

PROPRIÉTÉS DES ANDOSOLS DE L'ITASY ET DE L'ANKARATRA

C. ZEBROWSKI

RÉSUMÉ

Des sols volcaniques de l'Itasy et de l'Ankaratra (hauts plateaux de Madagascar) sont étudiés. Ils présentent des propriétés d'andosol mais sont assez différents.

Les sols de l'Itasy formés sur scories d'âge récent ont des caractères de sol peu évolué. Leurs teneurs en produits amorphes sont élevées, notamment en silice. Mais ils ne présentent ni une capacité de rétention pour l'eau très élevée ni une dessiccation irréversible. Ce ne sont des andosols que parce qu'ils sont peu évolués.

Les sols de l'Ankaratra, formés sur un manteau d'altération lixivié, sont très évolués. Ils possèdent peu de silice amorphe mais ont un horizon organique noir et épais, une capacité de rétention élevée et présentent une dessiccation irréversible, caractéristiques des andosols. Le climat est en grande partie responsable des propriétés de ces sols.

SUMMARY

Volcanic soils from the highlands of Madagascar have been observed and analysed in Itasy and Ankaratra. These soils have Andosol properties but are somewhat different.

In Itasy, the soils are derived from recent volcanic ash and present characteristics of weakly developed soils. Contents in amorphous material, mainly silica, are high. But they have neither a high moisture content nor a non reversing desiccation. They are andosols namely because they are weakly developed.

In Ankaratra, the soils are derived from a lixiviated mantle of alteration and are mature. They have little amorphous silica but have a deep black humic horizon, high moisture content and an irreversible desiccation, all characteristics of andosols. These properties are related to climatic factors.

PLAN

1. INTRODUCTION
2. TECHNIQUES D'ANALYSE
3. LES SOLS
 - 3.1. LES SOLS DE L'ITASY
 - 3.2. LES SOLS DE L'ANKARATRA
4. CONCLUSION

1. INTRODUCTION

Certaines caractéristiques paraissent essentielles pour qu'un sol volcanique soit un andosol ; l'une des principales est un contenu élevé en produits amorphes. D'autres propriétés comme les teneurs en matière organique, les teneurs en eau du sol sont également retenues. Mais les valeurs avancées pour que l'on puisse parler d'andosol ne sont pas les mêmes pour les différents auteurs.

Des sols volcaniques peuvent présenter des caractères qui les font classer comme andosols tout en étant pourtant très différents les uns des autres ; c'est le cas, sur les hauts plateaux de Madagascar, des sols des massifs volcaniques de l'Itasy et de l'Ankaratra.

Le massif de l'Itasy a une altitude comprise entre 1 000 et 1 500 m. La pluviométrie est comprise entre 1 700 et 1 800 mm ; la saison sèche, bien marquée, dure 5 à 6 mois. La température moyenne est de 18 à 20°.

La géologie du massif a été étudiée par LENOBLE (1940), il distingue les éruptions trachytiques, ordanchitiques, basanitiques et ultra-vulcaniennes. Ces manifestations volcaniques quoique non datées sont récentes, la jeunesse des appareils volcaniques ainsi que la fraîcheur des roches mères en témoignent. Les scories couvrent une importante surface du massif ; elles donnent naissance à des sols, plus ou moins profonds suivant leur position topographique, qui présentent certaines propriétés des andosols.

Le massif de l'Ankaratra a une altitude comprise entre 1 200 et 2 600 m. Les andosols ont été reconnus à une altitude supérieure à 2 000 m. A cette altitude, la pluviométrie dépasse 2 500 mm, la température moyenne s'abaisse à 10°, la saison sèche est peu marquée.

La géologie du massif est assez complexe. Chronologiquement les éruptions ont donné du pliocène au pléistocène, des rhyolites ; andésites leucocrates ; trachytes calco-alcalins, hyperalcalins et phonolitiques ; basaltes et andésites labradoriques ; ankaratrites, basanites et basanitoïdes (LENOBLE, 1938).

En fait, les variations de la roche mère semblent influencer assez peu la morphologie et les propriétés des sols. Ceux-ci sont généralement remaniés. Un sol jeune s'est formé à partir d'un manteau d'altération issu de matériaux volcaniques antérieurs à ceux de l'Itasy.



FIG. 1. — Carte de situation.

2. TECHNIQUES D'ANALYSE

Les analyses ont été effectuées suivant les techniques employées aux SSC de l'ORSTOM. Certaines modifications ont été apportées :

— Les granulométries ont été faites par la méthode pipette de Robinson, avec dispersion à l'hexa-metaphosphate de sodium. Une dispersion en milieu acide n'a pas amélioré les résultats. Par contre un

prétraitement acide (HCl à 2 %), suivi d'une dispersion à l'hexametaphosphate a augmenté les pourcentages d'argile de 10 %.

— Les produits amorphes ont été extraits et dosés par la technique mise au point par SEGALEN (1968). La représentation graphique des résultats a été faite en mettant en ordonnées, non pas les valeurs absolues des éléments extraits, mais les pourcentages extraits par rapport à l'élément total. Les courbes sont ainsi facilement comparables : plus la pente à l'origine est élevée, plus l'échantillon est susceptible de contenir des produits amorphes.

— La recherche des allophanes a été effectuée en appliquant le test de FIELDS ET PERROT (1966) au champ sur les échantillons frais.

— L'analyse triacide a fourni une estimation des éléments totaux, estimation d'autant plus juste que les résidus sont plus faibles. Les pourcentages corrigés de Si, Fe, Al et Ti ont été obtenus en rapportant les teneurs de ces éléments à la somme Si + Fe + Al + Ti. Ces pourcentages permettent de mettre en évidence un éventuel lessivage de la silice. Si le résidu de l'attaque triacide augmente de bas en haut du profil, il faut admettre, si la roche mère est homogène et si le profil n'est pas remanié, un lessivage de tous les éléments (les particules fines peuvent être lessivées). Une estimation, en général par défaut, du lessivage, peut être réalisée en comparant les teneurs des éléments dans les horizons d'un même profil après avoir multiplié ces teneurs par le rapport « Résidu le plus élevé/Résidu de l'horizon considéré ».

— Les diagrammes de diffraction des rayons X ont été réalisés au laboratoire de la Faculté des Sciences de Tananarive. L'appareil employé est un Philips, avec une anticathode de cobalt.

3. LES SOLS

3.1. LES SOLS DE L'ITASY

3.1.1. Généralités

Les sols formés sur scories occupent d'importantes surfaces dans le massif de l'Itasy. La taille des projections volcaniques est variable. Dans l'espace, les éléments les plus gros, qui atteignent 10 à 20 cm de diamètre, sont situés près des cônes alors que les éléments les plus fins (1 à 2 cm de diamètre) en sont éloignés. Ces projections sont pour la plupart scoriacées ; l'examen microscopique révèle une pâte vacuolaire micro-cristalline avec des amphiboles et des pyroxènes. Les dépôts de ces projections sont verticalement assez hétérogènes ; la succession de strates d'éléments fins intercalées avec des strates d'éléments plus grossiers est fréquente ; les éléments fins s'altérant plus vite que les éléments grossiers, on peut observer des séquences verticales du type suivant : sol-scories-sol-scories, sans que l'horizon de terre enfoui soit pour autant un paléosol.

L'hétérogénéité initiale du matériau originel rend parfois difficile l'interprétation du profil.

L'épaisseur du sol est étroitement liée à sa position topographique : les sols des sommets et pentes, rajeunis par l'érosion, sont peu épais, alors que ceux formés sur replat le sont beaucoup plus.

3.1.2. Morphologie des profils

Trois profils ont été étudiés en détail :

Un profil de type A - C correspondant à un sol peu épais situé en sommet de colline (SOZ 6).

Un profil de type A - (B) - C correspondant à un sol moyennement épais situé dans une pente (SOZ 4).

