

DOSAGE DES ÉLÉMENTS Cobalt, Nickel, Cuivre et Zinc ET LEUR DISTRIBUTION DANS QUELQUES TYPES DE SOLS DE MADAGASCAR

par

J. HERVIEU * et Lj. NALOVIC **

PLAN

1 - METHODES CHIMIQUES

- 1.1 - Mise en solution du sol
- 1.2 - Dosage du cobalt
- 1.3 - Dosage du nickel
- 1.4 - Dosage du cuivre
- 1.5 - Dosage du zinc

2 - CARACTERES DES PROFILS ETUDIES ET TENEURS EN OLIGO-ELEMENTS

- 2.1 - Sol peu évolué de terrasse inondable
- 2.2 - Sol peu évolué de levée alluviale
- 2.3 - Sol de mangrove
- 2.4 - Vertisol
- 2.5 - Sol ferrugineux tropical sur schistes
- 2.6 - Sol ferrugineux tropical sur grès
- 2.7 - Sol ferrallitique sur granite
- 2.8 - Sol ferrallitique brun-rouge sur cipolin
- 2.9 - Sol rouge faiblement ferrallitique lessivé sur gneiss
- 2.10 - Sol calcomagnésimorphe

3 - CONCLUSIONS

- 3.1 - Teneurs en oligo-éléments
- 3.2 - Comparaison des teneurs en oligo-éléments dans les types de sols analysés
- 3.3 - Quelques résultats obtenus dans d'autres pays

4 - BIBLIOGRAPHIE

* Maître de recherches au Centre O.R.S.T.O.M. de Tananarive.

** Chef du Laboratoire des sols au Centre O.R.S.T.O.M. de Tananarive.

La détermination des oligo-éléments dans les sols malgaches est intéressante du fait qu'il n'existe pratiquement pas de résultats dans ce domaine à Madagascar.

Nos travaux ont porté sur la détermination des teneurs en Cobalt, Nickel, Cuivre et Zinc dans quelques profils types de sols malgaches, sur la variation des teneurs entre le sol et la roche-mère, et sur la corrélation éventuelle entre ces teneurs et les différentes caractéristiques des horizons d'un profil.

Nous donnerons d'abord une brève description des méthodes utilisées pour ces dosages, puis nous décrirons la morphologie et les caractères physiques et chimiques des profils étudiés, en mentionnant plus particulièrement les résultats obtenus pour les oligo-éléments.

1 - MÉTHODES CHIMIQUES

Les possibilités techniques du laboratoire de Chimie des Sols du Centre O.R.S.T.O.M. de Tananarive nous ont permis d'utiliser les méthodes colorimétriques pour les dosages de ces éléments et d'effectuer des mesures avec le spectromètre Beckman, (modèle DU).

Les dosages colorimétriques, malgré de nombreux inconvénients, nous ont donné satisfaction au point de vue résultats. Le procédé analytique convenablement mené permet une exactitude de 90 à 95 %. Les solutions des réactifs ont été purifiées par l'extraction à la dithizone et l'eau distillée deux fois dans le verre Pyrex. Les réactifs utilisés pour le dosage spectrographique sont très purs ("Merck"). Les analyses ont été faites sur des séries de cinq échantillons avec un blanc contenant 100 μ g des éléments Co, Ni, Cu et Zn.

1.1 - Mise en solution du sol

Un gramme du sol, finement pulvérisé, séché à l'étuve à 105°C a été intimement mélangé avec 4 g de carbonate de sodium dans un creuset de platine, le mélange a été recouvert par un gramme de carbonate et chauffé dans un four électrique, d'abord modérément, jusqu'à la déshydratation du produit, et ensuite jusqu'à fusion et dégagement complet du gaz carbonique. Encore chaud, le creuset a été mis dans un bécher avec 50 ml d'eau redistillée et on a ajouté 10 ml d'acide chlorhydrique concentré. Le bécher a été porté sur la plaque chauffante jusqu'à dissolution complète ; la silice a été insolubilisée par évaporation à sec et reprise par l'acide chlorhydrique. La solution a été filtrée et jaugée dans une fiole de 100 ml. Cette solution nous a servi pour le dosage des éléments Co, Ni, Cu et Zn et nous l'appelons la Solution A.

1.2 - Dosage du Cobalt

Pour le dosage du cobalt, notre choix a porté sur la méthode au sel nitroso-R (1-nitroso-2-naphtol 3 : 6-disulphonate de sodium). Ce sel donne, en milieu acide dilué, un complexe stable coloré en rouge, absorbant optiquement dans la partie bleue et violette du spectre (une des réactions les plus sensibles pour le Cobalt: 0,05 μ g/ml (ALMOND 1952, AUBRY et LAPLACE 1951, GUERIN 1956, HALL et YOUNG 1950, PINTA 1962, SANDELL 1952).

1.2.1 - SÉPARATION DU COBALT

Parmi les réactifs proposés par plusieurs auteurs pour complexer le fer et l'aluminium, nous

avons utilisé du citrate d'ammonium à 10 % qui nous a donné des résultats satisfaisants surtout en présence de fer (> 5%). En cas d'apparition d'un précipité d'hydroxyde de fer et d'alumine qui risque de retenir une partie du cobalt, nous avons effectué une filtration du résidu et une fusion répétée avec 0,2 g de carbonate de sodium.

L'interférence des traces d'éléments gênants, tels que Fe, Cu, Ni, etc.. a été supprimée par une extraction totale du cobalt par la solution de dithizone à 0,01 % dans le tétrachlorure de carbone à pH 8,5.

1.2.2 - CHOIX DE LA LONGUEUR D'ONDE

Nous avons utilisé la longueur d'onde de 420 m μ pour laquelle l'absorption du complexe coloré est maximale. L'interférence due par excès du réactif qui a une forte absorption, entre 400 et 500 m μ (maximum à 415 m μ) peut toujours perturber le dosage et, malgré la suggestion de plusieurs auteurs d'utiliser la longueur d'onde de 560 m μ , nous avons choisi celle de 420 m μ à cause de sa plus grande sensibilité.

1.2.3 - MODE OPÉRATOIRE

Une prise de la solution A (entre 1 et 10 μ g du Co) est additionnée avec 10 ml de citrate d'ammonium à 10 % et amenée au pH mètre à pH 8,5 en ajoutant une quantité convenable d'ammoniaque concentrée. La solution mise dans une ampoule à décanter est agitée avec 5 ml de solution de dithizone à 0,01 % dans du tétrachlorure de carbone pendant une minute. L'opération est répétée jusqu'à ce que la dithizone, après agitation, reste verte. Les phases organiques sont transvasées dans une autre ampoule et agitées quinze secondes avec 5 ml d'eau et 3 gouttes d'ammoniaque et puis évaporées sous vide à sec, reprises par 0,25 ml d'acide perchlorique à 70 %, chauffées jusqu'à évaporation de l'acide et ensuite à 200-250°C. Le résidu, repris par 5 ml d'eau, 0,25 HCl concentré et deux-trois gouttes d'acide nitrique, est alors prêt pour le dosage.

1.2.4 - DOSAGE COLORIMÉTRIQUE

L'extrait est additionné de 0,5 ml (pipette de précision) d'une solution de sel nitroso-R à 0,2 % (conservée à l'obscurité). Un pH de 6 environ est nécessaire pour la formation du complexe Cobalt-sel nitroso-R : il est obtenu par addition de 1 g d'acétate de sodium hydraté.

Après dissolution complète de l'acétate de sodium, l'extrait est amené à pH voisin de 7 (stabilité du complexe Co-sel nitroso-R entre pH 6-8) à l'aide d'une solution de potasse à 10 % jusqu'à la coloration de la Phénolphthaléine et quelques gouttes d'acide chlorhydrique 0,5 N jusqu'à décoloration. La solution est mise en ébullition pendant une minute, puis additionnée d'1 ml d'acide nitrique concentré et remise en ébullition une minute, afin de stabiliser le complexe Co-sel nitroso-R, détruire les complexes composés interférents : Ni-sel nitroso-R (brun) et Cu-sel nitroso-R (vert) et finalement diminuer l'intensité de couleur due à l'excès de réactif. L'extrait est refroidi à l'obscurité, jaugé à 25 ml, comparé aux solutions étalons ayant subi le même traitement.

1.3 - Dosage du Nickel

Le dosage du nickel a été fait en utilisant la méthode à la diméthylgluoxime. Le nickel forme avec la diméthylglyoxime, en milieu oxydant, et à pH basique un complexe rouge-brun.

Le composé formé a été mesuré spectrophotométriquement dans la région bleue ou violette du spectre (AUBRY et LAPLACE, 1951, PINTA, 1962, SANDELL, 1952).

1.3.1 - SÉPARATION DU NICKEL

La réaction des éléments gênants tels que Fe, Co, Cr, Cu, etc., a été diminuée ou complètement supprimée par action d'une solution de citrate de sodium (le fer et l'alumine sont complexés) et par extraction au chloroforme (le fer et le chrome ne sont pas extraits). L'extraction du complexe Ni-diméthylglyoxime par le chloroforme constitue un excellent procédé pour la séparation du nickel des éléments interférents. Seul le cuivre accompagne le nickel dans l'extraction par le chloroforme. La phase chloroformique a été lavée par l'eau ammoniacale pour éliminer le cuivre.

1.3.2 - CHOIX DE LA LONGUEUR D'ONDE

Les extraits ont été colorimétrés à 530 m μ . A ces longueurs d'onde, l'absorption est plus stable et l'interférence du fer éventuellement encore présent est plus faible.

1.3.3 - MODE OPÉRATOIRE

Une prise de solution A (entre 5 et 100 μ g de Ni) a été additionnée avec 5 ml de citrate de sodium à 10 % et une quantité convenable d'ammoniaque concentrée pour obtenir un pH de 7,5 (au pH mètre).

La solution a été placée dans une ampoule à décantier, 2 ml de la solution alcoolique de diméthylglyoxime à 1 % sont ajoutés ainsi que 3 ml de chloroforme.

L'ampoule est fortement agitée pendant trente secondes et la phase organique séparée dans une nouvelle ampoule à décantier. Cette opération est répétée trois fois et les phases organiques réunies lavées par 5 ml d'ammoniaque à 2 % et à deux reprises par 6-8 ml d'acide chlorhydrique à 0,5 N.

La phase chlorhydrique contenant du nickel est transvasée dans une fiole jaugée de 25 ml.

1.3.4 - DOSAGE COLORIMÉTRIQUE

L'extrait chlorhydrique est additionné de dix gouttes d'eau saturée en brome et abandonné dix à quinze minutes. Une quantité d'ammoniaque est ajoutée jusqu'à décoloration suivie par un excès de 1 ml.

Après refroidissement (au-dessous de 30°) on ajoute 1 ml de solution alcoolique à 2 % de diméthylglyoxime et on complète à 25 ml.

Les analyses sont le plus rapidement possible comparées spectrophotométriquement avec les solutions étalons, préparées à partir d'une solution de chlorure de nickel dans l'acide chlorhydrique à 0,5 N et traitées comme ci-dessus.

1.4 - Dosage du Cuivre

La méthode utilisée pour le dosage du cuivre est celle à la dithizone. La dithizone forme, avec le cuivre, en milieu acide minéral dilué (pH 3,5) un complexe coloré en rouge-brun (Keto-complex) absorbant optiquement à 510 m μ .

Nous avons mesuré optiquement la dithizonate de cuivre en présence d'excès de dithizone non combinée (**mixed color method**). Nous avons également essayé de détruire l'excès de dithizone en utilisant un lavage avec l'ammoniaque diluée (**mono-color method**), mais les résultats obtenus

n'ont pas été satisfaisants à cause des transformations de Keto-forme de dithizonate en enol-forme coloré en brun (AUBRY et LAPLACE, 1951, CHAPMAN et PRATT, 1961, PINTA, 1962, SANDELL, 1952).

1.4.1 - SÉPARATION DU CUIVRE

L'interférence des éléments : Ag, Au, Hg, Pd et Bi peut perturber les dosages à cause des réactions identiques avec la dithizone en milieu acide. L'ion ferrique peut également perturber le dosage s'il est présent en quantité appréciable (le fer ferrique oxyde la dithizone).

Pour séparer le cuivre des éléments gênants, nous avons procédé à une extraction préliminaire par une solution de dithizone à 0,01 % dans le tétrachlorure de carbone. Le fer et l'alumine sont complexés par la solution de citrate de sodium à 10 %. L'extraction est faite à pH 3,5, ce qui nous a donné des résultats satisfaisants.

