

Le « remodelage » des terres en Martinique

Modification des propriétés de « ferrisols » et d'andosols cultivés en canne à sucre

T. CHEVIGNARD (1), C. FELLER (1), F. ANDREUX (2) et P. QUANTIN (3),

(1) ORSTOM, BP 81, 97201 Fort-de-France, Martinique.

(2) CPB-CNRS, 17, rue N.-D. des Pauvres, BP 5, 54501 Vandœuvre-les Nancy.

(3) ORSTOM, 74, route d'Aulnay, 93140 Bondy.

RÉSUMÉ

On entend par « remodelage » une opération de nivellement des collines pratiquée depuis environ 1970 en Martinique pour faciliter la mécanisation des cultures. On compare les propriétés de « ferrisols » (sols ferrallitiques pénévoulés) et d'andosols dont les horizons A ont été éliminés par ce traitement, avec celles de témoins non remodelés. Après 10 ans environ de culture de canne à sucre, le profil des sols remodelés reste peu différencié, de type Ap/B/C ou Ap/C. A quelques exceptions près, les variations texturales sont peu marquées, au moins en ce qui concerne l'ensemble des constituants inférieurs à 20 μm . Les teneurs en matière organique sont faibles, et représentent environ 30 % du stock organique des témoins. En surface, les rapports C/N sont plus élevés, les teneurs en phosphore total et assimilable moindres, et les stabilités structurales plus faibles que dans les témoins. Les teneurs en certains oligo-éléments sont modifiées, B et Cu étant deux fois plus abondants, et Zn diminuant sensiblement dans les situations remodelées. Par contre, compte tenu de la fertilisation minérale des sols étudiés, le pH et le complexe d'échange ne sont pas affectés significativement dans les sols remodelés.

MOTS-CLÉS : Remodelage — « Ferrisols » (ferrallitiques pénévoulés) — Andosols — Propriétés générales des sols — Culture de canne à sucre — Martinique.

ABSTRACT

THE HILLOCK LEVELLING (« REMODELAGE ») IN MARTINIQUE.

MODIFICATION OF SOIL PROPERTIES OF « FERRISOLS » AND ANDOSOLS CULTIVATED WITH SUGAR CANE

The « remodelage » is an operation of hillock levelling that has been used since about 1970 in Martinique to improve crop mechanization. The chemical properties, and some physical properties of ferrisols and andosols from which horizons A were removed by this technique, were compared with those of non truncated reference soils. After about 10 years of cultivation with sugar cane, the profiles of the truncated soils remained poorly differentiated, and appeared of the Ap/B/C or Ap/C type. With some exceptions, the variations in the texture were not very striking, as far as the whole of the components finer than 20 μm was concerned. The organic matter contents were low, and did not exceed 30 % of the organic stock of the respective reference soils. In the surface soil layer, the C/N ratios were higher, the amounts of total and available phosphorus were lower, and the structural stabilities were weaker than in the reference soils. The amounts of some trace elements were modified, especially Bo and Cu, which were duplicated, and Zn, which decreased noticeably, in the truncated soils. Contrarily, because of continuous mineral fertilization of these soils, the pH value, and most of the characteristics of the exchange complex, were not significantly modified in the truncated soils.

KEY WORDS : Top-soil removal — « Ferrisols » (young ferrallitic soils) — Andosols — Soil properties — Sugar cane cultivation — Martinique.

INTRODUCTION

Le « remodelage » des terres agricoles en Martinique (et Guadeloupe) est une opération de génie rural pratiquée depuis 1970 environ. Elle consiste en un nivellement des collines pour faciliter la mécanisation des cultures (canne à sucre principalement).

L'horizon humifère A n'étant généralement pas conservé, la culture est implantée directement sur les horizons B ou C mis à jour (haut de pente et mi-pente) ou sur des matériaux remaniés des horizons découpés en

bas de pente (fig. 1). Il en résulte une modification importante des propriétés des sols, et, par voie de conséquence, de certaines des relations sol-plante.

Par ailleurs, les situations correspondant à la mise à l'affleurement des horizons B ou C (profils tronqués) peuvent servir de « modèle en vraie grandeur » pour l'étude :

- des phases initiales de constitution des stocks organiques des sols sous l'effet d'une seule plante ;
- de l'influence du niveau du stock organique sur les propriétés édaphiques et les relations sol-plante.

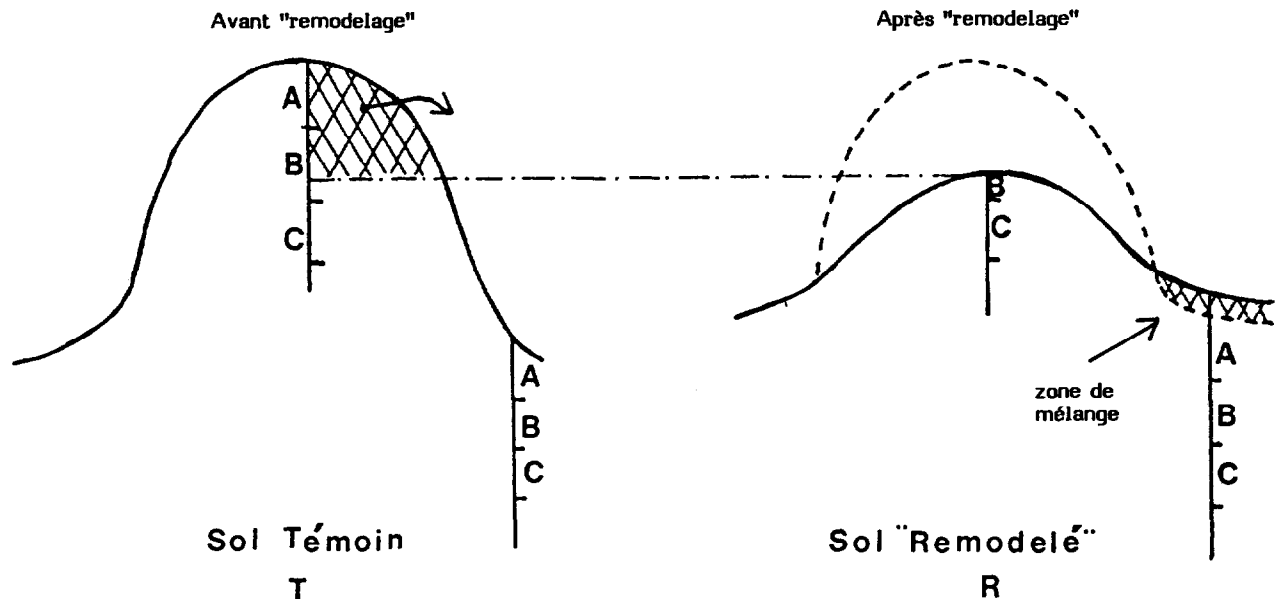


FIG. 1. — « Remodelage » des sols

Cet article est le premier d'une série visant à aborder l'ensemble de ces problèmes et consiste en une présentation générale des « ferrisols » (1) et andosols, remodelés ou non. Les données sont tirées des travaux de CHEVIGNARD (1985).