Un profil de type A - B - C correspondant à un sol épais sur replat (SOZ 5).

a) Profil A - C (SOZ 6)

A de 0 à 25 cm : Sec ; brun gris (7,5 YR-3/2) passant progressivement à brun jaune (7,5 YR-4/4) à 25 cm ; limoneux ; structure grumeleuse fine à moyenne, friable ; degré de structuration moyen ; très poreux ; bon enracinement ; passage brutal à :

C à partir de 25 cm : Scories plus ou moins altérées laissant des cavités remplies de terre fine.

b) Profil A - (B) - C (SOZ 4)

A de 0 à 15 cm : Sec, brun bris (10 YR-4/3) ; limono argileux ; structure grumeleuse fine à moyenne, dure, fort degré de structuration ; très poreux ; enracinement important ; passage progressif à :

(B) de 15 à 60 cm : Sec, brun jaune (10 YR-4/4) ; limoneux ; structure continue, meuble ; très poreux ; enracinement bon ; passage très progressif à :

C de 60 à 200 cm : Humide ; brun gris (10 YR-5/6) ; limono sableux, poches sableuses fréquentes, des minéraux altérés sont reconnaissables ainsi que des grains de quartz ; structure continue, friable ; très poreux ; peu de racines.

c) Profil A - B - C (SOZ 5)

A de 0 à 25 cm : Sec ; brun gris (10 YR-3/3) ; limoneux ; structure grumeleuse moyenne, friable, degré de structuration moyen ; porosité très bonne ; nombreuses racines ; passage progressif à :

B de 25 à 90 cm : Légèrement humide ; brun jaune légèrement rougeâtre (7,5 YR-4/4) ; limoneux ; structure continue, friable, lorsque les parois des talus sèchent une structure polyédrique à prismatique très grossière se forme, les éléments en sont friables et se réduisent en poussière ; très poreux ; enracinement beaucoup moins dense que dans A mais encore important ; passage très progressif à :

C de 90 à 220 cm : Humide ; brun jaune (10 YR-4/4) à brun gris (10 YR-5/6) ; limono sableux, quelques poches d'altération plus limoneuses ; nombreux minéraux en cours d'altération ; structure continue ; bonne porosité ; quelques racines peuvent descendre jusqu'à 2 m.

Des caractères communs à ces profils peuvent être dégagés :

La texture est limoneuse dans les horizons supérieurs.

La structure bien marquée dans les horizons A est absente dans les horizons inférieurs. La porosité est toujours bonne. La couleur est brun jaune mais dans les sols épais une coloration légèrement plus rouge apparaît en haut du profil.

L'horizon C présente une épaisseur variable suivant la composition minéralogique de la roche mère; il peut être très épais si la vitesse de pénétration du front d'altération est grande, c'est-à-dire le « degré de pénétration réelle » élevé (cas de SOZ 4) ; par contre, pour SOZ 6, le taux de décomposition totale, ou degré d'altération, est plus élevé que le degré de pénétration réelle, l'horizon C est très peu épais.

3.1.3. Granulométrie

Dans le tableau 1 et la figure 2 sont résumés les résultats obtenus pour les profils SOZ 6, 4 et 5.

TABLEAU I
GRANULOMÉTRIE DES PROFILS SOZ 6, 4 ET 5

		Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon (%)	Sables (%)	Humidité (%)
Profil A - C	SOZ 61	5	17	35	32	4
	SOZ 61bis	25	8	31	43	6
Profil A - (B) - C	SOZ 41	10	29	24	39	3
	SOZ 42	40	21	30	35	5
	SOZ 43	80	10	24	54	8
	SOZ 44	100	8	19	56	10
Profil A - B - C	SOZ 51	10	20	32	29	6
	SOZ 52	40	22	35	32	5
	SOZ 53	100	23	34	30	8
	SOZ 54	190	8	37	40	12

La texture est limoneuse à limono argileuse en sommet de profil, limono sableuse à sableuse en bas de profil.

Les totaux des fractions granulométriques atteignent rarement 100 % par suite d'une mauvaise dispersion des argiles.

3.1.4. Propriétés hydriques

Des prélèvements effectués pendant la saison sèche et pendant la saison humide montrent que l'humidité du sol en place reste élevée, dans l'horizon C, pendant la saison sèche ; elle diminue fortement dans les horizons A et B. Autrement dit le sol se dessèche sur une assez grande profondeur lorsque la saison sèche est bien marquée.

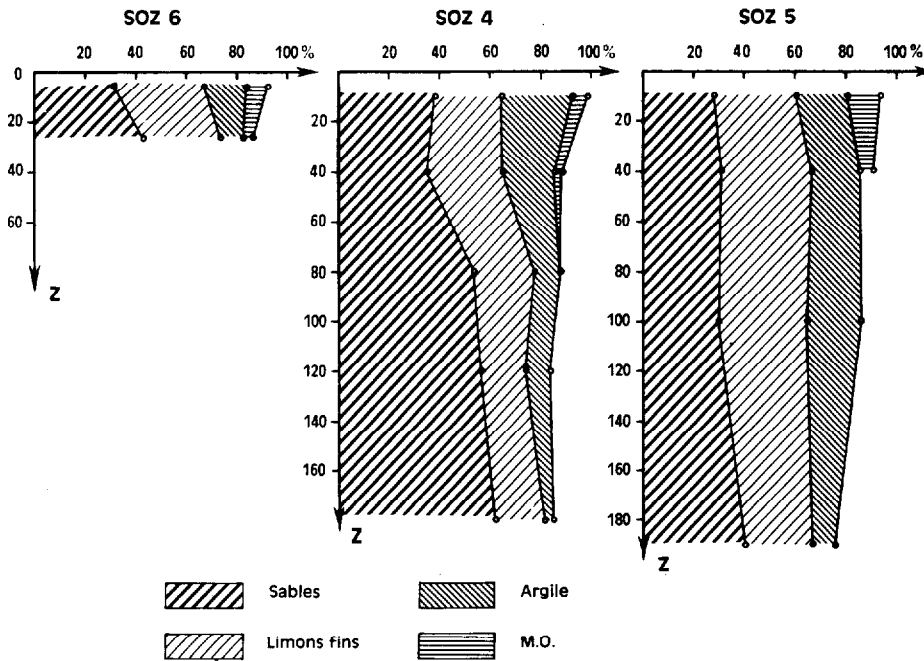


FIG. 2. — Résultats de l'analyse granulométrique.

Des mesures d'humidité ont été effectuées sur les horizons A, B, et C, elles sont résumées dans le tableau 2.

TABLEAU II

HUMIDITÉ DU SOL SEC ET HUMIDE, HUMIDITÉ À pF 3 ET pF 4,2

Horizon	A	B	C
Humidité du sol (%) :			
frais	22	28	56
séché 1 mois	6,5	8,2	12
Humidité du sol frais (%) :			
au pF 3	27,1	31,2	55,9
au pF 4,2	18,5	26,7	27,2
Humidité du sol séché 1 mois (%) :			
au pF 3	27,8	29,6	48,2
au pF 4,2	16,8	20,3	23,5
Densité apparente	0,9	0,8	0,7

Ce tableau montre que la dessiccation des différents échantillons n'est pas irréversible. Néanmoins la réhumectation du sol paraît plus difficile dans les horizons B et C que dans l'horizon A.

La densité apparente est inférieure à 1, elle est d'autant plus basse que l'humidité du sol en place est plus élevée (0,7 pour l'horizon C).

3.1.5. Analyse triacide

Les résultats de l'analyse triacide sont exprimés dans le tableau 3 et dans la figure 3.

TABLEAU III
RÉSULTATS D'ANALYSE TRIACIDE

		Perte au feu % du sol	Résidu % du sol	Pourcentage corrigé des éléments				
				SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	
SOZ 6	Terre	SOZ 61	17,4	7,1	25,5	36,4	28,2	9,9
		SOZ 61bis	13,4	4,6	27,7	37,7	24,4	10,3
	Scories	SOZ 62	5,9	8,9	43,8	28,8	18,8	8,7
SOZ 4		SOZ 41	15,0	33,4	23,4	33,2	35,7	7,8
		SOZ 42	13,5	17,5	28,4	31,4	33,6	6,3
		SOZ 43	9,3	21,0	30,2	32,5	30,4	7,1
		SOZ 44	8,2	24,0	29,2	32,7	30,8	7,3
SOZ 5		SOZ 51	24,7	30,5	18,9	33,6	40,2	7,1
		SOZ 52	17,2	12,4	32,0	27,8	34,8	5,7
		SOZ 53	14,6	8,5	20,0	38,2	31,0	11,0
		SOZ 54	13,5	6,3	27,6	31,5	33,4	7,7

Les pourcentages de résidu sont très variables d'un sol à l'autre ; ils dépendent de la nature de la roche mère. Ainsi les résidus du profil SOZ 4, contenant du quartz, sont beaucoup plus élevés que le résidu des scories du profil SOZ 6. On ne peut donc s'appuyer sur les teneurs en résidu pour déterminer avec précision le degré d'altération d'un sol jeune.

Dans tous les cas, le résidu, dans un même profil, augmente en surface du sol ; un remaniement par les cultures en surface, et un lessivage des éléments fins dû à la forte porosité du sol et de la roche mère, expliquent ce phénomène.

