec la profondeur, plus marquée entre 15 et 45 cm, puis très faible au-delà.

SOMME DES BASES ECHANGEABLES. La somme des bases est toujours faible. Elle diminue nettement au sommet du profil, passant de 0.6-1.3 méq/100g, à 5 cm, à 0.25-0.4, à 25 cm. La diminution avec la profondeur est ensuite très faible, la SBE étant de l'ordre de 0.2-0.3 méq/100g à 95 cm (la valeur 0.05 méq/100g notée pour D à 95 cm semble erronée).

On n'observe pas de variation nette avec la topographie.

Les valeurs relevées en janvier sont souvent un peu plus fortes que celles de mai et octobre 1992, sauf en surface, où elles sont plus faibles. Il est difficile d'expliquer ces variations.

TAUX DE SATURATION EN BASES A pH 7. Ils diminuent depuis la surface (4.5 à 8 %) jusqu'à un minimum (2 à 4.5 %) situé entre 15 et 45 cm, puis augmentent, souvent faiblement (4.5 à 8.5 % à 95 cm; la valeur 1.5 % notée pour D semble erronée). Ces valeurs sont faibles. Sur certains sites, les variations avec la profondeur sont limitées (< 0.7 point pour A; < 2.5 points pour C).

Les minima notés entre 15 et 45 cm pourraient correspondre aux niveaux plus compacts; ce point sera examiné au 3.

Le taux de saturation en bases (pH 7) en janvier 1993 est généralement plus élevé qu'en mai et octobre 1992, sauf en surface, où il est souvent nettement plus faible. Lors des pluies (janvier), le complexe d'échange du niveau superficiel, où l'activité biologique est importante, est donc nettement enrichi en éléments acides (protons surtout). Dans le même temps, les niveaux sous-jacents sont plutôt enrichis en bases, qui pourraient provenir du sommet du profil, où la teneur absolue en bases diminue.

TAUX DE SATURATION EN BASES AU pH DU SOL. Les données sont peu nombreuses, et semblent erronées dans certains cas (L à 45 cm, E à 95 cm). En ne tenant pas compte de ces derniers, on constate une évolution comparable à celle relevée à pH 7, mais avec des valeurs plus élevées. Le taux de saturation diminue ainsi depuis la surface jusqu'à des minima situés entre 25 et 45 cm, puis remonte faiblement. En excluant les données douteuses, les taux de saturation au pH du sol sont compris entre 5 et 21 %, contre 2 à 8.5 % à pH 7.

EN RESUME, les sols étudiés présentent une capacité d'échange satisfaisante, compte tenu de leur nature principalement kaolinitique: 15 méq/100g à 5 cm et 5 méq/100g à 95 cm, à pH 7. Mais ils sont fortement désaturés en bases: la SBE dépasse rarement 1 méq/100g à 5 cm et reste inférieure à 0.5 méq/100g dès 25 cm, avec un taux de saturation (pH 7) compris entre 2 et 8.5 %.

Au pH du sol, la capacité d'échange s'avère beaucoup plus faible, et passe de 5 méq/100g en surface à 2 méq/100g à 95 cm. En conséquence, le taux de saturation au pH du sol est nettement plus élevé qu'à pH 7, variant de 5 à 21 %.

Les variations avec la profondeur sont marquées:
- la CEC diminue rapidement entre 15 et 35, puis faiblement;
- la SBE diminue jusqu'à 25 ou 35 cm, puis se stabilise;
- le taux de saturation est minimal entre 15 et 45 cm.

Ces variations pourraient être liées à la présence de niveaux plus compacts situés entre 15 et 40 cm. Elles seront rediscutées au 3.

La comparaison avec les résultats de mai et octobre 1992 montre que CEC et SBE sont généralement un peu supérieures en janvier 1993, lors des pluies. Le taux de saturation en bases est également plus fort en janvier, sauf en surface où il est souvent nettement plus faible, sans doute en relation avec l'activité biologique.

Les variations avec la topographie sont généralement peu marquées, sauf pour H, près de l'axe de drainage. On y observe des variations qui semblent souvent décalées par rapport aux autres stations (hypothèse du décapage).

2.2.5 Cations échangeables (fig. 6 et 7)

CALCIUM. Les teneurs en calcium échangeable diminuent de 5 cm (0.3 à 0.6 méq/100g) jusqu'à 25 ou 35 cm (0.1-0.2 méq/100g), puis restent à peu près stables (0.1-0.3 méq/100g à 95 cm; le 0 noté pour D à 95 cm semble erroné)).

En pourcentage du total des bases échangeables, les taux oscillent généralement entre 40 et 70 %, mais les variations sont deux fois plus limitées pour un site donné; on observe des minima fréquents vers 35 cm (niveaux compacts). Toutefois, dans le cas des stations A et E, le rapport Ca éch./SBE croît jusqu'à 25 ou 45 cm, puis reste stable autour de 80 %

On n'observe pas d'organisation nette avec la topographie.

Les teneurs absolues relevées en janvier sont un peu supérieures à celles de mai et octobre 1992, sauf parfois en surface. En pourcentage du total des bases, les teneurs sont supérieures en janvier (surtout à l'amont), sauf pour la station C, où elles sont inférieures ou égales.

POTASSIUM. Dans l'ensemble, les teneurs en potassium échangeables diminuent rapidement depuis la surface (0.18 à 0.29 méq/100g à 5 cm) jusqu'à 25 cm (0.04 à 0.14 méq/100g), puis plus lentement jusqu'à 35 ou 45 cm (0.01 à 0.14 méq/100g), et restent ensuite à peu près stables (0.02 à 0.1 méq/100g à 95 cm). Sur les sites D et H (aval et axe de drainage), l'évolution est différente, avec un maximum relatif à 35 ou 45 cm (0.12 et 0.17 méq/100g) puis une diminution nette (0.03 et 0.08 méq/100g).

En pourcentage du total des bases échangeables, les variations sont moins marquées et moins homogènes:
- sur les stations D et K, le rapport K éch./SBE tend à augmenter avec la profondeur (de 15-20 % à 40 %);
- sur les stations A et E, K éch/SBE tend à diminuer avec la profondeur (de 30-40% à 5-15%);
- sur les stations H, I et L, le rapport augmente un peu jusqu'à 35 ou 45 cm (35-45 %), puis diminue (30 %);
- sur la station C, le rapport diminue jusqu'à 45 cm (30 %), puis augmente (50 %).

Dans l'ensemble, ces valeurs sont généralement comprises entre 15 et 45 %, ce qui est assez élevé.

Il est difficile de faire la relation avec la topographie; on note toutefois que les sites D et H (points bas), en teneurs absolues, présentent des variations comparables.