1.4.2 - CHOIX DE LA LONGUEUR D'ONDE

La méthode à coloration mixte que nous avons utilisée, nous a laissé le choix de la longueur d'onde entre 510 m μ (filtre vert - dithizonate de cuivre) et 625 m μ (filtre rouge - excès de réactif dithizone).

La longueur à 510 m μ nous a donné de meilleurs résultats à cause d'une plus grande stabilité de la courbe d'étalonnage.

1.4.3 - MODE OPÉRATOIRE

Une partie aliquote de la solution A (entre 1 et 10 μ g de cuivre) est mise dans un bécher de 100 ml. Cinq ml de solution de citrate de sodium à 10 % sont ajoutés et le pH ajusté à 3,5 au pH mètre par l'ammoniaque concentrée. La solution placée dans une ampoule à décanter est agitée pendant deux minutes avec 5 ml de dithizone à 0,01 % dans le tétrachlorure de carbone. L'opération est répétée jusqu'à ce que la dernière partie de dithizone reste verte. Les phases organiques sont réunies et lavées par quelques ml d'ammoniaque diluée (pour éliminer le fer) et ensuite deux fois avec 10 ml d'acide chlorhydrique 0,02 N (pour récupérer les traces de zinc éventuellement présentes).

Les phases aqueuses sont réunies et lavées par quelques gouttes de tétrachlorure de carbone. Pour le dosage de zinc, nous avons utilisé cette partie aliquote et nous l'appelons la solution B.

L'extrait organique est évaporé dans un bécher de 100 ml à sec, repris par 0,5 ml d'acide sulfurique et 0,2 ml d'acide perchlorique, puis le tout chauffé jusqu'à évaporation complète - 250°.

Le résidu refroidi et dissous par 10 ml d'eau est additionné de quelques gouttes d'ammoniaque pour neutraliser la solution (méthyl-orange comme indicateur) et une goutte d'acide sulfurique 6 N, puis transvasé et jaugé dans une fiole de 25 ml.

1.4.4 - DOSAGE COLORIMÉTRIQUE

Une prise de la solution aliquote (entre 1 et 5 μ g de cuivre) est agitée dans une ampoule à décanter pendant une minute avec 10 ml (burette de précision) de dithizone à 0,001 % dans du tétrachlorure de carbone.

Si la phase organique est colorée en rouge foncé, la quantité de cuivre peut être trop grande. Dans ce cas, nous avons répété l'opération avec une prise de la solution de cuivre plus petite. La phase organique est ensuite directement prélevée et spectrophotométrée à 510 m μ en le comparant avec les solutions étalons traitées comme précédemment.

1.5 - Dosage du Zinc

Pour le dosage du zinc, nous avons utilisé également la méthode à la dithizone. Le zinc donne avec la dithizone en milieu faiblement alcalin (pH 8,3) ou faiblement acide (pH 4,75) un complexe coloré en rouge clair (Keto-forme de dithizone), soluble dans le tétrachlorure de carbone et le chloroforme et absorbant optiquement à 530 m μ .

Nous avons utilisé la méthode à coloration mixte, comme pour le dosage du cuivre, et mesuré optiquement le dithizonate de zinc en présence d'excès de dithizone. La réaction a été faite en milieu faiblement alcalin (CHAPMAN et PRATT 1961, PINTA 1962, SANDELL 1952).

1.5.1 - SÉPARATION DU ZINC

Les ions Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Bi, Sn, Pb et Cd donnent également des complexes colorés avec la dithizone et peuvent perturber les dosages. Le zinc a été extrait à partir de la solution B, laquelle était libérée de la présence du cuivre. Le fer et l'alumine ont été également complexés par le citrate de sodium à 10 %.

L'extraction a été faite à pH 8,3 par la dithizone à 0,01 % dans le chloroforme et le zinc séparé des éléments gênants dans l'acide chlorhydrique 0,02 N. Pour complexer les traces des éléments interférents éventuellement encore présents, une solution de diethyldithiocarbamate à 0,2 % a été utilisée.

1.5.2 - CHOIX DE LA LONGUEUR D'ONDE

La mesure optique du complexe de dithizonate de zinc a été faite à 530 m μ (filtre vert) pour la même raison que dans le dosage du cuivre.

1.5.3 - MODE OPÉRATOIRE

La solution B (après la séparation du cuivre) a été amenée au pH mètre à pH 8,3 en ajoutant l'ammoniaque concentrée. La solution a été extraite par 10 ml d'une solution de dithizone à 0,10 % dans du chloroforme, et lavée avec quelques ml de chloroforme.

Les phases organiques contenant le dithizonate de zinc et les éléments gênants sont placés dans une ampoule à décanter et agités pendant deux minutes avec 40 ml d'acide chlorhydrique 0,02 N.

La phase chlorhydrique contenant le zinc est jaugée dans une fiole de 50 ml.

1.5.4 - DOSAGE COLORIMÉTRIQUE

Une partie aliquote (entre 1 et 5 μ g de zinc) est placée dans un bécher de 100 ml, additionnée de 5 ml de citrate d'ammonium à 25 % et amenée à pH 8,3 (au pH mètre) en ajoutant de l'ammoniaque concentrée.

La solution est transvasée dans une ampoule à décanter ; 10 ml de dithizone à 0,001 % de chloroforme et 10 ml de dithiocarbamate sont ajoutés, le tout est fortement agité pendant deux minutes.

Si la phase chloroformique est colorée en rouge-violet (quantité de zinc trop grande), le dosage est refait avec une prise de la solution de zinc plus petite. La phase chloroformique directement prélevée est rapidement passée au spectrophotomètre en évitant de l'exposer à la lumière

directe. Les solutions d'étalonnage sont préparées à partir de l'oxyde de zinc dans l'acide chlorhydrique 0,02 N et traitées comme les échantillons.

2 - CARACTÈRES DES PROFILS ÉTUDIÉS ET TENEURS EN OLIGO-ÉLÉMENTS

2.1 - Sol peu évolué de terrasse inondable

Profil n° 1

Unité alluviale	Plaine deltaïque du Mangoky.
Situation	X = 112,6 Y = 504,5 Z = 11 m ; près du village Tsianihy.
Végétation	Brousse arbustive clairsemée à <i>Salvadora angustifolia</i> (Sasavy) dominant, <i>Tamarindus indicus</i> (Kily), <i>Hyphaena Shatan</i> (Satra).

2.1.1 - MORPHOLOGIE

Plages de sol nu et structure à tendance poudreuse. Litière de feuilles sèches.

0 - 35 cm	Brun gris (Munsell à sec : 10 YR 5/1, humide 10 YR 3/2) ; argileux à argilo-sableux, finement crevasé ; bien structuré, grumeleux à prismatique irrégulière ; enracinement important ; cohésion assez forte ; porosité élevée.
35 - 80 cm	Brun jaune (Munsell à sec 10 YR 6/2, humide 10 YR 2/3) ; argilo-sableux, fins cristaux de gypse peu abondants ; structure massive, secondairement polyédrique grossière ; enracinement plutôt faible ; cohésion assez forte.
+ 80 cm	Jaunâtre (Munsell à sec 10 YR 7/3, humide 10 YR 5/3) ; un peu humide ; sableux, particulaire, avec traces d'efflorescences blanchâtres, devient en profondeur limono-sableux fin et micacé jusqu'à la nappe atteinte vers 2 m.

2.1.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

La réaction du sol est neutre à faiblement alcaline en profondeur : les valeurs du pH varient entre 7,4 et 7,8. Il existe une accumulation saline assez importante dans l'horizon moyen (conductivité de l'extrait salin au 1/10 supérieure à 2 mmhos) et les autres horizons sont un peu salés (0,3 à 0,5 mmhos). La nappe est d'ailleurs fortement minéralisée : plus de 15 mmhos et très riche en chlorure de sodium, alors que dans le sol et en particulier dans l'horizon moyen c'est le sulfate de calcium qui domine.

La teneur en argile varie entre 35 et 46 % dans les horizons supérieurs avec un rapport limon/argile de 0,5 à 0,6. Cette teneur est extrêmement faible dans l'horizon profond très sableux (environ 60 % de sable fin).

Le taux de matière organique atteint environ 3 % dans l'horizon supérieur et celle-ci est assez bien humifiée. Le rapport C/N est voisin de 12.

Le complexe absorbant est bien pourvu en éléments échangeables, surtout en calcium, et la capacité d'échange assez élevée (25 à 35 méq. pour 100 g dans les horizons supérieurs).

Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est voisin de 3, la fraction argileuse est constituée surtout par de la montmorillonite, en association avec un peu de kaolinite et des hydroxydes.

2.1.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 1)

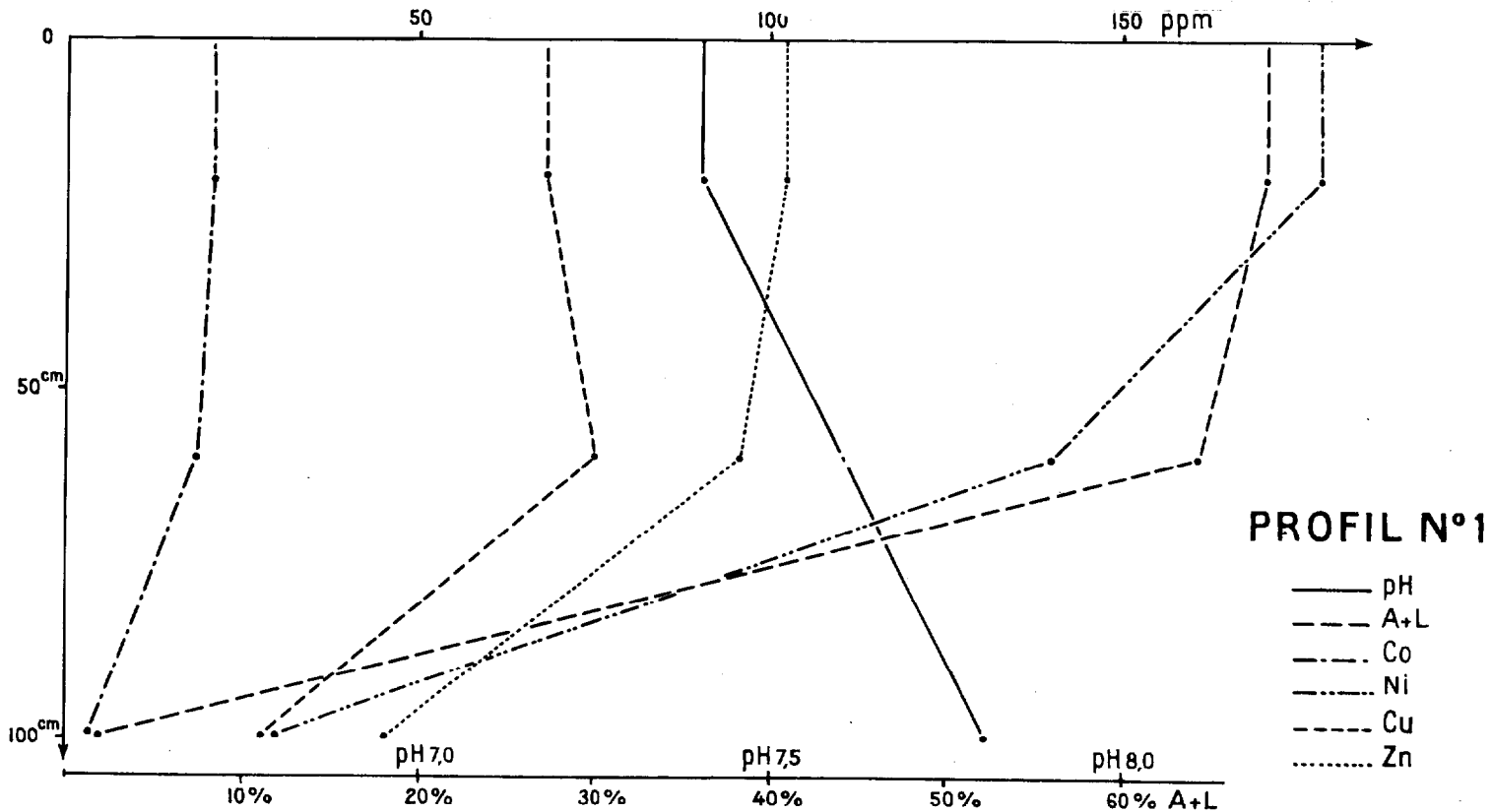
Dans ce profil de sol alluvial, l'hétérogénéité texturale des horizons a pour conséquence de fortes variations dans les teneurs en oligo-éléments. Ces teneurs s'abaissent fortement quand la texture devient très sableuse (cas de l'horizon profond).

L'influence de la matière organique dans l'horizon de surface n'est pas nette, bien que les teneurs en oligo-éléments y soient légèrement supérieures.

