

o
o o

A MONSIEUR GEORGES AUBERT.

EN HOMMAGE DE MA PROFONDE GRATITUDE.

Je remercie Monsieur J. JUNG, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris, de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de presider mon Jury. Je remercie également Messieurs J. CHOUARD et A. RIVIÈRE, Professeurs à la Faculté des Sciences de Paris, Monsieur P. DUCHAUFOR, Professeur à l'Ecole nationale des Eaux et Forêts, d'avoir bien voulu accepter de faire partie de ce jury.

Je suis heureux de pouvoir exprimer ici ma profonde et respectueuse reconnaissance à Monsieur le Professeur COMBES, (Membre de l'Institut), qui depuis mon entrée à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer a suivi mes travaux avec le plus grand intérêt et m'a permis de mener à bien cette étude en m'accordant toutes les facilités de travail.

Je remercie également Monsieur JUGLAS, qui ayant succédé à Monsieur le Professeur COMBES à la Direction de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer a bien voulu me maintenir la confiance que m'avait faite son prédécesseur, Messieurs ROSSIN et TRINTIGNAC qui de leur côté m'ont toujours apporté une sérieuse aide morale et matérielle.

Mes vifs remerciements s'adressent à Monsieur le Professeur J. MILLOT, Directeur de l'Institut de Recherches Scientifiques de Madagascar ainsi qu'à Monsieur R. PAULIAN, Directeur-adjoint de cet Institut pour toutes les facilités qu'ils m'ont données pour me rendre sur le terrain et effectuer l'étude des échantillons au laboratoire de Tsimbazaza à Tananarive.

Je dois une particulière reconnaissance à Monsieur G. AUBERT Professeur de Pédologie à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer qui fut mon initiateur à la pédologie. Il a suivi mon travail avec le plus grand intérêt et ne m'a jamais ménagé ses suggestions et ses conseils. C'est grâce à sa sollicitude de tous les instants que ce travail a pu être mené à terme.

.../...

Je tiens à remercier bien sincèrement Monsieur S. HENIN, Directeur du Laboratoire des Sols du Centre National de Recherches Agronomiques, qui m'a aidé et guidé dans la détermination des minéraux argileux.

Mes remerciements vont également à Monsieur R. CHAMINADE, Professeur à l'Institut National Agronomique, qui m'a conduit le premier sur le terrain à Madagascar et n'a cessé depuis de s'intéresser à mes travaux.

A Monsieur H. HUMBERT, Membre de l'Institut, Professeur au Muséum d'Histoire Naturelle qui m'a fait profiter de sa grande connaissance de Madagascar et qui m'a donné accès à son laboratoire.

Je remercie enfin, Messieurs FOURNIER, OLLAT, PINTA, Mademoiselle du ROUCHET de l'aide qu'ils m'ont accordée dans leurs laboratoires de l'Institut d'Enseignement et de Recherches Tropicales et tous mes Camarades du Service de Pédologie de l'Institut de Recherches Scientifiques de Madagascar à Tananarive.

AVANT PROPOS

Le travail présenté ici a été effectué entre les années 1949 et 1955, à la faveur du lever de la carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000° de Madagascar. Les secteurs dont l'étude avait été successivement demandée par le territoire se trouvaient dans des régions très différentes de l'île (Sud : vallée de la Menarandra ; sud-Ouest : vallée du Mangoky ; Nord-Ouest : région de Majunga, Ankaizinana, Nord ; régions de Diégo-Suarez et d'Ambilobe). Ceci nous a permis d'observer un grand nombre de sols dérivés de roches volcaniques dans des conditions très différentes de climat, végétation, topographie. Cependant, bien d'autres itinéraires ont été effectués, en dehors des régions précitées : environs de Tananarive (Massifs de l'Ankaratra et de l'Itasy); dans le Sud-Ouest (Massif de l'Analavelona); dans le Sud (massif volcanique de l'Androy); sur la côte Est, pour étudier la bande basaltique qui s'étend entre Vangaindrano et Nosy Vrika ; enfin dans le Nord-Ouest (Ile de Nossi-Bé).