Les teneurs absolues relevées en janvier sont généralement voisines de celles de mai et octobre 1992. En revanche, en janvier, K éch/SBE est inférieur aux valeurs de mai et octobre 1992 (surtout à l'amont), sauf pour la station C, où elles sont supérieures ou égales.

MAGNESIUM. Les teneurs en magnésium échangeable diminuent de 5 cm (0.04 à 0.1 méq/100g, sauf D à 0.25 méq/100g) jusqu'à 25 ou 35 cm (0.02 à 0.04 méq/100g), puis restent à peu près stables.

En pourcentage du total des bases échangeables, les taux tendent généralement à diminuer depuis 5 cm (6 à 10 %, sauf D à 20%, qui pourrait être erroné) jusqu'à 25 ou 35 cm (5 à 8 %), puis remontent (8 à 12 % à 95 cm). Toutefois, dans le cas des stations L et C, on note des maxima à 25 ou 35 cm (11 à 17 %), puis une décroissance nette avec la profondeur. Dans l'ensemble, ces valeurs sont faibles, surtout lorsqu'on les compare à celles du potassium.

En pourcentage du total des bases échangeables, on remarque une certaine organisation avec la topographie, les stations amont (A, L, K et I) présentant souvent des valeurs plus élevées que les stations aval (C, D, E et H).

Les teneurs absolues en magnésium échangeables relevées en janvier sont supérieures ou égales à celles de mai et octobre 1992, sauf en surface où elles sont généralement plus faibles. En pourcentage du total des bases échangeables, les teneurs en magnésium sont généralement inférieures en janvier à celles de mai et octobre (surtout à l'amont), sauf pour la station C, à partir de 15 cm, où elles sont supérieures.

SODIUM. Les teneurs en sodium échangeable sont faibles à nulles, dépassant rarement 0.05 méq/100g et 10 % de la somme des bases échangeables. Toutefois, la station H, au niveau de l'axe de drainage, est nettement plus riche, avec des taux de l'ordre de 0.1 méq/100g et 10-20 %. Un autre point intéressant à noter est la fréquence de maxima entre 25 et 45 cm.

On ne relève pas de différence notable avec les résultats de mai et octobre 1992.

RAPPORT Ca éch. / Mg éch. (graphe non présenté). Ce rapport varie entre 3 et 15, ce qui est assez élevé dans l'ensemble. Les différents sondages présentent des valeurs voisines en surface (3 à 7), plus étalées ensuite. Dans certains cas (H et K), les variations sont limitées.

On considère que la valeur optimale de ce rapport, pour les cultures annuelles, est située entre 1 et 10 (Boyer, 1982). Dans l'ensemble, les valeurs mesurées ici sont donc à peu près satisfaisantes, sauf pour E au-delà de 25 cm et A à 25 et 35 cm.

RAPPORT (Ca éch.+ K éch.)/S.B.E. (graphe non présenté). Ce rapport est élevé, toujours compris entre 70 et 100 %. Dans certains cas, il varie faiblement autour de 90 % (A et C). Ces deux cations représentent donc la majeure partie des bases échangeables.

EN RESUME, les teneurs en bases échangeables sont faibles, aucune ne dépassant 1 méq/100g. Elles diminuent jusque vers 25 ou 35 cm puis restent à peu près stables en profondeur, sauf pour le sodium, qui présente des teneurs maximales (quoique faibles) vers 35 ou 45 cm.

En proportion du total des bases échangeables:
- le calcium est l'élément dominant, (40 à 70 % du total, **avec souvent des minima vers 35 cm);**
- le potassium vient ensuite (en général 15 à 45 %);
- le magnésium vient ensuite (en général 5 à 20 %, avec **souvent des maxima vers 25-35 cm);**
- le sodium reste très faible à nul (sauf en H, où il atteint 10 %).

Quelques relations peuvent être établies entre les teneurs en bases échangeables et la situation topographique. Ainsi, pour K éch., les situations aval (D et H) présentent des maxima relatifs vers 35-45 cm, alors qu'ailleurs ces teneurs restent stables à partir de 25 cm. D'autre part, pour Mg éch./SBE, les valeurs sont généralement plus faibles vers l'aval (C, D, E et H) que vers l'amont (A, L, K et I). On note aussi les teneurs plus fortes en sodium en H (axe de drainage). Ces considérations conduisent à écarter H des sites susceptibles d'accueillir des dispositifs de mesure.

Par rapport aux échantillons prélevés en mai et octobre 1992, ceux de janvier 1993 présentent généralement des teneurs:
- absolues plus fortes (Ca, Mg) ou comparables (K, Na);
- relatives plus fortes (Ca/SBE), comparables (Na/SBE) ou plus faibles (K/SBE, Mg/SBE).

2.2.6 Aluminium et manganèse échangeables (fig. 8)

ALUMINIUM ECHANGEABLE. Les teneurs en aluminium échangeable sont comprises entre 0.44 et 2.53 méq/100g, ce qui est élevé dans l'ensemble. Généralement, les valeurs sont maximales entre 5 et 15 cm, ce qui semble la règle sur le bloc expérimental (Barthès & al., 1992a & 1993b); ces maxima dépassent 2 méq/100g. Les teneurs diminuent ensuite, avec souvent une pause vers 35 cm (0.8 à 1.9 méq/100g), puis des minima à 95 cm (0.5 à 1 méq/100g), et remontent faiblement pour atteindre environ 1 méq/100g à 295 cm.

Les maxima rencontrés entre 5 et 15 cm semblent correspondre au sommet des matériaux plus compacts (Barthès & al., 1993a); les maxima relatifs fréquents à 45 cm pourraient correspondre à la base de ces niveaux compacts. Ces points seront réexaminés au chapitre 3.

On note que les teneurs relevées ici sont peu différentes de celles de mai et octobre 1992 (Barthès & al., op. cit.).

On n'observe pas d'organisation nette avec la topographie.