La répartition de ces teneurs dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
20	21	178	68	102
60	18	140	75	95
100	3	29	28	45

La présence de sels ne semble pas déterminante par rapport au profil suivant (milieu neutre).



2.2 - Sol peu évolué de levée alluviale

Profil n° 2

Unité alluviale Bas Mangoky ; plaine deltaïque, près du village Tananadava.

Situation X = 122,9 ; Y = 486,1 ; Z = 29,5 m

Végétation Prairie à *Cynodon Dactylon*

2.2.1 - MORPHOLOGIE

0 - 20 cm	Beige (Munsell à sec 10 YR 6/2, humide 10 YR 4/2) ; sableux fin-limoneux ; structure faiblement nuciforme à tendance particulaire ; cohésion faible, enracinement moyen.
20 - 40 cm	Beige jaunâtre (Munsell à sec 10 YR 6/3, humide 10 YR 3/4) ; sableux fin-limoneux ; particulaire ; sans cohésion ; enracinement très faible.
40 - 60 cm	Beige grisâtre (Munsell à sec 10 YR 6/2, humide 10 YR 3/3) ; limono-argileux sableux fin à structure nuciforme ; cohésion moyenne ; enracinement très faible ; sol peu évolué enterré.
60 - 100 cm	Beige grisâtre (Munsell à sec 10 YR 6/2) ; argilo-sableux fin ; structure nuciforme à tendance polyédrique ; cohésion moyenne ; enracinement très faible ; sol peu évolué enterré.

2.2.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

La réaction du sol est modérément alcaline (pH 7,5 à 7,9). Les teneurs en sels solubles sont faibles.

Dans la texture le sable fin domine : plus de 75 % en surface contre 40 % en profondeur. Parallèlement, le taux d'argile augmente avec la profondeur de 10 à plus de 30 %. Le rapport limon/argile est assez élevé, compris entre 0,6 et 1,2. Il y a très peu de sable grossier.

Le taux de matière organique est peu élevé mais se maintient entre 1,2 et 1,6 dans les horizons supérieurs (0,7 % dans l'horizon le plus profond). L'humification est médiocre et le rapport C/N varie entre 12 et 16.

Le complexe absorbant est bien pourvu en éléments échangeables (surtout en Ca et Mg), la capacité d'échange moyenne à élevée, le pourcentage de saturation supérieur à 80 %.

Les réserves minérales sont bonnes.

La fraction argileuse dans l'horizon de surface est constituée en grande partie par de la montmorillonite. Dans les horizons profonds on observe une association montmorillonite-kaolinite.

2.2.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 2)

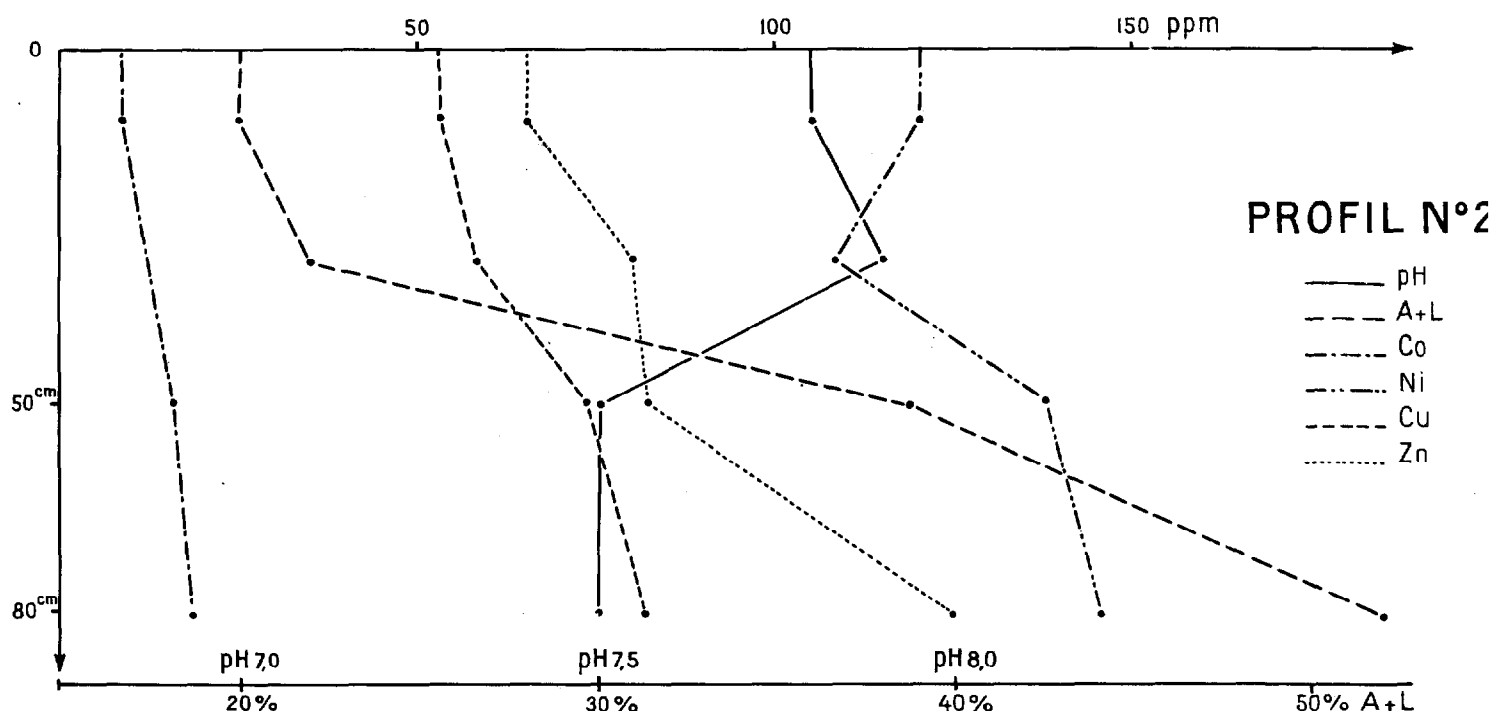
Là encore, dans ce type de sol peu évolué, on observe une certaine corrélation entre la teneur en éléments fins (argile + limon) et celle en oligo-éléments dont les quantités augmentent avec la profondeur.

La répartition de ces teneurs dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
10	8	120	53	65
30	12	108	58	80
50	18	146	81	125

Ces teneurs sont sensiblement du même ordre de grandeur que dans le profil précédent.

Rappelons que le bassin versant du Mangoky (un des plus vastes de l'île) s'étend à la fois dans le socle ancien et la couverture sédimentaire. Par conséquent, les sols alluviaux récents de la basse plaine deltaïque peuvent être considérés comme représentatifs des produits récents de l'érosion sur le versant occidental malgache.



2.3 - Sol de mangrove

Profil n° 3

Unité alluviale	Delta interne de la Betsiboka
Situation	X = 391,5 ; Y = 1119 ; Z = 2 m estuaire de Mahabo
Végétation	<i>Avicennia officinalis</i> en peuplement pur (Afiaty).

2.3.1 - MORPHOLOGIE

0 - 60 cm	Brun-jaune (Munsell humide 2,5 YR 4/4) ; humide ; riche en grosses racines et pneumatophores ; massif, plastique.
60 - 80 cm	Brun-jaune (Munsell humide 5 YR 4/6) ; à taches grises diffuses ; humide et plastique.
80 - 150 cm	Brun-jaune (Munsell humide 2,5 YR 5/4) à taches diffuses plus nombreuses ; très humide et plastique ; nappe vers 0,90 m (marée basse).

2.3.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

La réaction du sol est neutre, à l'état naturel et après séchage à l'air, dans tout le profil. Les teneurs en sels solubles sont très élevées : la conductivité de l'extrait salin passe de 1,2 à 3,8 mmhos de la surface en profondeur.

Forte prédominance du chlorure de sodium.

La nappe est très fortement minéralisée (36 mmhos).

Le taux d'argile atteint 55 % dans l'ensemble du profil et le rapport limon/argile varie autour de 0,4. Il y a moins de 0,5 % de sable grossier. La teneur en eau du sol en place varie entre 50 et 75 %.

Le taux de matière organique, en dehors des racines, est faible (moins de 1,5 %) avec un rapport C/N variant entre 9 en surface et 12 en profondeur.

Le complexe absorbant a une capacité d'échange assez élevée et est sursaturé en sodium. Le rapport Mg/Ca est supérieur à 1.

Les réserves minérales sont moyennes à élevées.

La fraction argileuse contient de la kaolinite en quantité dominante associée à un peu de montmorillonite et d'hydroxydes.

2.3.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 3)

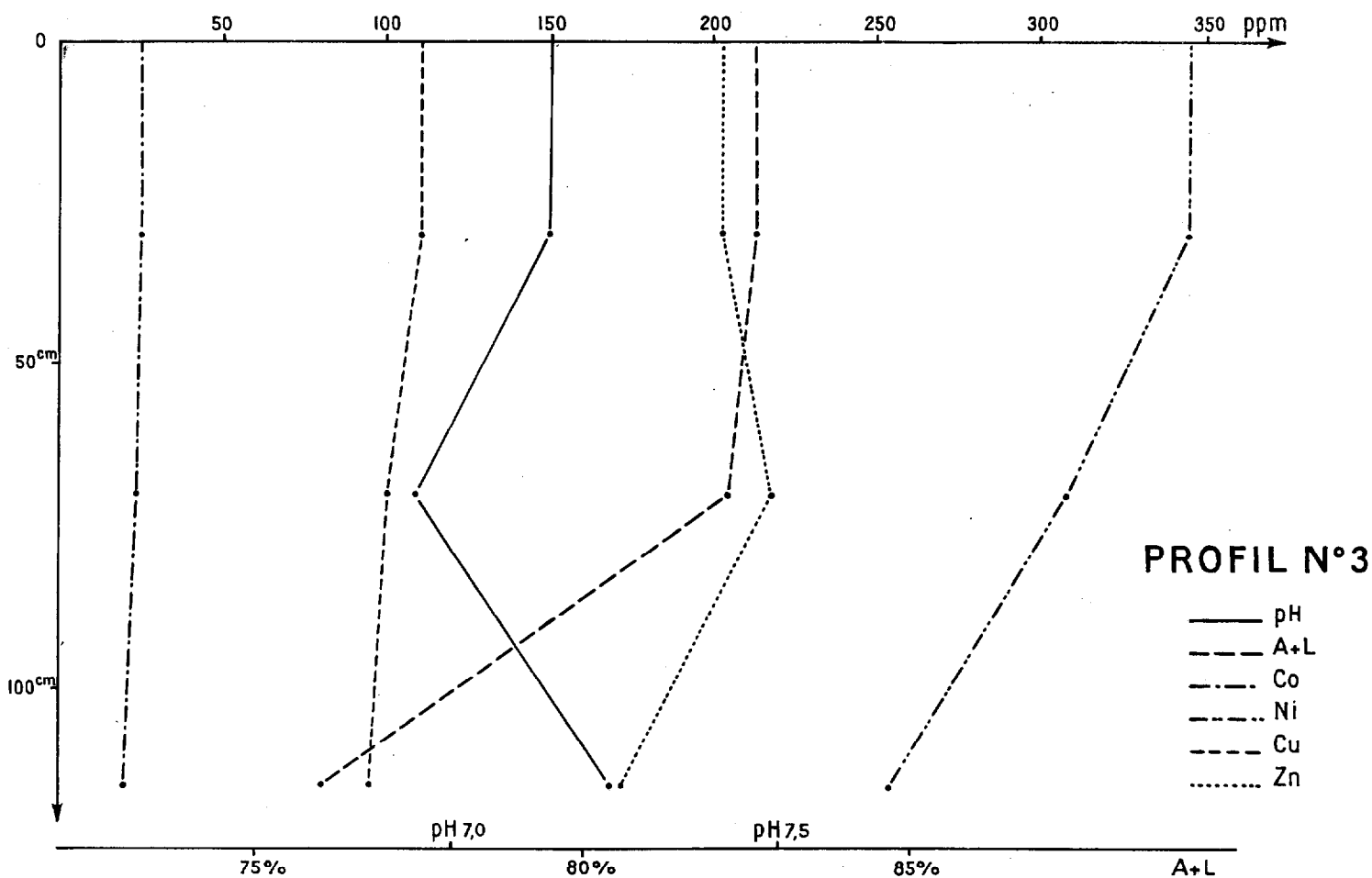
On observe dans ce type de sol des teneurs élevées pour les oligo-éléments dosés. Ce fait semble pouvoir être lié d'une part à l'abondance des éléments fins (76 à 82 % d'argile + limon), d'autre part aux conditions particulières du milieu fluvio-marin.