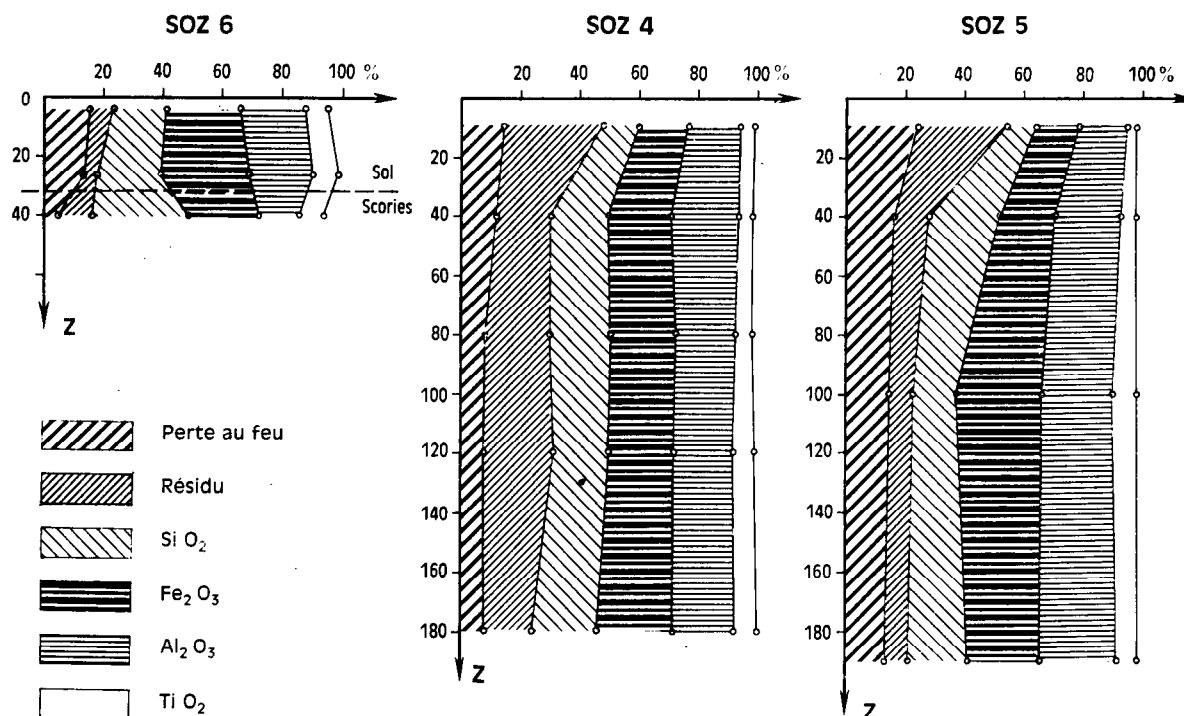


FIG. 3. — Résultats de l'analyse triacide.

Les résultats des teneurs en silice, fer et aluminium obtenus sur le sol et sur la roche mère montrent que la silice est en quantité beaucoup plus importante dans les scories que dans le sol. La silice est donc très facilement lessivée au cours de l'altération des scories ; il s'ensuit une accumulation relative du fer et de l'aluminium (le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ passe de 4, dans les scories à 1,5 dans le sol).

Dans le sol les pourcentages relatifs en Si, Fe et Al ne varient pas beaucoup de bas en haut du profil ; ce qui n'exclut pas un lessivage global de tous les éléments (pour SOZ 5, le résidu passe de 6 % en profondeur à 30 % en surface).

3.1.6. Eléments totaux

Les résultats sont résumés dans le tableau 4 et dans la figure 4.

Le magnésium est l'élément dont les teneurs sont les plus élevées (40 à 80 mé/100 g), il domine largement le calcium ($\text{Mg}/\text{Ca} = 10$). Les résultats obtenus sur les scories et la terre fine de SOZ 6 montrent en effet que le calcium est beaucoup plus facilement entraîné que le magnésium. De même, pour un profil donné, les teneurs en calcium diminuent de bas en haut du profil alors que celles en magnésium restent à peu près constantes.

Le sodium est, comme le calcium, un élément facilement entraîné au cours de l'altération des scories.

TABLEAU IV
ÉLÉMENTS TOTAUX

		Eléments totaux mé/100 g			
		Ca	Mg	K	Na
SOZ 6	Terre fine	9,2	136,6	1,1	0,8
	Scories	85,3	269,7	3,6	6,9
SOZ 4	SOZ 41	4,4	43,4	3,2	0,7
	SOZ 42	4,4	58,8	3,5	0,7
	SOZ 43	9,0	84,2	5,7	1,3
	SOZ 44	12,8	56,9	3,9	0,5
SOZ 5	SOZ 51	9,4	30,4	0,5	1,5
	SOZ 52	5,4	58,1	1,9	1,3
	SOZ 53	5,0	48,2	1,5	1,3
	SOZ 54	8,8	49,4	1,0	1,5

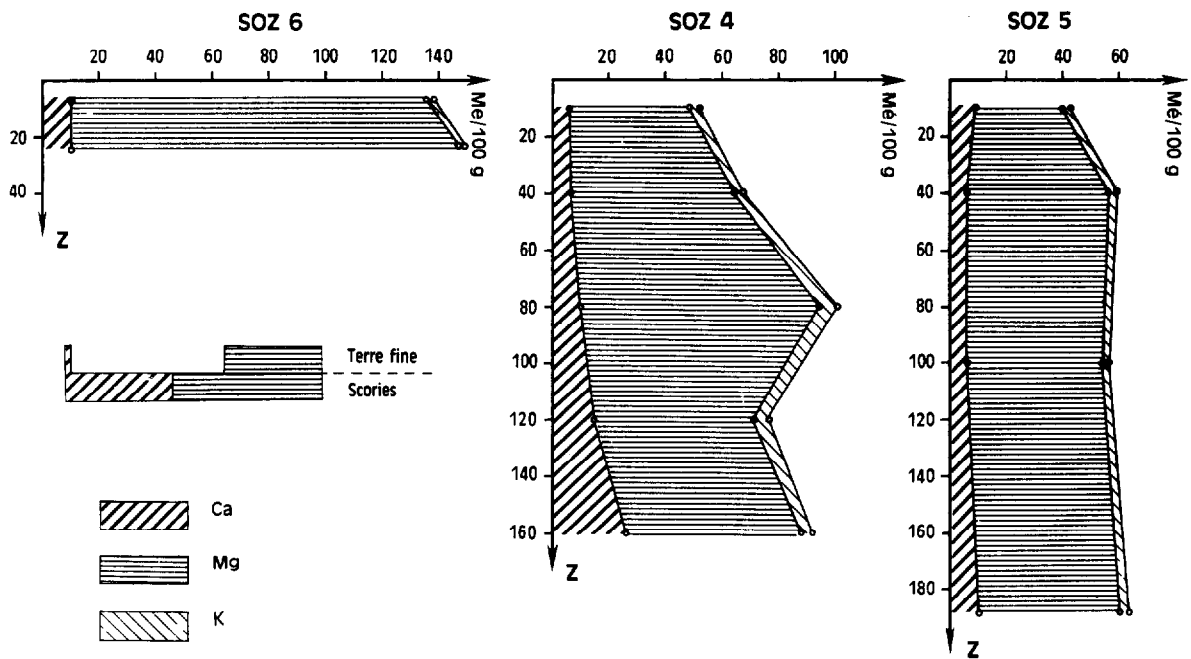


FIG. 4. — Eléments totaux.

3.1.7. Eléments échangeables. Taux de saturation

Les teneurs en éléments échangeables et les taux de saturation, résumés dans le tableau 5 et la figure 5, montrent une désaturation du profil d'autant plus forte que le sol est plus épais.

TABLEAU V
ELÉMENTS ÉCHANGEABLES ET TAUX DE SATURATION

		Eléments échangeables mé/100 g				S mé/100 g	T mé/100 g	V %	pH
		Ca	Mg	K	Na				
SOZ 6	SOZ 61	3,0	3,2	1,1	0,0	17,4	25,8	28,6	6,0
	SOZ 61bis	5,8	5,8	0,3	0,0	12,0	30,0	40,0	6,7
Scories broyées à 2 mm	SOZ 62	23,1	10,5	1,1	0,5	35,2	35,4	99,5	—
SOZ 4	SOZ 41	1,75	1,95	0,98	0,02	4,70	16,8	28	5,9
	SOZ 43	4,07	3,22	1,13	0,25	8,69	20,5	42	5,8
	SOZ 45	8,47	5,38	0,78	0,2	14,83	20,7	72	6,6
SOZ 5	SOZ 51	0,87	0,28	0,2	0,03	1,38	16,9	8,2	5,3
	SOZ 52	0,27	0,04	0,04	0,03	0,38	9,7	3,9	5,4
	SOZ 53	0,51	0,31	0,13	0,06	1,01	10,9	9,2	5,2
	SOZ 54	1,79	0,0	0,19	0,09	2,07	15,4	13,4	5,2

La somme des bases échangeables passe de 12 mé/100 g dans SOZ 6 à 0,4 mé/100 g dans SOZ 5. Le taux de saturation passe de 40 % à 5 % dans ces mêmes profils. Le calcium est l'élément le mieux retenu par le complexe absorbant. Les teneurs en potassium sont toujours beaucoup plus faibles que celles en Ca et Mg.