On s'est intéressé à l'indice de Kamprath (1970):

$$m = 100 \times Al\ éch./(Al\ éch.+SBE).$$

Pour les échantillons étudiés, cet indice est généralement supérieur à 70, ce qui est très élevé; seules certaines cultures résistantes peuvent s'accommoder de telles conditions (Boyer, op.cit.). Dans le détail, cet indice augmente généralement depuis la surface (60 à 80) jusqu'à un maximum situé entre 25 et 45 cm (80-90), puis diminue légèrement (pour D, il augmente au-delà de 45 cm)

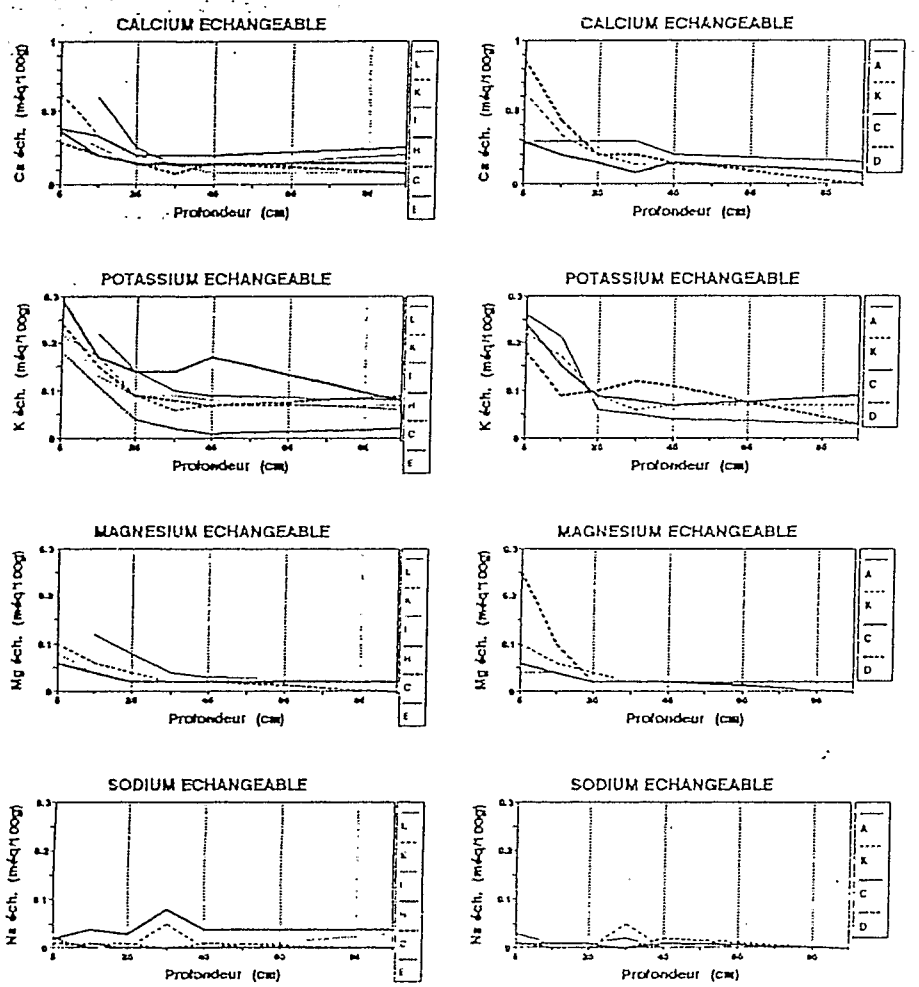


FIG. 6 : CATIONS ECHANGEABLES

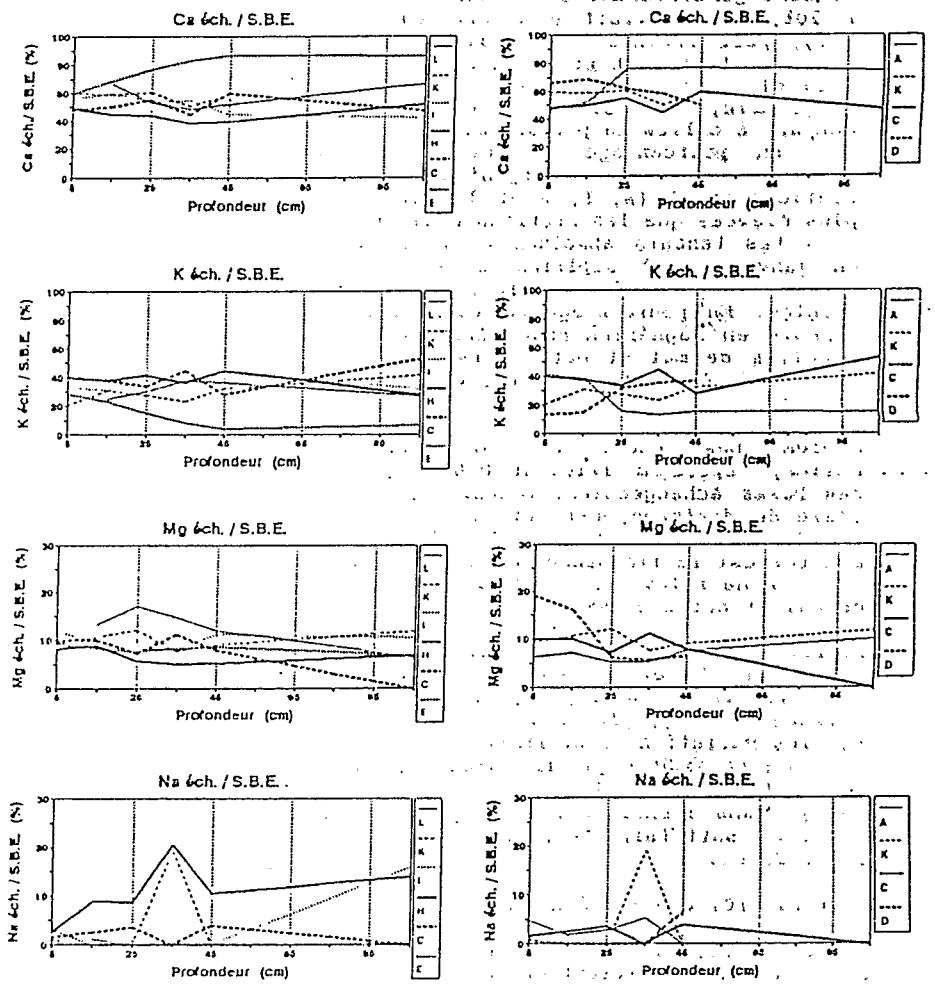
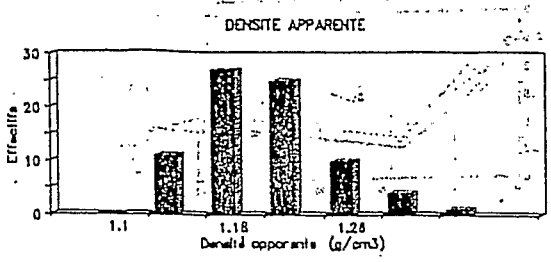
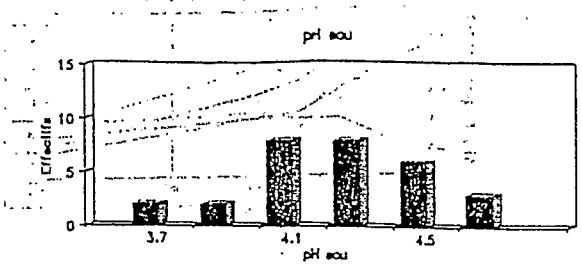
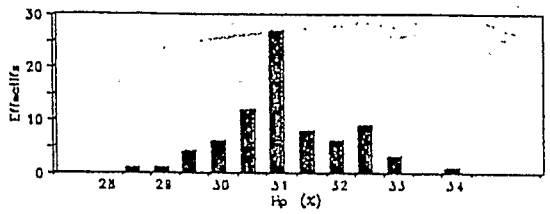
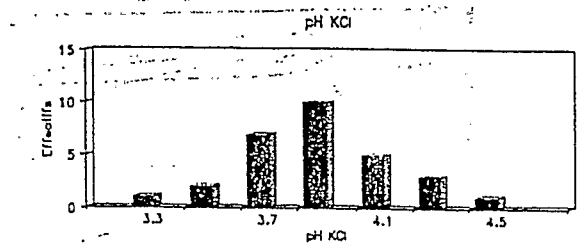