Sur 23 situations recensées et analysées en détail par cet auteur, réparties entre ferrisols, andosols et sols bruns (à halloysite), nous avons retenu les plus caractéristiques de celles cultivées en canne à sucre, à savoir :

- pour les ferrisols F, (TC) = situation témoin non remodelée
- (R) = situations remodelées depuis 4, 7, 10 et 12 ans

— pour les andosols A, (TC) = situation témoin non remodelée

(R) = situation remodelée depuis 8 ans

Ce choix restreint s'explique par la nécessité de comparer des situations « remodelées » (R) et non remodelées (TC) qui soient identiques par leur végétation (canne à sucre), proches du point de vue textural et minéralogique, ne correspondant pas à des mélanges de matériaux remaniés des horizons découpés, et, de préférence, remodelés jusqu'aux horizons B/C ou C. Toutefois, sur certains points particuliers, et qui seront signalés, il nous a paru nécessaire de traiter la totalité des données de CHEVIGNARD.

(1) Les ferrisols sont des sols ferrallitiques pénévulés, encore jeunes, ou rajeunis par des apports volcaniques, contenant en petite quantité (inférieure à 20 %) des minéraux encore altérables. Ils ont un horizon (B) et ne sont que faiblement (ou moyennement) désaturés en bases échangeables dans cet horizon (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les situations étudiées

Pour les données générales du milieu on se reportera à l'Atlas de la Martinique.

Le tableau I et la figure 2 résument la localisation, les caractéristiques climatiques et les principaux traitements retenus des situations étudiées.

Deux horizons sont prélevés : surface (0-15 cm) et profondeur (30-50 cm). L'analyse porte sur un échantillon composite obtenu à partir de 12 répétitions prélevées à mi-billon des rangs de canne à sucre, sur environ 10 à 50 mètres de longueur selon l'importance des surfaces remodelées.

Méthodes

Préparation des échantillons pour analyses. Tous les

échantillons sont séchés à l'air et tamisés à 2 mm, même pour les andosols, qui, de part leur situation climatique (andosols de « transition ») et leur utilisation (cultures) sont déjà soumis naturellement à des cycles humectation-dessiccation. Toutefois, pour ces sols une prudence dans l'interprétation de certaines analyses s'imposera.

L'analyse mécanique est réalisée selon le protocole SSC-ORSTOM (s.d.). Dans le cas des andosols, après destruction de la matière organique, la dispersion de l'échantillon est assurée par divers traitements contrôlés (ultra-sons et acidification à pH 3.5) selon COLMET-DAAGE *et al.* (1972).

La teneur en eau à différents potentiels (pF 2,5 - 3,0 - 4,2) est déterminée à l'aide d'un appareil à pression « Soil Moisture » selon SSC-ORSTOM (s.d.) sur sol séché à l'air.

TABLEAU I
Caractéristiques des différentes stations et développement des profils de sols étudiés

Sol	Localisation (exploitation)	Pluviom. annuelle (mm)	Station	Traitement	Profil		
					Horizon	Prof. (cm)	Test "NaF" (-négatif) (+ positif)
Ferrisol	"Gallion"	1820	F1	TC	Ap	0-20	-
					A12	20-50	-
					(B)	50-80	-
				R10	B/C	>80	-
					(A)p	0-15	-
					C	>15	-
R12	(A)p	0-10	-				
	C	10-60	-				
Ferrisol	"La Mauny"	2150	F3	R7	(A)p	0-5	-
					C	5-65	-
Ferrisol(*)	"Ste Marie"	2150	B1	R4	(A)p/C1	0-7	-
					C2	7-40	-
					C/R	>40	-
Andosol	"St Etienne"	2960	A1	TC	A	0-10	+
					B/C	10-65	+
					C/R	65-95	+
				R8	(A)p	0-30	+
					R	>30	+

(*) après remodelage d'un sol brun

Abréviations : F = ferrisol ; A = andosol ; B = sol brun à halloysite (avant remodelage) ; TC = sol témoin (non remodelé) cultivé en canne à sucre ; R = sol remodelé cultivé en canne à sucre. En indice, le nombre d'années écoulées depuis l'opération du remodelage (R10, R4, R7 etc...)

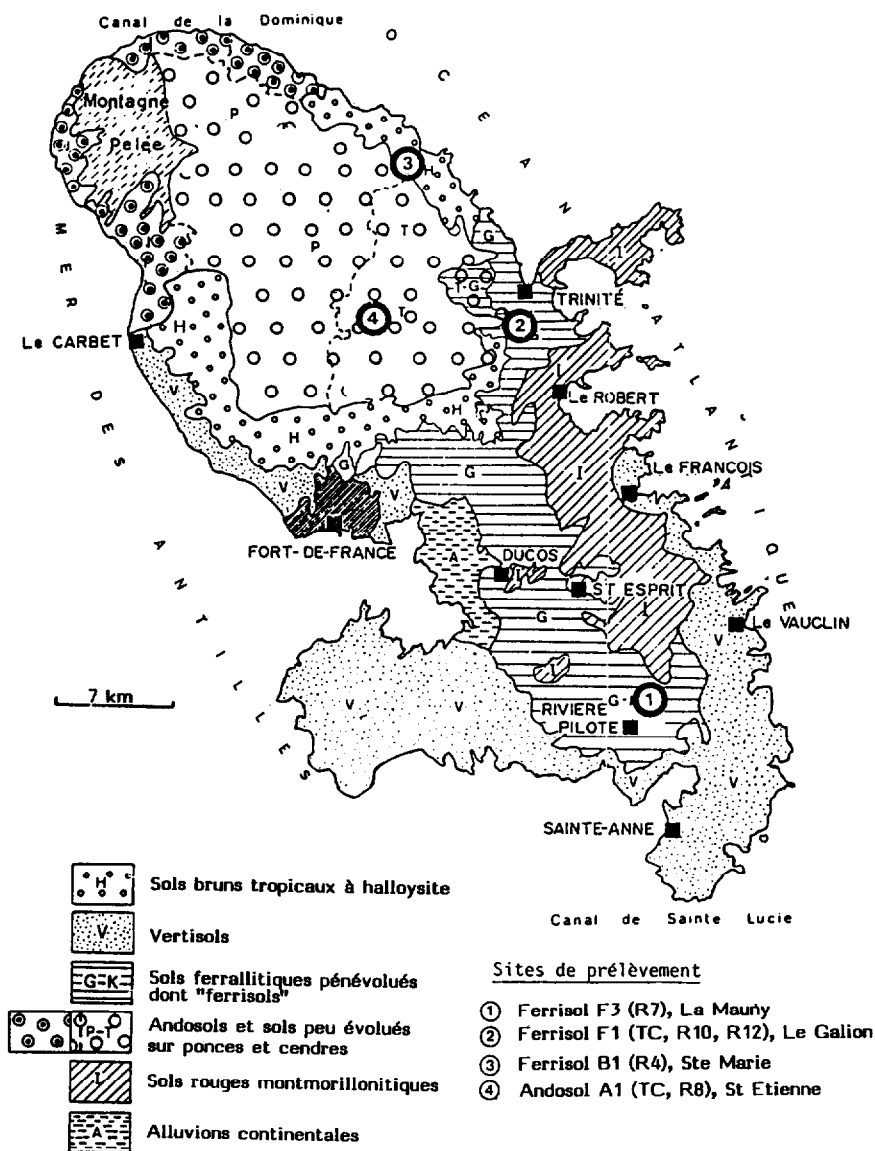


FIG. 2. — Carte simplifiée des sols de la Martinique et stations étudiées.
D'après la carte générale des sols. Atlas des Départements français d'Outre-Mer, CNRS-IGN.

