Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. VII, n° 2, 1969

ÉTUDE SPECTROGRAPHIQUE DES ÉLÉMENTS TRACES ET LEUR DISTRIBUTION DANS QUELQUES TYPES DE SOLS DE MADAGASCAR

par Lj. NALOVIC

RÉSUMÉ

L'étude de la distribution des éléments traces a été faite sur 26 profils typiques (115 échantillons) de sols de Madagascar. Les résultats d'analyse spectrographique des éléments : Mn, Pb, Ga, Ge, Bi, Mo, Sn, V, Cu, Ag, Zn, Zr, Ni, Co, Ti, Cr, Cs, Sr, Ba, Li et Rb ont été représentés et discutés.

Les résultats obtenus ont montré que le matériau originel joue un rôle prédominant dans la distribution des éléments traces par sa composition chimique et sa résistance à l'altération.

Le rôle de la pédogenèse semble aussi important que celui de la roche mère. Les différences en teneurs des éléments traces entre les sols ferrallitiques, sols ferrugineux et sols développés sur alluvions, peuvent résulter des facteurs pédoclimatiques.

Les teneurs maximales en éléments traces correspondent très souvent aux horizons les plus argileux mais plus rarement aux horizons les plus organiques (exception : Mn, Pb, V et Cu).

La corrélation entre les teneurs des éléments traces et le pH n'a pas été constatée.

Les résultats obtenus montrent que les sols malgaches sont riches en éléments traces totaux.

ABSTRACT

A study was made of total trace element contents of 26 typical soils (115 samples) of Madagascar. The results of spectrographic analysis of elements : Mn, Pb, Ga, Ge, Bi, Mo, Sn, V, Cu, Ag, Zn, Zr, Ni, Co, Ti, Cr, Cs, Sr, Ba, Li and Rb are represented and discussed.

The results obtained show the following :

— The parent material plays the predominant role on the trace elements distribution in the soil, by its chemical composition and resistance to alteration.

— The role of the pedogenesis seems to be as important as the role of the parent material. The ferralitic soils show the higher contents of less soluble trace elements than the ferruginous soils, developed on the same parent material. The contents of alcalin and alcaline-earth elements are similar for both soil groups.

The trace element contents of soils developed on alluvion, could also be considered as a result of different pedoclimatic facteurs.

— Accumulation of trace elements in clay horizons is general. No correlation between trace element contents, organic matter (exeption : Mn, Pb, V and Cu) and pH of soil was found.

— The trace element contents of Madagascar soils studed was very high, compared to the results from other contries.

The observations are given as objectively as possible, without assuming them to be general.

PLAN

INTRODUCTION

1. MÉTHODES D'ANALYSES

2. CARACTÈRES DES PROFILS ÉTUDIÉS ET TENEURS EN ÉLÉMENTS TRACES

2. 1. Sol ferrallitique sur granit
2. 2. Sol ferrallitique sur calcaire
2. 3. Sol ferrallitique sur basalte
2. 4. Sol ferrallitique humifère type « ando »
2. 5. Sol faiblement ferrallitique sur gneiss
2. 6. Sol faiblement ferrallitique sur roche métamorphique
2. 7. Sol ferrugineux tropical sur roche basique
2. 8. Sol ferrugineux tropical sur calcaire
2. 9. Sol ferrugineux tropical sur matériaux calcaires
2.10. Sol ferrugineux tropical sur matériaux gréseux
2.11. Sol ferrugineux tropical sur carapace sableuse
2.12. Sol hydromorphe sur alluvions
2.13. Sol hydromorphe sur alluvions
2.14. Sol salin sur alluvions
2.15. Vertisol
2.16. Vertisol
2.17. Vertisol

3. Discussion

3.1. Influence de la roche mère

3.2. Rôle de la pédogenèse

3.3. Cas du zirconium

3.4. Autres facteurs

4. Conclusion

5. Annexes

6. Bibliographie

INTRODUCTION

L'importance des éléments traces pour la vie humaine, animale, et végétale est très bien connue, mais les informations sur leur distribution dans les profils des sols et sur les facteurs qui régissent cette distribution sont encore insuffisantes, malgré les nombreux auteurs qui se sont attachés à l'étude de ce problème.

Certains travaux portent sur l'importance de la roche mère et de sa composition chimique, dont le rôle serait prédominant dans la distribution des éléments traces dans le profil. Archer (1963), MacKenzie (1959), Maliuga (1944), Mitchell (1955), Swaine (1955).

Pour d'autres auteurs, parmi les différents facteurs étudiés, les facteurs pédogénétiques seraient déterminants en ce qui concerne la distribution des éléments traces. Dobrovol'skiy (1960), Kovda et Vasil'yevskaya (1958), Wright, Levick et Atkinson (1955).

Le rôle de la morphologie de profil a été également étudié, Hervieu et Nalovic (1965), Oertel et Giles (1963), Pinta et Ollat (1961), Vuorinen (1958), Wahhab et Bhatti (1958), ainsi que l'influence d'autres facteurs tels que l'humus et la matière organique. Kovda, Yakushevskaya et Tiurinkanov (1958), Krym (1964), Pinta et Ollat (1961), Vuorinen (1958).

De nombreux travaux cités ci-dessus montrent les divergences d'opinion qui existent sur l'importance des différents facteurs intervenant dans la distribution des éléments traces. Le problème de ces éléments est complexe et leur étude demande la prise en considération de plusieurs facteurs, tel que la nature de la roche mère, la pédogenèse et la morphologie du profil.

Pour la pédologie, les teneurs en éléments traces et leur distribution dans les horizons génétiques peuvent être d'un intérêt particulier en vue d'estimer le degré de l'influence de certains facteurs (lessivage altération, etc.), intervenant dans le développement du profil.

Les travaux rapportés ci-dessous représentent la suite d'une étude générale qui a été entreprise par le Laboratoire de spectrographie de l'ORSTOM, SSC de Bondy, sur la répartition des éléments traces dans les sols tropicaux.

D'autre part, c'est aussi une étude sur les éléments traces et leur distribution dans les sols de Madagascar, étude dont la première partie Hervieu (J.) et Nalovic (Lj.) (1965) a révélé des teneurs exceptionnellement élevées.

Le but de cette étude est d'apporter le plus de renseignements possibles sur la quantité totale des éléments traces dont le sol malgache dispose, et d'essayer de dégager le ou les facteurs responsables de leur migration, leur répartition et leur accumulation dans le profil.

1. MÉTHODES D'ANALYSES

Les méthodes d'analyses utilisées pour le dosage des constituants de base pouvant influencer la distribution des éléments traces sont les méthodes classiques pratiquées dans les laboratoires de l'ORSTOM.

— Granulométrie : méthode classique avec dispersion au pyrophosphate de sodium. La séparation de la fraction fine a été effectuée par la pipette ROBINSON, les autres fractions sont obtenues par tamisage à sec.

— pH : méthode électrométrique (rapport sol/eau = 1/2,5).

— Matière organique totale : dosage du carbone par l'oxydation au bichromate de potassium (méthode WALKLEY et BLACK).

— Silice, fer alumine : analyse aux trois acides (méthode HARISSON, modifiée à l'ORSTOM, SSC de Bondy).

— Fer libre : méthode DEB.

Les éléments traces recherchés sont : manganèse, plomb, gallium, germanium, bismuth, molybdène, étain, vanadium, cuivre, argent, zinc, zirconium, nickel, cobalt, titane, chrome, césium, strontium, baryum, litium et rubidium. Leur détermination est effectuée par spectrographie d'émission dans l'arc.

La méthode utilisée est telle qu'elle est employée dans le laboratoire de spectrographie des SSC de Bondy et décrite par PINTA (1962).

La méthode spectrographique est semi-quantitative, l'erreur peut atteindre 25 % ce qui représente une précision suffisante pour une telle étude.

Les raies utilisées et la sensibilité maximale de la méthode exprimée en p.p.m. sont les suivantes :

Eléments	λ (Å)	p.p.m.	Eléments	λ (Å)	p.p.m.
Mn	2 576,10	30	Zr	3 391,97	10
Pb	2 833,07	10	Ni	3 414,76	3
Ga	2 943,64	3	Co	3 453,50	3
Gé	3 039,06	10	Ti	3 653,50	10
Bi	3 067,71	10	Cr	4 254,34	30
Mo	3 170,35	3	Cs	4 555,35	100
Sn	3 175,02	3	Sr	4 607,33	3
V	3 185,39	10	Ba	5 535,55	10
Cu	3 274,54	3	Li	6 707,84	3
Ag	3 280,68	3	Rb	7 800,23	10
Zn	3 345,02	300			

Dans ces conditions les taux de germanium, bismuth, molybdène, étain, argent, zinc et césium sont souvent insuffisants dans le sol pour être décelés par la méthode utilisée.

Les résultats des éléments traces ont été exprimés par rapport au sol séché à 105 °C.

2. CARACTÈRES DES PROFILS ÉTUDIÉS ET TENEURS EN ÉLÉMENTS TRACES

Les profils des sols étudiés ci-dessous ont été prélevés et décrits par J. HERVIEU (1966).

D'autre part, les échantillons prélevés par R. MAIGNIEN et décrits dans son rapport de mission effectuée à Madagascar en juillet 1962 ont été également utilisés dans cette étude.

Certains profils considérés dans les paragraphes 3 et 4 ont été déjà décrits et analysés partiellement par les méthodes chimiques. HERVIEU et NALOVIC (1965). Les tableaux des résultats d'analyse spectrographique pour ces profils figurent en annexe.

2.1. SOL ROUGE FERRALLITIQUE SUR GRANITE

Profil – YM 278/283

Situation : Environs du canton de Fanjakana, près du village d'Ambalamarina. $X = 448$ $Y = 545{,}5$ $Z = 1\,150$ m.

Climat : $P = 1\,215$ mm $T = 18{,}5°$.

Unité géomorphologique : Relief de hautes terres à dissection profonde assez dômes rocheux en voie de dégagement.

Végétation : Pseudo-steppe à Aristida sp.

Topographie : Pente très forte (30 à 35°). Erosion en terrassettes. Au sommet de la colline, dalles rocheuses en voie de dénudation. Le profil est observé dans un « lavaka ».

Roche mère : Granite de l'Isandra (types Midongy-Befody/Système du Vohibory) à caractère stratoïde ; alcalin², rose à grain fin.

Morphologie

0 à 15 cm : Brun-jaune (Munsell à sec : 5 YR-5/2, humide : 7,5 YR-3/2), assez humifère, assez durci, Argilo-sableux, structure grumuleuse à polyédrique fine. Nombreuses radicelles, forte cohésion, porosité plutôt faible.

15 à 40 cm : Rouge-brun clair (Munsell à sec : 10 R-5/4, humide : 2,5 YR-4/4), peu humifère, tassé et durci. Argileux, structure massive, secondairement polyédrique fine. Quelques taches d'humus sur le trajet de racines, enracinement faible, cohésion moyenne.

0,40 à 1,75 m : Rouge vif (Munsell à sec : 10-R-5/8, humide : 10 R-4/8), avec dessication en prismes sur la paroi d'érosion. Argileux, structure polyédrique fine, assez friable, très ferrugineux. Porosité moyenne, cohésion plutôt faible, enracinement très faible.

1,75 à 3 m env. : Horizon de transition jaunâtre (Munsell à sec : 2,5 YR-6,6, humide : 2,5 YR-5,8), un peu micacé, à structure fondue, argilo-sableux, kaolinisé.

3 à 4,5 m et plus : Roche pourrie, à structure grenue encore bien visible, blanche ou rosée, très kaolinisée, friable.

2.1.1. Caractères physiques et chimiques

L'acidité du sol varie dans le profil de 5,3 à 6,3, avec un minimum plus fortement acide entre 15 et 40 cm de profondeur.

La fraction argileuse, très abondante, varie entre 40 et 70 % dans les premiers 300 cm de profil, puis décroît progressivement jusqu'à 12 % dans la zone de départ. L'accumulation de la fraction fine dans le profil est suivie par une accumulation parallèle de fer et d'alumine. Le rapport limon/argileux est très faible et varie entre 0,06 et 0,4 mais dans la zone de départ il est supérieur à 1.

Le taux de matière organique est assez fort dans les premiers 15 cm, puis il devient inférieur à 0,5 % à partir de 40 cm de profondeur. L'humification est bonne et le rapport C/N varie entre 11 et 16.

Le complexe absorbant a une capacité d'échange relativement faible (10 mé pour 100 g) et il est pourvu en éléments échangeables.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie avec la profondeur entre 1,4 et 1,9.

2.1.2. Eléments traces

Dans ce type de sol ferrallitique, les teneurs en éléments traces sont élevées et bien réparties. Ce fait peut être expliqué par l'abondance de la partie fine dans le profil.

TABLEAU 1

SOL ROUGE FERRALLITIQUE SUR GRANITE

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile < 0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
YM-278	0 - 15	41,6	3,6	19,0	30,7	13,8	7,1	4,0	16,4	4,9	5,8
279	15 - 40	56,1	3,7	11,8	27,0	19,0	9,6	4,2	22,4	1,4	5,3
280	40 - 175	71,2	4,0	6,9	17,0	26,5	12,4	8,7	31,7	0,5	5,9
281	175 - 300	41,7	9,3	16,7	31,2	24,9	6,4	5,1	24,9	0,15	6,3
282	300 - 450	38,6	13,8	20,8	25,0	26,2	10,8	5,8	23,1	0,15	6,0
283	> 450	12,0	18,6	38,8	29,7	15,8	2,0	0,8	15,6	0,15	5,6

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
YM-278	900	35	2,6	< 9	< 9	<2,6	<2,6	70	40	<2,6	<260	90	26	18	7500	70	<90	310	700	35	265
279	450	30	2,7	< 9	< 9	<2,7	<2,7	65	45	<2,7	<270	90	27	18	11000	70	<90	225	450	27	140
280	250	53	2,6	< 9	< 9	<2,6	<2,6	55	53	<2,6	<260	110	31	13	14000	90	<90	220	260	18	70
281	100	27	4,5	< 9	< 9	<2,7	<2,7	55	50	<2,7	<270	70	36	14	7300	75	<90	135	230	30	90
282	200	32	9	< 9	< 9	<2,8	<2,8	65	23	<2,8	<280	90	41	14	7400	90	<90	185	460	41	550
283	50	76	2,8	<10	<10	<2,9	<2,9	40	52	<2,9	<290	20	29	5	2400	20	<95	190	1140	57	920

Les taux maxima pour le plomb, cuivre, zirconium, titane et chrome, correspondent bien aux horizons enrichis en argile.

On observe l'influence de la matière organique pour le manganèse, vanadium, cobalt, strontium, baryum, lithium et rubidium.

La zone de départ a conservé des teneurs très fortes notamment en plomb, gallium, cuivre, baryum, lithium et rubidium.

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, zinc et césium, sont très faibles et insuffisantes pour être décelées par la méthode utilisée.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 1.