Une partie de la capacité d'échange doit, dans les sols peu évolués (SOZ 6 et 4), comme le pensent TERCINIER et QUANTIN (1968), être attribuée aux sables. Néanmoins les valeurs trouvées sont certainement supérieures à la réalité, le broyage des sables faisant apparaître de nouveaux sites d'échange. Les scories broyées ont ainsi une capacité d'échange de 35,4 mé/100 g avec un taux de saturation de 99,5 %. Leur broyage a fait apparaître de nombreux sites d'échanges saturés, puisqu'initialement protégés du lessivage, et masque ainsi l'effet de leur lixiviation superficielle.

Le pourcentage de Ca échangeable par rapport au Mg échangeable est plus élevé dans le cas des scories que dans celui du sol ; il est donc normal de voir les teneurs en Ca échangeable diminuer beaucoup plus vite que celles en Mg échangeable, de bas en haut d'un profil qui serait sableux à sa base, limono argileux en son sommet (c'est le cas de SOZ 4).

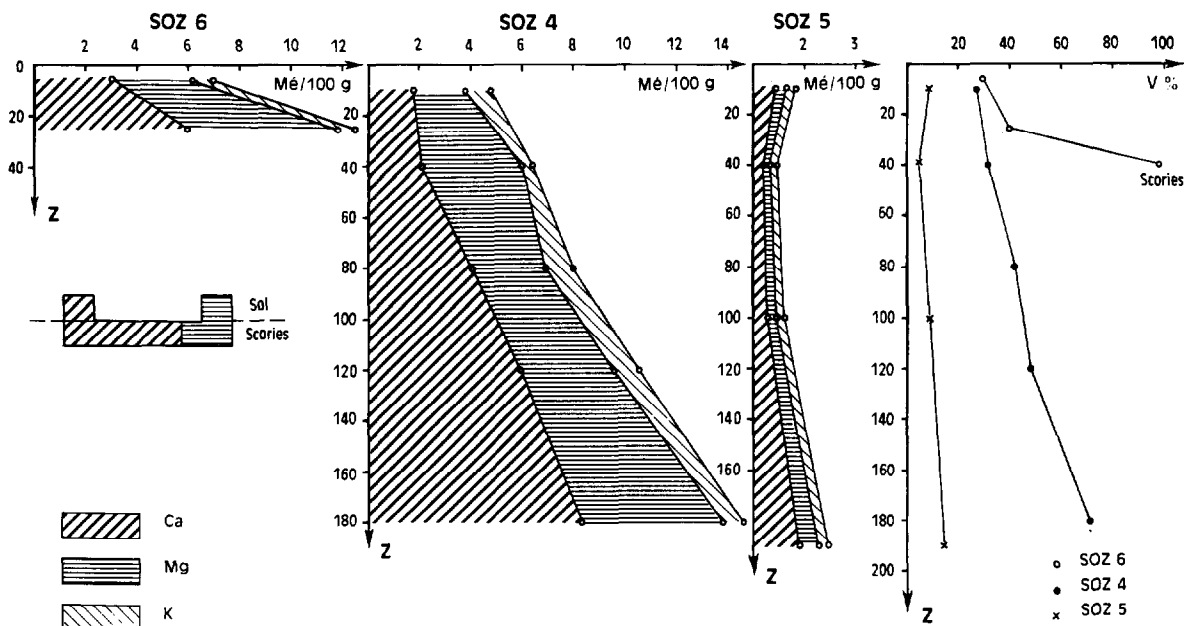


FIG. 5. — Éléments échangeables et taux de saturation.

3.1.8. Minéralogie

a) Rayons X

Sur les échantillons intacts les diagrammes de rayons X montrent :

Une raie à 15,8 Å peu marquée qui ne bouge ni au chauffage, ni au glycolage. Cette raie est attribuée à un minéral de la famille de la chlorite.

Une raie à 7,1-7,3 Å, absente dans les échantillons SOZ 6 et SOZ 4, très légèrement marquée dans les échantillons SOZ 5.

Les raies de la gibbsite n'apparaissent que dans les échantillons prélevés en sommet de profil de SOZ 5.

Les résidus des échantillons traités par 8 extractions de produits amorphes montrent les mêmes raies, sauf celles de la gibbsite. Mais les raies de la chlorite n'augmentent pas en intensité contrairement à celles de la kaolinite. Celles-ci apparaissent dans tous les échantillons et sont d'autant mieux marquées que l'échantillon traité est situé plus près de la surface et que le sol analysé est plus profond.

b) Analyse thermique différentielle

L'A.T.D. montre :

— Un crochet endothermique à 135° - 150° d'autant plus important que l'échantillon est situé plus en profondeur dans le profil.

— Un crochet exothermique culminant à 340° - 360°. Ce crochet est d'autant mieux marqué que l'échantillon est plus riche en matière organique, il disparaît après la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (cette oxydation est facile).

— Un crochet endothermique dû à la gibbsite. Ce crochet est très peu marqué et se situe à 290° dans les horizons de profondeur ; il prend de plus en plus d'importance et se déplace vers la droite (320°) lorsque les échantillons analysés sont situés plus haut dans le profil (horizons (B) et B).

— Un crochet endothermique peu marqué à 490° - 500° suivi d'un crochet exothermique à peine marqué à 930° - 935°.

c) Produits amorphes

— Test de Fieldes et Perrot au champ.

Le test est positif pour tous les échantillons traités par le fluorure de sodium ; il donne une coloration rouge du papier imprégné de phénolphtaléine.

— Extraction et dosage des produits amorphes.

Les résultats pour SOZ 6, 4 et 5 sont résumés dans le tableau 6 et les figures 6, 7, 8. Les quantités totales de produits amorphes sont importantes.

TABLEAU VI

PRODUITS AMORPHES DANS SOZ 6, 4 ET 5

	Quantité extraite en 8 traitements mg/g de sol			Quantité totale d'élément dans les échantillons mg/g de sol			Quantité d'élément extrait par rapport à l'élément total %			Quantité d'amorphes mesurée sur la courbe mg/g de sol			Quantité d'amorphes par rapport à l'élément total %		
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
SOZ 61bis	118	189	126	214	291	200	55	65	63	54	102	82	25	35	41
SOZ 62 ..	159	157	—	322	211	—	50	75	—	106	103	—	33	49	—
SOZ 41 ..	69	135	111	120	170	183	59	79	61	0	53	48	0	45	26
SOZ 42 ..	116	158	140	191	213	226	61	74	62	32,4	82	79	17	55	35
SOZ 43 ..	113	129	123	205	221	206	55	59	60	45	88	82	22	40	40
SOZ 44 ..	104	146	119	193	216	203	52	67	59	44,3	73	85	23	49	42
SOZ 52 ..	103	162	181	224	194	244	46	83	74	17,9	62	132	8	46	54
SOZ 53 ..	83	239	171	150	286	232	55	84	74	28,4	165	92	19	57	40
SOZ 54 ..	114	187	154	215	246	261	53	77	59	73	93	130	34	54	50

Produits amorphes dans les scories

L'extraction des produits amorphes a été effectuée sur les scories broyées (SOZ 62).

Le pourcentage de silice amorphe est très élevé (106 ‰ de terre, soit 33 % de la silice totale) ; il est plus élevé que dans le sol. Le broyage des scories contribue à augmenter la teneur en silice amorphe (facilement libérable par NaOH). Cette silice amorphe peut être dénommée : « silice amorphe primaire » ; elle est en quantité notable dans les sols peu évolués, sableux.

Les teneurs en fer amorphe sont sensiblement aussi élevées dans les scories que dans le sol : 100 mg/g de sol, soit près de 50 % du fer total.

Produits amorphes dans le sol

La silice amorphe diminue de bas en haut des profils et d'autant plus que le sol est plus épais. Dans les horizons C, les teneurs en silice amorphe atteignent 20 à 30 % de la silice totale, ces teneurs s'abaissent à 8 % dans l'horizon B, 0 % dans l'horizon A.

On peut admettre que la silice amorphe dosée est issue, pour sa plus grande partie, des sables. Sa diminution en haut de profil s'expliquerait donc par la diminution corrélative des sables (constitués par des minéraux primaires ou de fines particules vitreuses). Mais quel est le devenir de cette silice ? Une partie est lessivée : le dosage de la silice amorphe et totale montre que le lessivage de la silice est intense. Ce lessivage peut porter sur des particules alumino-siliciques amorphes (TRICHET, 1968).

La diminution des taux de silice amorphe de bas en haut du profil n'est pas due uniquement à son lessivage. L'incorporation de la silice amorphe dans les minéraux argileux est certaine. Il est aussi possible qu'une part de la silice se combine à la matière organique (complexes allophano organiques : SIEFFERMANN, 1969) et qu'ainsi elle ne puisse être dosée.