Pour chaque élément dosé les teneurs varient relativement peu dans le profil et ont la répartition suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
30	25	345	110	203
70	23	308	100	218
115	19	253	94	170

Par rapport aux sols alluviaux peu évolués, on voit qu'ici ce sont les teneurs en Ni et Zn qui augmentent dans les plus fortes proportions. Cette augmentation est moins prononcée pour le cuivre, plutôt faible pour le cobalt, compte-tenu de la variation des teneurs en éléments fins d'un profil à l'autre.

Du point de vue de l'origine des apports, il faut noter que dans le bassin versant de la Betsiboka, la contribution de la zone sédimentaire est moins importante que dans le cas du Mangoky.



2.4 - Vertisol

Profil n° 4

Unité alluviale	Plaine deltaïque du Mangoky
Situation	X = 117,4 ; Y = 493,3 ; Z = 21,5 m près du village Andranomanitsy
Végétation	Tapis herbacé peu dense à <i>Cyperus articulatus</i> (Mita) et <i>Sporobolus rhyzomatosus</i> (Matsia), <i>Cyperus rotundus</i> (Tsingetsese).

2.4.1 - MORPHOLOGIE

0 - 40 cm	Brun-gris foncé à noirâtre (Munsell à sec 10 YR 5/1, humide 10 YR 4/1) peu humifère ; structure polyédrique à prismatique large, fondue, fortement crevassé, faces de glissement ; très forte cohésion ; enracinement important.
40 - 110 cm	Grisâtre (Munsell à sec 10 YR 7/1, humide 2,5 Y 5/2) ; à nombreuses taches blanches calcaires et salines petites ; très durci massif à faiblement polyédrique ; argilo-sableux fin ; très forte cohésion ; enracinement faible.

- 110 - 320 cm Dépôt alluvial brun jaune clair (Munsell à sec 10 YR 6/4, humide 10 YR 6/3) ; argilo-sableux fin, à taches blanchâtres nombreuses ; massif à faiblement polyédrique.
- 320 - 350 cm Lit de sable fin argileux jaune brunâtre (7,5 YR 6/4) à tendance particulaire.

Au delà de cette profondeur, alluvions anciennes brun-marron à petites taches blanches nettes et fines cristallisations de gypse.

Les dépôts deviennent de plus en plus argileux et on observe vers 5 m des amas poudreux et des concrétions blanches tendres calcaires. A 5,5 m on passe à un sable fin limoneux très micacé fluviatile typique ; nappe en charge vers 6,4 m.

2.4.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

La réaction du sol, neutre en surface, devient rapidement fortement alcaline en profondeur (pH 9,1 à 9,5). Les teneurs en calcaire restent faibles (0,5 à 3,5 %) sauf dans les concrétions profondes (6 %).

Les teneurs en sels solubles sont assez importantes (extrait salin : 0,6 à 0,8 mmhos) avec davantage de chlorures que de sulfates mais le taux de ces derniers a tendance à prédominer en profondeur.

Le taux d'argile se maintient entre 30 et 50 % sauf dans les alluvions anciennes profondes où il atteint 78 %. Le rapport limon/argile varie entre 0,3 et 0,5. Il y a deux à cinq fois plus de sable fin que de sable grossier.

Les teneurs en matière organique dépassent peu 1 % en surface, sont très faibles dans les horizons sous-jacents. L'humification est assez bonne et le rapport C/N est voisin de 13 en surface.

Le complexe absorbant a une capacité d'échange assez élevée (20 à 30 méq. pour 100 g) et est sursaturé. Les teneurs en sodium échangeable sont également élevées et le rapport Na/T peut varier de 15 à 35 % en profondeur. Les réserves minérales sont très abondantes.

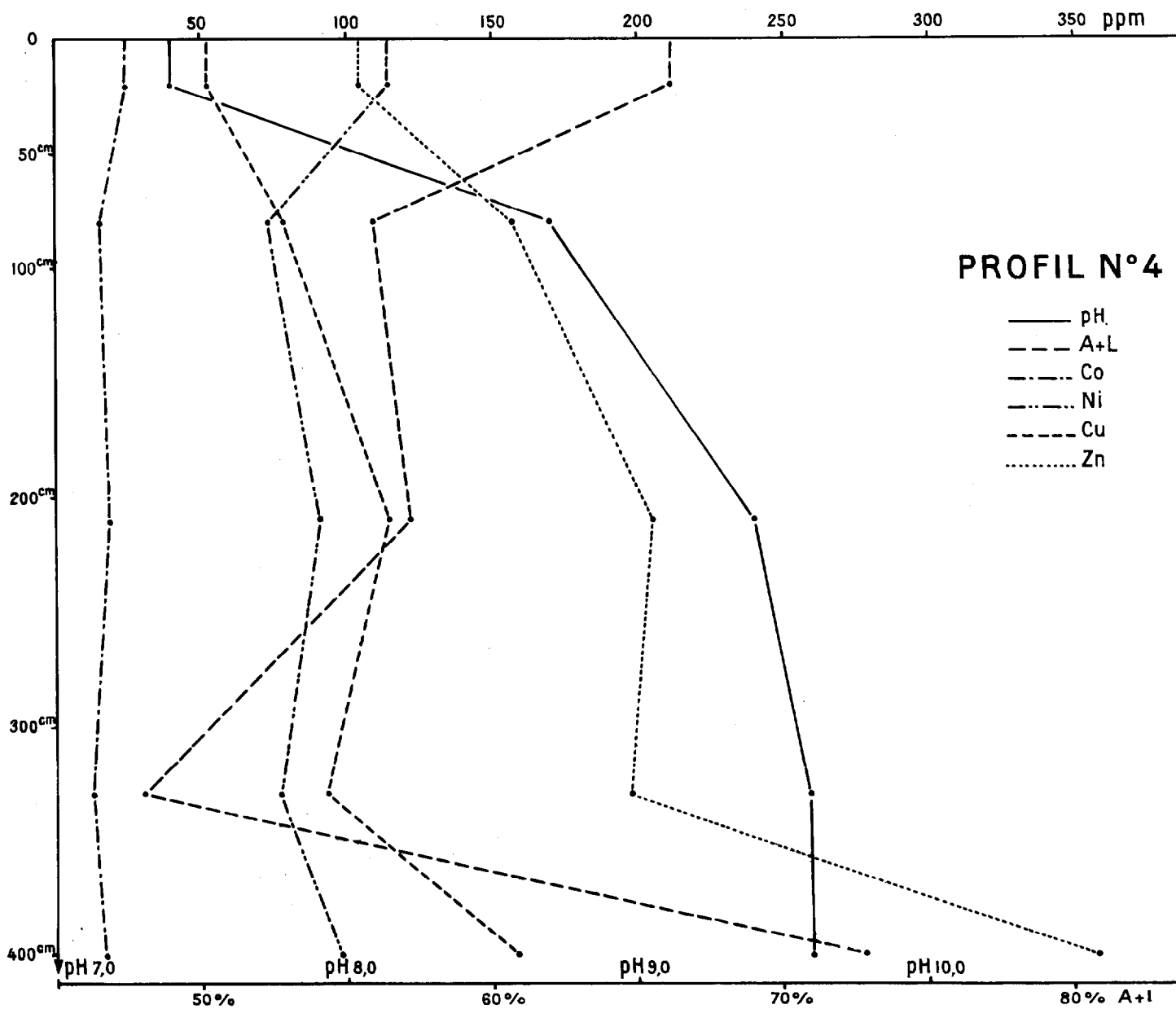
2.4.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 4)

Ce type de sol formé sur matériaux d'origine alluviale présente des teneurs en oligo-éléments un peu plus élevées que celles observées dans les sols alluviaux peu évolués, en particulier pour le zinc et le cuivre (les teneurs en nickel sont plus basses).

Pour certains éléments les variations dans le profil sont assez importantes bien que le taux d'argile + limon varie le plus souvent entre 50 et 70 %. On observe des teneurs élevées en cuivre et surtout en zinc dans les horizons profonds qui sont fortement alcalins et légèrement calcaires.

La répartition des teneurs dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
20	25	115	52	105
80	16	74	78	158
210	19	91	115	205
330	12	77	93	198
400	17	98	158	358



2.5 - Sol ferrugineux tropical sur schistes

Profil n° 5

Situation Environs de Janjina, à l'ouest du village Ankaboka.
 X = 331 ; Y = 626,5 ; Z = 725 m

Climat P = 1300 mm ; T = 25°4.

Unité géomorphologique	Lambeau de couverture sédimentaire sur la bordure occidentale du socle ancien.
Végétation	Pseudo-steppe clairsemée à <i>Aristida sp.</i>
Topographie	Pente forte (15 à 30°) avec blocailles de grès et de roches métamorphiques colluvionnées en surface du sol, en provenance de reliefs avoisinants (sols squelettiques).
Roche-mère	Schistes de la Sakamena.

2.5.1 - MORPHOLOGIE

0 - 12 cm	Brun-noirâtre (Munsell à sec 7,5 YR 6/2, humide 5 YR 4/3) ; riche en cailloux allochtones, un peu humifère ; argilo-sableux grossier ; tassé, à structure massive secondairement à tendance particulaire ; racelles abondantes ; cohésion moyenne.
12 - 60 cm	Rouge-jaune (Munsell à sec 5 YR 4/8) ; argilo-sableux ; structure massive ; enracinement moyen ; peu humifère ; cohésion assez forte.
60 - 95 cm	Rouge foncé, à taches grises diffuses (Munsell à sec 5 YR 6/6, humide 5 YR 4/8) ; argilo-sableux fin, à structure faiblement polyédrique, un peu humide ; enracinement moyen à faible.
+ 95 cm	Passage progressif et irrégulier à des schistes pélitiques micacés à fine stratification subhorizontale, gris clair (rouge vif sur les faces des strates) relativement tendre.

2.5.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

La Réaction du sol est acide avec un pH compris entre 4,5 et 4,8. Il atteint 5,7 dans la roche-mère.

Granulométrie : le taux d'argile augmente de 35 à 50 % dans les horizons rubéfiés, mais les horizons supérieurs sont enrichis en sable par colluvionnement (19 à 25 % de sable grossier contre 4 % seulement en profondeur).

Le rapport limon/argile ne dépasse pas 0,3. Les teneurs en sable fin varient entre 23 et 32 %.

Matière organique : l'horizon de surface contient environ 2,5 % de matière organique dont le taux devient inférieur à 0,5 % dans l'horizon sous-jacent.

L'humification est assez bonne, mais le rapport C/N voisin de 16 (action des feux).

Complexe absorbant : le complexe absorbant a une très faible capacité d'échange et est pauvrement pourvu en éléments échangeables.

Les teneurs en fer libre sont faibles et augmentent avec la profondeur de 2 à 4 %. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est voisin de 2,3 dans les horizons rubéfiés. Il atteint 2,9 dans la roche-mère.