2.2. SOL ROUGE FERRALLITIQUE SUR CALCAIRE

Profil – RM 191/195

Situation : Environs de Majunga, près du village Amparimahitsy.
$X = 397$ $Y = 1\,151{,}5$ $Z = 25$ m.

Climat : $P = 1\,560$ mm $T = 27^{o}$.

Unité géomorphologique : Surface structurale des calcaires éocènes.

Végétation : Pseudo-steppe à *Hypparhenia* et *Hyphaene shatan*.

Topographie : Pente moyenne (3 à 4 %). Erosion en nappe intense.

Roche mère : Calcaire fin massif, plus ou moins dolomitique.

Morphologie

0 à 12 cm : Brun-rouge (Munsell à sec : 5 YR-3/4, humide : 5 YR-3/3), humifère, à matière organique bien mélangée. Limono-sableux fin, structure grossièrement cubique à prismatique, secondairement grenue à nuciforme. Cohésion moyenne, bonne porosité, pénétration des racines par les fentes de retrait.

12 à 35 cm : Rouge-brun assez clair (Munsell à sec : 2,5 YR-3/6, humide : 2,5 YR-3/4) avec transition brutale. Un peu humifère, limono-argileux, structure nuciforme. Porosité faible à moyenne, enracinement le long des fentes.

35 à 110 cm : Rouge-brun (Munsell à sec : 2,5 YR-3/6, humide : 2,5 YR-3/4) avec transition progressive. Texture plus fine, limono-argileux, sables fins le long des fentes de retrait. Structure prismatique plus ou moins développée, porosité faible à moyenne, quelques grosses racines.

1,1 à 1,8 m : Rouge-brun (Munsell à sec : 5 YR-4/6, humide : 5 YR-4/6) avec bariolage jaune assez diffus et nombreuses concrétions ferromanganésifères (1-2 mm) arrondies et plus ou moins indurées. Limono-argileux, structure cubique à polyédrique, amorce de faces de glissement. Porosité faible, cohésion forte.

1,8 à 2 m : Jaune olive (Munsell à sec : 7,5 YR-4/4), humide : 5 YR-4/4), manganésifères. Structure en plaquettes avec faces de glissement. Cohésion très forte, porosité faible.

2.2.1. Caractères physiques et chimiques

Le pH du sol est moyennement à faiblement acide, et atteint la neutralité dans le matériau originel.

La croissance de la teneur de la partie fine avec la profondeur, de 37 à 60 %, a pour conséquence la croissance parallèle des teneurs en sesquioxydes.

Le rapport limon/argile varie de 0,9 en surface à 0,3 en profondeur.

Le taux de matière organique est du même ordre de grandeur que dans le profil précédent : 4,3 % en surface, et à partir de 35 cm de profondeur, il devient inférieur à 0,7 %. L'humification est assez bonne et le rapport C/N décroît rapidement avec la profondeur de 16 à 4.

Le complexe absorbant est bien pourvu en éléments échangeables (notamment en Ca et Mg) et la capacité d'échange est assez élevée (18 à 27 mé pour 100 g). Le pourcentage de saturation varie avec la profondeur entre 50 et 90.

Les réserves minérales sont bonnes (surtout en Mg). Le processus de ferrallitisation de ce profil n'est pas très accentué, probablement par la suite d'un rajeunissement par l'érosion.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est de 1,9 dans le sol et atteint 2,7 dans la roche mère.

TABLEAU 2

SOL ROUGE FERRALLITIQUE SUR CALCAIRE

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
RM-191	0- 12	37,5	32,5	17,3	3,8	24,9	16,3	13,8	21,6	4,3	5,8
192	12- 35	50,0	22,0	18,4	3,9	25,9	16,2	13,5	22,6	1,5	5,5
193	35-110	48,0	22,0	20,2	5,3	24,5	17,3	13,8	22,6	0,7	5,9
194	110-180	54,5	16,5	18,4	6,2	24,6	17,2	13,8	23,5	0,5	6,2
195	180-200	59,5	15,0	14,1	6,4	28,5	18,0	13,7	25,8	0,3	7,1

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
RM-191	3400	26	9	<9	<9	<2,6	<2,6	130	13	<2,6	260	170	70	13	10300	430	< 90	4	52	70	17
192	3500	22	9	<9	<9	<2,6	<2,6	175	18	<2,6	260	180	90	18	12300	530	90	< 2,6	35	530	9
193	4500	36	13	<9	<9	<2,7	<2,7	270	22	<2,7	270	230	105	22	14200	620	175	9	36	170	18
194	5300	53	13	<9	<9	<2,6	<2,6	390	22	<2,6	260	260	130	26	13200	700	350	9	53	180	18
195	6200	70	13	<9	<9	<2,6	<2,6	530	22	<2,6	260	310	130	31	8800	790	700	18	70	220	26

2.2.2. Eléments traces

On observe dans ce type de sol ferrallitique des teneurs très élevées en éléments traces, notamment en manganèse, plomb, vanadium, titane, chrome, césium et lithium, qui dépassent largement les moyennes trouvées dans les autres profils étudiés.

L'influence de la partie fine sur les teneurs en éléments traces est nette et prédominante, à tel point qu'il est difficile de remarquer leur accumulation éventuelle dans l'horizon organique (exception pour le plomb, strontium, baryum et rubidium).

Les teneurs en tous les éléments étudiés augmentent avec la profondeur, sans exception. Cette augmentation ne dépasse pas la valeur du simple au double, sauf dans le cas du vanadium et du lithium. Il est à souligner que l'acidité du sol varie dans le même sens.

Dans ce profil les teneurs en germanium, bismuth, molybdène et étain sont inférieures à la limite de détection de la méthode.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 2.

2.3. SOL ROUGE FERRALLITIQUE SUR BASALTE

Profil – AV 1/4

Situation : Environs d'Arivonimamo, près du village Mangatany. $X = 481{,}5$ $Y = 785$ $Z = 1\,400$ m.

Climat : $P = 1\,400$ mm $T = 18{,}2°$.

Unité géomorphologique : Coulée volcanique de l'Ankaratra (Pliocène).

Végétation : Pseudo-steppe à *Aristida sp.* et *Cyperus compressus.*

Topographie : Plateau avec escarpement d'érosion.

Roche mère : Ankaratrite (1).

Morphologie

0 à 25 cm : Rouge foncé vif (Munsell à sec : 2,5 YR-3/4, humide : 5 YR-4/3) avec nombreuses radicelles. Argilo-sableux fin, structure nuciforme moyenne, secondairement particulaire poudreuse. Tache les doigts. Quelques débris arrondis un peu plus durcis dans la masse (déjections de vers ?).

25 à 75 cm : Rouge foncé vif (Munsell à sec : 2,5 YR-4/2) argileux, structure polyédrique fine très bien développée. Nombreuses concrétions radiciformes rougeâtres, à cassure brun-rouge, pas très durcies, à structure fine et compacte (comme le confirme l'analyse il s'agit de migrations de l'horizon supérieur dans des trajets de racines d'une ancienne végétation arbustive ou localement dans des terriers d'animaux. La coupe mince de ces concrétions ne montre aucune structure organisée). Porosité d'ensemble élevée, cohésion plutôt faible, enracinement faible.

(1) Composition d'une ankaratrite d'après A. LACROIX *in* P. SEGALEN (1957), p. 40 : en % $SiO_2 = 38{,}74$ $Al_2O_3 = 11{,}30$ $Fe_2O_3 = 4{,}28$ $FeO = 7{,}71$ $MgO = 11{,}97$ $CaO = 14{,}43$ $Na_2O = 3{,}02$ $K_2O = 1{,}92$ $TiO_2 = 3{,}30$ $P_2O_5 = 1{,}77$ $H_2O = 1{,}28$.

0,75 à 2,45 m env. : Brun clair et grisâtre (Munsell à sec : 5 YR-5/3, humide : 5 YR-4/3) marbré mais non tacheté, argileux, à structure polyédrique fine et nette. Cohésion plutôt faible, enracinement nul. Des concrétions radiciformes sont encore présentes localement sur la pente du talus d'érosion.

+ de 2,45 m env. : Basalte altéré gris clair et blanchâtre (Munsell à sec : 2,5 Y-7/0, humide : 5 Y-5/1) finement piqueté de noir, argileux, structure massive à polyédrique grossière, meuble et peu cohérent, traversé par de minces lits de plaquettes alumineuses jaunâtres.

2.3.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol est moyennement acide, avec un pH compris entre 5,4 et 6,0.

Le taux d'argile varie modérément entre 35 et 47 %. Le rapport limon/argile est faible et varie entre 0,5 et 0,2.

Comme dans le profil précédent les taux des sesquioxydes sont très élevés (Fe_2O_3 : 26 % ; Al_2O_3 : 37 %).

Le sol est pauvre en matière organique, 1,2 % dans les premiers 25 cm, pour diminuer immédiatement à 0,3 %. L'humification est plutôt faible et le rapport C/N varie entre 13 et 20.

Le complexe absorbant est mal pourvu en éléments échangeables. La capacité d'échange est assez élevée : dans l'ensemble du profil elle est de 18 mé pour 100 g. Le pourcentage de saturation est très

TABLEAU 3

SOL ROUGE FERRALLITIQUE SUR BASALTE

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
AV-1	0- 25	35,0	17,8	38,5	6,5	10,2	24,2	10,0	35,2	1,2	5,9
2	25- 80	47,1	11,7	37,6	2,2	19,3	25,4	10,3	36,9	0,3	6,0
3	80-245	45,1	10,5	41,3	2,0	23,7	25,6	11,3	32,2	0,2	5,4
4	>245	37,5	17,3	41,6	2,7	24,4	26,1	9,2	30,2	0,2	5,6

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
AV-1	850	21	8	<8	<8	2,5	<2,5	125	34	5	<250	345	85	2,5	21000	590	170	210	680	8	40
2	850	16	9	<9	<9	<2,6	<2,6	155	43	<2,6	<260	430	170	2,6	25800	600	215	515	2600	9	50
3	900	18	13	<9	<9	<2,6	<2,6	175	53	<2,6	<260	440	265	8,8	28200	700	265	350	4400	9	70
4	1100	16	18	<9	<9	7	<2,7	270	71	<2,7	<270	720	530	18,0	31000	800	530	710	3500	9	90

faible (9 - 25 %). Les réserves minérales sont moyennes en ce qui concerne le calcium, et faibles en sodium et potassium. Ce profil est exceptionnellement pourvu en acide phosphorique, avec un taux qui varie entre 0,43 et 0,65 %.

La ferrallitisation de ce profil est très accentuée et le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie entre 0,5 et 1,4 en profondeur.

2.3.2. Eléments traces

Ce profil de sol ferrallitique sur basalte se caractérise par les teneurs en éléments traces exceptionnellement élevées, par rapport aux profils étudiés surtout en zirconium, nickel, titane, chrome, césium, strontium et baryum.

Les variations modérées du taux d'argile dans le profil ont probablement pour conséquence des teneurs en éléments traces très constantes et sans variations importantes. On constate cependant une légère augmentation avec la profondeur, résultat probable du lessivage poussé dans un sol relativement bien drainé.

Il est à remarquer que ce profil est très peu pourvu en éléments du premier groupe (alcalins) : lithium, potassium, sodium et rubidium.

Dans ce profil, on a décelé du molybdène et même de l'argent.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 3.

2.4. SOL FERRALLITIQUE HUMIFÈRE TYPE « ANDO »

Profil – RM 11/15

Situation : Environs d'Ambatolampy, piste Manjakatompy-Anosiarivo.
$X = 491$ $Y = 751$ $Z = 2\,075$ m.

Climat : $P = 2\,000$ $T = 15{,}6°$.

Unité géomorphologique : Haut massif volcanique de l'Ankaratra.

Végétation : Prairie, quelques arbustes et fougères.

Topographie : Replat sur pente forte (50 %).

Roche mère : Cendres et projections basaltiques.

Morphologie

0 à 6 cm : Brun-noir (Munsell à sec : 10 YR-2/2, humide : 10 YR-2/1), fortement humifère. Matière organique bien décomposée et bien mélangée aux éléments minéraux, système racinaire fin et abondant. Argilo-limoneux, structure grumeleuse à légère tendance nuciforme. Cohésion moyenne à forte, porosité d'agrégats faible, d'ensemble forte.

6 à 35 cm : Brun-foncé (Munsell à sec : 5 Y-3/2, humide : 5 YR-2/2), fortement humifère, nombreuses petites racines. Limono-argileux, structure peu développée, fondue à nuciforme. Cohésion moyenne à faible.

35 à 70 cm : Brun-rouge (Munsell à sec : 5 YR-3/4, humide : 5 YR-3/2) beaucoup moins humifère mais nombreuses petites racines. Limono-argileux, structure peu développée à tendance prismatique. Cohésion moyenne, porosité tubulaire moyenne à faible.

70 à 90 cm : Horizon d'altération brun jaunâtre (Munsell à sec : 7,5 YR-4/4, humide : 7,5 YR-3/2) avec débris de roches blanches et ponces basaltiques plus ou moins altérés. Système racinaire.

2.4.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol est acide, avec un pH compris entre 4,5 et 4,9.

Dans la granulométrie, limon et sable fin dominent (entre 40 et 75 %). La fraction argileuse, peu abondante, ne dépasse pas 5 % dans la plus grande partie du profil. Le rapport limon/argile est très élevé et varie entre 1,5 et 10.

Les teneurs en oxydes de fer et alumine sont très élevées.

Le taux de matière organique est compris entre 15 et 28 % dans les premiers 35 cm de profondeur. L'humification est faible avec un rapport C/N très élevé (entre 19 et 22).

La capacité d'échange du complexe absorbant est élevée (entre 15 et 25 mé pour 100 g), mais le profil est peu pourvu en bases échangeables. La somme de bases est inférieure à 2 mé pour 100 g dans l'horizon de surface, puis varie autour de 0,4 mé pour 100 g dans le reste du profil. Le taux de saturation est très faible et varie entre 1 et 7 %.

Les réserves minérales sont également très faibles.

La ferrallitisation est très prononcée, avec un rapport SiO_2/Al_2O_3 entre 0,7 et 1,0.

2.4.2. Eléments traces

Dans ce profil de sol ferrallitique sur cendres volcaniques, les teneurs en éléments traces sont visiblement au-dessous de la valeur moyenne trouvée pour les autres sols ferrallitiques, sauf les teneurs en vanadium, cobalt et titane. La forte teneur en matière organique ne semble pas influencer la distribution des éléments traces, car il est difficile de remarquer des accumulations importantes dans les horizons humifères.

La zone de départ au contraire a tendance à conserver les teneurs maximales notamment pour le manganèse, gallium, vanadium, zirconium, cobalt, titane, chrome, strontium et rubidium.

Il est important de remarquer que ce profil est fortement dépourvu de tous les éléments alcalins et alcalino-terreux sans exception.