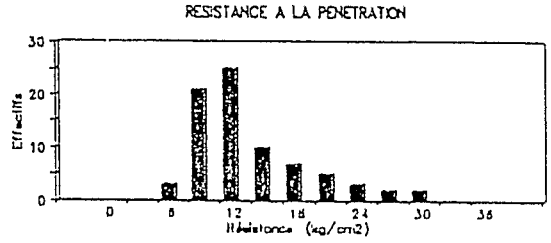
FIG. 7 : CATIONS ECHANGEABLES (% S.B.E.)

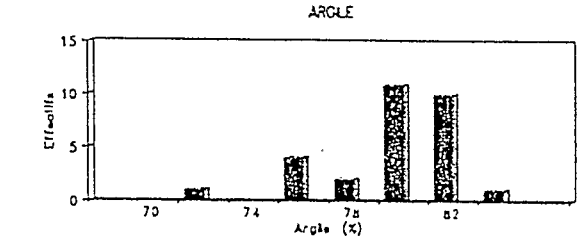


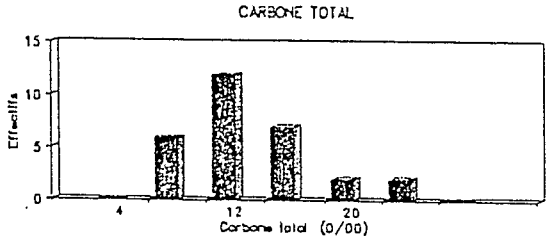


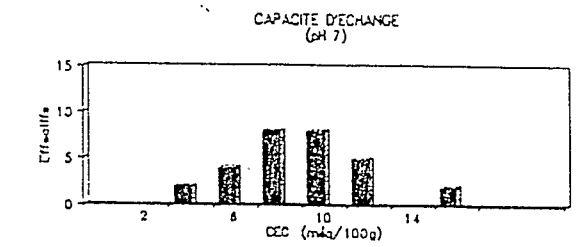


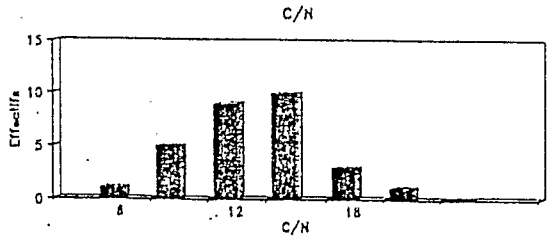


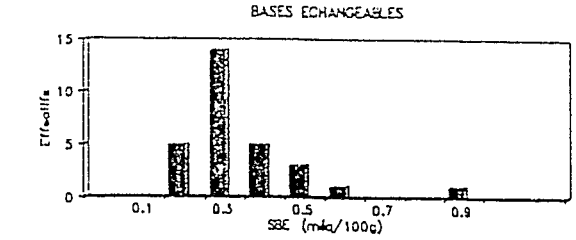












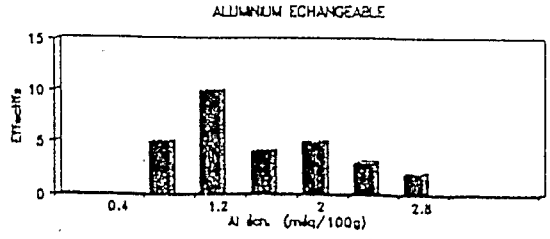


FIG.9 : FREQUENCES

MANGANESE ECHANGEABLE. Les teneurs en Mn éch. sont comprises entre 6 et 105 ppm; Elles diminuent rapidement entre 5 cm (80-105 ppm) et 25 cm (30-35 ppm), puis plus faiblement (5-20 ppm à 95 cm).

D'après Boyer (op. cit.), on observe des toxicités aiguës pour le cotonnier à partir de 10 à 13 ppm, pour l'arachide à partir de 80 à 100 ppm. Il est donc probable que, pour les cultures implantées (manioc, légumineuses, maïs), les seuils de toxicité soient atteints, au moins au sommet du profil.

Al éch./Mn éch. . Les teneurs en aluminium échangeables s'avèrent beaucoup plus importantes que celles en manganèse échangeable. Ainsi, le rapport Al/Mn augmente depuis la surface (20) jusqu'à des maxima situés entre 25 et 45 cm (65-75); au-delà, l'évolution est variable suivant les stations.

EN RESUME, les teneurs en aluminium échangeable sont élevées dans l'ensemble, et des risques de toxicité sont à craindre. Ces teneurs sont maximales entre 5 et 15 cm (> 2 méq/100g), au-dessus des matériaux plus compacts; elles sont minimales vers 95 cm (< 1 méq/100g), puis remontent faiblement (# 1 méq/100g à 295 cm). Les différences avec les valeurs notées en mai et octobre 1992 sont peu marquées.

Les teneurs en manganèse échangeable sont également élevées, surtout au sommet des profils (> 50 ppm). Elles diminuent rapidement jusqu'à 25 cm, puis restent à peu près stables (10-20 ppm). Des toxicités sont également à craindre.

3. COMPARAISON ENTRE PARAMETRES PHYSIQUES ET/OU CHIMIQUES

On dispose, pour la même période (janvier 1993) et les mêmes sites:

- de données sur les densités apparentes, sur fosses (Hartmann, 1993);
- de données sur les résistances à la pénétrations, sur fosses (Barthès & al., 1993a);
- de mesures d'humidité pondérale, sur sondages ((Barthès & al., 1993a);
- de résultats d'analyse chimique et granulométrique, sur sondages.

Il est intéressant de procéder à des comparaisons, pour mettre en évidence des relations permettant d'"expliquer" (statistiquement au moins) certains paramètres par d'autres.