Ces sols avaient déjà fait l'objet d'études de la part de A. Lacroix (27) qui dans sa "Minéralogie de Madagascar" traite des sols de l'île ; de H. Erhart (16 à 18) qui dans son traité de Pédologie, fait une large part aux sols de la Grande Ile ; de H. Besairie (8) qui en 1946 présente une première carte des sols du pays.

Depuis la fondation de l'Institut de Recherches Scientifiques de Madagascar, J. RIQUIER (46-47) a étudié des sols dérivés de roches volcaniques à Anjouan et Mayotte et dans la région de Tsivory ; C. MOUREAUX (34) près de Manakara ; G. TERCINIER (54) près de Mahanoro et de Diégo-Suarez ; P. ROCHE et J. VELLY (48) ont étudié les sols cultivés en canne à sucre à Nossi-Bé.

.../...

L'étude de ces sols a nécessité de nombreux mois d'étude sur le terrain, ainsi qu'aux laboratoires de l'Institut de Recherches Scientifiques de Madagascar à Tananarive et de l'Institut d'Études et de Recherches Tropicales à Bondy.

INTRODUCTION

Dans son ouvrage "La Minéralogie à Madagascar" (27), A. LACROIX écrit : "il serait utile de suivre le sort d'une même roche en fonction des facteurs suivants : latitude, altitude, conditions climatiques, intensité de la végétation (Steppe herbeuse ou forêt, influence des microorganismes etc...).

Or, Madagascar présente des variations considérables d'altitude (de 0 à 2.800 m) ; en latitude, elle s'étend sur plus de 12° ; le climat est semi-aride dans le Sud-Ouest, tropical sur la côte Ouest, équatorial sur la côte Est ; en altitude la température s'abaisse considérablement. Toutes les catégories de roches-mères sont représentées : roches plutoniques, métamorphiques, éruptives, sédimentaires. On pourrait s'attendre à ce que les sols de l'île, située presque entièrement dans la zone intertropicale, subissent l'empreinte définitive du climat et de la végétation. C'est d'ailleurs l'impression qu'ont eue les premiers observateurs qui ont vu Madagascar enfoui sous un manteau uniforme et c'est ce qui explique le succès de l'expression d'"île Rouge". Cependant, les prospections que nous avons été amené à faire dans ce pays nous ont montré que cette simplicité n'était qu'apparente et que les phénomènes qui concernent les sols sont plus complexes qu'ils ne le paraissent à première vue.

En particulier, tous les sols ne sont pas rouges et dans une même région les sols dérivés de roches-mères différentes ne présentent pas le même profil. C'est ainsi, par exemple, que dans l'Ouest de l'île, les sols dérivés de sables sont rouges ou jaunes. Ceux dérivés de calcaires sont jaunes, ceux qui proviennent de basalte sont "terre de sienne".

Nous avons voulu, en nous inspirant du mode d'approche proposé par A. LACROIX, suivre le sort des roches volcaniques basiques dans des conditions aussi variées que possible. Les roches

.../...

volcaniques étudiées sont des ankaratrites, basanites, basanitoides, labradorites et le basalte, qui est la plus fréquemment observée. Le choix que nous avons fait est motivé par les raisons suivantes :

- Les roches volcaniques basiques sont représentées dans toutes les régions de l'île, depuis les plus sèches jusqu'aux plus humides, dans les plus fraîches comme dans les plus chaudes. Elles figurent dans tous les domaines climatiques et sous tous les types de végétation. Les roches volcaniques acides : rhyolites, trachytes, phonolites, etc., ne sont représentées dans l'île que de façon assez sporadique et, par suite du mode de gisement de certaines d'entre elles, ne sont guère favorables au maintien du sol.

- Les autres roches ne figurent pas dans l'ensemble de l'île. Les roches sédimentaires ne sont pas présentes dans le centre et très peu à l'Est. Les roches métamorphiques et plutoniques sont peu fréquentes dans l'Ouest.