Les teneurs en germanium, bismuth, étain, argent, zinc, césium et lithium, sont plus faibles que la limite de détection de la méthode utilisée.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 4.

TABLEAU 4

SOL FERRALLITIQUE HUMIFÈRE TYPE « ANDO »

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
RM-11	0- 6	20,0	34,5	5,3	3,7	11,1	21,5	9,5	21,3	27,8	4,6
12	6-35	5,0	48,5	20,3	3,4	11,2	26,4	10,5	26,4	15,0	4,8
13	35-70	4,0	28,5	47,5	8,5	12,1	28,7	12,6	29,7	6,8	4,8
14	70-90	24,0	49,0	13,0	10,7	14,4	28,5	11,9	32,3	2,9	4,9
15	>90	34,0	46,8	9,3	8,1	18,4	26,7	6,1	31,1	0,8	4,5

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
RM-11	950	10	6	<6	<6	3	<1,8	125	22	<1,8	<180	100	16	16	18500	190	<60	16	25	<1,8	13
12	500	11	7	<7	<7	3,6	<2,2	180	29	<2,2	<220	140	22	22	18000	220	<70	11	37	<2,2	15
13	650	10	8	<8	<8	2,4	<2,4	160	20	<2,4	<240	120	20	20	31500	240	<80	8	24	<2,4	8
14	800	8	8	<8	<8	2	<2,4	160	20	<2,4	<240	80	16	16	16000	245	<80	12	24	<2,4	16
15	1300	8	9	<9	<9	2,6	<2,6	170	21	<2,6	<260	170	17	35	34000	255	<85	25	26	<2,6	34

2.5. SOL ROUGE FAIBLEMENT FERRALLITIQUE SUR GNEISS

Profil – PR 21/24

Situation : Près du Poste de Mandoto.
$X = 383$ $Y = 724,5$ $Z = 800$ m.

Climat : $P = 1\,530$ mm $T = 23°$.

Unité géomorphologique : Basse surface d'aplanissement dans le socle ancien en voie de dissection.

Végétation : Pseudo-steppe à *Aristida multicaulis* assez dense, quelques *Hypparhenia.*

Topographie : Pente forte : 30 à 35°. Forte érosion en nappe. Profil observé dans un ravinement.

Roche mère : Gneiss plus ou moins migmatique.

Morphologie

0 à 15 cm : Brun-jaune clair (Munsell à sec : 5 YR-5/6, humide : 2,5 YR-3/6) à jaune rougeâtre, un peu humifère, radicelles assez nombreuses. Argilo-sableux, très tassé, structure secondairement grumuleuse faible à particulaire fine. Cohésion assez forte.

0,15 à 1,1 m : Rouge vif (Munsell à sec : 5 YR-6/8, humide : 2,5 YR-4/8) argilo-limoneux, structure massive secondairement polyédrique faible à particulaire fine. Porosité moyenne, enracinement très faible. Cohésion moyenne.

+1,1 m : Passage progressif à un matériau d'altération blanchâtre à jaunâtre (Munsell à sec : 7,5 YR-8/6, humide : 7,5 YR-6/6), très micacé, kaolinique, limono-sableux, très friable. Vers 6 m de profondeur, on peut observer le gneiss altéré ayant conservé son litage original, blanchâtre avec des taches jaunes de micas en altération.

2.5.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol est moyennement à faiblement acide.

La fraction argileuse est assez abondante dans les premiers 100 cm de profil ; elle décroît rapidement avec la profondeur et le taux de 7 % reste constant jusqu'à 600 cm. La fraction sableuse est prédominante et varie avec la profondeur de 40 à 85 %. Le rapport limon/argile varie entre 0,2 et 1,3.

Les teneurs en matière organique, qui dépassent 1 % dans les premiers 15 cm du profil, sont très faibles dans les horizons sous-jacents. L'humidification est bonne et le rapport C/N ne dépasse pas 14.

TABLEAU 5

SOL ROUGE FAIBLEMENT FERRALLITIQUE SUR GNEISS

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
PR-21	0- 15	30,9	6,7	24,1	37,0	18,9	8,0	3,5	19,4	1,4	5,9
22	15-110	41,5	16,9	21,0	19,0	30,6	6,7	3.8	30,1	0,15	6,3
23	110-200	14,9	19,9	29,0	35,2	29,1	5,9	1,7	23,4	0,15	6,4
24	200-600	6,8	6,0	33,4	53,2	15,7	4,2	0,7	11,4	0,10	6,6

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
PR-21	1100	27	2,7	< 9	< 9	<2,7	<2,7	90	36	<2,7	<270	90	23	23	7300	46	< 90	90	180	27	46
22	350	44	4,5	< 9	< 9	<2,6	<2,6	80	44	<2,6	<260	62	26	32	5300	35	< 90	70	130	26	70
23	450	64	9	< 9	< 9	<2,7	<2,7	75	55	<2,7	<270	46	18	18	4500	27	< 90	90	730	46	137
24	650	95	19	<10	<10	<2,9	<2,9	70	58	<2,9	<290	29	14	14	2900	29	<100	115	960	67	190

Malgré une assez faible capacité d'échange, qui varie entre 6 et 10 mé pour 100 g, le taux de saturation est moyen avec des teneurs moyennes en calcium et magnésium.

Les réserves minérales sont faibles, exception faite du calcium.

Le rapport SiO/Al_2O_3 est de 1,7 dans la partie supérieure du profil ; il atteint 2,1 à 2,3 dans la profondeur (matériau originel).

2.5.2. Eléments traces

On observe dans ce profil de sol ferrallitique sur gneiss une diminution de la teneur en éléments traces avec la profondeur, notamment pour le vanadium, zirconium, nickel, cobalt, titane et chrome (métaux lourds).

D'autre part, on constate une augmentation de la teneur en métaux alcalins et alcalino-terreux avec la profondeur. Le même comportement est remarqué pour le plomb, gallium et cuivre.

Les teneurs en éléments traces sont en général inférieures aux moyennes observées dans les autres profils ferrallitiques, sur différentes roches mères, sauf pour le plomb, cuivre, cobalt et rubidium.

Les éléments germanium, bismuth, molybdène, étain, argent, zinc et césium n'ont pas pu être décelés.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 5.

2.6. SOL ROUGE FAIBLEMENT FERRALLITIQUE SUR ROCHE MÉTAMORPHIQUE

Profil – YM 270/273

Situation	: Environ, d'Ikalamavony, près du village Ambalasoatanana. $X = 421{,}5$ $Y = 545{,}2$ $Z = 1\,000$ m.
Climat	: $P = 900$ mm $T = 23°$.
Unité géomorphologique	: Hauts reliefs montagneux à dissection profonde.
Végétation	: Pseudo-steppe dégradée à *Hypparhenia* et *Aristida*.
Topographie	: Pente forte : 20 à 30° avec épandages de cailloux de quartz.
Roche mère	: Mignatite schisteuse riche en biotite et ferro-magnésiens.

Morphologie

0 à 25 cm	: Rouge-brun (Munsell à sec : 5 YR-4/3, humide : 2,5 YR-4/2) peu humifère, mais à nombreuses radicelles. Argileux à argilo-sableux, assez tassé et durci, structure nuciforme à faiblement polyédrique, secondairement particulaire poudreuse. Graviers de quartz fréquents.
25 à 35 cm	: Rouge foncé vif (Munsell à sec : 2,5 YR-5/8, humide : 10 R-4/4) à enracinement plutôt faible. Argileux à argilo-sableux, structure polyédrique fine secondairement particulaire poudreuse. Un filonnet de quartz à la base de l'horizon.

0,55 à 1,3 m : Rouge clair (Munsell à sec : 7,5 YR-5/6, humide : 5 YR-4/4). Structure massive secondairement particulaire fine, limono-sableux fin, assez tassé et durci en place, un peu micacé.

+ de 1,3 m : Passage progressif à l'arène d'altération très friable, gris clair à blanchâtre (Munsell à sec : 2,5 YR-4/4) à structures finement feuilletée encore bien visible.

2.6.1. Caractères physiques et chimiques

Le pH du sol varie de faiblement acide à neutre.

Les deux horizons supérieurs contiennent 40 à 60 % d'argile, avec un rapport limon/argile entre 0,05 et 0,15. Le taux de la fraction fine tombe à 15 % dans l'arène d'altération contre 78 % de sable. Les teneurs en sesquioxydes suivent les variations de la partie fine à travers le profil.

L'horizon de surface est moyennement riche en matière organique. L'humification est faible avec un rapport C/N variant entre 12 et 22.

Le complexe absorbant a une capacité d'échange moyenne à élevée ; il est bien pourvu en calcium et magnésium. Le pourcentage de saturation varie avec la profondeur de 36 à 95 %.

Les réserves minérales sont bonnes, sauf en acide phosphorique dont le taux est inférieur à 0,1 % dans la plus grande partie du profil.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie entre 1,9 et 2,1 dans le profil pour atteindre 2,7 dans la roche altérée.

2.6.2. Eléments traces

Ce type de sol ferrallitique formé sur roche métamorphique présente des teneurs en éléments traces du même ordre de grandeur que celles observées dans les profils précédemment étudiés (sur granite et gneiss).

Les teneurs en éléments traces ne suivent pas les variations importantes de la fraction fine et les taux maxima apparaissent dans l'arène d'altération dépourvue d'argile (exception faite des alcalino-terreux).

On observe une accumulation dans l'horizon humifère de manganèse, plomb, gallium, vanadium, chrome, baryum et rubidium.

Encore une fois, dans ce profil, il est à remarquer que les éléments alcalins et alcalino-terreux se suivent très bien.

Exemple : Si un profil est bien pourvu en calcium et magnésium, le baryum et les trontium sont présents également en quantité importante.

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, argent, zinc et césium sont très faibles.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 6.

TABLEAU 6

SOL ROUGE FAIBLEMENT FERRALLITIQUE SUR ROCHE MÉTAMORPHIQUE

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
YM-270	0- 25	40,5	2,7	28,0	24,2	16,1	8,5	7,4	13,6	4,0	6,0
271	25- 55	57,2	9,3	19,8	12,7	26,6	12,4	10,4	27,7	0,9	6,3
272	55-130	22,4	14,0	41,8	20,7	22,0	10,4	5,4	18,2	0,5	7,0
273	>130	15,6	6,4	43,1	34,0	13,7	8,0	2,6	7,0	0,15	7,2

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
YM-270	950	14	14	< 9	< 9	<2,8	<2,8	110	28	<2,8	<280	95	28	17	7000	185	< 90	140	930	14	93
271	700	9	9	< 9	< 9	<2,7	<2,7	90	27	<2,7	<270	90	36	18	11600	71	< 90	180	700	18	71
272	1100	14	9	< 9	< 9	<2,8	<2,8	95	37	<2,8	<289	185	75	23	7500	47	< 90	140	740	56	93
273	1250	19	10	<10	<10	<2,9	<2,9	95	44	<2,9	<290	145	49	24	19400	78	<100	95	680	49	195

2.7. SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR ROCHE BASIQUE

Profil – PR 31/36

Situation : Environs d'Anjoma-Ramartina, près du village Ambatotsipihina.
$X = 368,5$ $Y = 723$ $Z = 950$ m.

Climat : $P = 1\,400$ mm $T = 25°$.

Unité géomorphologique : Reliefs de hautes terres à dissection profonde avec dômes rocheux en voie de dégagement.

Végétation : Pseudo-steppe à *Aristida* dense.

Topographie : Butte résiduelle, ravinement intense.

Roche mère : Amphibolite en filons stratoïdes.

Morphologie

0 à 30 cm : Brun-rouge foncé (Munsell à sec : 2,5 YR-4/4, humide : 5 YR-4/3) un peu humifère, à radicelles nombreuses. Argileux, structure polyédrique fine. Porosité élevée, cohésion moyenne.

30 à 50 cm : Rouge foncé vif (Munsell à sec : 2 YR-5/6, humide : 10 R-4/4) argileux, structure polyédrique fine. Quelques taches noirâtres, nombreuses radicelles, porosité élevée, cohésion moyenne.

0,5 à 1,1 m	: Rouge foncé (Munsell à sec : 2,5 YR-4/4, humide : 10 R-4/6) à nombreuses petites concrétions noires ferro-manganésifères peu durcies. Argileux, structure polyédrique bien développée avec faibles revêtements argileux (« clay-skin ») sur les faces des agrégats. Enracinement moyen à faible, cohésion moyenne.
1,1 à 1,8 m	: Horizon identique au précédent (Munsell à sec : 2,5 YR-4/8, humide : 10 R-4/6) mais sans concrétions. Argilo-sableux, structure polyédrique, enracinement très faible, assez cohérent.
1,8 à 3 m	: Matériau d'altération brun-jaune foncé (Munsell à sec : 7,5 YR-6/6, humide 7,5 YR-4/4) micacé, friable et peu cohérent, sablo-limoneux.
+ de 3 m	: Roche grisâtre très altérée avec taches jaunes, se coupant facilement à la bêche.

2.7.1. Caractères physiques et chimiques

L'acidité du sol est moyenne à faible, pour atteindre la neutralité vers 300 cm de profondeur *(roche mère)*.

Dans la première partie du profil, l'argile domine avec un taux de 50-60 % ; à partir de 180 cm de profondeur, ce taux décroît rapidement jusqu'à 1 %. Parallèlement, le sable augmente et atteint 92 % dans la roche altérée. Le rapport limon/argile varie entre 0,14 (surface) et 5 (profondeur).

Le taux de matière organique est moyen mais il décroît rapidement. L'humification est bonne (40 à 50 %), et le rapport C/N varie avec la profondeur entre 13 et 9.

Le complexe absorbant est bien pourvu en calcium et en magnésium, et a une capacité d'échange assez élevée (21 à 27 mé pour 100 g) dans la partie argileuse du profil. Le taux de saturation augmente avec la profondeur de 40 à 70 %.

Les réserves minérales sont bonnes, surtout en calcium.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est de 2,5 dans le profil de sol et environ 4 dans la *roche altérée*.

2.7.2. Eléments traces

Les horizons supérieurs de ce profil de sol ferrugineux tropical montrent une accumulation importante des éléments traces probablement en liaison avec la forte teneur en argile et en matière organique. Cette accumulation est très nette et sans exception.

Le matériau altéré comprend deux horizons très différents quant à leurs teneurs en éléments traces : le premier (PR 35) est très pauvre, surtout en plomb, cuivre, zirconium, vanadium, nickel, cobalt, tandis que le second (PR 36) présente des teneurs en éléments traces très élevées, parfois même supérieures à celles observées en surface (gallium, vanadium, cuivre, titane, baryum, lithium). Par rapport aux autres profils ferrugineux étudiés, les teneurs en éléments traces sont en général élevées, sauf pour le gallium, germanium, bismuth, molybdène, étain, argent, zinc et césium.

Les résultats d'analyses sont présentés dans le tableau 7.