La « densité apparente » (d_a) est mesurée par la méthode au cylindre ($V = 250 \text{ cm}^3$) à partir de 6 à 9 répétitions.

La « stabilité structurale » est estimée par la mesure de l'« Indice d'Instabilité Structurale » (I_s), de HENIN *et al.* (1969).

La minéralogie. La nature des minéraux argileux est étudiée qualitativement par diffractométrie RX (équipement INEL-CGR) à partir de diagrammes de lames

orientées. Par ailleurs, sur sol total, certaines formes du fer, de l'aluminium et du silicium sont extraites par le réactif de TAMM (tampon oxalique à pH 3.0) ou de MEHRA-JACKSON (citrate-bicarbonate dithionite Na à pH 9.7). Les méthodes utilisées sont décrites dans JEANROY (1983).

Fe, Al et Si sont dosés par absorption atomique (équipement Techtron Varian). La présence d'allophane est décelée sur le terrain par le « test NaF » de FIELDS et PERROTT (1966).

La carbone (C) et l'azote (N) sont dosés par voie sèche à l'aide d'un analyseur élémentaire CARLO-ERBA Mod. 1106.

La capacité d'échange cationique (CEC) et les cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) sont déterminés selon PELLOUX *et al.* (1971) par la méthode percolative à l'acétate d'ammonium M à pH 7,0. Mg est dosé par absorption atomique, K, Na et Ca par émission (Technicon autoanalyseur). Les cations échangeables Al^{3+} et H^+ sont extraits par KCl et titrés par acidimétrie ou absorption atomique (Al^{3+}).

Le phosphore total est obtenu par attaque nitrique (HNO_3 conc., eb. 5 h) et dosé en colorimétrie à 625 nm (réactif sulfomolybdique avec excès d'acide ascorbique). Le « phosphore assimilable » est dosé selon AYRES et HAGIHARA (1961), méthode préconisée pour les cultures de canne à sucre : extraction H_2SO_4 tamponné à pH 2,0 par $(NH_4)_2 SO_4$. Rapport sol/réactif = 1/100.

Les éléments-traces ont été dosés selon la méthode utilisée au Centre ORSTOM de Bondy (PINTA, 1962) :

- Cu, Fe, Mn, Mo, Zn sur extrait HCl 0,1 N et dosage en absorption atomique ;
- B sur extrait eau bouillante (dans matras en quartz pur) et dosage en spectrométrie d'émission d'arc.

MORPHOLOGIE

Les descriptions des profils FITC, F1R10, A1TC et A1R8 sont données ci-dessous à titre d'exemple.

Profil FITC

Ferrisol, série Le Galion, site 2, non remodelé, cultivé après labour, sol nu dans parcelle partiellement remodelée (Duquesne haut).

Ap 0-20 cm : Horizon humifère, frais, brun grisâtre très foncé (10YR3/2), argileux, structure grenue bien développée, racines moyennes et fines, macro- et microporosité bonnes, transition distincte avec...

A12 20-50 cm : Horizon humifère, frais, brun grisâtre très foncé (10YR3/2), argileux, structure polyédrique grossière, racines moyennes et fines, compact, activité biologique forte, macro- et microporosité bonnes, transition graduelle avec...

(B) 50-80 cm : Horizon faiblement humifère, frais, brun jaunâtre (10YR3/3), argileux, structure polyédrique moyenne bien développée,

quelques racines, autres caractères : idem à précédent, transition graduelle avec...

(B)C 80-100 cm : Horizon frais, brun jaunâtre (10YR5/5) argileux, pas de racines, quelques concrétions Fe-Mn (0.5 mm), autres caractères : idem à précédent.

Test « NaF » : négatif sur tout le profil.

Profil F1R10

Ferrisol, série Le Galion, site 2, remodelé, prélevé 15 jours après la récolte de canne et 2 jours après épandage d'engrais. Sécheresse depuis plusieurs semaines. Fentes de retrait (parcelle Haute Terre, sommet).

(A)p (1) 0-15 cm : Horizon faiblement humifère, frais, brun à brun foncé (7,5YR4/4), argileux, structure polyédrique moyenne sur 1 cm (liée à dessiccation de surface) puis polyédrique très grossière avec tendance à surstructure prismatique, nombreuses taches rouille et jaunes diffuses (60 %), concrétions friables beige et jaune (2 mm), quelques faces de pression, racines fines et moyennes denses dans les deux premiers cas, faibles ensuite, macroporosité forte (fentes ouv. 1 mm), microporosité moyenne à faible, transition nette et ondulée (travail du sol) avec...

C sup. à 14 cm : Horizon bariolé jaune (7,5YR5/8) et rouille (2,5YR4/8) avec nombreuses taches blanchâtres, très peu humifère, quelques blocs d'andésite très altérée mais encore un peu indurés, quelques fines racines.

Test « NaF » négatif sur tout le profil.

Profil A1TC

Andosol, série St-Etienne, site 4, non remodelé, cultivé. litière feuille de canne, débris de roche altérée, 1 à 2 cm de diamètre, couleur jaune 2,5YR8/6. Parcelle Coulon.

I - (A) 0-10 cm : Horizon humifère, frais, brun jaunâtre (10YR5/8), argilo-sableux, structure grenue, faible cohésion de l'horizon, pas de tache, débris de roche de tailles variables, chevelu important, nombreuses racines, macro- et microporosité fortes, transition distincte et ondulée avec...

B/C 10-65 cm : Horizon brun vif (7,5YR5/6), argilo-sableux, structure massive à débit polyédrique fin, forte cohésion de l'horizon, quelques racines fines, pas

(1) (A)p = Horizon humifère peu exprimé () et labouré, p.

de taches, nombreux éléments grossiers à divers degrés d'altération (tuf andésitique ?), transition distincte à nette et plane avec C/Rt.

C/R 65-95 cm : Roche jaune brunâtre (10YR6/8) altérée, macroporosité faible, microporosité très bonne, pas de racine, transition très nette et plane avec...

II - (A) 95-115 cm (paléosol) : Horizon faiblement humifère, frais, brun foncé (7,5YR4/4), argileux, structure polyédrique moyenne, quelques racines, concrétions rouges (1 cm), pas d'éléments grossiers.

Test « NaF » : I A (+ + +), I B/C (+ +), I C/R (+ +), II (A) (+)

Profil A1R8

Andosol, série St-Etienne, site 4, remodelé, cultivé. Sol nu après labour, (parcelle Léopold, sommet).

(A) p/C 0-30 cm : Horizon faiblement humifère, frais, rouge jaunâtre (5YR4/6), argilo-sableux, structure massive à débit polyédrique moyenne, cohésion forte à moyenne de l'horizon, nombreux débris de roches altérées (1-2 cm), chevelu racinaire en surface, quelques racines moyennes et fines en profondeur, macroporosité faible, transition distincte, irrégulière et discontinue avec...

R sup. 30 cm : Tuf andésitique altéré, jaune brunâtre identique à A1TC.

Test « NaF » : (A)p (+ + +), R (+ + +).

On constate, bien évidemment, une « simplification » des profils pour les sols remodelés qui deviennent (A)p - B/C, (A)p - C ou (A)p - R.