- Les roches autres que volcaniques ne donnent pas naissance à des sols bien développés dans les régions d'altitude élevée. Pas plus dans l'Andringitra, que dans le massif de Vavavato, il n'y a pas de sol au-dessus de 2.000 m. Ces deux massifs sont quasi-squelettiques. Par contre, dans l'Ankaratra, on peut étudier des profils de sols jusqu'à une dizaine de mètres du sommet (2.636m). La même chose se produit dans les régions semi-arides.

Il est donc possible, dans la plupart des régions malgaches, d'étudier les sols dérivés de roches volcaniques. Par ailleurs, outre l'intérêt scientifique qu'ils présentent, ces sols peuvent avoir un **gros** intérêt économique. A Madagascar, l'île de Nosy-Bé, qui voit une agriculture particulièrement développée, est

.../...

presqu'entièrement volcanique ; le massif de l'Itasy est un des centres agricoles importants des hauts-plateaux malgaches. Les régions voisines de vieille agriculture comme la Réunion et Maurice, sont également des îles entièrement volcaniques.

Dans les pages qui suivent, nous présenteront rapidement les conditions générales qui prévalent à Madagascar en ce qui concerne : le climat, l'altitude, la végétation ; puis les différentes zones volcaniques.

Nous passerons ensuite à l'étude des sols proprement dits : leurs caractères morphologiques ; leurs propriétés physiques et chimiques ; et leur place dans une classification rationnelle.

Puis nous étudierons un certain nombre de propriétés des sols ; telle que : réaction, matière organique et humus, capacité d'échange, rapport silice/alumine, concrétions, et la nature des argiles.

Enfin nous comparerons les résultats obtenus avec ceux des sols de même roche-mère de différentes régions intertropicales et autres.

P R E M I E R E P A R T I E

LE MILIEU NATUREL

-- CHAPITRE I --

Caractéristiques générales de Madagascar

Madagascar est située entre 12° et 25°5 de latitude Sud, 43° et 50°7 de longitude Est. Le tropique du Capricorne traverse la partie Sud de l'île à proximité de Tuléar (fig.1).

L'île est formée d'un socle ancien d'une altitude moyenne supérieure à 1.000 m, terminé à l'Est par une double falaise, Angavo et Betsimisaraka ; la dernière est assez proche de la mer. A l'Ouest, le socle s'achève également par une falaise dite du Bongo Lava sur laquelle s'appuient des terrains sédimentaires inclinés en pente douce vers la mer distante d'environ 200 km.

Ce plateau central est dominé par un certain nombre de massifs montagneux qui sont : au Nord, le Tsaratanana qui culmine à 2.880 m ; au centre, l'Ankaratra : 2.636 m ; au Sud, l'Andringitra : 2.666 m. A ces massifs principaux, il convient d'ajouter un certain nombre d'autres moins importants, mais qui contribuent à donner à la partie centrale de l'île l'aspect tourmenté qu'il a en réalité, malgré le nom un peu trompeur de "Hauts-Plateaux". Ce sont du Nord au Sud ; la Montagne d'Ambre, le Marojezy, l'Ambondro, l'Ibity, l'Ivakoany, la chaîne bordière de Fort-Dauphin.

La bande sédimentaire de l'Ouest paraît à première vue relativement plane. Elle est cependant accidentée par quelques "chaînes" et plateaux alignés Nord-Sud dont les plus importants sont la presque île d'Anorotsangana, le plateau calcaire du Bemaraha, l'Isalo gréseux et son prolongement du Makay ; l'Analavelona au Sud-Ouest.

.../...