TABLEAU 7

SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR ROCHE BASIQUE

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
PR-31	0- 30	51,3	7,1	32,4	6,2	26,7	12,0	7,7	18,1	3,14	5,9
32	30- 50	53,5	11,3	29,7	3,7	29,0	12,1	7,7	19,3	0,94	5,9
33	50-110	57,3	9,5	28,2	3,0	33,9	13,7	8,4	25,0	0,70	6,0
34	110-180	31,1	23,7	41,5	2,2	37,3	15,1	8,7	25,8	0,33	6,5
35	180-300	6,8	6,6	53,0	33,0	39,0	10,3	2,8	14,4	0,21	6,8
36	>300	1,2	5,6	57,6	35,2	19,0	8,0	3,2	8,7	0,11	7,1

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
PR-31	3500	175	<2,6	< 9	< 9	<2,6	<2,6	105	60	<2,6	<260	260	61	26	10400	175	< 90	350	1300	85	350
32	3150	90	<2,7	< 9	< 9	<2,7	<2,7	110	70	<2,7	<270	230	72	27	10800	180	< 90	315	900	55	90
33	2950	135	<2,7	< 9	< 9	<2,7	<2,7	110	55	<2,7	<270	180	62	22	8000	180	< 90	220	450	36	70
34	1300	60	<2,6	< 9	< 9	<2,6	<2,6	26	31	<2,6	<260	<10	< 3	5	7000	130	< 90	90	50	9	50
35	1800	22	<2,7	< 9	< 9	<2,7	<2,7	45	27	<2,7	<270	18	18	9	2900	90	< 90	90	100	70	70
36	950	50	10	<10	<10	<2,9	<2,9	100	80	<2,9	<290	10	10	15	14500	50	<100	95	800	95	50

2.8. SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR CALCAIRE

Profil – BL 501/504

Situation : Environs du poste de Berevo, près du village Bemangily.
$X = 259$ $Y = 706,5$ $Z = 50$ m.

Climat : $P = 1\,090$ mm $T = 27°$.

Unité géomorphologique : Glacis d'érosion sur revers de cuesta calcaire.

Végétation : Pseudo-steppe à *Heteropogon contortus* avec traces de brûlis. Quelques arbustes.

Topographie : Plateau en pente faible. Erosion en nappe moyenne.

Roche mère : Calcaire fin légèrement marneux (Bathonien inférieur).

Morphologie

0 à 30 cm : Brun-jaune (Munsell à sec : 7,5 YR-4/2, humide : 7,5 YR-3/2). Un peu humifère assez durci. Argilo-limoneux, structure grumeleuse fine, radicelles assez nombreuses, finement crevassé.

30 à 80 cm : Jaune foncé à jaune légèrement rougeâtre ou jaune ocre (Munsell à sec : 7,5 YR-5/8, humide : 7,5 YR-4/4). Argilo-limoneux avec fentes assez nombreuses, structure prismatique secondairement polyédrique fine et poudreuse. Porosité d'ensemble moyenne, de masse faible. Assez durci, rares petites concrétions noires.

0,8 à 1,7 m : Horizon jaune ocre foncé (Munsell à sec : 10 YR-4/3, humide : 7,5 YR-3/2). Argileux, finement polyédrique, de plus en plus riche en petites concrétions ferro-manganésifères noires (2-3 mm), massif, très tassé.

+ de 1,7 m : Passage brutal à un calcaire jaunâtre clair, plus ou moins encroûté sur 20 à 30 cm et assez tendre en profondeur. Ce calcaire donne des dalles en bas de pente.

2.8.1. Caractères physiques et chimiques

Le pH du sol est très faiblement acide.

L'argile constitue la fraction prédominante de ce profil : le taux varie entre 55 % et 65 %. Le rapport limon/argile est faible et varie autour de 0,2.

Le taux de matière organique est moyen dans l'horizon de surface, puis il décroît rapidement dans le reste du profil. L'humification est médiocre et le rapport C/N voisin de 15.

La capacité d'échange est assez élevée et varie entre 27 mé pour 100 g (surface) et 19 mé pour 100 g (profondeur). Le complexe absorbant est assez riche en calcium et magnésium, mais pauvre en potassium et sodium.

Le taux de saturation est constant pour l'ensemble du profil : 60 à 70 %.

Les réserves minérales sont bonnes, surtout en alcalino-terreux et en acide phosphorique.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est voisin de 1,9.

2.8.2. Eléments traces

Ce profil de sol ferrugineux tropical sur calcaire présente des teneurs très élevées en éléments traces, et supérieures, sauf quelques exceptions, à celles trouvées dans les autres profils étudiés du même type.

La distribution est uniforme et sans variations importantes tout le long du profil. La roche mère présente quelques différences importantes par rapport au sol. Les teneurs en gallium, cuivre, nickel, cobalt, titane, chrome, césium, et rubidium sont inférieures à celles trouvées dans le sol. Les teneurs en strontium et baryum sont par contre supérieures à celles trouvées dans le sol.

Les teneurs en zirconium sont particulièrement élevées.

Il est difficile de mettre en évidence une influence de la matière organique sur la distribution des éléments traces.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 8.

TABLEAU 8

SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR CALCAIRE

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
BL-501	0- 30	53,9	12,9	21,2	9,7	15,3	23,0	13,0	13,5	3,9	6,5
502	30- 80	62,5	8,3	19,6	8,4	15,9	23,9	13,2	14,3	0,4	6,7
503	80-170	66,1	7,9	11,9	13,2	18,1	24,7	12,6	15,1	0,3	6,8
504	>170	La	roche	—	—	—	—	—	—	—	—

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BL-501	2600	22	18	< 9	< 9	2,6	<2,6	310	26	<2,6	<260	1300	88	31	7000	265	260	105	450	90	180
502	2300	18	18	< 9	< 9	2,8	<2,8	320	28	<2,8	<280	1650	92	37	7500	280	280	110	350	90	185
503	1800	28	18	< 9	< 9	2,8	<2,8	280	28	<2,8	<280	1850	92	46	6500	280	280	90	300	75	140
504	800	15	< 3	<10	<10	<3	<3	200	5	<3,0	<300	700	20	< 3	1500	50	<100	600	1200	40	20

2.9. SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR MATÉRIAUX CALCAIRES

Profil – TH 76/77

Situation : Environs d'Ankazoabo, près du village Andranoboka.
$X = 200,5$ $Y = 420,4$ $Z = 400$ m.

Climat : $P = 720$ mm $T = 25°$.

Unité géomorphologique : Terrasse ancienne de la rivière Sakanavaka.

Végétation : Savane arborée et arbustive à *Heteropogon contortus*.

Roche mère : Alluvions anciennes calcaires (produits de remaniement de l'Isalo-Jurassique - Série de la Sakanavaka à faciès mixte).

Morphologie

0 à 15 cm : Brun rougeâtre (Munsell à sec : 5 YR-4/2, humide : 5 YR-4/3), un peu humifère, matière organique bien mélangée. Argilo-sableux, structure massive à faiblement nuciforme, secondairement particulaire. Porosité assez élevée, enracinement moyen.

0,15 à 2 m env. : Rouge (Munsell à sec : 5 YR-4/6, humide : 2,5 YR-4/8), assez durci et tassé. Argilo-sableux, structure massive à grossièrement nuciforme, secondairement particulaire. Porosité moyenne, enracinement faible à nul.

2 à 2,4 m : Passage progressif à un horizon jaunâtre (Munsell à sec : 7,5 YR-5/8, humide : 10 YR-5/6), sablo-argileux, massif, peu ou pas calcaire (horizon de transition).

+ de 2,4 m : Matériau originel blanchâtre (Munsell à sec : 10 YR-8/3, humide : 10 YR-6/3) plus ou moins calcaire, avec passages riches en nodules calcaires, l'ensemble étant assez cohérent en place. Sableux fin, pulvérulent après désagrégation. Localement, on observe de petits encroûtements et des niveaux riches en petits galets de roches basiques.

2.9.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol dans le profil est faiblement acide à neutre (pH = 6,0 - 6,9) ; elle devient basique dans la roche mère. La teneur en calcaire atteint 15 % vers 2 m.

La fraction sableuse domine dans ce profil sans variations importantes (entre 75 et 85 %). L'argile, peu abondante, ne dépasse pas 25 % dans la plus grande partie du profil et décroît rapidement pour atteindre 3 % dans la roche mère (après décalcification). Le rapport limon/argile varie entre 0,15 et 1.

Le profil est très pauvre en sesquioxydes.

Le taux de matière organique est très faible en surface et insignifiant dans le reste du profil. L'humification est assez bonne (entre 35 et 40 %) avec un rapport C/N de 12.

La capacité d'échange est moyenne, le complexe absorbant est assez bien pourvu en calcium et magnésium ; le taux de saturation varie autour de 65 %.

Les réserves minérales sont très bonnes. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est assez élevé : 2,6 en surface et 4,5 à 3,9 en profondeur.

2.9.2. Eléments traces

Ce profil de sol ferrugineux tropical sur matériaux calcaires est nettement plus pauvre en éléments traces que les autres profils étudiés sur le même type de roche mère.

Ce fait peut être expliqué par l'appauvrissement du profil en argile, d'une part, et par l'absence de matière organique, d'autre part.

Il est très difficile de mettre en évidence un appauvrissement en éléments traces dû au lessivage, malgré la texture sableuse. La distribution des éléments traces est assez régulière et dans la plupart des cas, les teneurs décroissent avec la profondeur (manganèse, plomb, vanadium, cuivre, nickel, cobalt, strontium et lithium).

L'horizon d'altération a conservé des teneurs importantes en alcalins et alcalino-terreux ; comme dans le profil précédent, il faut remarquer les très fortes teneurs en zirconium. Dans ce profil il a été décelé du bismuth.

Les teneurs en germanium, molybdène, étain, argent, zinc et césium sont très faibles.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 9.

TABLEAU 9

SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR MATÉRIAUX CALCAIRES

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
TH-76	0- 15	20,5	3,5	32,1	43,2	6,7	4,4	1,4	4,4	1,09	6,9
76*a*	15-200	26,1	3,9	26,8	42,5	9,4	5,2	1,9	3,6	0,26	6,0
76*b*	200-240	8,1	3,1	64,7	23,7	13,7	6,2	2,8	6,0	0,26	6,6
77	>240	8,1	8,7	42,3	40,2	17,8	5,2	2,3	5,1	0,13	8,2

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
TH-76	680	24	5	<10	10	<2,9	<2,9	58	24	<2,9	<290	1150	29	15	2950	115	<100	195	700	80	195
76*a*	490	20	8	<10	10	<2,9	<2,9	49	24	<2,9	<290	1150	24	15	3400	145	<100	145	300	60	240
76*b*	390	24	10	<10	10	<2,9	<2,9	49	19	<2,9	<290	1150	29	10	7000	175	<100	100	600	50	290
77	460	18	5	< 9	9	<2,8	<2,8	37	18	<2,8	<280	1100	18	9	6000	140	< 90	90	900	95	460

2.10. SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR MATÉRIAUX GRÉSEUX

Profil - RM 121/125

Situation : Environs de Manja, au nord-est du village Marerano.
$X = 240$ $Y = 526,5$ $Z = 400$ m.

Unité géomorphologique : Surface d'érosion fini-tertiaire (carapace sableuse sur séries sédimentaires Isalo-Jurassique-Crétacé).

Climat : $P = 720$ mm $T = 24,5°$.

Végétation : Savane arborée à *Hypparhenia* et *Poupartia caffra* (Sakoa).

Topographie : Profil observé dans un ravin d'érosion, sur un plateau à pente de 3 %. Erosion en nappe importante.

Roche mère : Matériaux d'épandage formés à partir du remaniement de séries gréso-calcaires de l'Isalo-Jurassique (faciès mixte).

Morphologie

0 à 20 cm : Brun-rouge grisâtre (Munsell à sec : 5 YR-4/6, humide : 5 YR-4/6, humide : 5 YR-3/4), lissé en surface avec structure légèrement feuilletée (érosion). Sableux faiblement argileux, assez tassé, structure fondue vaguement nuciforme, grossière. Cohésion forte, enracinement moyen.

20 à 45 cm : Rouge (Munsell à sec : 5 YR-4/6, humide : 2,5 YR-3/6). Sableux faiblement argileux, structure nuciforme assez bien développée. Assez tassé, enracinement moyen.

45 à 105 cm : Rouge clair, sableux (Munsell à sec : 2,5 YR-4,6, humide : 2,5 YR-3/6), structure nuciforme assez bien développée. Cohésion moyenne à faible, pseudo-sables, enracinement moyen.

1,45 à 2,5 m : Rosé avec taches argileuses blanches ou rouges assez fortement indurées (Munsell à sec : 2,5 YR-4/8, humide : 2,5 YR-4/6). Sableux, avec cailloutis de quartz plus ou moins roulés, faiblement argileux. Produits gréseux remaniés.

+ 2,5 m : Grès sablo-argileux à stratifications subhorizontales, assez tendre, de couleur claire, blanchâtre à rosée.

2.10.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol est moyennement acide.

Le taux d'argile varie peu avec la profondeur ; il reste autour de 20 %. La fraction sableuse est prédominante ; les sables grossiers dépassent légèrement 50 %. Le rapport limon/argile est compris entre 0,7 et 0,5.

Le profil est très pauvre en sesquioxydes, surtout en fer.

Le taux de matière organique ne dépasse pas 1 % en surface. L'humification est moyenne (environ 30 %) avec un rapport C/N de 9.

La capacité d'échange est assez faible (entre 7 et 13 mé pour 100 g) mais le complexe absorbant est bien pourvu en bases échangeables, d'où un taux de saturation très élevé (60 à 96 %).

Les réserves minérales sont assez bonnes, sauf en sodium et en acide phosphorique.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie avec la profondeur entre 2,4 et 2,9 pour atteindre 3,1 dans le matériau originel.

2.10.2. Eléments traces

On observe dans ce profil de sol ferrugineux tropical sur matériaux gréseux des teneurs très faibles en éléments traces. Elles sont dues vraisemblablement à la nature de la roche mère, à la texture sableuse, à l'absence d'argile et de matière organique. Sauf quelques exceptions (plomb, zirconium, titane, baryum et rubidium), toutes les teneurs sont inférieures aux moyennes trouvées pour tous les autres types de sols étudiés.

Ici encore, les fortes teneurs en zirconium apparaissent comme une des caractéristiques dans les sols ferrugineux tropicaux étudiés.

La distribution des éléments traces est particulièrement régulière, et elle ne dépasse pas des valeurs du simple au double.

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, argent, zinc, cobalt et césium sont très faibles et impossibles à déceler par la méthode utilisée.

Les résultats analytiques sont présentés dans le tableau 10.