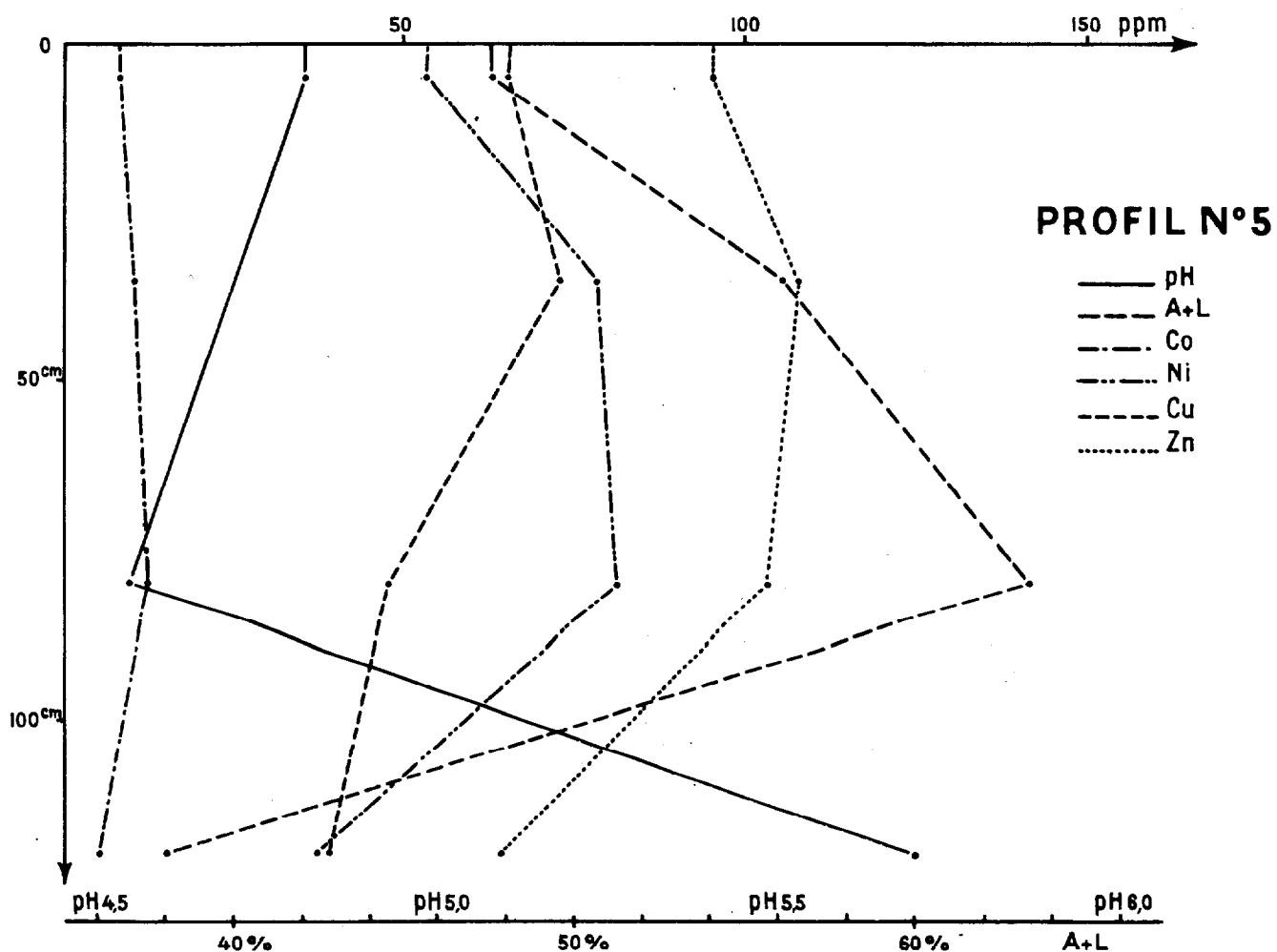
La fraction argileuse contient surtout de la kaolinite avec un peu d'illite dans la roche-mère.

2.5.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 5)

Les horizons rubéfiés de ce type de sol ne présentent pas de fortes variations des teneurs en oligo-éléments, mais la roche-mère est nettement moins riche. La répartition dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p. p. m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
6	8	53	65	95
35	10	78	72	107
80	12	81	47	102
120	5	37	38	64

Pour le cuivre et le zinc ces teneurs sont sensiblement du même ordre de grandeur que celles observées dans les sols alluviaux peu évolués vus précédemment. Par contre, les teneurs en cobalt et nickel sont nettement plus basses.



2.6 - Sol ferrugineux tropical sur grès

Profil n° 6

Situation	Environs du canton de Berenty, près du village Bekaratsaka X = 272,5 ; Y = 440 ; Z = 400 m
Climat	P = 720 mm ; T = 25°
Unité géomorphologique	Surface structurale de l'Isalo moyen
Végétation	Savane peu dense à <i>Heteropogon contortus</i> avec quelques arbustes : <i>Hyphaena Shatan</i> , <i>Dalbergia trichocarpa</i> .
Topographie	Plateau à pente faible (grandes ondulations) avec érosion en nappe : sable quartzique grossier ruisselé en surface du sol entre les touffes de graminées. Dans le paysage, ravins fréquents et lambeaux de sols résiduels.
Roche-mère	Grès à faciès continental, à squelette quartzique, petits galets roulés et ciment argileux.

2.6.1 - MORPHOLOGIE

0 - 15-20 cm	Grisâtre (Munsell à sec 10 YR 5/2, humide 10 YR 3/2) ; un peu humifère, tassé, argilo-sableux ; structure massive secondairement nuciforme faible à particulaire ; enracinement plutôt faible ; porosité faible.
20 - 50 cm	Rouge orangé clair (Munsell à sec 5 YR 6/6, humide 5 YR 5/6) ; argileux à sable grossier, tassé et durci, structure massive, forte cohésion, enracinement très faible.
50 - 120 cm	Rouge clair (Munsell à sec 5 YR 6/8, humide 5 YR 5/8) ; argilo-sableux ; massif, un peu humide, moins tassé et plus meuble.
120 - 210 cm	Jaune beige à gris clair (Munsell à sec 5 YR 7/4, humide 5 YR 5/4) ; sablo-argileux grossier avec passages gravillonnaires ; vers 1,9 m nombreuses taches rouge brique bien délimitées et petites (hydromorphie).
+ 210 cm	Passage progressif au matériau originel gréseux, jaunâtre à blanchâtre (Munsell à sec 7,5 YR 7/2, humide 10 YR 7/3) (les taches diminuent rapidement en profondeur) sableux grossier, avec graviers fréquents, devenant beaucoup plus dur vers 2,80 m.

2.6.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Réaction : Le pH est faiblement acide dans l'ensemble du sol et dans le matériau originel 6,0 à 6,4.

Granulométrie : le sable constitue 60 à 80 % des matériaux dont 50 à 60 % de sables grossiers. L'horizon de surface paraît un peu appauvri en argile (13 %) mais les apports de sable ruisselé ne sont sans doute pas étrangers à ce fait. Le taux d'argile atteint 23 % dans les horizons rubéfiés, 16 % dans le matériau originel.

Matière organique : le sol est pauvre en matière organique, environ 1 % dans l'horizon de surface, mais l'humification est élevée (décoloration nette de l'horizon supérieur) et le rapport C/N voisin de 13.

Complexe absorbant : malgré une faible capacité d'échange inférieure à 10 méq. pour 100 g, le pourcentage de saturation est moyen avec des teneurs moyennes en chaux et en magnésium.

Les réserves minérales sont faibles. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est un peu supérieur à 2 dans le sol rubéfié ; il atteint 2,5 à 3 dans le matériau originel.

La fraction argileuse des horizons rubéfiés est constituée par de la kaolinite en mélange avec de la montmorillonite, un peu d'illite et des traces de goethite. La proportion de montmorillonite augmente avec la profondeur et devient très importante dans le matériau originel où est encore présente la kaolinite.

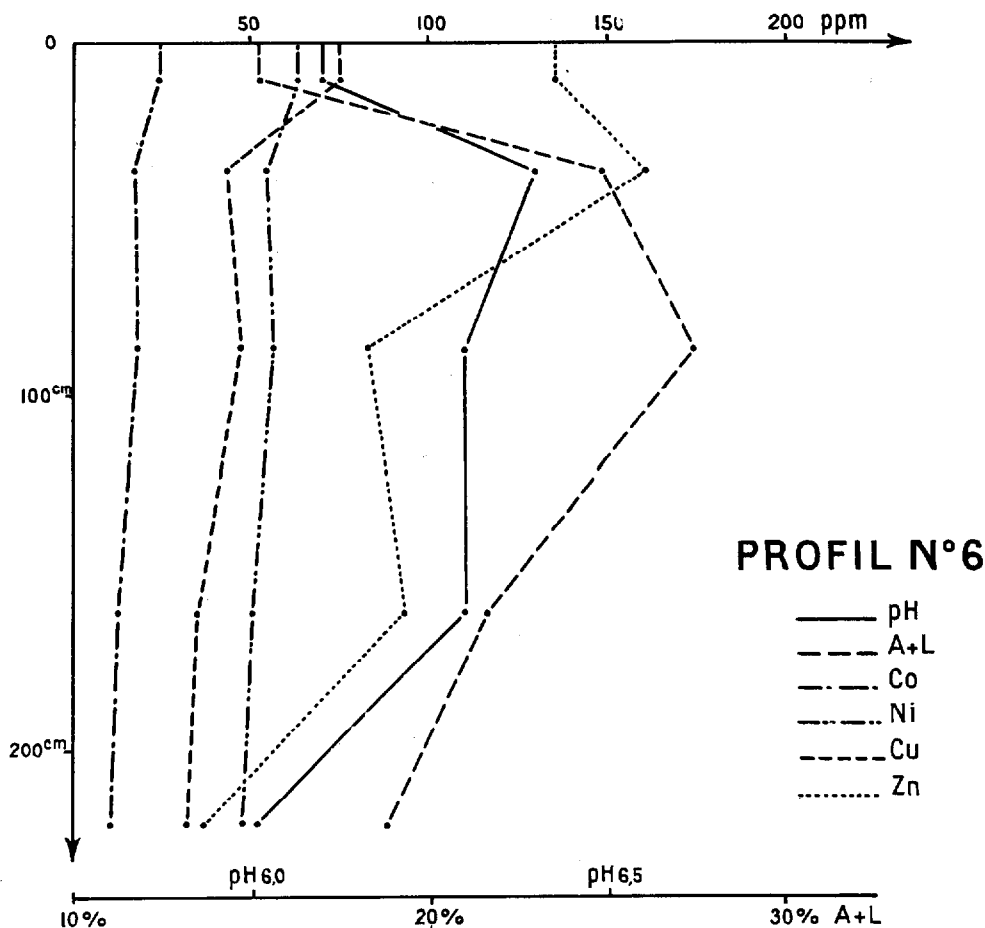
2.6.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 6)

On observe, dans ce profil, une diminution de la teneur en oligo-éléments avec la profondeur, surtout pour le cobalt, le cuivre et le zinc. Il n'y a pas de corrélation avec la teneur en éléments fins (le taux d'argile + limon varie entre 15 et 27 %).

La réaction du sol variant peu (neutre à faiblement acide), et le taux de matière organique restant inférieur à 1 %, cette variation est peut-être due aux phénomènes d'altération.

La répartition des teneurs dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
10	15	63	74	135
35	10	54	42	160
85	10	56	47	82
160	5	50	34	92
220	5	47	32	46



2.7 - Sol ferrallitique sur granite

Profil n° 7

Situation	Environs de Fianarantsoa, route du canton d'Andoharanomaitso, près du village Antsamena. X = 460,5 ; Y = 509 ; Z = 1250 m
Climat	P = 1215 mm ; T = 18°6.
Unité géomorphologique	Haute surface d'érosion à dissection profonde et reliefs de dénudation.
Végétation	Pseudo-steppe à <i>Aristida sp.</i>
Topographie	Pente très forte (25 à 30°). Erosion en nappe ; le profil est observé dans un "lavaka" en formation
Roche-mère	Granite de type andringitréen, rose à biotite et quartz gris, à structure grenue et grain moyen.

2.7.1 - MORPHOLOGIE

0 - 35 cm	Rouge orangé (Munsell à sec 10 YR 5/8, humide 10 YR 4/3), avec taches brunâtres diffuses ou migrations d'humus sur les trajets de racines ; argilo-sableux, structure nuciforme à faiblement grumeleuse ; nombreuses radicelles ; quelques cailloux de quartz gris colluvionnés.
35 - 60 cm	Rouge vif (Munsell à sec 2,5 YR 6/8, humide 5 YR 5/8) avec quelques rares débris organiques et cailloux de quartz peu nombreux ; argileux à argilo-sableux ; structure nuciforme à polyédrique fine ; enracinement moyen à faible ; cohésion assez forte, porosité moyenne.
+ 60 cm	Passage progressif à une arène d'altération jaunâtre (Munsell à sec 10 YR 8/6), humide 7,5 YR 5/6), micacée, avec cristaux feldspathiques ayant conservé leur forme mais fortement kaolinisés ; meuble et friable, localement filonnets quartziques.

En bas de pente, on peut observer dans l'arène des boules rocheuses avec écailles d'altération en pelure d'oignon. La roche est altérée superficiellement et l'écaille elle-même (quelques centimètres) est encore très dure ; de rose grisâtre dans le granite inaltéré, la teinte devient jaunâtre clair dans l'écaille

2.7.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Réaction : le pH du sol atteint 5,5 en surface, 6,6 dans l'arène d'altération.

Granulométrie : la fraction sableuse domine dans tout le profil (45 à 60%). Le taux d'argile ne dépasse pas 40% dans les horizons rubéfiés. Le rapport limon/argile augmente de la surface en profondeur : 0,17 dans l'horizon humifère, 0,42 dans l'horizon B un peu plus riche en argile, 1,9 dans l'arène.

Matière organique : le taux de matière organique ne dépasse pas 2% dans l'horizon de surface. L'humification est faible, le rapport C/N = 12,5.

Complexe absorbant : la capacité d'échange du complexe est faible dans tout le profil, il y a peu d'éléments échangeables et le pourcentage de saturation augmente de la surface en profondeur, de 38 à 80%.