Au contraire de la silice, les teneurs en fer amorphe sont à peu près constantes dans le profil : 60 à 100 mg/g de sol soit 40 à 55 % du fer total.

Les teneurs en aluminium amorphe, dans les horizons non humifères, sont comprises entre 80 et 130 mg de Al_2O_3 /g de sol, soit 40 à 55 % de l'aluminium total.

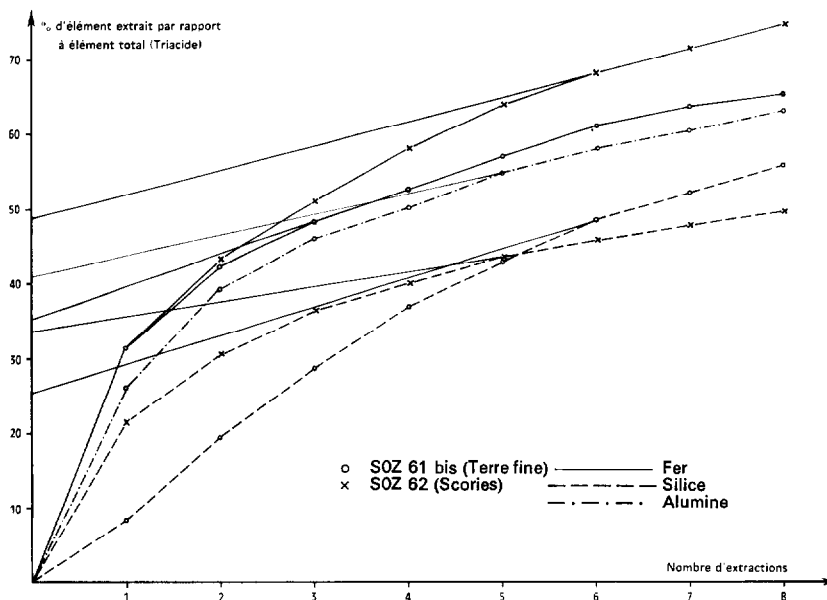


FIG. 6. — Extraction des produits amorphes pour SOZ 6.

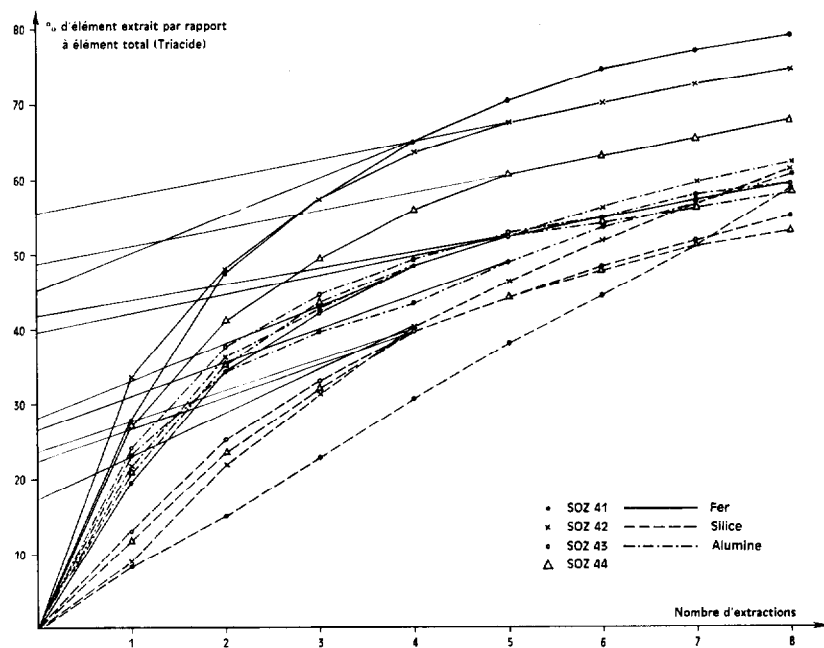


FIG. 7. — Extraction des produits amorphes pour SOZ 4.

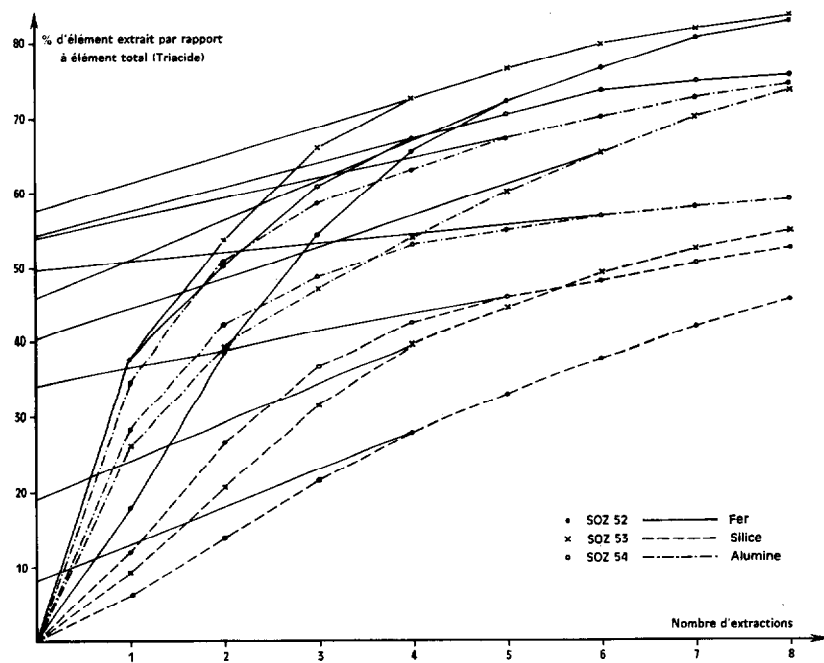


FIG. 8. — Extraction des produits amorphes pour SOZ 5.

3.1.9. Matière organique

Les teneurs en matière organique sont assez élevées : 30 à 50 ‰ de carbone total en surface. Le rapport C/N est compris entre 16 et 18, il diminue en profondeur.

Le rapport $\frac{\text{Humus}}{\text{M.O. totale}}$ est légèrement supérieur à 0,2. Il est à peu près constant dans le profil.

Le rapport AH/A.F., égal à 0,6 en surface, diminue en profondeur.

Dans le cas des sols cultivés de façon intense (SOZ 5), la teneur en carbone total atteint 80 ‰ ; le rapport $\frac{\text{Humus}}{\text{M.O.}}$ est égal à 0,3. Le rapport $\frac{\text{A.H.}}{\text{A.F.}}$, égal à 1 en surface, s'abaisse rapidement en profondeur.

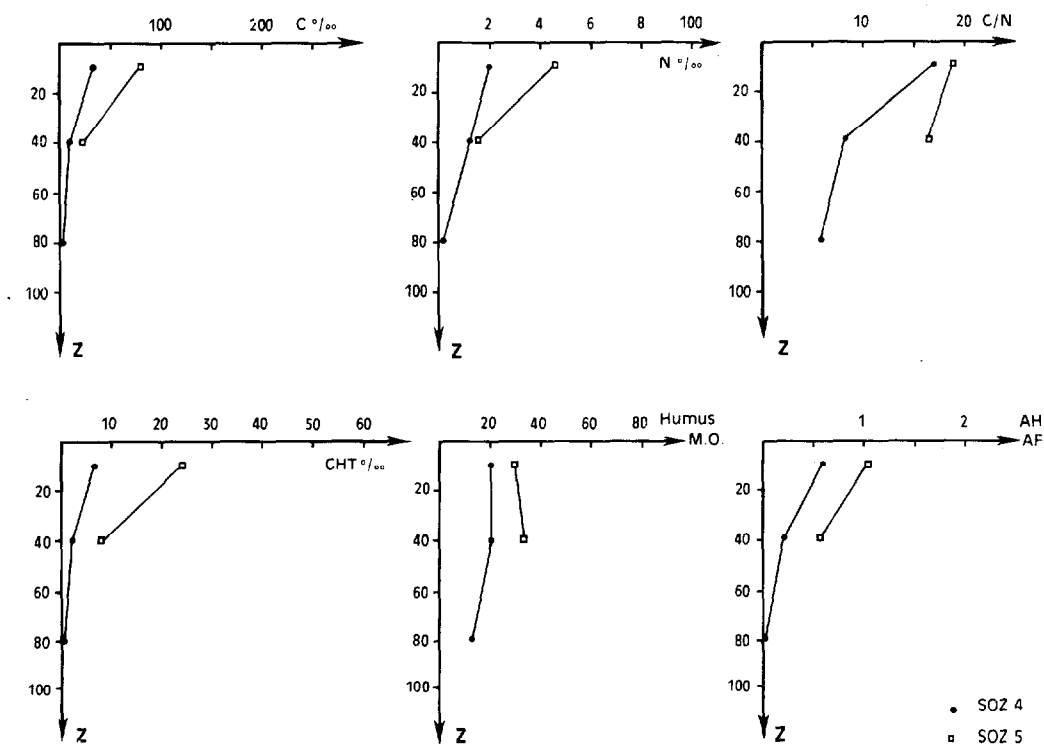


FIG. 9. — Caractéristiques de la matière organique.