3.1 Comparaison entre paramètres physiques

La comparaison porte sur 3 séries de 78 valeurs:

- les densités apparentes, mesurées au cylindre, sur les fosses L, K, I et H aux profondeurs 10-15, 20-25, 30-35, 40-45, 50-55, 60-65, 70-75, 80-85, 90-95, 100-105, 110-115, 120-125, 130-135 et 140-145 cm, sur la fosse E aux mêmes profondeurs à l'exception de 10-15 cm, et sur la fosse C aux mêmes profondeurs à partir de 60-65 cm;

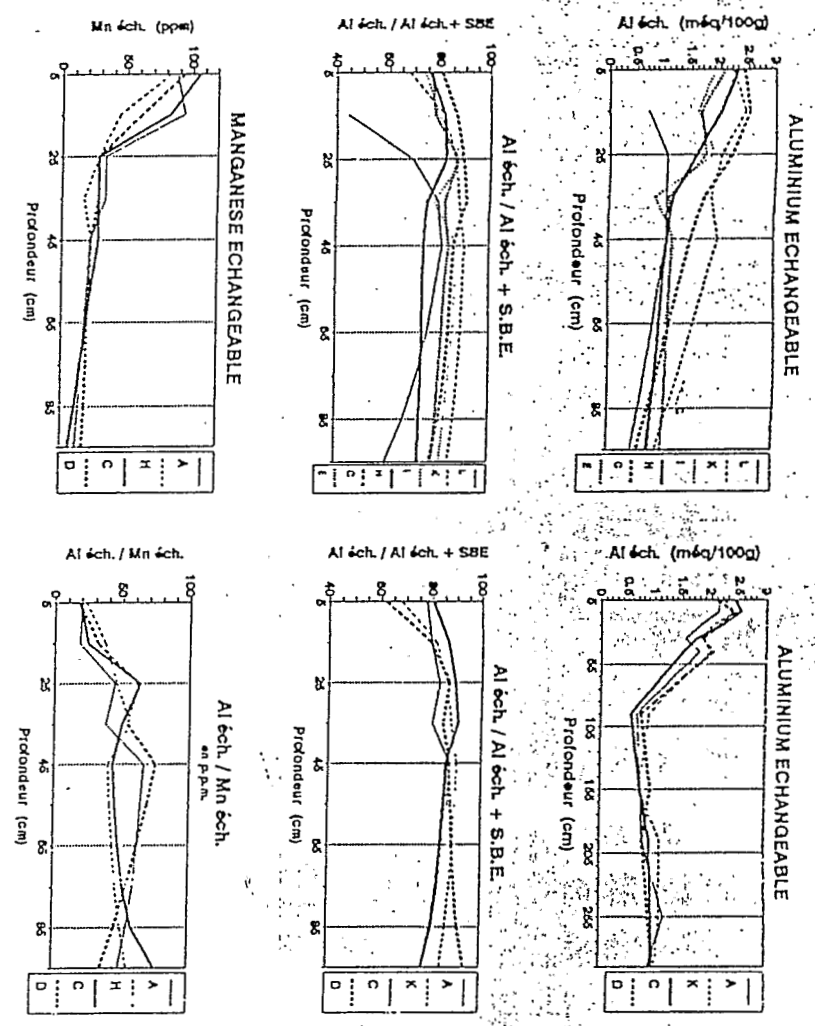


FIG. 8 : ALUMINIUM ET MANGANESE ECHANGEABLES

- les résistances à la pénétration, mesurées à l'aide d'un pénétromètre de poche conique, sur les fosses L, K, I et H aux profondeurs 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 et 140 cm, sur la fosse E aux mêmes profondeurs à l'exception de 10 cm, et sur la fosse C aux mêmes profondeurs à partir de 60 cm;
- les humidités pondérales, mesurées sur les sondages L, K, I et H aux profondeurs 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, 90-100, 100-120, 120-140 et 140-160 cm, sur le sondage E aux mêmes profondeurs sauf 10-20, et sur le sondage C aux mêmes profondeurs à partir de 60-70 cm (on supposera les humidités à 100-110 et 110-120 égales à celle mesurée pour 100-120, celles à 120-130 et 130-140 égales à celle à 120-140, et celle à 140-150 égale à celle à 140-160).

La distribution des densités apparentes et celle des humidités pondérales peuvent être assimilées à des distributions normales. Celle des résistances à la pénétration est normale à semi-normale, avec un léger sur-effectif aux fortes valeurs (fig. 9).

3.1.1 Densité apparente et résistance à la pénétration

On établit, entre la résistance à la pénétration (PEN, en kg/cm^2) et la densité apparente (Da, en g/cm^3) la relation suivante:

$$PEN = -37.53 + 41.78\ Da$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 76;
- coefficient de corrélation = 0.343 significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur PEN = 5.06 ;
- erreur sur le coefficient de Da = 13.13 .

Cette relation montre que la cohésion est correctement liée à la densité apparente, donc à la porosité.

La relation entre la résistance à la pénétration et le volume poral présente des paramètres un peu moins bons (R = 0.328).

3.1.2 Humidité pondérale et résistance à la pénétration

On établit la relation suivante entre la résistance à la pénétration (PEN, en kg/cm^2) et la teneur en eau pondérale (Hp, en %):

$$PEN = 88.33 + 2.47\ Hp$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 76;
- coefficient de corrélation = 0.443 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;

- erreur sur PEN = 4.83;
- erreur sur le coefficient de Hp = 0.57 .

La résistance à la pénétration est correctement expliquée (statistiquement) par la teneur en eau pondérale, mieux que par la densité apparente: meilleur coefficient de corrélation et erreurs moindres.

3.1.3 Résistance à la pénétration, densité apparente et humidité pondérale

Sur la base de la triple série de 78 données, on établit entre la résistance à la pénétration (PEN, en kg/cm^2), d'une part, et la teneur en eau pondérale (Hp, en %) et la densité apparente (Da, en g/cm^3), d'autre part, la relation suivante:

$$PEN = 44.43 - 2.05\ Hp + 26.15\ Da$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 75;
- coefficient de corrélation = 0.487 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur PEN = 4.74;
- erreur sur le coefficient de Hp = 0.60;
- erreur sur le coefficient de Da = 13.12 .

La prise en compte de la densité apparente Da, en plus de l'humidité pondérale Hp, n'améliore pas significativement l'explication statistique de la résistance à la pénétration PEN. Le coefficient de corrélation est un peu plus élevé (0.487 contre 0.443), l'erreur sur PEN est un peu plus faible (4.74 contre 4.83), mais l'erreur relative sur le coefficient de Hp est sensiblement plus forte (0.6/2.05 contre 0.57/2.47).

En revanche, la prise en compte de Hp en plus de Da améliore l'explication de PEN: le coefficient de corrélation est plus élevé (0.487 contre 0.343), l'erreur sur PEN plus faible (4.74 contre 5.06), avec toutefois une erreur relative sur Da nettement plus élevée ((13.12/26.15 contre 13.13/41.78).