La ferrallitisation de ce profil n'est pas très accentuée, sans doute par suite d'un rajeunissement par érosion. Aussi, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ne descend pas au-dessous de 1,6 dans le sol et est voisin de 2 dans l'arène.

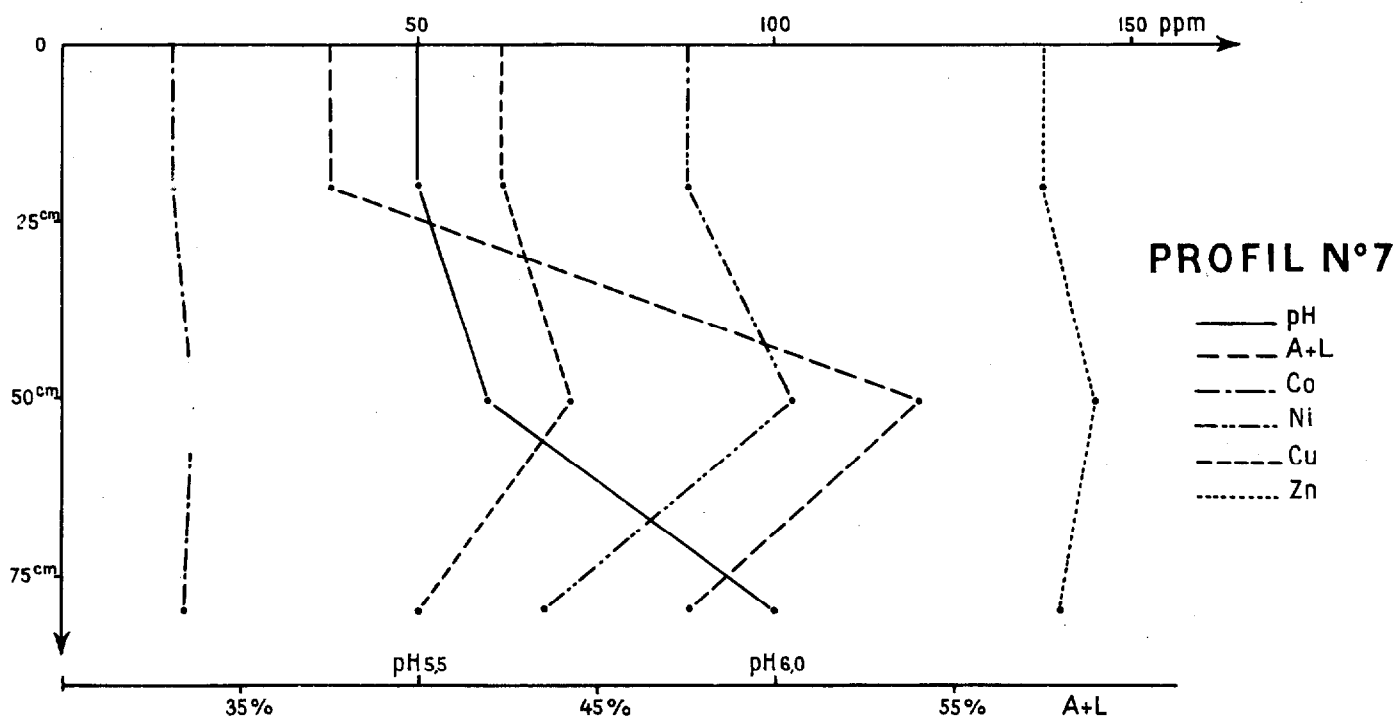
La fraction argileuse contient essentiellement de la kaolinite avec des quantités notables d'hydroxydes.

2.7.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 7)

Ce profil se caractérise par une faible variation des éléments dosés et des teneurs du même ordre de grandeur que dans les horizons supérieurs du sol ferrugineux tropical sur grès. Mais ici la zone de départ conserve des teneurs assez élevées.

La répartition dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
20	15	88	62	138
50	18	105	71	145
80	17	67	50	140



2.8 - Sol ferrallitique brun-rouge sur cipolin

Profil n° 8

Situation

Poste d'Ambatofinandrahana, près du village Tetikanana
 X = 445 ; Y = 617,5 ; Z = 1650 m

Climat	P = 1360 mm ; T = 17°4.
Unité géomorphologique	Relief de Hautes Terres à dissection profonde
Végétation	Prairie dense à <i>Hyparrhenia sp.</i> , <i>Imperata</i> , <i>Eragrostis sp.</i> , <i>Aloe capitata</i> sur les affleurements rocheux.
Topographie	Petits plateaux à pente assez forte (15 à 25°) et thalwegs très encaissés. Erosion en décrochements ou en paliers
Roche-Mère	Série des Cipolins (couverture paléozoïque du socle)

2.8.1 - MORPHOLOGIE

0 - 18 cm	Brun foncé (Munsell à sec 5 YR 4/2, humide 7,5 YR 3/2) ; humifère, argilo-sableux fin ; à structure grumeleuse bien développée, secondairement particulaire fine ; racines abondantes ; porosité élevée, cohésion moyenne.
18 - 40 cm	Brun-rouge (Munsell à sec 7,5 YR 4/4, humide 5 YR 3/4) ; argilo-sableux fin ; structure faiblement grumeleuse à nuciforme, secondairement particulaire ; assez humifère, enracinement abondant ; quelques migrations d'humus plus foncées sur trajets de racines et quelques fentes de dessiccation ; porosité encore élevée.
40 - 85 cm	Brunâtre (Munsell à sec 10 YR 4/3, humide 5 YR 3/3) ; peu humifère ; sableux fin ; structure diffuse à particulaire fine ; enracinement moyen ; poreux ; cohésion faible.
85 - 130 cm	Horizon de transition brun clair (Munsell à sec 10 YR 5/3, humide 7,5 YR 3/4) ; sableux fin à sablo-limoneux, structure massive secondairement particulaire fine ; enracinement faible ; cohésion faible.
130 - 280 cm	Cipolin très altéré jaune-ocre à jaune olivâtre (Munsell à sec 10 YR 6/3, humide 10 YR 4/2) ; tacheté de noir et de rouille ; sableux fin, meuble, peu cohérent, enracinement quasi nul ; litage à 45° encore visible.

2.8.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Réaction : le pH du sol est faiblement acide avec un minimum plus fortement acide dans l'horizon brun-rouge (pH 5,3).

Granulométrie : les deux horizons supérieurs contiennent 30 à 40 % d'argile avec un rapport limon/argile variant entre 0,4 et 0,5. Il y a très peu de sable grossier et le sable fin augmente en profondeur, dépassant 75 % dans la roche altérée.

Matière organique : le taux de matière organique dépasse 8 % dans l'horizon de surface et 4 % dans l'horizon sous-jacent. Il est inférieur à 0,2 % dans les horizons profonds. L'humification est plutôt faible et le rapport C/N varie entre 18 et 13.

Complexe absorbant : exception faite pour le calcium et le magnésium dans l'horizon de surface et le matériau originel, le sol est plutôt pauvre en éléments échangeables et la capacité d'échange du complexe moyenne à faible. Le pourcentage de saturation présente un minimum (45 %) dans l'horizon brun-rouge.

Les teneurs en fer libre varient peu dans le profil : 4,5 à 5,5 %. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ augmente progressivement en profondeur et passe de 1,4 à 2,1 dans le sol, pour atteindre 4,0 dans le matériau originel.

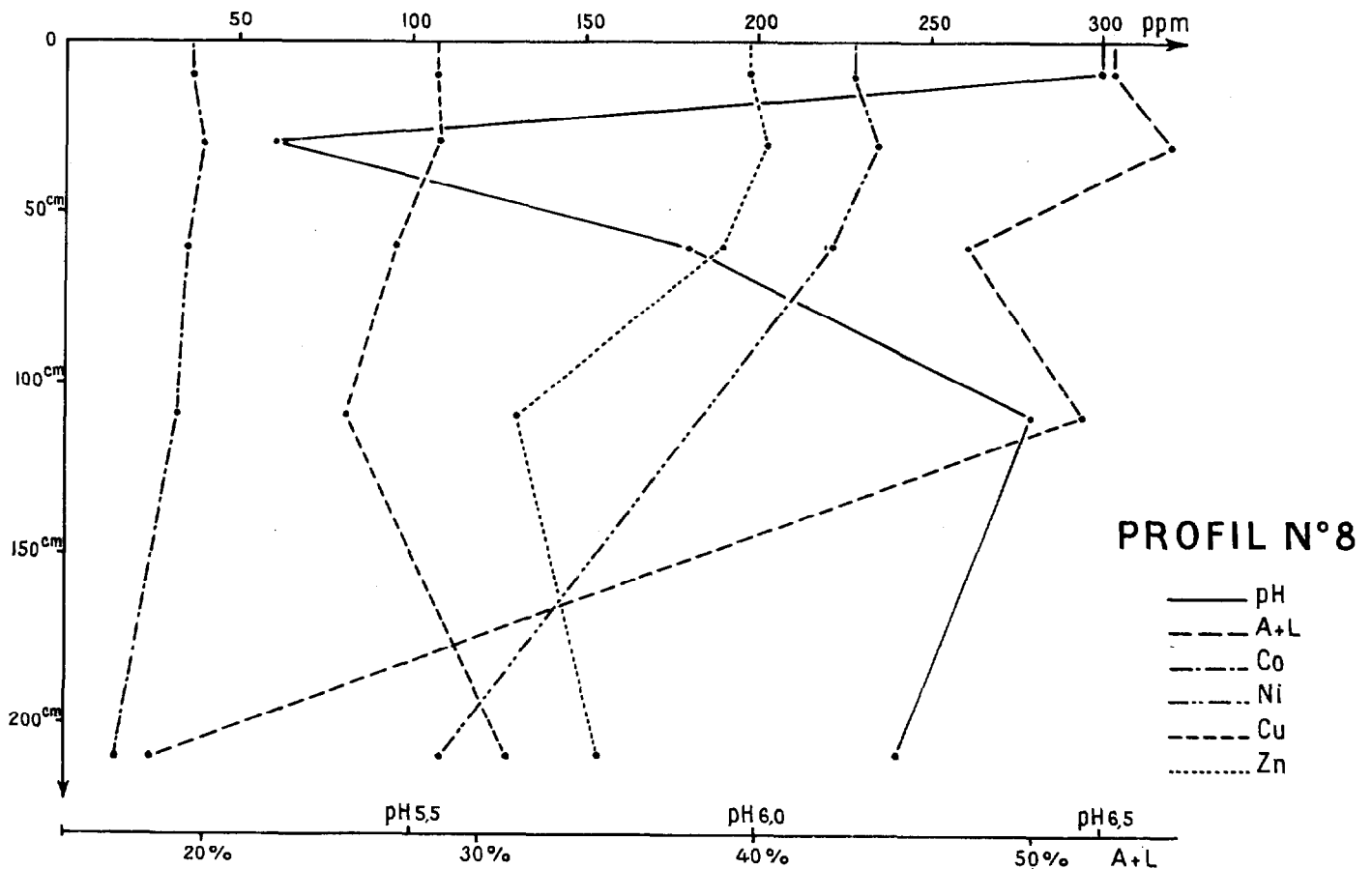
La fraction argileuse dans les horizons du sol contient surtout de la kaolinite avec des quantités notables d'hydroxydes. Présence probable d'illite dans le matériau originel.

2.8.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 8)

On observe dans ce profil des teneurs élevées pour l'ensemble des éléments dosés, surtout le nickel. Ces teneurs décroissent légèrement avec la profondeur, mais sont encore élevées dans la roche altérée, malgré un taux faible d'éléments fins (argile + limon = 18 % contre 47 à 53 % dans le sol). Le taux de matière organique, relativement élevé dans les deux horizons supérieurs, ne semble pas avoir d'influence nette sur ces teneurs.

La répartition dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
10	36	228	106	198
30	39	235	107	202
60	35	222	95	190
110	32	184	90	130
210	14	108	128	154



2.9 - Sol rouge faiblement ferrallitique lessivé sur gneiss

Profil n° 9

Situation	Environs de Mandoto, près du village Ivory X = 399,5 ; Y = 727,8 ; Z = 950 m
Climat	P = 1530 mm ; T = 23°
Unité géomorphologique	Basse surface d'aplanissement dans le socle ancien
Végétation	Pseudo-steppe à <i>Hyparrhenia rufa</i> dominant, avec <i>Aristida multicaulis</i> , <i>Pennisetum polystachyum</i> , <i>Rhynchelitrum repens</i>
Topographie	Surface aplanie et collines surbaissées. Traces de stagnation d'eau en saison des pluies (couvert graminéen plus ras et sol tassé). Profil prélevé à la sonde.
Roche-Mère	Gneiss plus ou moins migmatique, altéré sur une dizaine de mètres d'épaisseur, mélanocrate, finement stratifié, avec lentilles plus riches en amphibole et minéraux noirs.