TABLEAU 10

SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR MATÉRIAUX GRÉSEUX

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
RM-121	0- 20	15,5	10,5	18,2	53,7	7,7	1,5	1,0	5,4	0,9	5,7
122	20- 45	19,0	10,0	16,5	52,6	9,9	1,8	1,3	6,0	0,4	5,6
123	45-105	20,0	7,5	14,2	56,5	10,8	1,7	1,2	6,8	0,3	5,7
124	105-145	20,5	8,5	13,4	55,3	11,4	1,9	1,2	6,6	0,3	5,9
125	145-250	20,0	9,0	15,5	53,4	11,4	2,0	1,1	6,1	0,2	6,0

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
RM-121	950	24	10	<10	<10	<2,9	<2,9	29	24	<2,9	<290	580	19	<2,9	3900	80	<100	95	800	29	190
122	700	24	10	<10	<10	<2,9	<2,9	34	24	<2,9	<290	580	24	<2,9	5800	145	<100	145	700	24	175
123	250	19	10	<10	<10	<2,9	<2,9	29	24	<2,9	<290	490	24	<2,9	4900	115	<100	95	950	29	145
124	190	24	14	<10	<10	<2,9	<2,9	34	24	<2,9	<290	480	24	<2,9	4900	145	<100	80	600	49	175
125	150	24	20	<10	<10	<3,0	<3,0	34	24	<3,0	<300	390	20	<3,0	2900	100	<100	80	800	29	195

2.11. SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR CARAPACE SABLEUSE

Profil – TH 70/73

Situation : Environs du canton de Tandrano, près du village Ambonanitelo.
$X = 225$ $Y = 444$ $Z = 550$ m.

Climat : $P = 720$ mm $T = 25°$.

Unité géomorphologique : Glacis d'épandage sur la surface structurale de l'Isalo supérieur (série d'Ankazoabo - grès tendres continentaux).

Végétation : Savane arborée claire à *Heteropogon contortus*.

Topographie : Zone place à faible pente. Erosion en nappe et nombreux ravinements à fond plat. Le profil a été observé dans le ravin de l'Ambatoha, affluent de la rivière Ifantaka.

Roche mère : Matériaux d'épandage et alluvions fluviatiles à dominance sableuse. Produits de remaniements des grès de l'Isalo.

Morphologie

0 à 25 cm	: Brun rougeâtre (Munsell à sec : 5 YR-4/3, humide : 5 YR-3/3) un peu humifère. Sablo-argileux, structure faiblement nuciforme, secondairement particulaire. Cohésion moyenne, enracinement faible.
25 à 2,5/3 m	: Rouge vif (Munsell à sec : 2,5 YR-4/8, humide : 2,5 YR-3/8) assez tassé, plus ou moins durci. Sablo-argileux, structure massive, secondairement nuciforme grossière à particulaire. Localement, surstructure prismatique irrégulière. Enracinement rare, cohésion moyenne.
3 à 5/6 m	: Passage progressif à un matériau sablo-argileux jaunâtre à jaune-rouge (Munsell à sec : 5 YR-5/8, humide : 7,5 YR-6/8) plus ou moins cohérent, avec lits riches en concrétions radiciformes gréso-calcaires.

2.11.1. **Caractères physiques et chimiques**

Le pH du sol est neutre sans variations importantes.

La fraction argileuse reste aux environs de 16 % dans la plus grande partie du profil. Le sable grossier domine dans le profil avec une teneur constante de 80 à 85 %. Ce profil, comme les deux profils de sols ferrugineux tropicaux précédemment décrits, est très sableux et pauvre en sesquioxydes.

Le taux de matière organique est inférieur à 1 % dans les premiers 25 cm, et insignifiant dans le reste du profil. L'humification est très bonne et le rapport C/N est de 12.

Le complexe absorbant est assez bien pourvu en calcium et magnésium, avec une faible capacité d'échange (entre 8 et 12 mé pour 100 g). Le taux de saturation varie autour de 70 %.

Les réserves minérales sont très bonnes, surtout en calcium.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 varie entre 2,6 et 3,1.

2.11.2. **Eléments traces**

Dans ce profil de sol ferrugineux tropical sur carapace sableuse, on observe encore une fois des teneurs très faibles en éléments traces, qui sont visiblement du même ordre de grandeur que celles des deux profils précédemment décrits (sur calcaire et matériaux gréseux). Ces trois profils se caractérisent par une texture sableuse et l'absence de matière organique.

Cependant, on constate dans ce profil un appauvrissement en éléments traces dans l'horizon supérieur, ce qui n'était pas le cas pour les deux profils précédents.

Les teneurs des éléments traces augmentent avec la profondeur sauf pour le manganèse, cuivre, nickel et chrome.

Dans ce profil, comme dans les trois profils des sols ferrugineux tropicaux précédemment étudiés, les teneurs en zirconium sont particulièrement élevées.

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, argent, zinc et césium sont très faibles.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 11.

TABLEAU 11

SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR CARAPACE SABLEUSE

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
TH-70	0- 25	15,3	3,9	21,6	58,2	5,9	2,0	1,0	3,3	0,94	6,9
71	25-250	17,3	3,9	17,2	60,5	6,0	2,0	0,6	3,9	0,09	7,2
72	250-500	15,2	1,6	22,2	60,2	6,3	2,1	0,8	3,6	0,10	7,1
73	>500	11,3	2,7	8,6	77,0	6,0	3,5	1,5	3,6	0,08	6,9

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
TH-70	1400	29	9	< 9	< 9	<2,9	<2,9	29	24	<2,9	<290	665	19	2,9	650	95	< 90	75	400	95	140
71	600	34	10	<10	<10	<2,9	<2,9	34	25	<2,9	<290	785	20	3	1450	80	<100	50	700	95	145
72	200	34	15	<10	<10	<2,9	<2,9	34	20	<2,9	<290	785	15	3	1350	80	<100	80	1000	95	145
73	800	40	15	<10	<10	<3,0	<3,0	40	25	<3,0	400	1480	20	5	3500	80	<100	100	1200	100	150

2.12. SOL HYDROMORPHE SUR ALLUVIONS

Profil – BS 191/194

Unité alluviale : Plaine de Marovoay (basse vallée de la Betsiboka).

Situation : $X = 424,7$ $Y = 1\,106,2$ $Z = 4$ m près du village Anosifisaka.

Végétation : *Echinochloa sp.* (Ahidrano) dense.

Morphologie : Sol régulièrement crevassé jusqu'à 50 à 60 cm.

0 à 30 cm : Horizon brun-jaune (Munsell à sec : 7,5 YR-5/2, humide : 7,5 YR-4/2) à taches rouille vif le long des racines. Argileux, très durci, structure prismatique irrégulière, secondairement polyédrique. Enracinement superficiel.

30 à 65 cm : Horizon brun foncé (Munsell à sec : 7,5 YR-6/2, humide : 7,5 YR-5/4), à débris organiques noirâtres et taches gris clair nettes. Argileux, structure massive à faiblement polyédrique. Fines cristallisations de gypse fréquentes.

65 à 140 cm : Horizon gris clair (Munsell à sec : 2,5 Y-5/2, humide : 2,5 Y-5/1) à tache rouille ou ocre jaune très nettes. Argileux, massif, plastique (nappe à 1 m).

+1,4 m : Argile gris bleu, très compacte, à taches jaune clair, peu nombreuses, nettes.

2.12.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol est acide avec un pH compris entre 4,5 et 4,8.

La fraction fine domine nettement, sans présenter de variations notables.

Le rapport limon/argile est faible, et varie entre 0,12 et 0,3. Il y à moins de 1 % de sable grossier. La teneur en eau du sol en place varie entre 18 et 65 %.

Le taux de matière organique est faible dans l'horizon de surface et médiocre dans les horizons sous-jacents. L'humification est bonne à médiocre avec un rapport C/N compris entre 12 (en surface) et 10 (en profondeur).

Le complexe absorbant est très riche en bases et saturé en calcium et sodium. La capacité d'échange est élevée (37 à 27 mé pour 100 g).

Les réserves minérales sont très bonnes ; le rapport SiO_2/Al_2O_3 de la fraction fine est autour de 3.

2.12.2. Eléments traces

Dans ce profil de sol hydromorphe sur alluvions, on observe des teneurs moyennes en éléments traces, malgré un taux très élevé d'argile. La comparaison des teneurs en éléments traces des profils de sol en place et de celles des sols d'apports présentant un même taux d'argile, montre que les matériaux apportés sont plus ou moins appauvris en éléments traces au cours du transport.

Les variations dans le profil sont peu importantes et dépassent rarement les valeurs du simple au double. La distribution régulière peut être expliquée par la texture du profil, laquelle est sans variations importantes. Il faut remarquer les faibles teneurs en zirconium par rapport aux sols ferrugineux tropicaux.

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, argent et zinc sont très faibles.

Les résultats d'analyses sont donnés dans le tableau 12.

TABLEAU 12

SOL HYDROMORPHE SUR ALLUVIONS

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
BS-191	0- 30	62,7	12,2	23,6	0,2	43,9	10,7	7,4	25,7	2,0	4,5
192	30- 65	63,4	9,8	25,8	0,2	45,0	10,5	7,3	24,9	0,6	4,8
193	65-140	53,6	16,4	29,4	0,2	41,4	9,4	5,9	26,5	0,2	4,7
194	>140	55,0	16,2	26,7	1,0	35,3	6,7	2,9	34,0	1,0	4,5

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BS-191	900	26	26	<9	<9	<2,6	<2,6	90	35	<2,6	<260	44	62	13	7000	220	220	44	450	90	180
192	1300	26	26	<9	<9	<2,6	<2,6	105	31	<2,6	<260	44	70	18	8000	260	220	70	450	105	260
193	260	22	26	<9	<9	<2,6	<2,6	90	26	<2,6	<260	44	52	13	6000	220	170	35	250	70	440
194	180	18	26	<9	<9	<2,6	<2,6	90	26	<2,6	<260	44	44	11	5300	180	180	53	250	70	530

2.13. SOL HYDROMORPHE SUR ALLUVIONS

Profil – BS 61/63

Unité alluviale : Delta interne de la Betsiboka.

Situation : $X = 391,7$ $Y = 1\,118,6$ $Z = 3$ m. Estuaire de Mahabo.

Végétation : Mangrove dégradée à *Avecinnia officinalis* clairsemé, *Heritiera littoralis* (Lonony), *Thespesia populnea* (Valorao). Tapis herbacé clairsemé à *Cynodon dactylon* et *Cyperus rotundus*.

Morphologie

0 à 5 cm : Horizon brun-jaune (Munsell à sec : 7,5 YR-4/4, humide : 7,5 YR-4/2), crevassé, un peu humide, argilo-sableux fin, structure diffuse.

5 à 25 cm : Horizon brun-jaune à taches grises diffuses (Munsell humide : 7,5 YR-4/4), humide et plastique, argilo-limoneux à argileux, enracinement nul.

0,25 à 1 m : Horizon gris clair (Munsell humide : 7,5 YR-5/2) avec localement taches jaune ocre de sulfates de fer. Très humides, argileux, plastique. Riches en racines de palétuviers. Nappe à 70 cm de profondeur.

2.13.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol varie de faiblement basique, en surface, à faiblement acide en profondeur.

La fraction argileuse assez abondante, ne présente pas de variations importantes : le taux se maintient autour de 55 % sur l'ensemble du profil. Le rapport limon/argile varie de 0,4 à 0,2. La teneur en sable grossier est extrêmement faible. Le taux d'humidité du sol sur place varie de 65 à 98 %.

Le taux de matière organique est faible (1,5 %) mais relativement constant. L'humification est moyenne avec un rapport C/N de 9.

La capacité d'échange est très élevée ; le complexe absorbant est sursaturé en sodium.

Les réserves minérales sont très bonnes, et pour le sodium, très élevées.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 de la fraction argileuse est de 2,8 en surface, puis il décroît jusqu'à 2,2 en profondeur.

2.13.2. Eléments traces

Dans le profil de sol hydromorphe sur alluvions, les teneurs en éléments traces sont légèrement plus fortes que celles observées dans le profil précédemment décrit.

Bien que la fraction fine de ce profil soit très abondante, les teneurs en éléments traces restent moyennes, à la différence des sols en place, dans lesquels, pour un même taux d'argile, ces teneurs sont très élevées.

Les teneurs en manganèse, plomb, gallium, cobalt, titane, chrome, strontium et baryum sont légèrement supérieures à celles trouvées dans les autres profils hydromorphes étudiés. La distribution des éléments traces est régulière, car la texture est homogène et le taux de matière organique varie peu.

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, argent et césium sont encore une fois très faibles et impossibles à déterminer avec exactitude.

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau 13.

TABLEAU 13

SOL HYDROMORPHE SUR ALLUVIONS

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
BS-61	0- 5	54,0	19,2	24,3	1,0	32,9	10,5	5,7	22,0	1,5	7,7
62	5-25	54,7	20,9	21,9	1,2	34,5	12,1	6,9	25,5	1,1	7,4
63	25-70	56,5	11,5	27,7	0,5	41,8	9,5	3,9	32,5	1,6	6,5

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	Cu	V	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BS-61	2650	31	36	<9	<9	<2,7	<2,7	90	27	<2,7	270	27	45	27	10000	270	<90	270	1100	71	90
62	3500	35	44	<9	<9	<2,6	<2,6	90	35	<2,6	260	35	48	22	7500	265	<90	220	700	105	220
63	2300	27	64	<9	<9	<2,7	<2,7	90	32	<2,7	<270	36	41	27	4500	270	<90	180	650	180	350

2.14. SOL SALIN SUR ALLUVIONS

Profil – BS 181/184

Unité alluviale : Plaine de Marovoay (Basse vallée de la Betsiboka).

Situation : $X = 414$ $Y = 1\,099$ $Z = 9$ m. Près du village Tanambao.

Végétation : *Cyperus volodioïdes* (Volodia) en peuplement assez dense. *Hypparhenia rufa* clairsemé, quelques *Abutilon greveanum* (Lahirika).

Morphologie

0 à 12 cm : Horizon brun-jaune clair, limono-argileux, structure massive à lamellaire. Peu humifère, enracinement important (recouvrement récent).

12 à 40 cm : Horizon brun-gris, argileux, un peu humifère. Structure prismatique à polyédrique grossière, enracinement plutôt faible.

0,4 à 1,5 m : Horizon brun-jaune à marbrures gris clair, argileux, homogène. Structure massive secondairement polyédrique, avec quelques taches noires nettes mais réparties irrégulièrement.

1,5 à 2 m : Horizon brun-jaune tacheté de rouille, argileux, de plus en plus humide en profondeur.

+2 m : Argile gris plomb, saturée d'eau (niveau de la nappe), plastique.

2.14.1. Caractères physiques et chimiques

Le pH du sol varie entre acide et faiblement basique.

La fraction fine (argile+limon) est prédominante et varie peu avec la profondeur (entre 60 et 75 %). Le rapport limon/argile est de 1 en surface, et de 0,25 en profondeur. Le taux de sable grossier est très faible et ne dépasse pas 1 %. La teneur en eau du sol en place varie entre 14 et 102 %.