Les épaisseurs des horizons humifères cultivés (CHEVIGNARD, 1985) sont de 40 à 50 cm (sauf A1 TC, 10 cm) pour les sols témoins, de 3 à 20 cm pour les sols remodelés.

La structure des horizons de surface des sols remodelés est généralement plus grossière que celle des sols témoins.

La distribution de système racinaire est très variable selon les situations à l'intérieur d'une même parcelle (étude en cours). Pour les sols témoins TC, le système racinaire est distribué en majorité dans les 20 premiers centimètres de sol, avec des variations selon le travail du sol. Pour les sols remodelés R toutes les situations peuvent être observées, d'un enracinement très superficiel (0-5 à 0-10 cm) à un enracinement au contraire très développé et supérieur à celui des sols témoins. Toutefois, dans toutes les situations R, la répartition à

l'échelle macroscopique de la matière organique humifiée est très hétérogène au sein de l'horizon, contrairement aux situations TC. Ceci est confirmé à l'observation micromorphologique qui indique une imprégnation organique du plasma très localisée (pour les sols remodelés) à des zones d'activités biologiques fortes (pédotubules) (CHEVIGNARD, 1985).

RÉSULTATS D'ANALYSES

Minéralogie et texture

Les résultats sont portés dans les tableaux IIa et IIb.

a. FERRISOLS

La fraction 0-2 μm est dominée par des argiles 1:1 de type kaolinite désordonnée et des métahalloysites (ou halloysite). Les smectites, quand elles sont présentes, sont en faible quantité. On note aussi la présence d'hématite et de goethite, parfois de gibbsite en faible quantité. Les résultats des extraits TAMM et MEHRA-JACKSON indiquent que les ferrisols (TC et R) ne contiennent pas ou très peu d'alophaane et peu d'hydroxydes Fe et Al amorphes ou para-cristallins, mais sont riches en fer libre cristallisé. Les différences entre TC et R sont faibles sauf pour Fe des extraits TAMM : $\text{Fe}_o(\text{TC}) > \text{Fe}_o(\text{R})$. Ceci pourrait s'expliquer par une moins bonne cristallinité des oxyhydroxydes de fer dans les sols riches en matière organique (TC).

A l'exception du sol F3 R7, tous ces sols sont argileux, les teneurs en argile (0-2 μm) des horizons de surface et de profondeur variant de 48 à 69 % et celles en éléments fins (A + LF, 0-20 μm) de 67 à 85 %. Ces sols, témoins et remodelés, peuvent donc être considérés comme relativement semblables sur les plans textural et minéralogique.

Le sol F3 R7 apparaît plus limoneux. Il est développé directement sur un ancien horizon C comprenant encore de nombreux lithoreliques altérées ce qui pourrait éventuellement expliquer ce phénomène (argilisation moins forte). Il est donc plus difficilement comparable aux autres situations.

b. ANDOSOLS

La fraction 0-2 μm n'indique que de faibles teneurs en minéraux cristallisés (métahalloysite, gibbsite, cristobalite, feldspaths). Les constituants amorphes et para-cristallins dominant. D'après l'extrait TAMM, ces sols contiendraient des allophanes alumineuses de type « imogolite » et la comparaison TAMM/MEHRA-JACKSON fait apparaître la présence de fer libre cristallisé en quantité moindre que dans les ferrisols. Les andosols témoins et remodelés sont très proches du point

TABLEAU IIa
Minéralogie et texture des horizons de surface (0-15 cm)

Analyse	F1TC	B1R4	F3R7	F1R10	F1R12	A1TC	A1R8
Test NaF RX (0-2µm) (abondance)	(-) FC/M/Go/He ++ + t t	(-) FC ou MH/M/Go + + t +	(-) MH/Go/He + + +	(-) FC/M/Go/He/Gi +++ + + t	(-) FC ou MH/H/Go/He + + t + +	(+) Al/M/H/Gi/Cri ++ t + +	(+) Al/Gi/Cri ++ + +
Analyse mécanique (% sec air)							
A	48,0	58,0	32,1	69,0	53,5	24,3	18,3
LF	19,0	20,5	39,8	16,0	20,5	17,2	18,8
(A + LF)	67,0	78,5	71,9	85,0	74,0	41,5	37,1
LG	6,5	4,5	8,7	3,5	7,1	7,8	8,1
SF	13,5	6,0	5,4	1,9	6,0	17,8	19,5
SG	7,0	4,0	1,0	2,0	4,3	16,8	18,9
H ₂ O	5,0	4,7	9,5	5,9	6,5	11,2	17,7
Fe, Al, Si (°/100) selon							
Tamm Fe	7,8	0,5		1,8		9,2	5,6
Al	1,5	1,5		1,5		35	48
Si	0,6	0,4		0,4		42	60
Mehra-Jackson							
Fe	40	40		60		27,5	27,5
Al	4	4		6,5		12,5	14,5
Si	1,5	1,0		1,0		2,3	2,8

Abréviations : FC = fire-clay, kaolinite ; M = montmorillonite ; Go = goethite ; He = hématite ; Gi = gibbsite ; MH = métahalloysite ; H = halloysite ; Cri = cristobalite ; AlI = allophane
(++) = dominant ; (+) = présent ; (t) = traces

TABLEAU IIb
Minéralogie et texture des horizons de profondeur (30-50 cm)

Analyse	F1TC	B1R4	F3R7	F1R10	F1R12	A1TC	A1R8
Test NaF RX (0-2µm) (abondance)	(-) FC/M/Go ++ + +	(-) FC ou MH/Go ++ +	(-) MH/M/He/Go + + t t	(-) FC/M/Go/He +++ + + ++	(-) FC ou MH/H/Go/He/Cri t + t +	(+) AlI/M/H/Gi ++ + t	(+) AlI/Cri ++ +
Analyse mécanique (% sec air)							
A	47,9	58,0	15,5		54,5	21,8	26,4
LF	18,0	22,0	38,8		21,0	15,8	20,0
(A + LF)	65,9	80,0	54,3		75,5	37,6	46,4
LG	6,6	3,5	13,5		8,2	7,7	9,5
SF	13,0	6,0	11,3		6,0	20,6	10,5
SG	8,5	4,2	6,7		4,0	15,2	12,0
H ₂ O	4,4	4,7	11,1		5,2	11,8	19,0

Abréviations : voir tableau IIa

de vue minéralogique (1) et granulométrique, la fraction A + LF étant respectivement égale à 37 et 42 % pour A1TC et A1R8.

Ainsi pour chacun des deux types (ferrisols, andosols) de sols choisis, les situations TC et R peuvent être considérées comme semblables du point de vue minéralogique et textural. C'est d'ailleurs la raison du choix restreint des stations, parmi celles étudiées par CHEVIGNARD (1985).