3.2. LES SOLS DE L'ANKARATRA

3.2.1. Généralités

Les andosols de l'Ankaratra se rencontrent habituellement à une altitude supérieure à 2 000 m. Les horizons caractéristiques sont les suivants :

- Horizon A 11 Noir foncé ; très organique ; toujours humide ; argileux à limono argileux ; structure nuciforme fine à polyédrique fine ; très poreux ; très nombreuses racines ; cet horizon de 20 cm d'épaisseur peut atteindre localement 30 à 40 cm.
- Horizon A 12 Brun très foncé ; organique ; toujours humide ; argileux ; toucher savonneux ; non structuré à l'état humide mais se structure fortement à l'état sec ; les agrégats sont alors polyédriques à cubiques fins et ne se réhumectent pas ; très poreux ; racines assez nombreuses, très fines ; l'épaisseur de cet horizon, très variable, dépend de la position topographique du sol.
- Horizon B Brun jaune à brun rouge ; peu organique ; toujours fortement humide ; argileux, toucher savonneux ; structure identique à celle de l'horizon A 12 ; très poreux ; pas de racine ; l'épaisseur de cet horizon dépend aussi de la position topographique du sol.
- Horizon C Son épaisseur, sa nature dépendent de la roche mère et de la position topographique du sol.

Variations dans le profil - Remaniement

Le relief des hauts sommets de l'Ankaratra étant très accidenté, le remaniement des sols est général. La plupart du temps, le remaniement s'extériorise dans le profil par une ligne de cailloux. L'épaisseur des sols est très variable suivant la topographie.

Sur les monticules, le profil se présente souvent de la façon suivante :

- 0 - 20 à 30 cm : horizon A 11, sous lequel se trouve une ligne de cailloux.
 30 - 40 à 60 cm : horizon B (l'horizon A 12 est souvent absent).
 A partir de 60 cm : horizon C ou D.

Dans les creux, le profil est très épais :

- 0 - 20 à 40 cm : horizon A 11
 20 à 40 - 80 à 120 cm : horizon A 12
 80 à 120 - 120 à 150 cm : horizon B

Sous l'horizon B se trouve souvent un sol enterré présentant un horizon organique net.

L'épaisseur du profil dépend donc de la topographie. Les sols les plus épais sont issus de colluvions. D'une façon générale, le remaniement est tel qu'il est difficile d'affirmer qu'un sol est en place et de déterminer le matériau originel.

Un profil type de sol épais habituellement rencontré dans l'Ankaratra a été étudié ici en détail.

3.2.2. Morphologie du profil

Description du profil type AKZ 20.

- A 11 de 0 à 20 cm : Humide ; noir (5 YR-2/1 humide, 5 YR 2/1 sec) ; argileux à argilo limoneux ; structure nuciforme fine à polyédrique fine, peu friable, en séchant les éléments se rétractent et deviennent très durs ; très nombreuses fines racines attachant les éléments de structure en grappes ; très poreux ; passage net à :
- A 12 de 20 à 80 cm : Humide ; brun rouge sombre (5 YR-2/2 humide, 5 YR-2/2 sec) ; argileux ; non structuré, massif, on peut détacher de gros blocs de terre plus ou moins

prismatiques, des fissures très étroites permettent ce détachement, un bloc arraché met à découvert une paroi finement et très légèrement mamelonnée, une structure polyédrique fine très dure se dégage lorsque le sol sèche ; assez nombreux pores très fins, à peine visibles à l'œil nu, quelques pores de 1 à 2 cm de diamètre rendant cet horizon très perméable ; nombreuse racines très fines ; passage net avec limite festonnée à :

- B de 80 à 100 cm** : Humide ; brun rougeâtre (5 YR-4/4 humide, 7,5 YR-4/4 sec) ; argileux, toucher savonneux ; non structuré mais moins massif que A 12, la surface des mottes arrachées a un aspect plus mamelonné que dans le cas précédent, de petits éléments polyédriques commencent à se former mais ne sont pas individualisés ; les pores fins sont un peu plus gros que ceux de A 12 ; les pores de gros diamètre sont en grande quantité, ils se rejoignent et forment des cavernes que l'eau emprunte dans son écoulement ; pas de racine ; passage net au sol enterré.
- A' de 100 à 110 cm** : Humifère ; humide ; brun rougeâtre sombre (5 YR-2/2 humide, 7,5 YR-3/2 sec) ; limono-argilo-sableux ; structure massive mais les blocs arrachés sont légèrement mamelonnés ; macroporosité importante comme dans l'horizon supérieur ; passage net à :
- B' de 110 à 140 cm** : Très humide ; brun jaune (5 YR-3/4 humide, 7,5 YR-4/4 sec) ; argileux ; plastique, on peut réaliser un boudin de terre entre les doigts ; on peut arracher des mottes, mais moins facilement que dans les horizons supérieurs car la cohésion est plus forte, qui présentent une surface mamelonnée d'une façon polyédrique très fine, en séchant de fins éléments polyédriques très durs se détachent ; nombreux pores très fins.

3.2.3. Granulométrie

Le tableau 7 indique les pourcentages des diverses fractions granulométriques ainsi que les teneurs en matière organique et en eau du sol séché à l'air.

TABLEAU VII
GRANULOMÉTRIE DU PROFIL AKZ 20

	Profondeur cm	Humidité %	A %	L.F. %	Sables %	M.O. %	
AKZ 201	0 - 10	14,3	40,9	12,8	5,6	30,9	Horizons colluvionnés
AKZ 202	10 - 35	11,5	43,4	25,4	6,5	13,7	
AKZ 203	35 - 75	11,3	45	23,2	9,0	11,5	
AKZ 204	75 - 90	9,7	50,4	18,8	13,0	6,0	
AKZ 205	90 - 105	11,3	29,7	18,4	26,9	8,7	Horizons enterrés
AKZ 206	105 - 125	8,1	57,3	17,5	11,4	4,2	

Ce tableau montre :

- Un pourcentage relativement élevé (8 à 14 %) d'humidité malgré un séchage des échantillons pendant 2 mois. Le taux d'humidité est d'autant plus élevé que l'horizon est plus organique.
- Une texture argileuse dans l'ensemble du profil (sauf AKZ 205).

3.2.4. Propriétés hydriques

Le tableau 8 et la figure 10 indiquent les pourcentages d'humidité du sol frais, du sol séché à l'air et ceux correspondant aux pF 3 et 4,2 (pour le sol frais et séché). La capacité de rétention a été également déterminée.

TABLEAU VIII

HUMIDITÉS DU PROFIL AKZ 20 - DENSITÉS APPARENTES

	AKZ 201	AKZ 202	AKZ 203	AKZ 204	AKZ 205	AKZ 206
Humidité du sol % :						
en place	183	170	163	108	147	87
séché 20 jours à l'air	21	19	17	15	17	14
séché 2 mois à l'air	14,3	11,5	11,3	9,7	11,3	8,1
Densité apparente	0,38	—	0,46	0,69	—	—
pF :						
Sol						
pF 3	170,4	148,1	142,1	98,7	135,7	80,5
frais						
pF 4,2	112,3	83,9	82,6	68,3	84,8	58,4
Sol						
séché						
20 jours						
pF 3	78,4	40,2	37,5	34,7	32,9	34,3
pF 4,2	74,9	37,5	33,9	30,4	29,5	31,2
Capacité de rétention	206	230	200	104	100	—

RÉSULTATS

— *Humidité du sol.* Le sol est toujours très humide ; même en fin de saison sèche (celle-ci est peu marquée), l'humidité atteint des teneurs voisines de celles obtenues en saison des pluies : le sol ne se dessèche jamais. Les teneurs en eau sont parallèles aux teneurs en matière organique. La densité apparente est très faible (0,4 à 0,7).