Le taux de matière organique est faible dans les premiers 12 cm, et médiocre dans les deux horizons sous-jacents. En profondeur, on constate une légère accumulation de matière organique. L'humification est bonne à médiocre avec un rapport C/N qui décroît avec la profondeur de 13 à 10.

La capacité d'échange est assez élevée et le complexe absorbant sursaturé en sodium, calcium et magnésium. Les réserves minérales sont bonnes.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 de la fraction argileuse varie de 2,3 dans les trois premiers horizons jusqu'à 3,3 en profondeur.

2.14.2. Eléments traces

Ce profil de sol salin sur alluvions se caractérise, comme les deux profils hydromorphes précédemment décrits, par la répartition régulière des éléments traces.

Les teneurs sont moyennes, malgré la fraction fine très abondante. L'accumulation des éléments traces dans l'horizon organique est difficile à remarquer, sauf peut-être pour le plomb, gallium, cuivre, titane et baryum.

On observe encore une fois une faible teneur en zirconium, ce qui semble caractéristique des sols d'apport, à la texture lourde.

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, argent et zinc sont très faibles.

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau 14.

TABLEAU 14

SOL SALIN SUR ALLUVIONS

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
BS-181	0- 12	30,4	31,6	35,3	0,2	38,8	12,7	7,6	29,2	2,5	5,0
182	12- 30	58,4	17,6	22,4	1,0	39,8	9,3	5,8	29,1	0,6	5,1
183	30-120	43,5	23,7	31,4	0,5	39,0	9,1	5,3	28,3	0,7	7,0
184	120-175	54,0	13,6	29,9	0,5	43,2	8,6	4,5	22,5	1,6	7,8

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BS-181	850	22	35	<9	<9	<2,6	<2,6	90	39	<2,6	<260	35	35	17	6000	260	<90	90	900	52	440
182	900	18	26	<9	<9	<2,6	<2,6	90	35	<2,6	<260	35	35	18	3500	260	<90	90	250	90	440
183	850	17	26	<9	<9	<2,6	<2,6	90	34	<2,6	<260	34	34	17	6000	170	90	130	350	105	520
184	850	22	35	<9	<9	<2,6	<2,6	90	30	<2,6	<260	35	30	17	2600	220	90	130	450	130	600

2.15. VERTISOL

Profil – BSY 51/53

Unité alluviale : Plaine de Besalampy (basse vallée de la Sambao).

Situation : $X = 194,5$ $Y = 1\,010,6$ $Z = 4$ m. Près du village Bevary.

Végétation : *Sporobolus rhyzomatosus* (Matsia) dominant, *Cyperus rotondus* (Tsingetsetse), *Roettbellia exaltala* (Kalay).

Morphologie

0 à 25 cm : Horizon noirâtre (Munsell à sec : 7,5 YR-4/0, humide : 7,5 YR-4/0), à enracinement important en surface. Argileux durci, structure prismatique large secondairement polyédrique irrégulière. Crevassé jusqu'à 30 cm de profondeur.

25 à 45 cm : Horizon gris (Munsell à sec : 5 Y-4/1, humide : 2,5 Y-4/2), à taches noirâtres diffuses et taches blanches salines irrégulières. Argileux, structure polyédrique faiblement développée.

+45 cm : Horizon gris clair (Munsell à sec : 5 YR-4/1, humide : 5 Y-5/3) à petites taches ocre jaune assez abondantes. Argileux, homogène, massif, plastique. Creusé jusqu'à 1,30 m.

2.15.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol est moyennement basique. Les teneurs en calcaire sont faibles (0,7 à 3,4 %).

Ce profil ne comprend pratiquement que de l'argile, qui varie entre 90 et 80 %, et un peu de limons, dont le taux reste autour de 10 %. Le rapport limon/argile est 0,1. Le sable fin apparaît dans la profondeur mais ne dépasse pas 10 %. Le taux d'humidité atteint 64 % en profondeur.

La teneur en matière organique est voisine de 1 % en surface ; elle est très faible dans les horizons sous-jacents. L'humification est moyenne et le rapport C/N est voisin de 8 en surface.

Le complexe absorbant a une capacité d'échange extrêmement élevée (50 - 40 mé pour 100 g) et il est sursaturé. Les teneurs en sodium échangeable sont très fortes et le rapport Na/T varie de 16 à 60 % en profondeur.

Les réserves minérales sont également très bonnes.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 de la fraction argileuse est voisin de 4.

2.15.2. Eléments traces

Ce type de sol présente des teneurs en éléments traces un peu plus élevées que celles observées dans les sols hydromorphes sur alluvions. Le nickel, cuivre, plomb et gallium font exception : leurs teneurs sont du même ordre de grandeur.

Malgré l'abondance de la fraction fine du sol, les teneurs en éléments traces ne sont pas très élevées, sauf en éléments facilement solubles, dont la nappe fortement minéralisée dispose. Ici encore, la fraction fine plus ou moins remaniée est partiellement appauvrie en métaux lourds, lors du transport.

Les faibles décroissances des teneurs en manganèse, plomb, cuivre, nickel, cobalt, chrome et baryum avec la profondeur peuvent être attribuées aux influences de la matière organique.

Ce profil est riche en gallium, vanadium, chrome, alcalins et alcalino-terreux.

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau 15.

TABLEAU 15

VERTISOL

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
BSY-51	0-25	87,0	11,0	0,4	0,7	49,1	9,6	2,0	22,2	1,4	7,9
52	25- 45	87,5	9,3	1,3	1,5	49,8	9,3	1,2	21,4	0,7	8,1
53	45-130	79,8	7,6	9,2	2,7	50,0	9,4	1,5	22,7	0,2	8,3

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BSY-51	1350	36	18	<9	<9	<2,7	<2,7	180	36	<2,7	<270	54	80	18	4950	540	<90	305	630	180	270
52	1100	22	31	<9	<9	<2,7	<2,7	180	22	<2,7	<270	53	60	15	4900	450	<90	300	540	130	180
53	700	27	45	<9	<9	<2,7	<2,7	180	22	<2,7	<270	45	36	13	5100	360	<90	310	450	180	220

2.16. VERTISOL

Profil – BS 281/283

Unité alluviale : Plaine de la Manolodroa (nord-ouest de Majunga).

Situation : $X = 403,6$ $Y = 1\ 164,4$ $Z = 2$ m. Près du village Ambalika.

Végétation : Tapis herbacé dense à *Scirpus maritimus* (Kiheraherana) et *Cressa cretica* (Sirasira).

Morphologie : Sol régulièrement crevassé.

0 à 20 cm : Horizon noirâtre (Munsell à sec : 7,5 YR-4/0, humide : 5 Y-5/1), peu humifère, argileux, durci à fentes de retrait bien développées. Structure prismatique large secondairement polyédrique grossière. Enracinement moyen à faible, un peu calcaire.

20 à 30 cm : Horizon grisâtre (Munsell à sec : 7,5 YR-5/0, humide : 5 Y-5/1), à petites concrétions blanchâtres calcaires. Argileux, structure polyédrique faiblement développée.

30 à 80 cm : Horizon gris olivâtre (Munsell à sec : 2,5 YR-5/2, humide : 5 Y-5/1), à taches jaunâtres diffuses, argileux, humide, plastique. Enracinement nul.

0,80 à 1,20 m : Horizon gris bleuté à gris plomb (Munsell à sec : 2,5 Y-3/0, humide : 2,5 Y-4/0), à odeur putride, très argileux, plastique. Quelques débris de Cyperacées. Nappe vers 1,60 m.

2.16.1. Caractères physiques et chimiques

Le pH du sol se maintient autour de 8,3, dans l'ensemble du profil. Les teneurs en carbonate de calcium varient entre 11 et 13 % en surface et décroissent en profondeur.

La fraction fine (argile+limon) est prédominante avec un taux de 85 %. Le rapport limon/argile est compris entre 0,12 et 0,2. Le sable fin augmente avec la profondeur et atteint 18 % contre 11 % en surface. Les teneurs en eau du sol varient de 12 à 60 %.

Le taux de matière organique est faible et dépasse peu 1 %. L'humification est médiocre et le rapport C/N est de 9.

La capacité d'échange varie de 57 à 52 mé pour 100 g et le complexe absorbant est sursaturé en bases. Le rapport Na/T augmente avec la profondeur de 20 à 60 %. Les réserves minérales sont très bonnes.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 du sol est 3,3 en surface, et atteint 4 en profondeur.

2.16.2. Eléments traces

Dans ce profil de vertisol, les teneurs des éléments traces sont assez élevées et régulièrement réparties.

Les teneurs en manganèse, plomb, gallium, vanadium, cuivre, zirconium, nickel, cobalt et titane augmentent légèrement avec la profondeur. Cette augmentation ne peut s'expliquer que si l'on fait intervenir certains facteurs pédo-génétiques, intervenant dans la formation de ce profil.

Les teneurs en éléments alcalins et alcalino-terreux de ce profil sont très élevées (exception faite du lithium) comme dans tous les profils de sols hydromorphes étudiés.

Ce profil est très pauvre en zirconium et les éléments : bismuth, molybdène, étain, argent, zinc et césium sont impossibles à déceler.

Les résultats d'analyses sont présentés dans le tableau 16.

TABLEAU 16

VERTISOL

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
BS-281	0-20	76,8	9,8	10,9	0,7	33,1	6,5	1,0	17,3	1,3	8,4
282	20-30	73,5	14,1	10,6	0,2	35,4	6,5	1,2	16,6	1,0	8,3
283	30-80	71,4	8,8	17,6	0,7	38,7	7,2	2,8	17,6	0,5	8,3

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BS-281	700	38	34	<9	<9	<2,6	<2,6	70	17	<2,6	<260	26	30	17	5500	255	<85	255	680	70	680
282	700	40	35	<9	<9	<2,6	<2,6	80	18	<2,6	<260	26	26	18	5200	260	<90	260	720	70	720
283	900	41	55	<9	<9	<2,8	<2,8	90	23	<2,8	<280	46	41	23	6500	280	<90	280	730	75	640

2.17. VERTISOL

Profil – BL 421/423

Situation : Environs de Berevo, près du village Antanandava.
$X = 236$ $Y = 696{,}5$ $Z = 30$ m.

Climat : $P = 1\,090$ mm $T = 27°$.

Unité géomorphologique : Basse vallée de la rivière Manambolo, affluent de la rive gauche de la Tsiribihina.

Végétation : Couverture herbacée peu dense à base de *Cyperus volodioïdes*.

Topographie : Zone place à drainage déficient en contrebas d'une petite « cuesta » basaltique.

Roche mère : Produits de remaniements de grès et marnes du Coniacien-Turonien.

Morphologie

0 à 40 cm : Noir foncé (Munsell à sec : 7,5 YR-5/0, humide : 7,5 YR-3/0). Argileux à argilo-limoneux, structure grumuleuse à polyédrique fine bien développée (« self-mulching »). Quelques graviers calcaires. Fissuration importante, porosité de masse faible, enracinement moyen.

40 à 75 cm : Horizon de transition brun à brun noirâtre (Munsell à sec : 2,5 Y-4/2, humide : 2,5 Y-3/2), avec petites taches blanches calcaires. Argileux à argilo-sableux, structure massive, un peu humide et plastique.

+de 75 cm : Brun-gris à taches jaunes et rouille, petites et nombreuses (Munsell à sec : 2,5 Y-5/2, humide : 2,5 Y-4/2). Sableux fin plus ou moins argileux, structure fondue, peu plastique.

2.17.1. Caractères physiques et chimiques

La réaction du sol est fortement basique, avec un pH compris entre 8,5 et 9,0.

L'horizon de surface contient 60 % d'argile, contre 10 % en profondeur. Le rapport limon/argile varie de 0,2 à 0,5. La fraction sableuse varie de 20 % en surface à 55 - 80 % en profondeur.

Le taux de matière organique est moyen en surface, et il se maintient autour de 1 % dans les horizons sous-jacents. L'humification est médiocre avec un rapport C/N compris entre 16 et 13.

La capacité d'échange est très élevée en surface (66 mé pour 100 g) et décroît en profondeur jusqu'à 25 mé pour 100 g.

Le taux de saturation varie de 80 à 100 %. Le complexe absorbant est très bien pourvu en calcium, magnésium et sodium.

Les réserves minérales sont très bonnes. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 dans l'ensemble du profil est de 4.

2.17.2. Eléments traces

Dans ce profil de vertisol, on observe une accumulation des éléments traces dans l'horizon de surface, sous l'influence probable de la fraction fine et de la matière organique.

Les teneurs en manganèse, plomb, vanadium, cobalt, chrome, alcalins et alcalino-terreux décroissent avec la profondeur.

Ce profil est probablement formé sur un matériel provenant d'une roche mère riche en minéraux lourds, car à partir de 40 cm de profondeur, en même temps que la fraction fine diminue, les teneurs en cuivre, zirconium, nickel, cobalt et titane augmentent pour atteindre les valeurs maximales dans l'horizon de sable (80 %).

Les teneurs en germanium, bismuth, molybdène, étain, argent et zinc sont en dessous de la sensibilité de méthode utilisée.

Les résultats d'analyses sont présentés dans le tableau 17.

TABLEAU 17

VERTISOL

Résultats exprimés en %

Horizons	Profondeur en cm	Argile <0,002 mm	Limon 0,02-0,002 mm	Sable fin	Sable grossier	SiO_2	Fe_2O_3 Total	Fe_2O_3 Libre	Al_2O_3	M.O.	pH
BL-421	0-40	58,2	11,2	15,9	6,3	32,1	9,5	3,3	13,8	2,9	8,5
422	40-75	34,0	6,1	31,8	22,8	16,4	7,4	3,1	7,1	1,1	8,6
423	>75	10,6	5,4	76,2	3,6	14,1	7,0	2,9	6,5	1,1	9,0

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BL-421	2400	24	19	<10	<10	<2,9	<2,9	145	14	<2,9	<285	57	38	24	7000	190	380	380	750	115	665
422	950	19	19	<10	<10	<2,9	<2,9	115	19	<2,9	<290	115	44	15	8000	145	195	195	750	80	390
423	950	19	19	<10	<10	<2,9	<2,9	95	24	<2,9	<290	195	49	29	10000	195	145	145	950	70	390

3. DISCUSSION

3.1. INFLUENCE DE LA ROCHE MÈRE

Les roches éruptives (basalte, granite) et métamorphiques (cipolin, gneiss et roche acide) donnent en moyenne des sols plus riches en éléments traces que les roches sédimentaires (grès, carapace sableuse).

On constate de même que les sols développés sur roches compactes (basalte, cipolin, gneiss et calcaire) sont plus riches que ceux formés sur matériaux meubles ou plus ou moins recimentés (carapace sableuse, grès, cendres volcaniques).