En dehors de quelques régions de l'Ouest et du Sud de l'île, le relief est à peu près partout extrêmement tourmenté. Les "tanety"(1) qui s'étendent à perte de vue dans la région centrale, sont bien connues de tous les voyageurs. Ce sont des collines hautes de 50 à 200 mètres qu'il faut escalader sans fin lors de toute progression. Les falaises bordières se dressent comme de véritables murs hauts de 1.000 ou 1.500 mètres. Certains massifs volcaniques ou granitiques constituent par leurs pentes et leur couverture végétale, des zones d'un accès particulièrement difficile. Dans l'Ouest, l'alternance des couches sédimentaires a permis le dégagement de toute une série de cuestas hautes d'une cinquantaine de mètres. Tout ceci fait que, dans l'ensemble du pays, le drainage est, en général, bien assuré. Par contre, les fortes pentes, les pluies torrentielles jointes à la dégradation de la couverture végétale par l'homme font que l'érosion est partout très active et prend parfois une ampleur catastrophique.

Les zones planes sont dispersées dans l'espace et, à part quelques exceptions, d'une étendue modérée. Sur les Hauts-Plateaux, les plaines sont dues à des effondrements tectoniques (Lac Alaotra) suivis de remblaiement, ou bien au barrage de vallées par des coulées volcaniques (Ankaratra, Ankaizinana). Dans l'Ouest, les plaines sont liées aux fleuves qui déposent, de part et d'autre de leurs cours, des alluvions sur une faible largeur mais sur une très grande longueur (vallées de l'Ikopa et de la Betsiboka par exemple). Chaque fleuve se termine par un delta souvent très étendu (Mangoky, Sambirano, Mahavavy par exemple). Dans toutes ces zones planes, le drainage est parfois

(1) : Tanety = Colline.

RÉGIONS CLIMATIQUES DE MADAGASCAR

- I Climat de l'Est
- I Climat du Sambirano
- II Climat du Centre
- III Climat de l'Ouest
- IV Climat du Sud-Ouest