— *Humidité des échantillons aux pF 3 et 4,2.* Les résultats obtenus à pF 3 et pF 4,2 sur le sol frais (non séché à l'air) et sur le sol séché à l'air pendant 20 jours sont semblables aux résultats obtenus par COLMET-DAAGE (1967) sur les sols fortement allophaniques d'Equateur. L'humidité mesurée au champ est supérieure à celle trouvée pour pF 3. La différence des humidités entre pF 3 et pF 4,2 est beaucoup plus forte sur l'échantillon frais que sur l'échantillon séché à l'air, mais, alors que la différence est prati-

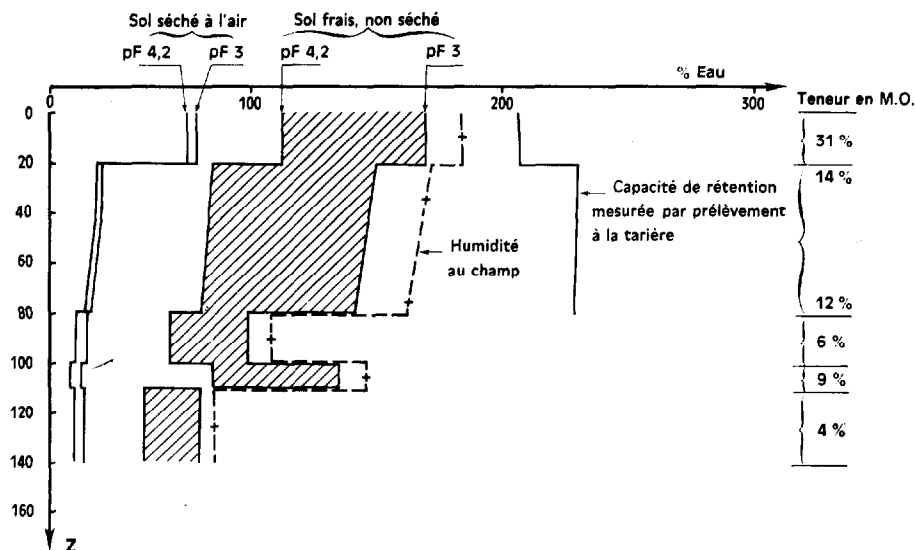


FIG. 10. — Humidités profil AKZ 20.

quement toujours égale à 3 % pour l'échantillon séché à l'air, elle dépend, pour l'échantillon frais, du taux de matière organique : elle est d'autant plus importante que le taux de matière organique est plus élevé.

3.2.5. Analyse triacide

TABLEAU IX
ANALYSE TRIACIDE

	Perte au feu %	Résidu	Pourcentage corrigé des éléments			
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂
AKZ 201.....	47,5	9,6	26,6	26,9	41,0	5,4
AKZ 202.....	29,6	11,2	27,8	26,2	41,0	5,1
AKZ 203.....	26,7	11,5	26,7	27,0	41,6	4,7
AKZ 204.....	21,7	10,3	28,3	29,3	37,2	5,3
AKZ 205.....	24,7	10,9	23,9	33,3	37,1	5,9
AKZ 206.....	20,9	9,9	26,8	27,6	40,8	4,9

La perte au feu est très élevée, elle est parallèle aux teneurs en M.O. des échantillons.

Le résidu égal à 9,6 - 11,5 est à peu près constant dans le profil de même que les pourcentages de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 .

3.2.6. Eléments totaux

Ils sont chacun en quantité constante dans le profil. Le magnésium domine, mais ses teneurs sont beaucoup moins élevées que dans les sols de l'Itasy.

TABLEAU X

ELÉMENTS TOTAUX MÉ/100 G

Ca	Mg	K	Na
1,5 à 2,5	10 à 12	0,7	≈ 0

3.2.7. Eléments échangeables. Taux de saturation

Les bases échangeables ont des teneurs très faibles et à peu près équivalentes ; 0,05 mé de Ca, 0,05 mé de Mg, 0,02 mé de K et 0,02 mé de Na pour 100 g de sol.

Les horizons très organiques sont mieux pourvus que les horizons inférieurs, mais restent pauvres (0,13 mé de Ca pour 100 g de sol dans AKZ 201).

La capacité d'échange est forte dans les horizons très organiques (42 mé/100 g dans AKZ 201), moyenne dans les horizons moins organiques (16 à 20 mé/100 g). Les valeurs élevées de T sont en partie dues à la matière organique : après destruction de celle-ci par H_2O_2 , l'horizon AKZ 201 ne présente plus qu'une capacité d'échange de 13 mé/100 g.

Le pH et le taux de saturation indiquent une forte désaturation du profil : $V < 1\%$ - $4,6 < \text{pH} < 5$.

3.2.8. Minéralogie

a) Rayons X

Les diagrammes effectués à partir des échantillons n'ayant pas subi de traitement d'extraction des produits amorphes montrent des raies plus nettes que celles obtenues pour les sols de l'Itasy.

La gibbsite est facilement identifiable. Une raie à 15 - 15,8 Å est attribuée à un minéral de la famille de la chlorite. La kaolinite est identifiée par des raies à 3,5 et 7,2 Å.

Les diagrammes effectués sur les échantillons ayant subi 8 traitements d'extraction des produits amorphes ne montrent pas, pour les minéraux de la famille de la kaolinite, des raies plus importantes que celles obtenues dans les diagrammes précédents (contrairement à ce qui a été observé pour l'Itasy).

b) *Analyse thermique différentielle*

Les échantillons où la matière organique n'a pas été détruite, montrent à l'analyse thermique différentielle : un crochet endothermique important à 130 - 140° (départ d'eau) ; un crochet exothermique à 365°, d'autant plus important que l'échantillon est plus riche en M.O. ; ce crochet pour AKZ 201 se termine à 750° (combustion de la M.O.) ; un crochet endothermique entre 300 et 320° (gibbsite) ; un crochet endothermique à 500 - 520° et un crochet exothermique à 915 - 940° dus à la kaolinite.

Après destruction de la M.O. par H_2O_2 les différents échantillons donnent des courbes très semblables entre elles : le crochet exothermique à 365° a disparu presque complètement ; le crochet de la gibbsite est nettement marqué.

c) *Produits amorphes*

— Test de Fieldes au champ.

Tous les échantillons soumis à ce test donnent une coloration rouge du papier imprégné de phénolphtaléine.

— Extraction et dosage des produits amorphes.

Le tableau 11 et la figure 11 indiquent les résultats pour les échantillons AKZ 203, 204, 206.

TABLEAU XI

PRODUITS AMORPHES DANS AKZ 20

	Quantité extraite en 8 traitements mg/g de sol			Quantité totale d'éléments dans les échantillons mg/g de sol			Quantité d'élément extrait par rapport à l'élément total %			Quantité d'amorphes mesurée sur la courbe mg/g de sol			Quantité d'amorphes par rapport à l'élément total %		
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
AKZ 203	99,4	113	132	171	173	270	58	66	49	18,8	80	97	11	47	36
AKZ 204	79,0	131	130	198	205	260	40	64	50	5,0	89	94	2,5	44	36
AKZ 206	76,8	120	171	191	196	290	40	62	59	0,0	92	102	0,0	44	35

Les teneurs en silice amorphe sont très faibles sinon nulles dans les horizons peu organiques (AKZ 204 et 206) ; elles augmentent en haut de profil, parallèlement aux taux de matières organiques (19 mg de silice amorphe par g de sol, soit 11 % de la silice totale dans AKZ 203).

Les teneurs en fer amorphe ne varient pas beaucoup dans le profil ; elles sont élevées : 45 % du fer total, c'est-à-dire presque autant que dans les sols de l'Itasy.

Les teneurs en aluminium amorphe atteignent 95 à 100 mg Al₂O₃/g de sol, soit 35 % de l'aluminium total. Ce pourcentage est légèrement plus faible que celui obtenu pour les sols de l'Itasy.

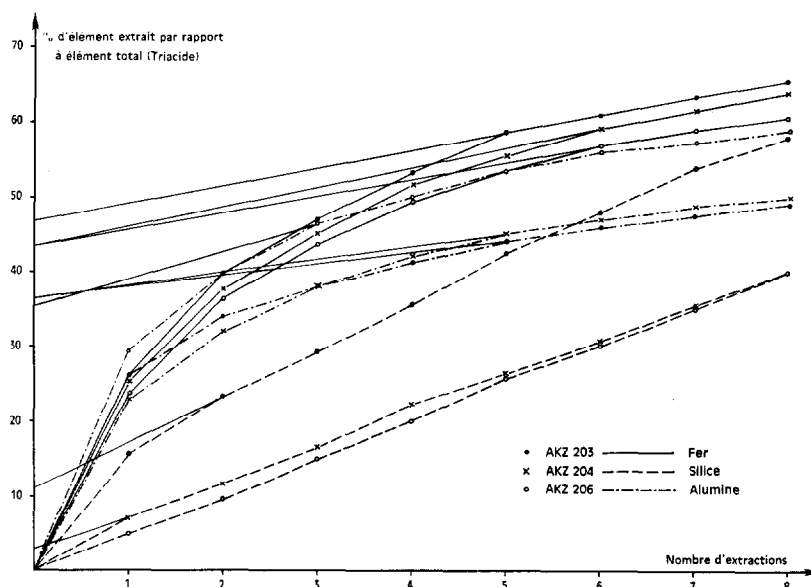


FIG. 11. — Extraction des produits amorphes pour AKZ 20.