2.9.1 - MORPHOLOGIE

0 - 12 cm	Brun rougeâtre (Munsell à sec 7,5 YR 4/4, humide 2,5 YR 3/2) ; humifère argilo-sableux assez tassé ; structure nuciforme à faiblement grumeleuse ; quelques fentes fines, radicelles abondantes.
12 - 30 cm	Rouge foncé vif (Munsell à sec 5 YR 4/6, humide 2,5 YR 3/4) ; argilo-sableux ; structure massive, secondairement polyédrique grossière ou à tendance particulière ; peu humifère ; enracinement faible ; porosité faible.
30 - 170 cm	Rouge foncé vif (Munsell à sec 10 Y 4/6, humide 2,5 YR 3/4) ; légèrement humide ; tache les doigts ; argileux à argilo-sableux ; structure peu nette, plus ou moins polyédrique grossière ; enracinement quasi nul.
170 - 380 cm	Rouge vif (Munsell à sec 2,5 YR 5/8, humide 2,5 YR 3/4) ; peu différent du précédent ; argileux à argilo-sableux ; plus friable, à tendance particulière fine.
380 - 450 cm	Rouge jaune à rougeâtre (Munsell à sec 5 YR 5/8) ; avec petites taches jaune-rouille diffuses ; argilo-limoneux à argilo-sableux ; friable ; peu humide.
450 - 580 cm	Passage progressif à un horizon jaune orangé à jaune ocre (Munsell à sec 7,5 YR 7/6, humide 5 YR 6/8) ; argilo-limono-sableux ; micacé ; homogène, friable, un peu humide.
580 - 620 cm	Bariolé jaune ocre et rouge violacé à feldspaths jaunâtres altérés (zone d'altération) humide ; argilo-limono-sableux fin ; micacé ; toucher kaolinique.

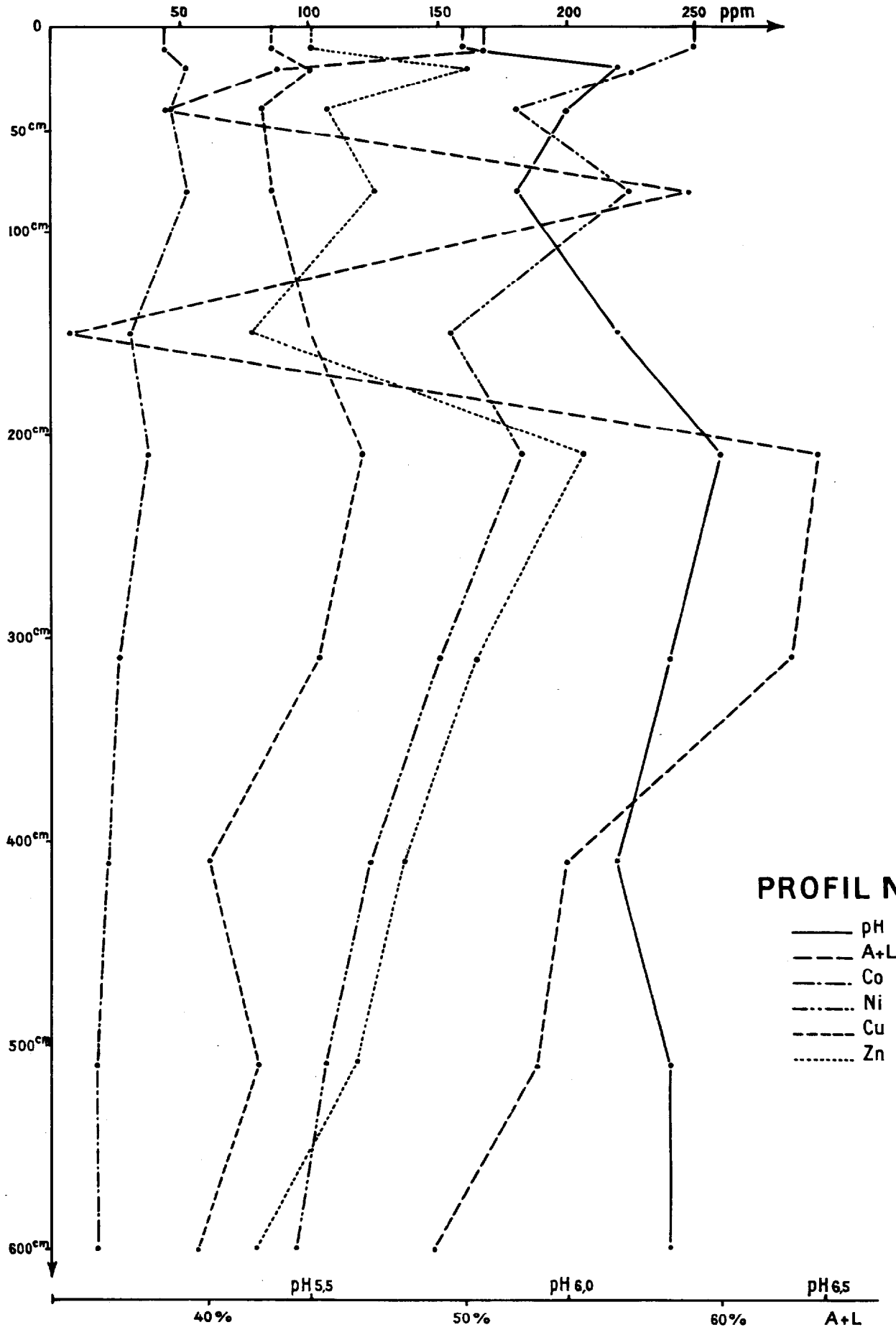
2.9.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Réaction : le pH du sol est moyennement acide dans l'horizon de surface, faiblement acide (5,9 à 6,2) dans le reste du profil.

Granulométrie : la fraction argileuse dont le taux ne dépasse pas 30 % dans les cinquante premiers centimètres, augmente jusqu'à plus de 40 % dans les horizons très rubéfiés, pour décroître ensuite progressivement jusqu'aux environs de 20 % dans la zone de départ. Parallèlement on observe un lessivage du fer, la teneur en fer libre passant de 4,8 à plus de 10 % et celle en fer total de 7 à 13 %.

Dans le sol le rapport limon/argile varie entre 0,25 et 0,5 ; il est supérieur à 1 dans la zone de départ.

Les sables fins sont assez abondants : 25 à 47 %. Le taux de sables grossiers ne dépasse pas 20 %.



Les sables fins sont assez abondants : 25 à 47 %. Le taux de sables grossiers ne dépasse pas 20 %.

Matière organique : le taux de matière organique atteint 3,5 % dans l'horizon de surface mais il s'abaisse à 0,3 % dans l'horizon sous-jacent. Cette matière organique est assez bien humifiée mais le rapport C/N demeure relativement élevé (14,7).

Complexe absorbant : le complexe absorbant est assez bien pourvu en calcium et en magnésium, mais les teneurs en potassium sont très faibles. La capacité d'échange est moyenne en surface, faible dans les autres horizons et le pourcentage de saturation moyen.

Les réserves minérales sont moyennes en chaux et en acide phosphorique, faibles en potasse.

Dans le sol le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est légèrement inférieur à 2 (1,8) jusque vers 1 m de profondeur, voisin de 2 dans le reste du profil, y compris la zone de départ.

La fraction argileuse est constituée essentiellement par de la kaolinite associée à de faibles quantités d'hydroxydes (en particulier de la gibbsite dans les trois horizons supérieurs).

2.9.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 9)

Dans ce type de sol on observe également des teneurs assez élevées des éléments dosés en particulier pour le cobalt et le nickel. Les taux maximum correspondent assez bien aux horizons très altérés ou enrichis en argile. Mais les teneurs diminuent sensiblement dans la zone de départ. Là encore, il semble que ce soit surtout les phénomènes d'altération qui conditionnent de fortes teneurs, la réaction du sol (faiblement acide) et la matière organique intervenant peu.

La répartition dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p. p. m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
10	44	250	86	100
20	52	228	100	162
40	46	180	81	107
80	53	225	85	125
150	30	155	100	78
210	38	183	120	206
310	26	151	103	166
410	22	124	61	137
510	18	106	80	118
600	18	95	57	78

2.10 - Sol calcomagnésimorphe

Profil n° 10

Situation Environs de Nosy-Ambositra (Bas Mangoky)
X = 147 ; Y = 462 ; Z = 75 m

Climat P = 550 mm ; T = 25°6

Unité géomorphologique	Revers de la "cuesta" éocène
Végétation	Forêt sèche dégradée
Topographie	Pente assez forte (5 à 10°) : glacis colluvial avec blocailles de calcaire lapiézé ou encroûté
Roche-mère	Calcaire gréseux blanc assez tendre (Eocène inférieur)

2.10.1 - MORPHOLOGIE

0 - 30 cm	Noirâtre (Munsell à sec 10 YR 3/1, humide 7,5 YR 4/2) ; humifère, argilo-sableux structure grumeleuse, plus ou moins bien développée secondairement particulaire ; cohésion plutôt faible, porosité élevée ; enracinement important ; quelques cailloux calcaires colluvionnés.
+ 30 cm	Passage rapide avec une limite sinueuse, à un matériau calcaire blanchâtre (Munsell à sec 2,5 YR 8/2, humide 10 YR 5/3) ; plus ou moins colluvionné, assez friable ; argilo-sableux à sablo-argileux, massif à faiblement nuciforme ; secondairement particulaire poudreux ; enracinement moyen ; porosité assez élevée.

2.10.2 - CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Réaction : le pH du sol est modérément alcalin : 8,2. Le matériau originel a un pH de 8,6.

Granulométrie : l'horizon humifère est riche en calcaire (28 %), le matériau originel très riche (60 à 80 %). Après décalcification, la fraction argileuse constitue 23 % de l'horizon supérieur et 17 % du matériau originel, contre 38 et 39 % avant décalcification. Avant décalcification, la teneur en sables de chaque horizon atteint respectivement 51 et 30 % contre 42 et 13 % après décalcification.

Après décalcification, le rapport limon/argile atteint 0,37 dans l'horizon humifère et 0,21 dans le matériau originel.

Matière organique : l'horizon de surface est riche en matière organique : 7,8 %. Celle-ci est assez bien humifiée avec un rapport C/N voisin de 10.

Complexe absorbant : la capacité d'échange est élevée dans l'horizon humifère : 36 méq. pour 100 g, moindre (18 méq) dans le matériau originel. Le complexe est sursaturé avec de très fortes teneurs en calcium et en magnésium, calcium dominant nettement.

Les réserves minérales du sol sont élevées en chaux, magnésie et potasse, moyennes en acide phosphorique.

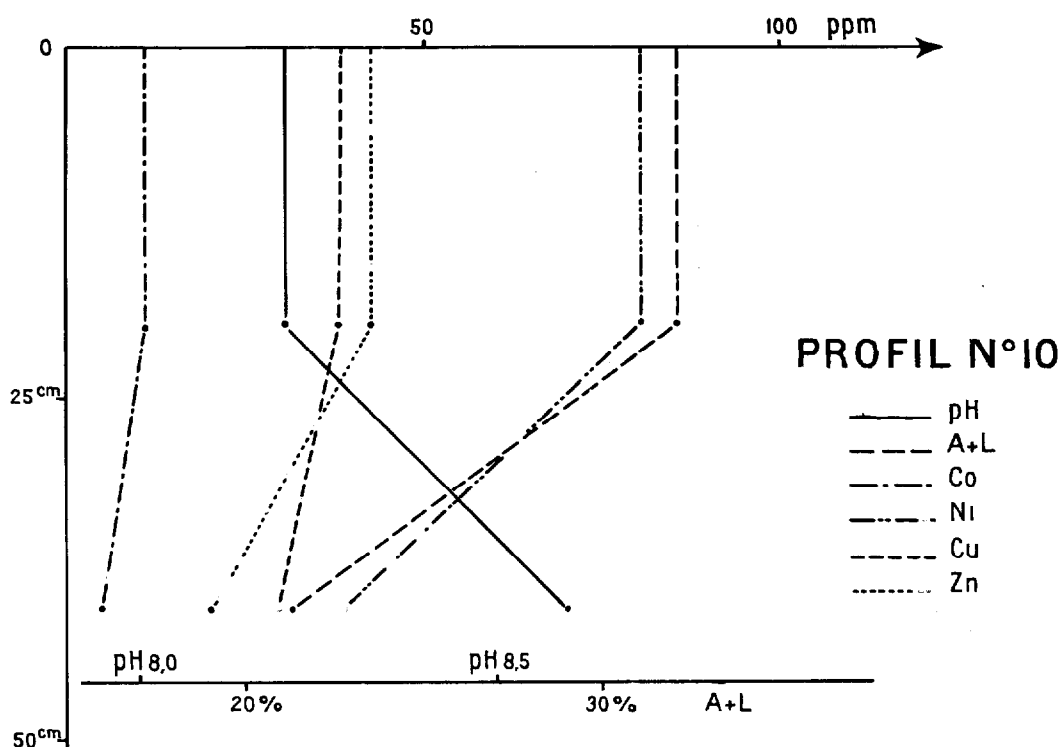
La fraction argileuse non calcaire du matériau originel est constituée par un mélange de montmorillonite (dominante) de kaolinite et d'illite.