Propriétés chimiques

Les résultats sont portés dans les tableaux IIIa et IIIb.

a. MATIÈRE ORGANIQUE (C, N)

Les teneurs en carbone des *ferrisols* et *andosols* témoins (TC) sont d'environ 30 ‰ alors que celles des sols remodelés (R) varient de 4 à 10 ‰ selon l'âge du remodelage (ferrisols) et sont d'environ 12 ‰ pour l'andosol. Les teneurs en azote des sols témoins sont

d'environ 2,5 ‰ et celles des sols remodelés varient de 0,2 à 0,9 ‰. Il en résulte généralement des rapports C/N plus élevés pour les sols remodelés que pour les sols témoins. On retiendra qu'en 10 ans c'est environ 30 % des stocks organiques initiaux (TC) qui sont reconstitués dans les sols remodelés. Ce pourcentage est plus faible si on tient compte des teneurs initiales en matière organique des horizons profonds (C = 1 à 4 ‰) mis à jour par remodelage.

b. PHOSPHORE

Les teneurs en phosphore total des sols remodelés, malgré une forte fertilisation phosphatée, sont toujours inférieures (mais avec une très grande variabilité) à celles des sols témoins. Les teneurs en phosphore « assimilable » sont faibles et très variables. Pour ces mêmes sols, CHEVIGNARD *et al.* (1986) ont montré que le pouvoir très fixateur de ces sols était encore accru à la suite du remodelage.

TABLEAU IIIa
Propriétés chimiques des échantillons de surface (0-15 cm)

Analyse		F1TC	B1R4	F3R7	F1R10	F1R12	A1TC	A1R8
pH	H ₂ O	5,2	4,7	4,7	5,2	5,3	5,0	5,6
	KCl	4,7	4,4	3,9	5,0	5,0	4,7	5,5
MO	C ‰	26,2	3,59	6,71	9,94	10,4	32,7	12,0
	N ‰	2,69	0,19	0,75	0,81	0,86	2,43	0,57
	C/N	9,7	18,9	10,3	12,2	12,1	14,5	21,1
P ₂ O ₅	Total ‰	1,23	1,17	1,13	0,44	0,99	1,70	0,94
	Ass. (AYRES)	0,08	0,19	0,16	0,01	0,04	0,05	0,01
<u>Complexe d'échange</u> (meq/100 g)								
	CEC	18,0	21,5	28,0	25,5	18,0	18,5	22,5
	K ⁺	0,48	0,82	1,33	0,61	1,69	0,51	0,77
	Na ⁺	0,17	0,24	0,16	0,36	0,24	0,07	0,08
	Ca ⁺⁺	8,14	3,85	6,82	7,92	4,84	1,48	3,74
	Mg ⁺⁺	2,67	2,17	7,92	7,83	3,75	0,94	1,25
	S	11,46	7,08	16,23	16,72	10,52	3,00	5,84
	S/CEC (%)	63,7	32,9	58,0	65,6	58,4	16,2	25,9
	Al ⁺⁺⁺	0,2	0,4	1,80	0,1	0,1	0,15	0,03
	H ⁺	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,03
<u>Oligoéléments</u> (ppm)								
	Fe	93 000	85 000		100 000		85 000	85 000
	Mn	2 900	400		500		2 400	2 300
	Cu	50	130		80		35	50
	Zn	117	67		46		102	90
	Mo	< 0,2	< 0,2		< 0,2		< 0,2	< 0,2
	B	49	132		165		74	129

(1) Du moins en surface; car en profondeur le remodelage fait apparaître un paléosol à halloysite.

TABLEAU IIIb
Propriétés chimiques des échantillons de profondeur (30-50 cm)

Analyse		F1TC	B1R4	F3R7	F1R10	F1R12	A1TC	A1R8
pH	H ₂ O	6,3	4,7	4,7	5,3	5,2	4,8	5,6
	KCl	5,7	4,3	3,7	5,3	4,8	4,7	5,5
MO	C ‰	12,5	nd	4,7	4,9	4,2	26,5	8,7
	N ‰	1,2	nd					
	C/N	10,4	nd	18,8	17,5	17,0	8,3	16,1
P ₂ O ₅ (‰)	Total	0,38	0,84	0,68	0,23	0,84	1,31	0,83
	Ayres	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Complexe d'échange (meq/100 g)								
	CEC	15,5	20,5	33,5	27,0	19,0	16,0	22,0
	K ⁺	0,29	0,38	0,79	0,36	0,72	0,05	0,11
	Na ⁺	0,08	0,08	0,22	0,08	0,11	0,20	0,08
	Ca ⁺⁺	7,92	2,53	2,36	5,83	3,08	0,55	4,18
	Mg ⁺⁺	3,42	2,50	12,50	6,92	4,58	0,33	1,00
	S	11,71	5,49	15,87	13,19	8,49	1,13	5,37
	S/CEC (%)	75,5	26,8	47,40	48,9	44,7	7,1	24,4
	Al ⁺⁺⁺	0,1	0,5	4,67	0,1	1,3	0,13	0,05
	H ⁺	0,1	0,1	0,38	0,1	0,2	0,03	0,0

c. pH ET COMPLEXE D'ÉCHANGE

Ferrisols F1TC, B1R4, F1R10, F1R12. Les pH-eau sont aux environs de 5,0. Seul F1TC (30-50 cm) présente un pH plus élevé de 6,3. Les variations du pH-eau avec le remodelage sont donc relativement faibles en surface ($\leq 0,5$ unités pH) mais plus fortes en profondeur (≥ 1 unité pH). Les différences $\Delta \text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{KCl})$ sont faibles tant en surface qu'en profondeur. Les pH modérément acides et les ΔpH faibles sont en accord avec les faibles teneurs en $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ échangeables.

La capacité d'échange cationique (CEC), mesurée à pH 7,0, des ferrisols (TC ou R) varie de 18 à 26 meq/100 g pour les horizons de surface et de 16 à 27 meq/100 g pour les horizons de profondeur. Ces variations entre TC et R s'expliquent par plusieurs facteurs : minéralogie, teneurs en A + LF et en matière organique (CHEVIGNARD, 1985). Globalement, pour ces sols à large dominance d'argiles de type 1:1, cette CEC apparaît élevée, puisque rapportée, par exemple, à la seule fraction A + LF, les CEC varieraient de 27 à 30 meq/100 g A + LF en surface et de 24 à 26 meq/100 g A + LF en profondeur. NGAKANOU (1987) a pu montrer que pour des ferrisols et sols ferrallitiques acides de Martinique et Guadeloupe les CEC mesurées à pH 7,0 sont fortement supérieures (facteur de multiplication de 1,5 à 3,0) à celles mesurées par

diverses méthodes à des pH proches de ceux du sol. A l'appui de ces observations on constate ici que la somme des cations ($\text{S} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) est beaucoup plus faible que la CEC à pH 7,0.

Compte tenu des différences de fertilisation entre les parcelles et les exploitations il est difficile d'interpréter les variations observées pour les bases échangeables, à l'exception d'une tendance à la diminution des teneurs en Ca^{++} à la suite du remodelage.

Ferrisol F3R7. Ce sol apparaît, sur le plan chimique, nettement différent des autres ferrisols avec des pH-KCl globalement plus acides, des valeurs ΔpH plus élevées en accord avec des teneurs en Al^{3+} échangeables relativement fortes. CEC et Mg^{2+} échangeables sont plus élevées aussi. Une étude minéralogique détaillée de ce sol serait nécessaire.