Quant aux sols développés sur alluvions, on constate qu'ils sont plus riches que certains sols, notamment les sols ferrugineux, développés en place sur différentes roches mères.

L'ordre de richesse des sols est le suivant (tableau 18).

TABLEAU 18. — Eléments traces totaux (1)

	Sols ferrallitiques		*Sols ferrugineux*	
1.	———			*Vertisols* (80)
2.	sur basalte	(82)		
3.	sur cipolin	(89)		
4.	sur calcaire	(93)		
5.	———			*Sols hydromorphes* (94)
6.	sur gneiss	(96)		
7.	———		sur calcaire	(99)
8.	sur granite	(100)		
9.	———		sur roche basique	(107)
10.	sur roche métamorphique	(123)		
11.	———		sur schistes	(124)
12.	———		sur matériaux gréseux	(134)
13.	———		sur carapace sableuse	(136)
14.	———		sur grès	(141)
15.	sur cendres volcaniques	(155)		

Les vertisols étudiés présentent des teneurs en éléments traces très élevées.

Ces sols se développent sur des roches mères riches en bases (marnes, basaltes), sont très mal drainés, avec une hydromorphie de surface, présentent un taux d'argile très élevé (jusqu'à 90 %), autant de conditions favorables au maintien des éléments traces fournis par la roche mère et apportés par l'eau.

La composition chimique de la roche mère a donc une influence prédominante sur la distribution des éléments traces dans le sol.

3.2. ROLE DE LA PÉDOGENÈSE

Les sols ferrallitiques sont dans l'ensemble plus riches que les sols ferrugineux. Cette différence devient plus évidente si on compare les différents types de sols sur un même type de roche mère : basalte, roche basique, différentes roches calcaires, ou gneiss et schistes (tableau 18).

Cela est confirmé par les résultats obtenus pour les éléments les plus solubles, donc les plus mobiles : alcalins et alcalino-terreux (tableau 19).

(1) Les chiffres entre parenthèses ont été obtenus de la façon suivante. Sur quinze types de matériaux originels étudiés, on a calculé la teneur moyenne pour les quatorze éléments traces les plus fréquents. Chaque élément est donc affecté d'un coefficient, variant de 1 à 15, qui représente son rang de classement basé sur la valeur moyenne. Le chiffre entre parenthèses représente le total de ces quatorze coefficients. Il permet d'évaluer grossièrement la richesse en éléments traces et de comparer différents profils entre eux.

TABLEAU 19. — Alcalins et alcalino-terreux (Ba, Sr, Rb, Li)

	Sols ferrallitiques		*Sols ferrugineux*	
1.	———		———	*Vertisols* (11)
2.	———		———	*Sols hydromorphes* (21)
3.	———		sur calcaire	(26)
4.	sur basalte	(27)		
5.	sur granite	(27)		
6.	———		sur grès	(27)
7.	sur roche métamorphique	(29)		
8.	———		sur carapace sableuse	(30)
9.	———		sur roche basique	(30)
10.	———		sur schistes	(31)
11.	sur cipolin	(35)		
12.	———		sur matériaux gréseux	(36)
13.	sur calcaire	(44)		
14.	sur gneiss	(45)		
15.	sur cendres volcaniques	(59)		

On observe que les sols ferrugineux présentent des teneurs en ces éléments du même ordre de grandeur, ou légèrement supérieures à celles obtenues pour les sols ferrallitiques, bien que ces derniers soient soumis à un lessivage beaucoup plus intense (pluviométrie moyenne de 1 500 à 2 000 mm pour les sols ferrallitiques, contre 600 à 900 mm pour les sols ferrugineux).

Cette différence est encore plus accentuée si on ne considère que les éléments difficilement solubles donc moins mobiles, c'est-à-dire les métaux lourds (tableau 20).

TABLEAU 20. — Métaux lourds (Mn, Pb, Ga, V, Cu, Ni, Co, Ti, Cr)

	Sols ferrallitiques		*Sols ferrugineux*	
1.	sur calcaire	(40)		
2.	sur gneiss	(45)		
3.	sur cipolin	(47)		
4.	sur basalte	(50)		
5.	———		———	*Vertisols* (58)
6.	———		———	*Sols hydromorphes* (58)
7.	sur granite	(63)		
8.	———		sur roche basique	(65)
9.	———		sur calcaire	(72)
10.	sur roche métamorphique	(81)		
11.	sur cendres volcaniques	(82)		
12.	———		sur schistes	(90)
13.	———		sur matériaux gréseux	(92)
14.	———		sur carapace sableuse	(104)
15.	———		sur grès	(117)

Bien que certains auteurs ARCHER (1963), MacKENZIE (1959), OERTEL (1959), SWAINE et MITCHELL (1960), nient ou sous-estiment le rôle des facteurs pédogénétiques sur la distribution et le devenir des éléments traces, il semble que, pour ces sols de Madagascar, la pédogenèse joue un rôle aussi important que la roche mère ; des facteurs tels que la pluviométrie et la température ont donc une influence marquée.

3.3. CAS DU ZIRCONIUM

On constate que les sols en place, ferrallitique et ferrugineux, présentent des teneurs en zirconium plus élevées que les sols d'apport hydromophes sur alluvions (tableau 21). Cela s'explique par la résistance à l'altération des composés du zirconium, même dans les conditions brutales du climat tropical.

On observe aussi que les sols ferrugineux tropicaux présentent des teneurs en zirconium nettement plus élevées que les sols ferrallitiques. Cela est en contradiction avec les conclusions données ci-dessus à propos de la plus grande richesse des sols ferrallitiques en éléments traces, surtout en éléments peu solubles.

TABLEAU 21. — Zirconium

	Sols ferrallitiques			*Sols ferrugineux*		
1.	———			sur calcaire	(1 250)	
2.	———			sur carapace sableuse	(930)	
3.	———			sur schistes	(635)	
4.	———			sur matériaux gréseux	(505)	
5.	sur basalte	(484)				
6.	sur gneiss	(432)				
7.	sur cipolin	(390)	=	sur grès	(390)	
8.	sur calcaire	(230)				
9.	sur granite	(227)				
10.	———					*Vertisols* (210)
11.	———			sur roche basique	(134)	
12.	sur roche métamorphique acide	(129)				
13.	sur cendres volcaniques	(122)				
14.	———					*Sols hydromorphes* (85)

(entre parenthèses la valeur moyenne du profil en ppm).

En l'absence de résultats précis sur la nature et la composition chimique des roches mères, il est difficile de donner une interprétation acceptable du comportement du zirconium.

Cependant une corrélation entre les teneurs en zirconium et la fraction grossière du sol est à souligner. On observe régulièrement (sauf quelques exceptions : sols formés sur calcaires et sur roche basique), une relation entre le taux de zirconium et l'abondance de la fraction sableuse, ce qui expliquerait que les sols ferrugineux, généralement plus sableux que les sols ferrallitiques, soient plus riches en zirconium.

D'autre part, pour un même type de roche mère (granite) on constate que les teneurs en zirconium sont fonction de l'importance de la fraction grossière du sol.

Reste à savoir par l'analyse morphoscopique des sables si effectivement la majeure partie des composés du zirconium existe sous forme de particules supérieures à 50 μ. Dans ce cas, la solution du problème du zirconium se trouve probablement dans le caractère particulier de l'altération des composés de cet élément dans les conditions locales.

3.4. AUTRES FACTEURS

Le rôle de la matière organique dans la distribution des éléments traces est peu important dans les sols de Madagascar. Même les horizons humifères, avec un taux de matière organique allant jusqu'à 28 % (tableau 4), ne présentent pas d'accumulation nette d'éléments traces.

Toutefois, pour les éléments tels que le manganèse, plomb, vanadium, cuivre, alcalins et alcalino-terreux, quelques corrélations entre les horizons organiques et le taux maximal de ces éléments ont été observés pour les profils de sols en place.

D'autre part, on constate que le pH du sol n'a pas d'action sensible sur la répartition des éléments traces dans le profil.

Par contre, la corrélation entre la fraction fine du profil et les teneurs en éléments traces nous paraît plus évidente. Dans la plupart des profils étudiés, les accumulations des éléments traces correspondent aux horizons très argileux (exception faite, du zirconium, dont le comportement a déjà été discuté ci-dessus).

Mais cette corrélation n'est pas linéaire et, dans les sols présentant des taux d'argile très élevés, on ne peut pas s'attendre à trouver des teneurs en éléments traces proportionnelles. Les vertisols et les sols hydromorphes sur alluvions, avec un taux d'argile exceptionnellement élevé (jusqu'à 90 %) ont des teneurs en éléments traces égales ou légèrement plus élevées que les sols ferrallitiques, qui ont un taux d'argile entre 25 et 30 %.

Les teneurs élevées en éléments traces des sols hydromorphes développés sur alluvions résultent de plusieurs facteurs, qui sont à la base de la classification de ce type de sol. Ces sols sont caractérisés par un engorgement temporaire ou permanent par l'eau, riche en éléments solubles. Ils sont en général peu évolués, avec une texture lourde qui facilite la fixation des éléments apportés par la nappe, sur un matériau d'apport partiellement appauvri lors du transport.

Les sols hydromorphes étudiés sont particulièrement riches en éléments alcalins et alcalino-terreux (tableau 19).

4. CONCLUSION

La comparaison entre les résultats obtenus et ceux présentés par différents auteurs : ARCHER (1963), DOBROVOL'SKIY (1960), KOVDA et VASILEVSKAYA (1958), KRYM (1964), MacKENZIE (1959), MALIÚGA (1944), OERTEL (1959), OERTEL et GILES (1963), PINTA et OLLAT (1961), SWAINE et MITCHELL (1960), VUORINEN (1958), WAHHAB et BHATTI (1958) et WRIGHT, LEVICK et ATKINSON (1955), montre que les sols de Madagascar sont très riches en éléments traces totaux (histogrammes n^{os} 1 et 2, voir annexes).

— La roche mère joue un rôle prédominant par sa composition chimique, mais aussi par sa résistance à l'altération (accumulation relative des minéraux peu altérables dans les sols), sur la distribution et les teneurs en éléments traces. L'ordre des sols développés sur différentes roches mères, établi d'après

les teneurs en éléments traces, correspond à une classification des roches d'après leur richesse chimique (tableau 18).

— Pour les sols ferrallitiques développés en place, on observe une accumulation de manganèse, vanadium, cuivre, nickel, cobalt, titane et chrome et une pauvreté relative en alcalins et alcalino-terreux (tableau 22).

TABLEAU 22 — Comparaison des teneurs moyennes en éléments traces

	Mn	Pb	Ga	V	Cu	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li	Rb
1.	2 470	30	12	147	44	300	100	22	10 950	249	139	631	83	86
2.	940	36	11	75	29	700	40	11	4 500	126	116	678	71	275
3.	980	25	22	112	29	207	57	17	6 000	231	390	920	146	337
4.	1 140	31	37	97	36	85	78	17	5 200	221	131	785	103	296

1 – Sols ferrallitiques (46 échantillons)
2 – Sols ferrugineux tropicaux (32 échantillons)
3 – Vertisols (16 échantillons)
4 – Sols hydromorphes sur alluvions (21 échantillons).

Les sols ferrugineux tropicaux présentent des teneurs en alcalins et alcalino-terreux de même ordre de grandeur, ou légèrement plus élevées, que les sols ferrallitiques, mais par contre, ils sont plus pauvres en métaux lourds.

Leurs teneurs très élevées en zirconium semblent en relation avec l'importance de la fraction granulométrique sableuse (présence du zircon ?).

Les vertisols sont riches en éléments traces et plus particulièrement en alcalins et alcalino-terreux.

Les sols hydromorphes sont plus riches que les sols ferrugineux tropicaux, sauf en zirconium.

Ces différences de teneurs des éléments traces suivant les types des sols étudiés paraissent indiquer une action marquée de la pédogenèse, sous l'influence de facteurs pédoclimatiques variés.

— L'importance relative de ces deux facteurs (roche mère et pédogenèse) est difficile à préciser, par la suite du manque de données exactes sur la composition chimique des roches mères correspondant aux différents profils étudiés.

— La corrélation entre la fraction fine du profil et les teneurs en éléments traces est évidente, mais elle se manifeste probablement en fonction de plusieurs facteurs : nature des argiles, richesse chimique de la roche mère et les facteurs pédogénétiques locaux.

— Les autres facteurs observés : matière organique et réaction du sol, n'interviennent pas sur la distribution des éléments traces d'une façon nette.

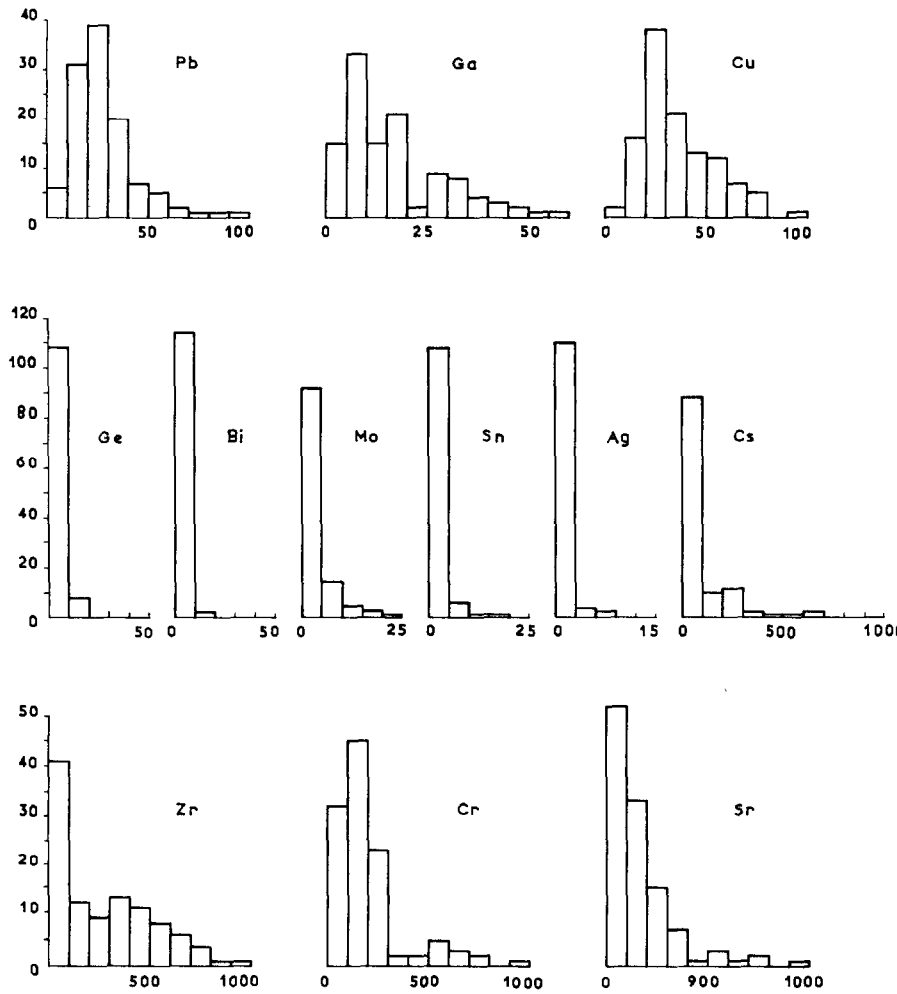
— Bien que les sols malgaches soient généralement riches en éléments traces totaux, il n'est pas possible de prévoir des teneurs en oligo-éléments assimilables par les plantes.