3.1.4 Humidité pondérale et densité apparente

La prise en compte de Da en plus de Hp n'améliorant guère l'explication (statistique) de PEN, on peut s'interroger sur l'existence d'une relation entre Hp et Da. On établit ainsi entre Hp (%) et Da (g/cm3) la relation suivante:

$$Hp = 40.0 - 7.6\ Da$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 76;
- coefficient de corrélation = 0.348 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur Hp = 0.91;
- erreur sur le coefficient de Da = 2.4 .

La teneur en eau s'avère ainsi liée à la densité apparente, ce qui est surprenant. En effet, la densité apparente étant liée de manière univoque au volume poral, il existerait une relation entre le volume poral et son contenu en eau. Ceci pourrait signifier qu'une augmentation de porosité se traduit principalement par une augmentation de la porosité de rétention d'eau.
Le terme constant fournit une indication sur l'humidité maximale après ressuyage (40%).
On note par ailleurs que la relation Hp-Da s'avère aussi satisfaisante que la relation PEN-Da (coefficients de corrélations comparables).

3.2 Comparaison entre paramètres analytiques

On considérera les résultats d'analyses granulométriques et chimiques sur les sondages L, K, I , C et H aux profondeurs 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 et 90-100 cm, et sur le sondage E aux mêmes profondeurs à partir de 20-30 cm, soit au total 29 échantillons. Sur ces échantillons, on s'intéressera aux analyses suivantes: capacité d'échange à pH 7, somme des bases échangeables, teneurs en carbone total et en aluminium échangeable, rapport C/N, taux d'argile.

Pour les 29 échantillons considérés, le pH KCl, la capacité d'échange cationique et le C/N présentent des distributions normales. Les distributions du pH eau, du taux de carbone total et de la somme des bases échangeables peuvent être assimilées à des distributions normales. La teneur en aluminium échangeable présente une distribution de type semi-normal, avec un sur-effectif aux fortes teneurs. Le taux d'argile a une distribution de type semi-normal, avec un sur-effectif aux faibles taux (fig. 9).

3.2.1 Carbone total et capacité d'échange

On établit entre la capacité d'échange cationique à pH 7 CEC (en méq/100g) et la teneur en carbone total C (en 0/00) la relation suivante (dans le mètre supérieur du profil):

$$CEC = 1.94 + 0.57\ C$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.966 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur CEC = 0.74;
- erreur sur le coefficient de C = 0.03 .

Ces paramètres sont très bons, et sont en accord avec un résultat connu: dans les sols à dominante kaolinitique, c'est la matière organique qui constitue l'essentiel du complexe d'échange.

3.2.2 Taux d'argile et capacité d'échange

On établit entre la capacité d'échange cationique à pH 7 CEC (en méq/100g) et la teneur en argile ARG (en %) la relation suivante (dans le mètre supérieur du profil):

$$CEC = -22.56 + 0.39\ ARG$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.337 , significativement différent de zéro au seuil de 10 %;
- erreur sur CEC = 2.69;
- erreur sur le coefficient de ARG = 0.21 .

Il est possible d'établir une relation entre la capacité d'échange et la teneur en argile, mais les caractéristiques de cette relation ne sont pas vraiment satisfaisantes: coefficient de corrélation faible et erreurs importantes.

3.2.3 Carbone total, taux d'argile et capacité d'échange

On établit entre la capacité d'échange à pH 7 CEC (en méq/100g), la teneur en carbone total C (en 0/00) et le taux d'argile ARG (en %) la relation suivante:

$$CEC = -8.00 + 0.55\ C + 0.13\ ARG$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 26;
- coefficient de corrélation = 0.972 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur CEC = 0.69 ;
- erreur sur le coefficient de C = 0.03 ;
- erreur sur le coefficient de ARG = 0.06 .

La prise en compte du taux d'argile en plus de la teneur en carbone total permet d'améliorer légèrement la relation avec la capacité d'échange (légère amélioration du coefficient de corrélation et diminution de l'erreur sur CEC).

3.2.4 Carbone et bases échangeables

On établit entre la teneur en carbone total C (en 0/00) et la somme des bases échangeables SBE (en méq/100g) la relation suivante:

$$SBE = 0.09 + 0.02\ C$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.644 significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur SBE = 0.12;
- erreur sur le coefficient de C < 0.01 (= 0.05).

Cette relation permet donc d'expliquer correctement la teneur en bases échangeables à partir de la teneur en carbone total. Toutefois, le carbone total explique mieux la capacité d'échange qu'il n'explique la somme des bases échangeables.

3.2.5 Aluminium échangeable et C/N

On établit entre la teneur en aluminium échangeable AL (en méq/100g) et le rapport C/N (taux de carbone total/taux d'azote total) la relation suivante:

$$C/N = 6.5 + 3.8\ AL$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.63 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur C/N = 2.7;
- erreur sur le coefficient de AL = 0.9 ;

Ces paramètres sont satisfaisants, et permettent de relier de manière satisfaisante le rapport C/N et la teneur en aluminium échangeable.

3.2.6 pH eau et C/N

On établit entre le pH eau et le rapport C/N la relation suivante:

$$C/N = 37.9 - 6.2\ pH\ eau$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.505 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur C/N = 3.0 ;
- erreur sur le coefficient de pH eau = 2.0 .

Cette relation est intéressante, mais l'explication (statistique) du C/N par le pH eau est moins satisfaisante que par le taux d'aluminium échangeable.

3.2.7 pH KCl et C/N

On établit entre le pH KCl et le rapport C/N la relation suivante:

$$C/N = 47.8 - 9.3\ pH\ KCl$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.739 , significativement différent de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur C/N = 2.3 ;
- erreur sur le coefficient de pH KCl = 1.6 .

L'explication du C/N est encore meilleure avec le pH KCl qu'avec le taux d'aluminium échangeable: meilleur coefficient de corrélation (0.739 contre 0.630), moindre erreur sur C/N (2.3 contre 2.7).

L'acidité totale (acidité libre + acidité d'échange) semble donc fortement conditionner la décomposition de la matière organique. Cette influence pourrait s'exercer directement sur les réactions chimiques (la disponibilité en protons freinant leur libération), ou affecter l'activité des décomposeurs.

3.2.8 pH eau et pH KCl

On note entre le pH KCl et le pH eau la relation suivante:

$$pH\ eau = 0.7 + 0.9\ pH\ KCl$$

avec les paramètres:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.887 , significativement différent de zéro au seuil de 1%;
- erreur sur pH eau = 0.1 ;
- erreur sur le coefficient de pH KCl = 0.1 .