Andosols A1TC, A1R8. Les pH du sol remodelé sont plus élevés que ceux du sol témoin par suite, probablement, de teneurs plus fortes en Ca^{2+} échangeable. Cette variation est due à une fertilisation Ca forte et récente. Les teneurs en Al^{3+} et H^+ échangeables sont faibles. Les mesures de CEC effectuées à pH 7,0 sur sol séché ont peu de signification pour ce type de sol et ne sont rapportées ici que pour mémoire.

d. OLIGOÉLÉMENTS

Concernant les teneurs en oligoéléments deux effets du remodelage paraissent significatifs :

— une baisse de Zn et Mn dans les ferrisols remodelés probablement liée aux faibles teneurs en matière organique ;

— une augmentation de B et Cu (ferrisols et andosols) en relation éventuellement avec une fixation accrue sur les minéraux argileux et les oxyhydroxydes de fer.

Une interprétation rigoureuse de ces résultats nécessiterait toutefois une étude beaucoup plus détaillée concernant l'état initial des horizons de profondeur mis à jour par remodelage et une meilleure connaissance de l'histoire des fertilisations.

Propriétés physiques

Les résultats sont portés dans le tableau IV.

a. DENSITÉ APPARENTE (da)

Elles sont plus faibles pour les andosols que pour les ferrisols mais, compte tenu de l'effet travail du sol, il est difficile, pour les échantillons de surface, d'apprécier l'effet du remodelage.

Ferrisol TC, da = 1.21 ± 0.08

Ferrisol R4, da = 0.99 ± 0.10

R10, da = 1.15 ± 0.05

Andosol TC, da = 0.71 ± 0.03

Andosol R8, da = 0.78 ± 0.03

b. TENEURS EN « EAU NATURELLE » W_n

Ferrisols. La teneur en « eau naturelle » (W_n) est proche de la valeur mesurée à pF 2,5 (sur sol < 2 mm, séché à l'air), comme l'avaient démontré COMBEAU et QUANTIN (1963) sur des sols ferrallitiques cultivés. On obtient, tous échantillons confondus (TC, R, surface, profondeur), la corrélation :

$$W_n = 1,045 (W_{pF\ 2,5}) - 3,96 \quad r = 0,708$$

Il n'y a pas d'effet significatif du remodelage.

Andosols. W_n est, bien sûr, plus élevée que pour les ferrisols. L'effet du remodelage (1 seule situation) se manifesterait par une augmentation de cette valeur.

TABLEAU IV
Propriétés physiques des échantillons de surface (0-15 cm) et de profondeur (30-50 cm)

Analyse	F1TC	B1R4	F3R7	F1R10	F1R12	A1TC	A1R8
<u>Echantillons surface (0-15 cm)</u>							
da	1,21	0,99		1,15		0,71	0,78
W_n %	37,4	50,2	55,5	38,4	36,5	63,4	76,9
$W_{pF\ 2,5}$ %	37,9	48,4	52,7	52,1	44,5	39,0	61,2
3,0	31,9	42,5	44,4	46,8	39,6	34,3	52,4
4,2	27,2	36,8	39,1	41,5	35,3	27,3	43,4
EU	10,7	11,6	13,6	10,6	9,2	11,7	17,8
St. Str. Is	0,20	0,16	0,95	1,16	1,41	0,30	0,33
Aga %	81,5	56,9	63,6	60,4	62,0	67,3	58,0
Agb %	58,7	19,0	13,2	4,5	12,9	61,1	54,2
Age %	78,6	37,1	44,7	37,7	40,0	64,9	57,3
$\Sigma Ag/3$ %	72,8	37,7	41,5	34,2	38,3	64,4	56,5
(A + LF)max %	13,1	5,4	38,4	37,7	48,6	12,5	13,2
SG %	7,0	4,0	1,0	2,0	4,3	24,3	18,3
<u>Echantillons profondeur (30-50 cm)</u>							
W_n %	37,7	56,1	51,2	44,1	38,9	63,5	76,9
$W_{pF\ 2,5}$ %	37,3	49,0	50,2	49,3	45,2	37,9	61,2
3,0	32,1	43,0	44,5	45,1	39,8	31,7	52,4
4,2	27,4	37,6	36,8	40,1	35,5	27,2	43,4
EU	9,9	11,4	13,4	9,2	9,7	10,7	17,8

c. RÉTENTION EN EAU A DIVERS POTENTIELS (pF 2,5-3,0-4,2)

Ferrisols. Les variations des teneurs en eau à diffé-

rents pF paraissent liées à des variations texturales entre les différents horizons des sols témoins et remodelés (fig. 3a). Les teneurs en « eau utile » (EU = pF 2,5 - pF 4,2) varient de 8 à 14 %.

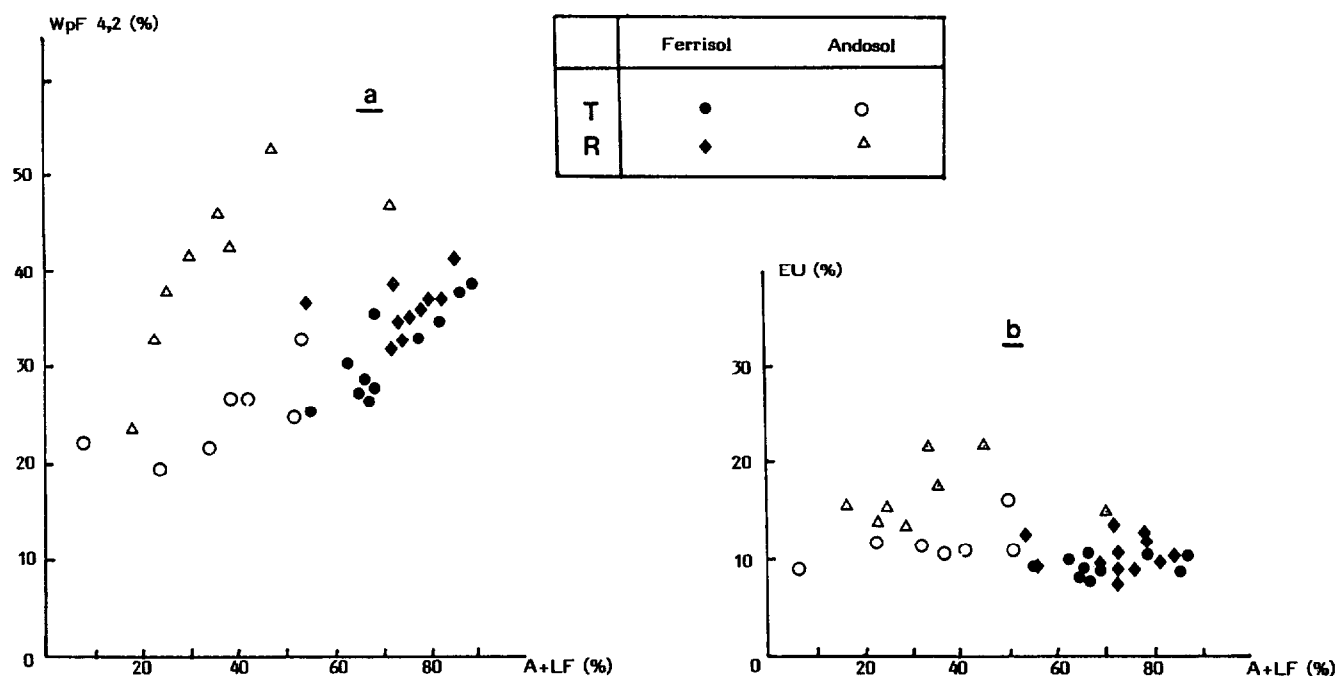


FIG. 3. — Variations des teneurs en eau à pF 4,2 (WpF 4,2) et en « eau utile » (EU) en fonction des teneurs en éléments fins du sol (A + LF)