REMERCIEMENTS

Nous profitons de l'occasion pour remercier vivement MM. J. HERVIEU et R. MAIGNIEN de nous avoir permis d'utiliser les échantillons des sols prélevés par eux et exprimons notre reconnaissance plus particulièrement à M. M. PINTA qui nous a aidé par son expérience et ses précieux conseils dans la partie analytique de cette étude. Nous remercions également M. Jean-Michel RIEFFEL, Chargé de Recherches de l'ORSTOM qui a bien voulu nous donner des conseils pour l'interprétation pédologique des résultats obtenus.

ANNEXES

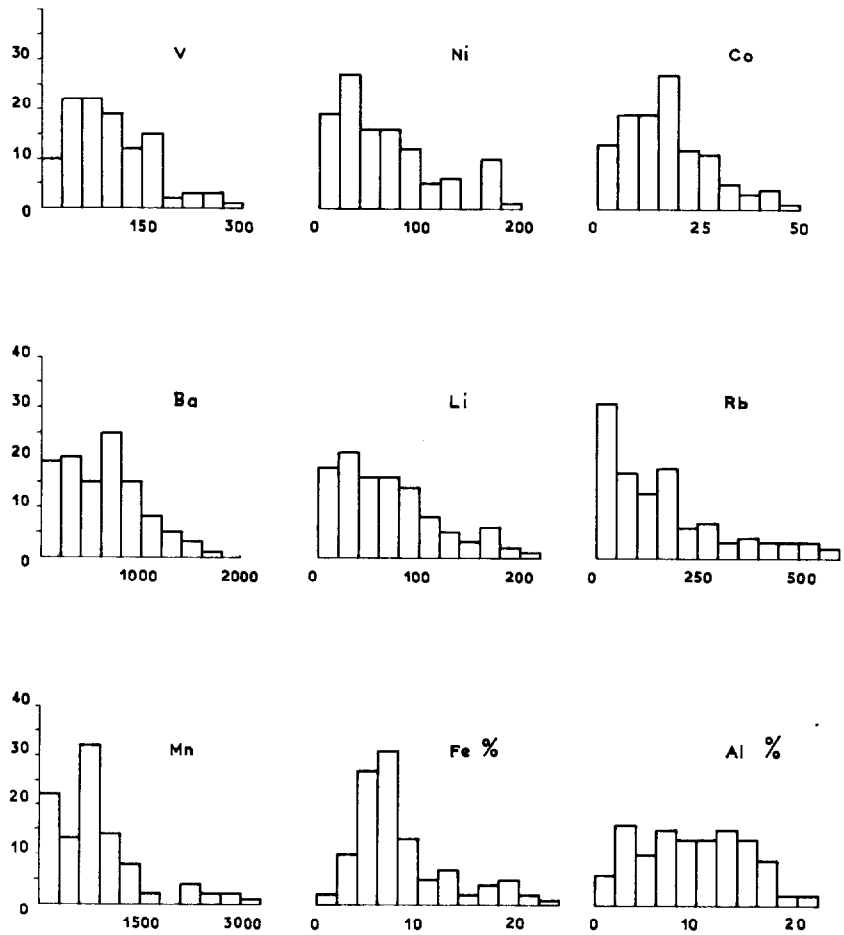
HISTOGRAMME N° 1



Abscisse — teneurs en éléments traces en p.p.m

Ordonnée — nombre d'échantillons

HISTOGRAMME N° 2



Abscisse — teneurs en éléments traces en pp.m.

Ordonnée — nombre d'échantillons

SOL DE TERRASSE INONDABLE PEU ÉVOLUÉ (*profil* 1)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
25d-01	2300	37	47	< 9	< 9	<2,8	<2,8	75	33	<2,8	<280	47	115	19	6000	110	< 90	95	1400	75	280
02	950	33	37	<10	<10	<2,9	<2,9	95	43	<2,9	<290	48	115	14	6000	115	<100	115	1600	105	240
03	400	30	20	<10	<10	<3	<3	50	25	<3	<300	50	20	5	1500	60	<100	100	1200	50	200

SOL DE LEVÉE ALLUVIALE PEU ÉVOLUÉ (*profil* 2)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
4d-31	750	48	38	<10	<10	<2,9	<2,9	95	24	5	<290	290	75	10	5000	190	100	145	1750	250	480
32	750	38	38	<10	<10	<2,9	<2,9	95	29	<2,9	<290	190	75	10	5000	175	100	145	1450	190	290
33	750	38	34	<10	<10	<2,9	<2,9	115	34	<2,9	<290	290	85	14	5000	155	100	95	1350	145	240
34	950	29	34	<10	<10	<2,9	<2,9	115	39	<2,9	<290	390	95	19	6000	115	100	95	800	115	195

SOL DE MANGROVE (*profil* 3)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
BS-71	850	52	78	<9	13	17	22	130	73	9	<260	26	220	26	4300	520	130	260	450	60	130
71	850	44	35	<9	9	9	13	130	60	4	<260	26	170	22	2600	350	130	220	400	52	90
73	850	35	44	<9	<9	2,6	4	130	52	<2,6	<260	26	170	17	2600	260	90	170	300	44	90

VERTISOL (*profil* 4)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
TH- 8	1400	19	14	9	< 9	<2,8	<2,8	95	37	<2,8	<280	560	110	23	6000	190	280	930	1300	140	190
9	750	19	5	10	<10	<2,9	<2,9	48	38	<2,9	<290	380	75	14	5000	140	240	770	950	140	140
10	950	22	14	9	< 9	<2,8	<2,8	95	56	<2,8	<280	470	95	19	6000	190	280	560	1200	110	190
11	850	19	14	10	<10	<2,9	<2,9	95	48	<2,9	<290	575	65	14	5000	145	190	430	950	95	145
12	950	23	14	9	< 9	<2,8	<2,8	95	65	<2,8	<280	370	95	19	6500	230	185	290	950	95	95

SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR SCHISTES (*profil* 5)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
Nol-41	140	19	19	9	< 9	9	<2,9	47	28	<2,9	<290	380	42	5	2800	95	< 90	95	300	140	190
42	90	19	19	9	< 9	9	<2,8	47	37	<2,8	<280	470	65	9	2800	140	< 90	110	350	140	190
43	140	28	28	14	< 9	14	4,6	46	18	<2,8	<280	740	64	9	3700	140	< 90	140	350	140	230
44	140	24	24	10	<10	10	2,9	48	19	<2,9	<290	950	38	5	3800	95	<100	95	300	190	190

SOL FERRUGINEUX TROPICAL SUR GRÈS (*profil* 6)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
YM-229	590	29	10	<10	<10	<2,7	<2,7	19	29	<2,7	<290	290	49	10	3000	78	<100	100	1150	39	390
230	195	20	10	<10	<10	<2,7	<2,7	25	25	<2,7	<290	390	44	10	1500	75	<100	80	700	70	340
231	95	14	10	<10	<10	<2,9	<2,9	29	19	<2,9	<290	390	44	10	970	70	<100	80	750	39	290
232	145	15	10	<10	<10	<2,9	<2,9	19	19	<2,9	<290	490	39	5	3900	90	<100	50	1450	24	490
233	240	20	10	<10	<10	<2,9	<2,9	19	24	<2,9	<290	390	39	3	1500	70	<100	50	700	20	580

SOL FERRALLITIQUE — ROUGE SUR GRANITE (*profil* 7)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
FS-11	1400	47	23	14	<9	14	2,8	28	47	<2,8	<280	650	74	19	4700	185	<95	185	470	47	140
12	450	27	27	14	<9	18	7,3	32	54	<2,7	<270	550	90	23	6400	230	<90	225	540	54	75
13	450	46	46	18	<9	28	4,6	32	46	<2,8	<280	370	74	28	5500	280	<90	275	920	92	90

SOL FERRALLITIQUE SUR CIPOLIN (*profil* 8)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
Nol-21	8300	21	17	17	<8	17	6	125	42	<2,5	<250	500	170	33	3300	165	<80	100	250	165	25
22	16500	17	9	9	<9	9	6	170	70	3,5	<260	260	175	35	4500	130	<85	85	260	350	9
23	13500	23	9	9	<9	9	4,5	135	91	4,6	<270	360	180	36	3600	135	<90	46	900	455	14
24	7500	18	9	9	<9	2,8	2,8	140	64	2,8	<280	460	185	37	4600	140	<90	46	900	275	18
25	2800	14	9	9	<9	<2,8	<2,8	190	56	<2,8	<280	370	140	19	9300	930	<95	95	1400	465	23

SOL FAIBLEMENT FERRALLITIQUE LESSIVÉ SUR GNEISS (*profil* 9)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
PR-10	10550	35	13	<9	<9	9	<2,6	170	44	<2,6	<260	530	175	44	5300	130	<90	175	1050	22	35
11	7200	27	14	<9	<9	9	<2,7	225	72	<2,7	<270	540	180	45	5400	160	<90	160	630	18	36
12	4450	36	18	<9	<9	13	<2,7	225	45	<2,7	<270	620	180	45	7100	180	<90	180	450	22	27
13	5350	53	18	<9	<9	9	<2,7	180	62	<2,7	<270	890	180	45	7100	135	<90	135	350	27	36
14	900	31	13	<9	<9	9	<2,6	130	70	<2,6	<260	530	130	26	7000	175	<90	115	175	35	26
15	700	40	18	<9	<9	9	2,6	130	79	<2,6	<260	700	130	26	6200	160	<90	115	130	31	44
16	550	26	18	<9	<9	13	2,6	175	70	<2,6	<260	620	130	26	6200	130	<90	130	130	26	35
17	250	22	13	<9	<9	9	4,4	175	35	<2,6	<260	520	115	17	5200	130	<90	61	175	22	35
18	150	17	9	<9	<9	9	7	220	44	<2,6	<260	435	85	17	4400	115	<90	70	175	13	26
19	200	35	13	<9	<9	9	8,5	265	35	<2,6	<260	435	85	13	7000	130	<90	105	260	17	26

SOL CALCO-MAGENSIOMORPHE : RENDZINE NOIRE (*profil* 10)

Résultats exprimés en p.p.m.

Horizons	Mn	Pb	Ga	Ge	Bi	Mo	Sn	V	Cu	Ag	Zn	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Cs	Sr	Ba	Li	Rb
TH-27	700	20	12	<8	<8	<2,3	<2,3	390	20	<2,3	<230	235	47	8,8	9350	95	660	625	2180	115	350
28	260	10	7	<7	<7	<2,0	<2,0	330	10	<2,0	<200	100	20	3,5	1300	35	230	200	990	65	130

BIBLIOGRAPHIE

ARCHER (F.C.), 1963. — Trace elements in some Welsh upland soils. *J. Soil Sci.*, vol. 14, n° 1, pp. 144-148.

DOBROVOL'SKIY (V.V.), 1960. — Microelements in several soils and soil forming parent materials of Kazakhstan. *Sov. Soil Sci.*, n° 2, pp. 120-127.

HERVIEU (J.), 1966. — (publié en 1968). Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. Mém. ORSTOM, n° 24, Paris, 466 p.

HERVIEU (J.), NALOVIC (Lj.), 1965. — Dosage des éléments cobalt, nickel, cuivre et zinc et leur distribution dans quelques types de sols de Madagascar. Cah. ORSTOM, *sér. Pédol., III*, n° 3, pp. 237-267.

KOVDA (V.A.), VASIL'YEVSKAYA (V.D.), 1958. — A study of the minor element contents in soils of the Amur river area. *Sov. Soil Sci.*, n° 12, pp. 1369-1377.

KOVDA (V.A.), YAKUSHEVSKAYA (J.V.), TIURINKANOV (A.N.), 1958. — The problem of microelements in the soil of the U.R.S.S., *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R.*, ser Biolog., n° 4, pp. 562-570.

KRYM (I. Ya), 1964. — Microelements in the soils of the Ural. (Sakurara) interfluve. *Sov. Soil Sci.*, n° 10, pp. 1069-1073.

MACKENZIE (R.M.), 1959. — Trace elements in some south Australian terra rossa and rendzina soils. *Aust. J. agric. Res.*, vol. 10, n° 1, pp. 52-57.

MALIUGA (D.P.), 1944. — On the problem of cobalt, nickel and copper content of soils. *C.R. Acad. Sci.*, U.R.S.S., vol. XLIII, n° 1, pp. 207-210.

MITCHELL (R.L.), 1955. — Trace elements in chemistry of the Soil. A.C.S. monograph, n° 126, Reinhold, New York, 235 p.

MITCHELL (R.L.), 1960. — Trace elements in Scottish soils. *Proc. Nutrit. Soc.*, vol. 19, n° 2, pp. 148-154.

NICOLLS (K.D.), 1956. — Pedological aspects of trace-elements distribution. *J. Aust. Inst. agric. Sci.*, vol. 22, n° 1, pp. 45-47.

OERTEL (A.C.), 1959. — Estimation of the trace element status of large areas of soil. *Aust. J. agric. Res.*, vol. 10, n° 1, pp. 58-70.

OERTEL (A.C.), GILES (J.B.), 1963. — Trace elements contents of some Queensland soils. *Aust. J. Soil Res.*, vol. 1, pp. 215-222.

PINTA (M.), 1962. — Recherche et dosage des éléments traces. Dunod, Paris, 736 p.

PINTA (M.), OLLAT (C.), 1961. — Recherches physico-chimiques des éléments traces dans les sols tropicaux. Etude de quelques sols du Dahomey. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 25, pp. 14-23.

SWAINE (D.J.), 1955. — The trace element content of soils. *Commonw. Bur. Soil Sci. Techn. Commun.*, n° 48. Farnham Royal, 157 p.

SWAINE (D.J.), MITCHELL (R.L.), 1960. — Trace-element distribution in soil profiles. *J. Soil Sci.*, vol. 11, n° 2, pp. 347-368.

VUORINEN (J.), 1958. — On the amounts of minor elements in Finnish soils. *J. sci. agric. Soc. Finland*, vol. 30, n° 1, pp. 30-34.

WAHHAB (A.), BHATTI (H.M.), 1958. — Trace-element status of same west Pakistan soils. *Soil. Sci.*, vol. 86, pp. 319-323.

WRIGHT (J.R.), LEVICK (R.), ATKINSON (H.J.), 1955. — Trace elements distribution in virgin profils representing four great soil groups. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 19, n° 3, pp. 340-344.