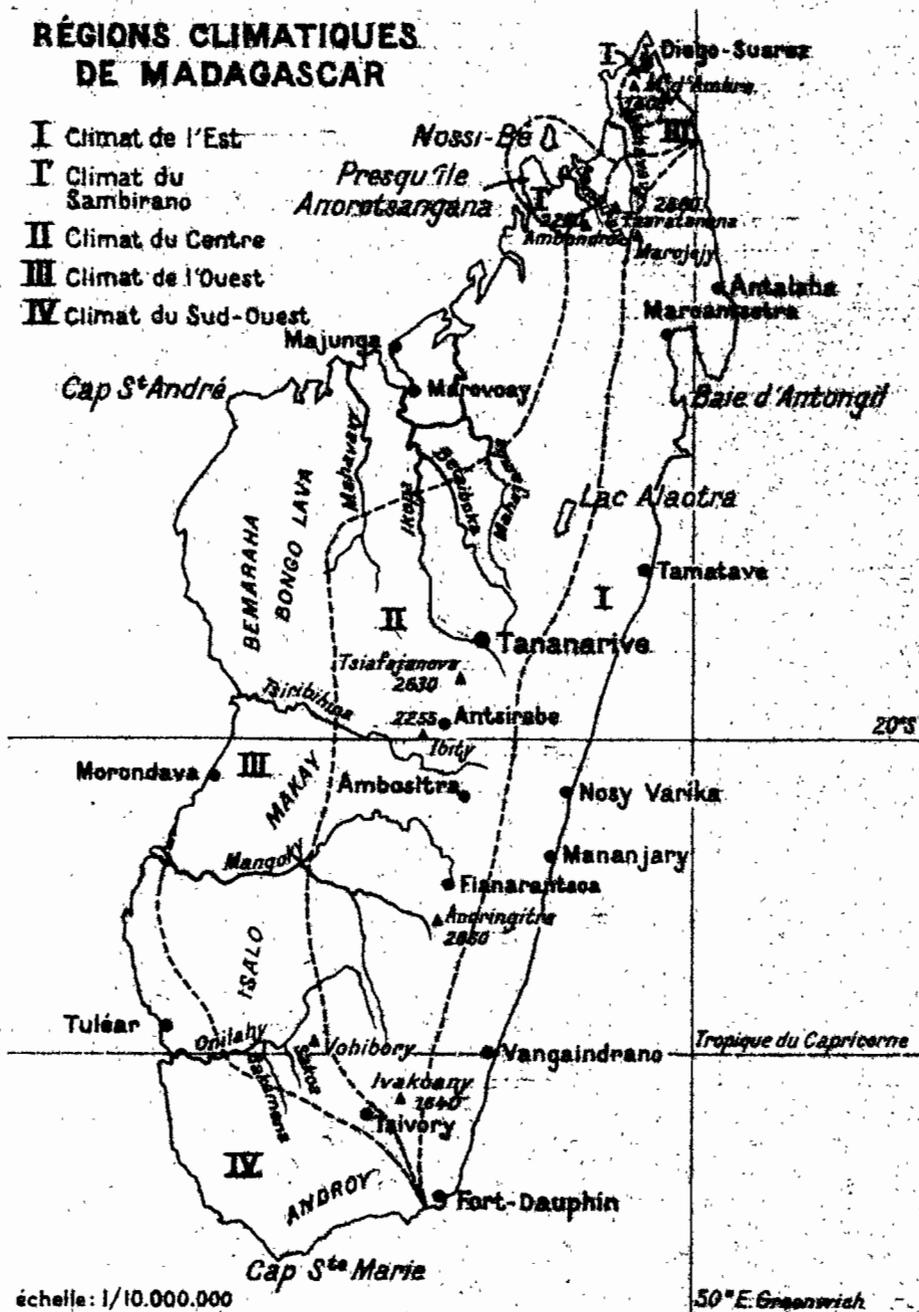


Fig 1.

imparfait ; il n'en reste pas moins que toutes ces plaines sont du plus haut intérêt économique.

La disposition générale de l'île, les éléments constitutifs du relief, déterminent pour une large part, les types de climat qui régissent sur le pays (45).

Par suite de son orientation Nord-Sud, l'île est disposée perpendiculairement, ou presque, au vent dominant chargé d'humidité, qu'est l'alizé.

La partie orientale de l'île est la plus arrosée. Toute la côte Est est très pluvieuse et jouit d'un climat tropical humide. Ce climat est à peu près identique du Nord au Sud avec un maximum de pluviosité aux abords de la baie d'Antongil (3 à 5 m). Vers les extrémités Nord et Sud, la pluviométrie diminue puisqu'à Fort-Dauphin, il ne tombe plus que 1,24 m et à Diégo-Suarez au Nord 0,9 m. L'ensemble de la Côte Est reçoit une pluviométrie comprise entre 2 et 3 mètres, généralement bien répartie sur toute l'année (à l'exception de la baie d'Antongil et des points extrêmes). La température moyenne annuelle est voisine de 23° sur toute la côte. L'extrême-Nord plus sec et plus proche de l'Equateur a une température moyenne annuelle plus élevée (27° à Diégo-Suarez). Les variations au cours de l'année sont faibles (4° environ).

L'alizé qui aborde la falaise orientale s'y débarrasse d'une bonne partie de son humidité avant de venir arroser la partie centrale de l'île. L'altitude provoque un rafraîchissement sensible de la température. Deux saisons sont, sur les hauts-plateaux nettement tranchées : une saison sèche qui dure d'Avril à Novembre. La pluviométrie est moyenne : 1 à 1,4m et la température moyenne de l'ordre de 20°. Les gels sont peu fréquents, mais existent. Le renforcement de l'alizé en Novembre

déclenche la saison des pluies qui durera jusqu'à fin Mars. La température dépasse alors 23°.

Les hauts sommets du Tsaratanana, de l'Ankaratra et de l'Andringitra jouissent d'un climat nettement différent de celui des hauts-plateaux. L'altitude plus forte y détermine une température beaucoup plus basse. Dans le détail, le climat est assez mal connu, car les stations météorologiques sont inexistantes. Dans l'Ankaratra, le seul massif où des mesures aient été faites, on a noté une température moyenne annuelle de 8°8 (13). On peut supposer que celle des deux autres massifs en est peu différente. La neige y est inconnue, mais les gels sont fréquents. L'existence de ces hauts sommets provoque des précipitations abondantes en toutes saisons. Le poste pluviométrique le plus élevé paraît être celui de Nosiarivo dans l'Ankaratra à 2.100 m qui accuse une pluviométrie annuelle de 2,3m. Il paraît logique de penser que, sur les hauts sommets, la pluviométrie doit atteindre 3 m.