Andosols. Un accroissement des teneurs en eau à pF 4,2 et de EU apparaît à la suite du remodelage pour les andosols. Ceci pourrait s'expliquer par une déshydratation irréversible plus élevée pour les horizons de surface des sols témoins que pour ceux des sols remodelés, les premiers étant plus riches en matière organique et soumis à des alternances d'humectation-dessiccation depuis plus longtemps que les seconds. Les échantillons ayant été séchés à l'air, ces variations peuvent être dues, éventuellement aussi, à des artefacts.

a. STABILITÉ STRUCTURALE

La stabilité de la structure est mesurée par l'Indice d'Instabilité structurale de HENIN, Is. Selon BOYER et COMBEAU (1960), l'échelle d'interprétation de Is est la suivante :

- 0 à 0,4 bonne stabilité
- 0,4 à 1,0 stabilité médiocre
- sup. à 1,0 stabilité mauvaise

Ferrisols. Bonne pour le sol témoin (Is = 0,2), la stabilité structurale devient médiocre après remodelage, Is étant généralement égal ou supérieur à 1. Ceci s'explique par la diminution de l'effet stabilisant de la matière organique comme l'indique la forte diminution des taux d'agrégats stables après prétraitement benzène (Agb). Ces résultats sont en accord avec ceux de COMBEAU et

QUANTIN (1964) pour des sols ferrallitiques cultivés.

Andosols. La stabilité structurale est très bonne (Is = 0,3) pour ces sols quelles que soient les situations, TC ou R.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Que ce soit pour les ferrisols ou les andosols, le remodelage conduit à une transformation totale du profil pédologique par décapage des horizons A (et souvent B) initiaux. Après 10 ans de culture de canne à sucre les horizons humifères (A)p qui se reconstituent sur sols remodelés sont peu épais et encore pauvres en matière organique (30 % du stock initial sur 0-15 cm, teneurs inférieures à cette valeur si l'on prend en compte les 50 premiers centimètres et les teneurs initiales en matière organique des horizons de profondeur). Ces résultats sont en accord avec les observations d'autres auteurs sur des sols ferrallitiques remodelés en Guadeloupe (LINARES et DUMAS, 1975), des sols « miniers » de l'Illinois USA (THOMAS et JANSEN, 1985), ou de l'Allemagne (SCHRÖDER, 1986). La matière organique est distribuée de façon très hétérogène à l'intérieur de l'horizon.

La structure des horizons (A)p des sols remodelés (R) paraît généralement plus grossière que celle des hori-

zons A des sols témoins TC, mais notre densité d'observations est insuffisante pour conclure. Il en est de même pour la répartition du système racinaire (densité d'observations insuffisante). Les références de la littérature sur des sols « perturbés » (« removal top-soil » = sols remodelés et/ou « mine spoils » = sols miniers) font état généralement, par rapport à des « témoins », de fortes diminutions de l'enracinement et/ou de la productivité, de faibles développements des structures exprimées et de dégradations des propriétés physiques (FYLES *et al.*, 1985 ; JESSOP *et al.*, 1985 ; LINARES et DUMAS, 1975 ; Mc SWEENEY et JANSEN, 1984 ; SCHUMAN et SEDBROOK, 1984 ; THOMAS et JANSEN, 1985).

Par contre, les travaux de ECK (1968) ne font pas apparaître d'effet important, sur la productivité d'un sorgho, du décapage des horizons humifères des sols des grandes plaines du sud des USA.

De ces observations générales il résulte que les modifications des propriétés édaphiques observées à la suite du remodelage peuvent être dues :

- soit à la mise à jour d'horizons de profondeur aux caractéristiques texturales ou minéralogiques différentes de l'horizon de surface du sol témoin initial,
- soit, pour des matériaux identiques sur le plan textural et minéralogique (TC et R), à de fortes diminutions des teneurs en matière organique des horizons de surface.

C'est ainsi que pour les *ferrisols* les faibles teneurs en matière organique des sols remodelés sont la cause principale de la dégradation de la structure, des faibles teneurs en N, P total et P assimilable et d'une augmentation du « pouvoir de fixation du sol vis-à-vis du phosphore », malgré des niveaux de fertilisation azotée et phosphatée particulièrement élevés pour ces sols remodelés. De même on peut expliquer les diminutions observées pour certains oligoéléments (Mn et Zn). MBAGWU (1985) citant divers auteurs signale le caractère parfois limitant de Zn dans les sols pauvres en matière organique s'expliquant par les corrélations positives existantes entre teneurs en matière organique et oligoéléments échangeables du sol (SEVERSON et GOUGH, 1984). Sur ces différents aspects chimiques (N, P, oligoéléments) des observations analogues ont été faites par FYLES *et al.* (1985), HART et HEALY (1980, LINARES et DUMAS (1975), SCHUMAN et SEDBROOK (1984).

Par contre, les variations observées entre *ferrisols* témoins et remodelés pour les propriétés hydriques et le complexe d'échange (CEC, bases) paraissent plutôt liées, soit à des différences structurales et/ou minéralogiques entre les horizons étudiées, soit à des différen-

ces de pratiques de fertilisation entre les diverses parcelles.

Pour les *andosols*, le remodelage fait souvent apparaître des horizons argileux à kaolinite ou halloysite ce qui induit des propriétés édaphiques très différentes. Lorsque ce n'est pas le cas, les faibles teneurs en matière organique des sols remodelés s'accompagnent de faibles teneurs en N et P totaux et d'une augmentation du « pouvoir de fixation du sol vis-à-vis du phosphore ». Par contre, contrairement aux *ferrisols*, on constate la conservation d'une stabilité structurale élevée et une augmentation des teneurs en eau à différents pF et de la réserve en eau utile (EU).

Si, pour les raisons invoquées ci-dessus, l'effet du remodelage sur les propriétés des sols peut s'exprimer de façon différente (en particulier pour les propriétés physiques) selon le type de sol et l'épaisseur de la couche décapée, il apparaît, dans tous les cas, la nécessité de reconstituer le plus rapidement possible le stock organique des horizons superficiels des parcelles remodelées, tant pour le maintien de la productivité végétale que pour la conservation des sols (érosion possible sur *ferrisol*). Dans le cas particulier de l'agrosystème industriel cannier, il paraît difficile et illusoire de préconiser une reconstitution rapide des stocks organiques des sols par des cultures prairiales, cultures que l'on sait, par ailleurs, être efficaces : travaux de ALBRECHT *et al.* (1986) sur vertisols « dégradés » en Martinique et de Mc COLL *et al.* (1982) pour des sols remodelés en Nouvelle-Zélande. Il faut donc insister sur toutes les possibilités d'associer, à long terme, fertilisations organiques (composts, tourteaux de presse, non brûlage des cannes) et minérales, compatibles avec le contexte agro-économique (1). Des expériences récentes dans diverses conditions de « sols perturbés » (MBAGWU, 1985 ; SCHUMAN et SEDBROOK, 1984 ; SCHUMAN *et al.*, 1984) en ont montré tout l'intérêt.

En conclusion, les pratiques de « remodelage des terres » effectuées dans un souci de mécanisation des cultures et de rentabilité à court terme ont fortement modifié, souvent dans le sens de la dégradation, les propriétés des sols avec des conséquences probablement non négligeables sur la productivité cannière.