Le pH eau est donc fortement lié au pH KCl, ce qui signifie que la teneur en protons libres dépend de la teneur totale en protons (libres et échangeables), et inversement.

3.3 Comparaison entre paramètres physiques et analytiques

On se propose de croiser des données physiques et des données chimiques. On considère les 29 échantillons retenus pour les comparaisons entre paramètres analytiques, pour lesquels on dispose également de données physico-hydriques (ces 29 échantillons sont compris dans les 79 retenus pour les comparaisons entre paramètres physiques).

3.3.1 Aluminium échangeable et résistance à la pénétration

On établit entre la résistance à la pénétration PEN (en kg/cm^2) et la teneur en aluminium échangeable AL (en méq/100g) la relation suivante:

$$PEN = 10.36 + 5.03\ AL$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 22 (parmi les 29 échantillons, on a écarté les 5 de la station C, la fosse y étant ancienne, avec des parois durcies);
- coefficient de corrélation = 0.419 , significativement différent de zéro au seuil de 5 %;
- erreur sur PEN = 5.81;
- erreur sur le coefficient de AL = 2.32 .

Ces paramètres ne sont pas très bons, mais permettent toutefois d'expliquer (statistiquement) la cohésion par la teneur en aluminium échangeable: les niveaux les plus cohérents sont ceux dont la teneur en aluminium échangeable est la plus élevée.

3.3.2 pH KCl et résistance à la pénétration

On établit entre le pH KCl et la résistance à la pénétration PEN (en kg/cm²) la relation suivante:

$$PEN = 47.68 - 7.96 \text{ pH KCl}$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 22;
- coefficient de corrélation = 0.350 , significativement différent de zéro au seuil de 10 %;
- erreur sur PEN = 5.99 ;
- erreur sur le coefficient de pH KCl = 4.55 .

Cette relation est moins satisfaisante que la précédente. C'est donc plus la teneur en aluminium échangeable que le pH KCl qui est liée à la cohésion.

Une relation entre PEN et pH eau a été établie par ailleurs, mais elle n'est pas satisfaisante (corrélation médiocre).

3.3.3 C/N et résistance à la pénétration

On établit entre le rapport C/N et la résistance à la pénétration PEN (en kg/cm²) la relation suivante:

$$PEN = 3.75 + 1.15 \text{ C/N}$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 22;
- coefficient de corrélation = 0.561 , significativement de zéro au seuil de 1 %;
- erreur sur PEN = 5.30 ;
- erreur sur le coefficient de C/N = 0.36 .

Ces paramètres sont satisfaisants. Parmi les paramètres chimiques, c'est le rapport C/N, avant le taux d'Al éch, qui est le mieux corrélé avec la cohésion: la décomposition de la matière organique est mauvaise lorsque la cohésion est élevée, sans doute en relation avec une mauvaise aération.

On signalera qu'en revanche, les relation établies par ailleurs entre Da et C/N d'une part, entre Da et AL d'autre part, ne sont pas satisfaisantes.

3.3.4 Taux d'argile, humidité pondérale et cohésion

On établit entre le taux d'argile ARG (en %), l'humidité pondérale Hp (en %) et la résistance à la pénétration PEN (en kg/cm²) la relation suivante:

$$PEN = 40.39 + 0.54 \text{ ARG} - 2.15 \text{ Hp}$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 21;
- coefficient de corrélation = 0.520 , significativement différent de zéro au seuil de 5 %;
- erreur sur PEN = 5.58 ;
- erreur sur le coefficient de ARG = 0.56 ;
- erreur sur le coefficient de Hp = 1.05 .

Ces paramètres sont passables. La prise en compte du taux d'argile en plus de l'humidité pondérale (Cf. 3.1.2) n'améliore pas l'explication de la résistance à la pénétration.

3.3.5 Taux de carbone total et densité apparente

On établit entre la teneur en carbone total C (en %) et la densité apparente Da (en g/cm3) la relation suivante:

$$Da = 1.23 - 0.04 \text{ C\%}$$

avec les paramètres suivants:
- nombre de degrés de liberté = 27;
- coefficient de corrélation = 0.324 , significativement de zéro au seuil de 10 %;
- erreur sur Da = 0.06 ;
- erreur sur le coefficient de C = 0.02 .

Ces paramètres sont passables, mais montrent néanmoins que la densité apparente diminue quand la teneur en carbone augmente.

3.4 Principales relations mises en évidence

Des relations intéressantes ont peu être mises en évidence. (Fig.10)

CEC - C: la capacité d'échange cationique à pH 7 est très fortement liée à la teneur en carbone total, la relation étant légèrement améliorée en prenant également en compte le taux d'argile.

SBE - C: la somme des bases échangeables est également liée au taux de carbone total, mais moins bien que la capacité d'échange.

C/N - acidité: le rapport C/N est correctement expliqué par le pH KCl, dans une moindre mesure par le taux d'aluminium échangeable, et dans une moindre mesure encore par le pH eau.

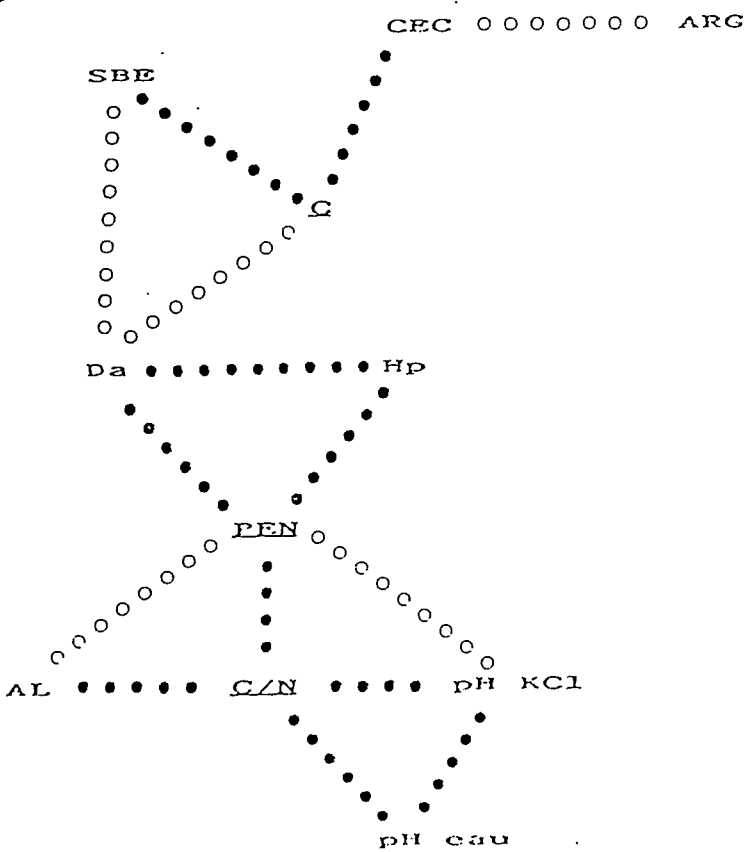


FIG. 10 : RELATIONS ENTRE PARAMETRES

●●●● corrélation significativement différente de 0 au seuil de 1 %

○○○○ corrélation significativement différente de 0 au seuil de 5 ou 10 %

PEN - Hp: la résistance à la pénétration est fortement dépendante de l'humidité pondérale, la relation étant légèrement améliorée en prenant également en compte la densité apparente (cette dernière s'avère liée à l'humidité pondérale).