Après avoir traversé la région centrale, les vents redescendent vers la côte Ouest à peu près débarrassés de leur humidité. La pluie cependant forte pendant quatre mois de l'année est apportée sur la partie Ouest et Nord-Ouest par la mousson d'Afrique déviée par le bloc continental qu'est Madagascar. Nous aurons donc deux saisons bien tranchées, il tombe de 1 à 2 m d'eau ; la pluviométrie diminue régulièrement du Nord vers le Sud. La température ne descend guère au-dessous de 20° et a pour valeur moyenne 26°.

Une mention particulière doit être faite pour la région du Sambirano et de Nossi-Bé. Cette région, très limitée dans l'espace, jouit d'un climat comparable à celui de la Côte Est. La pluviométrie est supérieure à 2 m et la saison sèche est moins nette. La température moyenne annuelle descend légèrement

.../...

par suite de l'humidité (24°).

Plus au Nord, le Massif d'Ambre, qui s'élève à 1.400 m condense toute l'humidité apportée par les vents d'Est. Alors que le pourtour a un climat du type côte Ouest, le massif lui-même a un climat intermédiaire entre celui de la côte Est et celui des plateaux (distribution de la pluie sur toute l'année mais température plus fraîche).

Enfin, l'extrême Sud est caractérisé par un climat beaucoup plus sec que tous les précédents. La pluviométrie est très faible (0,3 à 0,5 m) et tombe avec irrégularité pendant les mois de Décembre à Mars. La température moyenne reste élevée 23° - 24°, mais les écarts sont assez forts.

Pour résumer nous pouvons classer les climats de l'île en 5 grands types :

- I - Equatorial - Côte Est et Sambirano.
Sans grande variation saisonnière
- 2 - Tropical humide - Côte Ouest.
à 2 saisons tranchées
- 3 - Tropical d'altitude - région centrale.
assez pluvieux - frais
- 4 - Tropical de haute altitude - Sommets
très pluvieux - assez frais
- 5 - Semi-aride - Extrême Sud et Sud-Ouest
Courte saison des pluies - très irrégulière - chaud.

La végétation actuelle de Madagascar ne donne qu'une image très imparfaite de l'état primitif de l'île. Le pays est déboisé au 7/8 et malgré les efforts faits pour ralentir le déboisement, la destruction de la végétation primitive se poursuit.

.../...

Les travaux de H. HUMBERT (23) et H. PERRIER DE LA BATHIE (41) ont montré que l'île fut presque entièrement couverte d'une végétation arborée qui est actuellement réduite à une bande plus ou moins continue sur la Côte Est, discontinue dans l'Ouest et à des îlots dans le reste du pays. Une mention spéciale doit être faite pour l'extrême Sud où la végétation primitive s'est mieux maintenue. Le reste de l'île est occupé par des formations dégradées. La "Savoka" (1) où dominent des espèces arborées ou arbustives, telles : Nastus capitatus, Harongana madagascariensis, Solanum auriculatum, Philippia sp. la Savane arborée est toujours très claire avec Stereospermum euphorioides, Poupartia caffra, Acridocarpus excelsus, Medemia nobilis, Hyphaene shatan, etc.. Le tapis de graminées est le plus souvent constitué par Hyparrhenia rufa, et Heteropogon contortus. La prairie est formée par les genres suivants : Aristida, Hyparrhenia, Heteropogon, Chrysosopogon.

H. PERRIER DE LA BATHIE a distingué deux régions. La région orientale soumise à l'action des vents humides provenant de l'Océan Indien. La région occidentale où ces vents arrivent desséchés. Chacune de ces régions est subdivisée à son tour en un certain nombre de domaines. Dans la région orientale on distingue les domaines de l'Est, du Centre et du Sambirano. La région occidentale comprend les domaines de l'Ouest et du Sud-Ouest.