Pour les deux types de sols la reconstitution en 10 ans, sous culture cannière, d'environ 30 % du stock organique initial des seuls horizons de surface ne suffit pas à retrouver des propriétés édaphiques satisfaisantes. Il faudra donc compter avec le temps...

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 2 mars 1988.

(1) C'est ainsi que dans le contexte martiniquais, compte tenu du paysage très accidenté, du coût du transport, et du morcellement des exploitations, l'utilisation des « vinasses » ne peut qu'être très réduite.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRECHT (A.), BROSSARD (M.) et FELLER (C.), 1986. — Etude de la matière organique des sols par fractionnement granulométrique. 2 - Augmentation par une prairie à *Digitaria decumbens* du stock organique de vertisols cultivés en Martinique. C.R. 13^e Cong. A.I.S.S. Hambourg 2 : 214-215.
- Atlas de la Martinique, 1977. — CNRS-IGN Ed., Paris.
- AYRES (A.S.) et HAGIHARA (H.H.), 1961. — Effectiveness of raw rock phosphate for sugar cane. *Soil Sci.*, 91 (6) : 383-387.
- BOYER (J.) et COMBEAU (A.), 1960. — Etude de la stabilité structurale de quelques sols de la République Centrafricaine. *Sols africains* 5 (1) : 5-24.
- CHEVIGNARD (T.), 1985. — Etude de la formation actuelle d'horizons humifères en milieu tropical. Cas des sols de culture « remodelés » de la Martinique. Thèse 3^e cycle, Univ. Nancy-1, 83 p. + Annexes.
- CHEVIGNARD (T.), FARDEAU (J.C.), DOULBEAU-PIASCO (S.), FELLER (C.), TURENNE (J.P.) et VALLERIE (M.), 1986. — Effets du remodelage parcellaire sur la fixation des phosphates en divers types de sols des Antilles. *Agronomie*, 6 (2) : 149-156.
- COLMET-DAAGE (F.) et LAGACHE (P.), 1965. — Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 3 (2) : 91-122.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (M.), KIMPE (C. de) et FUSIL (G.), 1972. — Dispersion et étude des fractions fines de sols à allophane des Antilles et d'Amérique latine. 1^{re} partie : la dispersion. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 10 (2) : 169-191.
- COMBEAU (A.) et QUANTIN (P.), 1963. — Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF - Humidité. *Sci. Sol., Bull. AFES*, 1 : 1-7.
- COMBEAU (A.) et QUANTIN (P.), 1964. — Observations sur les relations avec la stabilité structurale et la matière organique dans quelques sols d'Afrique Centrale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 2 (1) : 3-11.
- ECK (H.V.), 1969. — Restoring productivity on Pullman silty clay loam subsoil under limited moisture. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 578-581.
- FIELDS (M.) et PERROT (K.W.), 1966. — The nature of allophane in soils. Part. 3 *N.Z. J. Science*, 9 (3) : 623-629.
- FYLES (J.W.), FYLES (I.H.) et BELL (M.A.M.), 1985. — Vegetation and soil development on coal mine spoil at high elevation in the Canadian Rockies. *J. Appl. Ecol.*, 22 : 239-248.
- HART (P.B.S.) et HEALY (W.B.), 1980. — Topsoil removal and the restoration of pasture and soil productivity. Interim Report. Soil Bureau, Dpt. Sc. Ind. Res., New Zealand, 40 p., *multigr.*
- HENIN (S.), GRAS (R.) et MONNIER (G.), 1969. — Le profil cultural. Masson Ed., Paris.
- JEANROY (E.), 1983. — Diagnostic des formes du fer dans les pédogenèses tempérées. Thèse Doct. Univ., Nancy 1, 168 p. + annexes.
- JESSOP (R.S.), Mc LEOD (D.A.), HULME (P.J.) et Mc KENZIE (D.C.), 1985. — The effects of landforming on crop production on a red-brown earth. *Aust. J. Soil Res.*, 23 : 85-93.
- LINARES (A.A.) et DUMAS (Y.), 1975. — Profil cultural et croissance de la canne à sucre. Etude de quelques cas typiques dans divers milieux de la Guadeloupe. Rapp. INRA-CRAAG, Guadeloupe, 24 p., *multigr.*
- MBAGWU (J.S.C.), 1985. — Subsoil productivity of an ultisol in Nigeria as affected by organic wastes and inorganic fertilizer amendments. *Soil Sci.*, 140 (6) : 436-441.
- MBAGWU (J.S.C.), LAL (R.) et SCOTT (T.W.), 1984. — Effects of desurfacing of alfisols and ultisols in Southern Nigeria. I - Crop performance. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 48 : 828-833.
- Mc COLL (H.P.), HART (P.S.) et COOK (F.J.), 1982. — Influence of earthworms on some chemical and physical properties, and the growth of ryegrass in a soil after topsoil stripping. A pot experiment. *N. Z. J. Agric. Res.*, 25 : 229-237.
- Mc SWEENEY (K.M.) et JANSEN (I.J.), 1984. — Soil structure and associated rooting behavior in mine soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 606-612.
- MEHRA (O.P.) et JACKSON (M.L.), 1960. — Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium carbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7 : 317-327.
- NGAKANOU (D.), 1987. — Etude de propriétés de charge de sols ferrallitiques riches en halloysite et caractérisation de leurs fractions argileuses. Mémoire de fin de stage. CPB-CNRS, Nancy, 32 p., *multigr.*
- PELLOUX (P.), DABIN (B.), FILLMANN (G.) et GOMEZ (P.), 1971. — Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols. *Init. Doc. Tech.* n° 17, Paris, ORSTOM, 117 p.
- PINTA, 1962. — Recherche et dosage des éléments traces. Dunod Ed., Paris, 726 p.
- SCHRÖDER (D.), 1986. — Properties of reclaimed soils on loess. 13th Int. Cong. Soil Sci., A.I.S.S., Hambourg, p. 1403.
- SCHUMAN (G.E.) et SEDBROOK (T.A.), 1984. — Sawmill wood residue for reclaiming bentonite spoils. *Forest Products Journal*, 34 (11-12) : 65-68.

- SCHUMAN (G.E.), DEPUIT (E.J.), SMITH (J.A.) et KING (I.A.), 1984. — Reclamation of bentonite mined lands in the Northern Great Plains. Proc. « Symposium on the reclamation of lands disturbed by surface mining... » July 10-13, Owensboro, Kentucky.
- SEVERSON (R.C.) et GOUGH (L.P.), 1984. — Rehabilitation materials from surface-coal mines in western USA. III. Relations between elements in mine soil and uptake by plants. Reclamation and Revegetation Research, 3 : 185-197.
- SSC-ORSTOM, s.d., — Méthodes d'analyses utilisées au laboratoire de physique des sols. SSC-ORSTOM-Bondy, ORSTOM, 30 p., *multigr.*
- TAMM (O.), 1922. — Um best ämning ow de oorganiska komponentema i markens gel-complex. *Medd. Statens Skogsförsöksanst.*, 19 : 385-404.
- THOMAS (D.) et JANSEN (I.), 1985. — Soil development in coal mine spoils. *J. Soil and Water Cons.*, 40 (5) : 439-442.