2.10.3 - OLIGO-ÉLÉMENTS (cf. Figure 10)

Ce profil, peu épais, se caractérise par des teneurs en éléments dosés nettement plus faibles que celles observées jusqu'ici. Le matériau originel (60 % de calcaire) a des teneurs particulièrement basses.

La répartition dans le profil est la suivante :

Profondeur moyenne en cm	Teneurs en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
20	10	80	37	42
40	4	38	29	20



3 - CONCLUSIONS

3.1 - Teneurs en oligo-éléments

Bien que les résultats précédents ne concernent que dix profils caractéristiques de sols malgaches, on peut en dégager les faits suivants :

- Les teneurs en oligo-éléments dosés ne sont jamais très basses, exception faite pour certains horizons très sableux de matériaux remaniés (alluvions) ou certains matériaux originels sédimentaires (schistes, calcaires). Au sein d'un même profil les variations sont parfois importantes (cf. Tableau 1). Dans les sols alluviaux peu évolués, les teneurs les plus élevées paraissent liées à l'importance de la fraction fine (argile + limon) jusqu'à un seuil d'environ 40 à 50%. Dans les sols évolués en place cette corrélation avec la fraction fine est moins nette.

- La réaction du sol et le taux de matière organique n'ont pas d'action sensible sur les concentrations des oligo-éléments dosés. Par contre, un milieu réducteur favoriserait ces concentrations (sols de mangrove).
- Les teneurs les plus élevées ont été observées dans les sols évolués hydromorphes formés sur matériaux alluviaux d'une part, dans les sols évolués sur roches cristallines d'autre part. Dans ce dernier cas, les sols sur gneiss et sur cipolin sont plus riches que le sol sur granite (cette conclusion est à vérifier sur un plus grand nombre d'analyses).
- Les sols ferrugineux tropicaux sur roches sédimentaires sont moins riches que les sols ferrallitiques du socle ancien métamorphique.
- Dans les sols évolués en place on observe une décroissance plus ou moins nette et plus ou moins irrégulière des teneurs en éléments dosés avec la profondeur. Les phénomènes d'altération (rubéfaction ou ferrallitisation) favoriseraient l'accumulation relative de ces oligo-éléments dans les horizons supérieurs.
- Etant donné la plupart des valeurs obtenues, bien qu'on ne connaisse pas la forme (mobile ou fixée) des éléments dosés, on ne doit pas s'attendre dans ces types de sols à observer des carences nettes en oligo-éléments.

3.2 - Tableau 1 - Comparaison des teneurs en oligo-éléments dans les types de sols analysés

N° du Profil	Nombre des Echantillons	Co		Ni		Cu		Zn					
		Min.	Max.	moyenne	Min.	Max.	moyen.	Min.	Max.	moyen.			
1	3	3	21	14	19	178	116	28	7	17	45	102	80
2	4	8	18	13	108	146	128	53	81	66	65	125	88
3	3	19	25	22	253	345	302	94	110	101	170	218	197
4	5	12	25	17	74	115	87	52	158	99	105	358	204
5	4	5	12	8	37	81	62	38	72	55	64	107	92
6	5	15	15	19	47	63	54	32	74	46	46	160	103
7	3	15	18	17	67	105	86	50	71	61	138	145	141
8	5	14	39	31	108	235	195	90	128	105	130	202	174
9	10	18	53	34	95	250	169	57	120	87	78	206	128
10	2	1	10	7	38	80	59	29	37	33	20	42	31

1 - Sol de terrasse inondable peu évolué	6 - Sol ferrugineux tropical sur grès
2 - Sol de levée alluviale peu évolué	7 - Sol rouge ferrallitique sur granite
3 - Sol de mangrove	8 - Sol brun rouge ferrallitique humifère sur cipolin
4 - Vertisol	9 - Sol rouge faiblement ferrallitique lessivé sur gneiss
5 - Sol ferrugineux tropical sur schistes	10 - Sol calcomagnésimorphe (Rendzine noire)

3.3 - Quelques résultats obtenus dans d'autres pays

Etudiant les oligo-éléments dans un certain nombre de sols d'Australie, A. C. OERTEL (1961) a trouvé pour les éléments : cobalt, cuivre, zinc et nickel, les valeurs suivantes :

Type de sol	Concentrations en p.p.m.			
	Co	Cu	Zn	Ni
{ Alluvion argileuse *	36	46	90	
{ Terre noire	41	53	81	
{ Calcaire	3	23	40	
{ Rendzine	7	44	71	
{ Roche granitique	30	54	57	
{ Sol brun rouge	34	67	62	
{ Alluvion	17	34	67	
{ Solonetz solodisé	15	40	52	
{ Dolérite	29	180	160	33
{ Sol brun	48	110	160	58

Selon le même auteur, la relation entre les concentrations dans les matériaux originels et les sols n'est pas suffisante pour expliquer les variations observées. Les processus d'altération jouent certainement un rôle dans l'augmentation des concentrations en oligo-éléments dans les sols. Cela rejoint notre conclusion. Par rapport à nos résultats, les concentrations sont du même ordre de grandeur pour le cobalt, plus faibles en moyenne pour le cuivre et le zinc.

Toujours en Australie, dans le district de Denmark, les teneurs en cobalt des sols varient entre 4,2 et 40 p.p.m. Des carences dans les pâturages ont été observées pour des teneurs inférieures à 3 p.p.m. (R.J. HARVEY, 1937).

En Australie encore, dans les rendzines et les "terra rossa" les concentrations suivantes ont été observées (R.M. MacKENZIE, 1959) :

	en p.p.m.			
	Co	Ni	Cu	Zn
Terra Rossa	2 - 30**	4,7 - 5,0	2,2 - 65	11 - 86
	2 - 10	2 - 21	1 - 25	4 - 46
Rendzines	2 - 18	12 - 38	6,8 - 43	18 - 67
	2 - 18	2 - 42	1,4 - 34	5 - 90

Comme pour l'exemple malgache, les teneurs sont particulièrement faibles dans les matériaux originels calcaires.

Dans quelques types de sols caractéristiques du Dahomey, M. PINTA et C. OLLAT (1961) ont observé également que les concentrations en oligo-éléments variaient généralement avec la teneur en argile et étaient plus élevées dans les horizons argileux, les horizons organiques favorisant surtout, semble-t-il, une accumulation du bore et du manganèse.

Les analyses faites sur 111 profils de Mongolie intérieure (C.L. FANG, T.C.C. SUNG, YEH-BING, 1963) ont donné les résultats moyens suivants

Zn : 85 p.p.m. ; Ni : 51 ; Co : 23 ; Cu : 22.

* 1er terme : matériau originel, 2ème terme : sol. Nous ne citons que quelques exemples parmi ceux donnés par cet auteur.

** 1er terme : sol, 2ème terme : matériau originel calcaire.

Aux îles Hawaii, 87 types de sols représentatifs ont révélé des concentrations en cuivre variant entre 16 et 357 p.p.m. avec une moyenne de 124 p.p.m. (G. FUGIMOTO, G.D. SHERMAN 1959).

Les terres noires à coton des Indes, à réaction alcaline, ont montré les teneurs suivantes : cobalt 25-41, cuivre 63-143, zinc 16-52 (Y. SATYANARAYAN, 1958).

Dans les sols de différentes parties des Etats-Unis, les teneurs en cuivre varient entre 6 et 67 p.p.m., celles en zinc entre 18 et 135 p.p.m. Les sols alluviaux du Mississippi présentent le plus souvent des teneurs intermédiaires du fait de l'origine complexe des matériaux (R.S. HOLMES, 1943).

En Bulgarie, les teneurs en zinc varient dans les limites suivantes : chernozems 63 à 97 p.p.m., sols de prairie 88 à 98, sols forestiers 42 à 106, sols salins 39 à 63, sols marécageux 80, sols alluviaux 62, sols podzoliques 32. Les teneurs en cobalt varient dans les limites suivantes : sols forestiers 3,3 à 15,2, sols de prairie 9,2 à 13,6, chernozems 10,2 à 47,6, sols marécageux 1,7 à 8,1, sols salins 5,2 à 9. Les sols contiennent en général plus d'oligo-éléments que la roche-mère (L. STANCHEV, G. GYUROV et al., 1962).

Dans un certain nombre de sols hongrois : chernozems, sols podzoliques et sols bruns forestiers, les teneurs en oligo-éléments (Mn, Zn, Cu, Mo et Co) dépendraient avant tout de la roche-mère (D. GYORI, 1962).

L'ensemble de ces résultats tend à confirmer le fait que pour les oligo-éléments dosés, les teneurs observées dans les sols malgaches et leurs matériaux originels sont en moyenne relativement élevées. Ce fait est peut-être la conséquence de la richesse originelle du socle ancien de l'île et des phénomènes d'altération à lessivage limité en milieu tropical à saisons alternantes.

4 - BIBLIOGRAPHIE

- ALMOND (H.) - 1952 - Dosage des traces de Cobalt dans les sols. *Anal. Chem.*, 25, p.166.
- AUBRY (I.) et LAPLACE (G.) - 1951 - Dosage de Cr, Ni, Co et Cu dans les minerais de Lorraine. *Bull. Soc. Chim.*, 18, p.204.
- CHAPMAN (H.D.) et PRATT (P.F.) - 1961 - *Methods of analysis for soils, plants and waters* - Univ. of California, U.S.A.
- IANG (C.L.), SUNG (T.C.) et YEH BING - 1963 - Trace elements in the soils of north-eastern China and eastern Inner Mongolia. *Acta pedol. sin.*, 11, p.130-142.
- FUGIMOTO (G.) et SHERMAN (G.D.) - 1959 - The copper content of typical soils and plants of the Hawaiian Islands. *Hawaii Agric. Exp. Sta. Progr. Rep.*, 121, p.22.
- GUERIN (B.D.) - 1956 - La méthode du sel Nitroso-R pour le dosage du Cobalt dans les minerais. *Analyst*, 81, p. 409.
- GYORI (D.) - 1962 - Distribution and compounds of the trace elements : Mn, Zn, Cu, Mo and Co in some soil types. *Magy. Tud. Akad. Agrartud. Oszt. Közlet.*, 21, p. 53-71.
- HALL (A.J.) et YOUNG (R.S.) - 1950 - Dosage colorimétrique du Cobalt avec le sel nitroso-R. *Anal. Chem.*, 22, p.497.
- HARVEY (R.J.) - 1937 - Cobalt status of some west Australian soils. *J. Dept. Agr. W. Australia*, 14, p.386-392.
- HOLMES (R.S.) - 1943 - Cu and Zn contents of certain soils of the united states. *Soil Sci.*, 56, p.359-370.
- Mac KENZIE (R.M.) - 1959 - Trace elements in some south Australian terra rossa and rendzina soils. *Aust. J. Agric. Res.*, 10, p.52-57.

- ORTEL (A.C.) - 1961 - Relation between Trace element concentrations in soil and parent material. *J. Soil Sci.*, 12, p.119-128.
- PINTA (M.) - 1962 - *Recherche et dosage des éléments traces*. Dunod, Paris, 726 p.
- PINTA (M.) et OLLAT (C.) - 1961 - Recherches physico-chimiques des éléments-traces dans les sols tropicaux. Etude de quelques sols du Dahomey. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 25, p.14-23.
- SANDELL (E.B.) - 1952 - *Colorimetric determination of traces of metals*. Interscience Publish., New York, 673 p.
- SATYANARAYAN (Y.) - 1958 - Trace elements status of the Cotton Soils of Gujarat. *Indian Cott. Gr. Rev.*, 12, p.138-141.
- STANCHEV (L.), GYUROV (G.) et MASHEV (N.) - 1962 - Zinc as a trace element in the principal types and subtypes of Bulgarian Soils. *Jzv. tsentralnanch - izsled. Inst. Pochvoznan. Agrotekh. Rushoscarov*, 4, p.133-144.