PEN - C/N: la résistance à la pénétration est également liée au rapport C/N, et dans une moindre mesure au taux d'aluminium échangeable.

Dans ce réseau de relations, on peut identifier des variables qui se situent aux noeuds:
- C (teneur en carbone total);
- C/N (rapport entre taux de carbone et d'azote totaux);
- PEN (résistance à la pénétration).

A partir de ces 3 variables, les relations établies précédemment permettent en effet d'appréhender un ensemble de caractéristiques physiques, hydriques, granulométriques et chimiques. Ceci confirme leur importance.

4. CONCLUSIONS

4.1 Caractérisation granulométrique et chimique

Les principales caractéristiques des 8 sites sont les suivantes:

- les taux d'argile sont très élevés (70-80%), et tendent à diminuer avec la profondeur; les niveaux les plus argileux sont les plus compacts;
- l'acidité est très marquée (pHeau < 5), surtout en surface, et plus encore en janvier (pluies) qu'en mai et octobre 1992; les pH augmentent jusqu'à 1 m de profondeur, puis restent stables;
- les teneurs totales en azote et surtout carbone sont élevées, avec de faibles différences entre sites et entre dates de prélèvement; les C/N sont élevés, surtout au sommet des profils;
- les capacités d'échanges, correctes à pH 7, s'avèrent beaucoup plus faibles au pH du sol (2 à 5 méq/100g); les teneurs en bases échangeables sont faibles (SBE < 1 méq/100g); les taux de saturation en bases sont minimaux entre 15 et 45 cm;
- parmi les bases échangeables, Ca présente les teneurs les plus élevées (40 à 70% SBE) avec K (15 à 45%); Mg est plus faible (5 à 20%) et des carences sont à craindre; en valeurs absolues, les teneurs diminuent depuis la surface jusqu'à 25 ou 35 cm, puis varient faiblement; par rapport aux teneurs relevées en mai et octobre 1992, celles de janvier (pluies) sont supérieures ou égales pour les teneurs absolues, et inférieures ou égales pour les teneurs relatives (sauf Ca/SBE);

- les teneurs en aluminium et manganèse échangeables sont élevées, surtout au sommet des profils (Al éch.> 2 méq/100g), et diminuent en profondeur; des toxicités sont à craindre.

4.2 Installation des stations de mesure

Plusieurs sites présentent des variations individualisées de certains paramètres chimiques, et l'installation de stations de mesures y est déconseillée. Il s'agit des sites K (pH plus faibles) et surtout H (courbes granulométriques "décalées"; C et C/N plus faibles; CEC et V% "décalés"; K éch. et Na éch. plus élevés).

Sur la base des mesures de teneur en eau pondérale et de résistance à la pénétration (Barthès & al., 1993a), l'installation de stations de mesures sur ces deux sites avait également été déconseillée. On reprendra donc les conclusions formulées alors: installation des stations de mesure sur les parcelles SAVANE et HAUTINT "entrée" manioc du bloc III (au-dessus des sites C et E) et sur la parcelle BASINT "entrée" manioc du bloc IV (dont les caractéristiques sont supposées voisines de celles des sites C, D et E).

4.3 Comparaison entre paramètres physiques et chimiques

Des corrélations ont pu être établies entre paramètres chimiques:

- la SBE et surtout la CEC (à pH 7) sont fortement liées à la teneur en C total; les sites d'échange sont donc principalement localisés au niveau de la matière organique;
- le C/N est corrélé aux paramètres d'"acidité", pH KCl, mais aussi Al éch., et dans une moindre mesure pH eau; l'acidité, sans doute en relation avec les teneurs élevées en aluminium échangeable, s'oppose à une bonne décomposition des matières organiques.

On a également mis en évidence que la résistance à la pénétration dépend de l'humidité pondérale, et dans une moindre mesure, de la densité apparente.

Enfin, on a montré que la résistance à la pénétration, est liée au C/N, et dans une moindre mesure, au taux d'aluminium échangeable. Les niveaux cohérents n'autorisent qu'une décomposition incomplète de la matière organique, et sont riches en aluminium échangeable.

Parmi tous les paramètres considérés, trois d'entre eux s'avèrent de bons indicateurs, et on les retrouve aux noeuds des réseaux de relations établies. Il s'agit:

- du taux de carbone total;
- du rapport C/N;
- de la résistance à la pénétration.

5. REFERENCES CITEES

B. Barthès, C. Hartmann & B. Nyeté, 1992a.- Résultats d'analyses chimiques sur 3 fosses du site IBSRAM à Loudima (Congo). DGRST-ORSTOM, Brazzaville. 5 p.+ 6 fig.

B. Barthès, C. Hartmann & E. Toutou-Missié, avec la coll. de P. N'Goma , 1993a.- Mesures de teneur en eau pondérale et de résistance à la pénétration sur le site IBSRAM de Loudima (Congo). DGRST-ORSTOM, Brazzaville. 25 p.

B. Barthès, B. Nyeté & C. Hartmann, 1993b.- Résultats d'analyses chimiques sur la fosse A du site IBSRAM à Loudima (Congo). DGRST-ORSTOM, Brazzaville, 15 p.

J. Boyer, 1982.- Les sols ferrallitiques. Tome X: facteurs de fertilité et utilisation des sols. Initiations-Documentations Technique n° 52. ORSTOM, Paris, 384 p.

IBSRAM (International Board for Soil Research and Management Incorporated), 1991.- Etude comparative de quatre systèmes de culture à base manioc, un témoin et trois systèmes plus ou moins intensifiés en milieu paysan dans la vallée du Niari. Proposition de projet. IBSRAM, Abidjan, 36 p.

E.J. Kamprath, 1970.- Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 34: 252-257.

G. Martin, 1967.- Synthèse agropédologique sur les sols de la Vallée du Niari; évolution du sol sous culture In Quinze ans de travaux et de recherches dans les pays du Niari; les sols de la vallée du Niari. Etude pédologique et agropédologique. ORSTOM, Brazzaville, 189 p.