Le domaine de l'Est est caractérisé par trois types principaux. Les forêts et bosquets littoraux occupent les formations sablonneuses bordant la mer. On y rencontre de beaux arbres ; des Palmiers et des Pandanus.

Les lagunes et marais sont peuplés de fougères, de typhacées, d'aroides. La forêt orientale est une belle futaie formée d'arbres de 25 à 30 mètres avec un sous-bois discontinu. Les épiphytes y .../...

(1) "Savoka" = broussailles secondaires fréquentes sur la Côte Est.

sont nombreuses.

La forêt des cimes occupe les zones d'altitude. Les arbres y sont moins beaux, plus rabougris et tortueux. La végétation secondaire est due essentiellement à la pratique des "tavy" qui provoque le remplacement de la végétation naturelle par une savoka où les espèces principales sont Ravenala madagascariensis, Nastus capitatus, Aframomum angustifolium, Psiada altissima, etc.

- le domaine du centre - la forêt à mousses et sous-bois herbacé apparaît après la côte 800 m ; les arbres sont moins hauts et la strate arborescente est bien fournie. Au voisinage des crêtes apparaît la sylve à lichens, puis, sur les hauts sommets, des formations éricoides qui subsistent encore dans l'An-drangitra, sont en voie de disparition dans le Tsaratanana et ont disparu dans l'Ankaratra (42).

Sur les pentes occidentales, jusqu'à la cote 800 m, s'étendait une forêt basse sclérophylle dans un climat beaucoup moins humide que précédemment. Sur certains rochers on trouve encore la pelouse à xérophytes. Les marais enfin sont peuplés de cypéracées.

Cette végétation primitive est détruite à peu près partout et remplacée par la végétation secondaire. La savoka à Philippia dans les zones les plus humides, la prairie de graminées partout ailleurs, avec quelques espèces peu nombreuses Aristida, Trachypogon, Trichopteryx entre autres. Les arbres sont quasi-inexistants.

- dans le domaine du Sambirano subsiste encore une haute futaie rappelant celle de la Côte Est. Elle est remplacée peu à peu par des savoka riches en Ravevala.

- la région occidentale est essentiellement celle des forêts tropophiles séparées en deux ensembles par le domaine du Sambirano

.../...

Tavy = défrichement en forêt pour y installer des cultures.

qui constitue une enclave du domaine oriental. La forêt est très diverse et en relation plus étroite avec le sol que dans la région orientale ; on peut distinguer la forêt des alluvions, des terrains arénacés, des argiles, des calcaires, etc... Peu à peu la forêt se transforme vers le Sud par l'apparition de baobabs géants et on passe au domaine du Sud-Ouest. La végétation secondaire est composée de végétaux ligneux résistant au feu : Medemia nobilis, Hyphaene shatan, Acridocarpus excelsus, Poupartia caffra, etc.. La strate herbacée est à base de Heteropogon contortus ou d'Hyparrhenia rufa.

Le domaine du Sud-Ouest est le plus sec du territoire. Il est peuplé de végétaux xérophytiques épineux ou aphyllés. Les familles des Didieracées et des Euphorbiacées y sont particulièrement représentées. Dans ce domaine, la végétation primitive a le mieux subsisté du fait qu'elle est moins inflammable et qu'elle couvre des étendues souvent squelettiques.

La connaissance de la géologie de Madagascar est due aux travaux de A. LACROIX (24 à 27), J. BARRABE (1), H. PERRIER DE LA BATHIE (43), E. BASSE (4), J. PIVETEAU, M. BOULE, A. LENOBLE (30 à 32) et surtout H. BESAIRIE qui est à la tête d'une active équipe de géologues. H. BESAIRIE (5 à 10) vient de publier une nouvelle édition de la carte géologique au 1/1.000.000° qui fait le point des nombreux travaux qui ont abouti à la connaissance que nous avons actuellement du sous-sol de l'île.