3.2.9. Matière organique

TABLEAU XII

DOSAGE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

		C total ‰	N ‰	$\frac{C}{N}$	Matière humique ‰	C Matière humique/C total	AH ‰	AF ‰	$\frac{AH}{AF}$
A 11	AKZ 201	179	8,6	20,8	59,5	0,33	37,5	21,9	1,6
A 12	AKZ 202	79,6	3,8	21,0	38,4	0,48	20,9	17,5	1,2
	AKZ 203	66,8	2,9	23,2	35,5	0,53	21,0	14,5	1,3
B	AKZ 204	34,7	1,8	19,0	22,8	0,66	11,5	11,3	0,8

Les taux de M.O., très élevés dans l'horizon de surface (A 11), s'abaissent brutalement dans l'horizon A 12, puis de nouveau dans l'horizon B. Le rapport C/N est élevé, égal à 20. Il ne varie pas beaucoup dans le profil.

Les teneurs en carbone des matières humiques passent de 60 ‰ en surface à 20 ‰ en profondeur.

Le rapport $\frac{\text{Humus}}{\text{C. total}} \times 100$ augmente donc en profondeur où il atteint la valeur de 66.

Le rapport $\frac{AH}{AF}$ s'abaisse progressivement en profondeur, mais n'est jamais inférieur à 0,7.

4. CONCLUSION

Alors que les sols de l'Itasy sont formés sur une roche mère très récente, ceux de l'Ankaratra sont issus d'un manteau d'altération déjà évolué. Des différences entre les propriétés des sols s'expliquent de ce fait.

La texture des sols de l'Itasy est limoneuse à limono-sableuse (30 à 40 % de sables, 30 à 40 % de limons fins, 20 % d'argile). Celle des sols de l'Ankaratra est argileuse (10 % de sables, 20 % de limons fins, 50 % d'argile).

Les teneurs en éléments échangeables et le taux de saturation sont plus faibles dans les sols de l'Ankaratra que dans les sols de l'Itasy. Dans ces derniers, le taux de saturation diminue lorsque le profil se différencie : il est de 30 à 70 % dans un profil de type A - C et s'abaisse à 8 % dans un profil de type A.B.C.

La gibbsite et les minéraux kaoliniques augmentent en quantités dans les sols de l'Itasy lorsque le sol s'approfondit, mais celles-ci restent inférieures à celles des sols de l'Ankaratra.

Les teneurs en produits amorphes, importantes dans l'ensemble des sols étudiés, sont plus élevées dans les sols de l'Itasy que dans les sols de l'Ankaratra, notamment en ce qui concerne les teneurs en silice amorphe. Dans les premiers, celles-ci atteignent 30 % de la silice totale dans un sol ayant un profil A.C. ; elles diminuent en haut de profil, et ne sont plus que de 8 % en sommet d'horizon B d'un profil A.B.C. Dans les sols de l'Ankaratra, au contraire, la silice amorphe, en très faible quantité, augmente en haut de profil.

Il existe par ailleurs de profondes différences en ce qui concerne la matière organique et les teneurs en eau des sols de l'Itasy et de l'Ankaratra.

Les sols de l'Itasy possèdent des teneurs en matière organique de 5 à 6 % (atteignant 10 % dans les sols très cultivés). Cette matière organique donne une coloration brun gris à l'horizon A. Celui-ci est épais d'une vingtaine de centimètres. Le rapport C/N de 16 à 18 en surface s'abaisse à 10 en profondeur. Le rapport $\frac{\text{Humus}}{\text{M.O.}}$ est égal à 0,3. Le rapport $\frac{\text{AH}}{\text{AF}}$, égal à 1 en surface, s'abaisse rapidement en profondeur. Les teneurs en eau du sol sont peu élevées, sauf dans l'horizon C où elles atteignent 60 %. La dessiccation du sol n'est pas irréversible.

Les sols de l'Ankaratra possèdent par contre des teneurs en matière organique très élevées (20 à 30 %), avec un rapport C/N égal à 20 sur l'ensemble du profil, un rapport $\frac{\text{Humus}}{\text{M.O.}}$ de 0,3 augmentant en profondeur jusqu'à 0,6 ; un rapport $\frac{\text{AH}}{\text{AF}} > 1$. Cette matière organique donne une coloration noire à l'horizon A. Celui-ci peut atteindre 1 m d'épaisseur. Les teneurs en eau du sol sont toujours très élevées : supérieures à 100 %, elles atteignent 200 % dans l'horizon organique. La dessiccation du sol est irréversible.

Bien qu'ils soient très différents les sols de l'Itasy comme ceux de l'Ankaratra sont à classer parmi les andosols.

Les sols de l'Itasy ne possèdent pas les propriétés hydriques habituellement décrites chez les andosols. Ils le sont néanmoins par leurs teneurs élevées en produits amorphes, notamment en silice ; celle-ci

TABLEAU XIII

CARACTÉRISTIQUES COMPARÉES DE L'ITASY ET DE L'ANKARATRA.
PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES SOLS

		Itasy	Ankaratra	
Climat	Pluviosité	1 700-1 800 mm	3 000 mm	
	Saison sèche	Bien marquée (5 à 6 mois)	Peu marquée	
	Température	18 à 20°	10°	
Matériau originel		Scories récentes	Manteau d'altération évolué	
Propriétés des sols	Horizon A	— Gris brun (10 YR-3/3 à 10 YR-4/3) — Peu épais (20 cm) — 5 à 8 % de M.O.	— Noir (5 YR-2/1) — Très épais (30 à 100 cm) — 20 à 30 % de M.O.	
	Texture	Limoneuse	Argileuse	
	Taux de saturation	70 à 10 %	< 1 %	
	Propriétés hydriques	— Teneurs en eau peu élevées sauf dans l'horizon C (60 %). — Dessiccation réversible.	— Teneurs en eau toujours très élevées (100 à 200 %). — Dessiccation irréversible.	
	Kaolinite et gibbsite	Faible quantité	Forte quantité	
	Produits amorphes (% de l'élément total)	SiO ₂	30 à 8 % diminue en haut de profil	1 à 10 % augmente en haut de profil
		Fe ₂ O ₃	40 à 55 % Stable dans le profil	45 % Stable dans le profil
Al ₂ O ₃		40 à 55 % Assez stable dans le profil	35 % Stable dans le profil	

est héritée de la roche mère. Les sols de l'Itasy sont des andosols parce que peu évolués ; une évolution plus poussée du profil coïncide avec une diminution des teneurs en silice amorphe dans l'horizon B.

Les sols de l'Ankaratra, plus évolués que ceux de l'Itasy, ont des teneurs en silice amorphe très faibles, mais leurs propriétés hydriques sont spécifiques de celles des andosols et les rapprochent des sols fortement allophaniques décrits par COLMET-DAAGE (1967). C'est le climat frais et humide de l'Ankaratra qui favorise le maintien des teneurs en eau élevées dans le sol et qui est responsable de l'accumulation de la matière organique dans le profil.

La comparaison des sols de l'Itasy et de l'Ankaratra montre que si les andosols sont caractérisés par des teneurs élevées en produits amorphes (dont la silice) et par une capacité de rétention pour l'eau importante avec une dessiccation irréversible, ces propriétés ne vont pas toujours de pair et une distinction des sols présentant l'une ou l'autre de ces caractéristiques, ou les deux, doit apparaître au niveau de la classification.

Manuscrit déposé le 1^{er} mars 1971

BIBLIOGRAPHIE

- COLMET-DAAGE (F.), CUCALON (F.) et coll., 1967. — Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 1^{re} partie : essai de caractérisation des sols des régions tropicales. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. V, n° 2, pp. 3-38.
- FIELDS (M.), PERROTT (K.W.), 1966. — The nature of allophane in soils 3, rapid field and laboratory test for allophane. *N.Z. J. Sci.* 9, pp. 623-629.
- LENOBLE (A.), 1938. — Sur la chronologie des éruptions volcaniques du massif de l'Ankaratra (Centre de Madagascar), *C.R. Acad. Sc.*, 206, pp. 613-615.
- LENOBLE (A.), 1940. — Le massif volcanique de l'Itasy. *Mém. Acad. Malg.*, 32, pp. 43-77.
- QUANTIN (P.), TERCINIER (G.), 1968. — Influence de l'altération de cendres et ponces volcaniques d'âge récent sur la nature, les propriétés et la fertilité des sols aux Nouvelles Hébrides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. VI, n° 2, pp. 203-224.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1, pp. 105-126.
- SIEFFERMANN (G.), 1969. — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun. Thèse. Strasbourg, 5, 1., 290 p. *multigr.*
- TRICHET (J.), SVORONOS (D.R.), 1968. — Etude des premiers stades d'altération d'un verre volcanique. *C.R. Acad. Sc.*, t. 266, n° 12, pp. 1207-1209.