On peut diviser l'île en deux ensembles que l'on qualifie souvent de cristallin et de sédimentaire. Dans les terrains cristallins, on distingue maintenant, avec H. BESAIRIE, les systèmes suivants, séparés par des discordances, successivement de bas en haut :

.../...

- 1 - le système Androyen, bien représenté dans le Sud de l'île est avant tout paragneissique (leptynites, quartzites, cipolins, amphibolites ou pyroxénites).

- 2 - Le système du Graphite comprend des gneiss riches en graphite. Il est en grande partie migmatisé et comprend de vastes zones où la roche est connue sous le nom de "migmatite granitoïde".

- 3 - Le système du Vohibory (1) comprend des roches métamorphiques variées avec des pyroxénites à phlogopite. A ce système sont rattachées les puissantes venues granitiques du Vavavato et du Vohambohitra.

- 4 - Le système Schisto-quartzocalcaire comprend des roches d'un métamorphisme beaucoup moins poussé que dans les systèmes précédents. Une écaille de lépidodendrée trouvée dans les schistes situe leur âge au Dévonien. Les granites de l'Andringitra et de la baie d'Antongil sont de cette époque.

Tous ces systèmes ont été minéralisés de façon variable et renferment de l'or, du cuivre, du nickel, de l'étain, des pierres précieuses diverses telles que béryls, tourmalines, topazes, des minéraux des terres rares, et radioactifs (à base d'uranium et de thorium). A. HOLMES, et H. BESAIRIE (10) ont pu, d'après les proportions de certains isotopes du plomb, calculer l'âge de ces divers systèmes. Ces mesures ont permis de placer les systèmes Androyen et du graphite dans le Précambrien ; l'âge du système du Vohibory irait du Précambrien tardif au Cambrien inférieur ; celui des schistes quartzites et calcaires irait du Paléozoïque inférieur au Dévonien.

.../...

(1) petit massif au Sud du fleuve Onilahy.

Tous ces terrains cristallins occupent au Centre et à l'Est environ les 2/3 de la superficie de l'île. Les terrains sédimentaires occupent dans l'Ouest de l'île une bande continue du Nord au Sud et large parfois de 2 à 300 km. Ces terrains, non plissés, pendent sous un angle de 1° à 5° vers le canal de Mozambique. On distingue de bas en haut de l'échelle stratigraphique : Le Karroo, essentiellement continental, a été divisé en trois groupes : La Sakoa (1) (Carbonifère moyen ou supérieur) comprend des conglomérats d'origine glaciaire, des couches de charbon, des grès des marnes (l'origine marine de ces derniers dépôts témoignent de l'ancienneté du canal ou d'un golfe de Mozambique). Le Sakamena (2) (Permien inférieur à Trias inférieur) est marin au Nord et continental au Sud. Il comprend au Nord des schistes argileux à poissons : au Sud des schistes grès, arkoses, etc... L'Isalo (3) (Trias moyen et supérieur et parfois Liás) est représenté par de puissantes couches de grès assez grossier et des sables.

Le Jurassique est caractérisé par un renouveau de l'activité marine. Le Liás est calcaire dans le Nord, mais toujours gréseux dans le Sud. Le Dogger est essentiellement calcaire au Nord comme au Sud ; le Malm est le plus souvent marneux ou argileux.

Au Crétacé, les sédiments sont plus variés. L'infra-crétacé est marneux ; du Cénomaniens au Sémonien inférieur, grès et sables dominant, accompagnés d'épanchements volcaniques. Le sommet du système est calcaire.

.../...

-
- (1) Sakoa : affluent de la rive Sud de l'Onilahy
(2) Sakamena : " " " "
(3) Isalo : massif gréseux au Nord de l'Onilahy.

L'Eocène, qui n'est pas représenté partout, est calcaire; l'oligocène n'est présent que dans l'extrême Nord; le miocène calcaire n'occupe qu'une très faible superficie dans l'Ouest et le Nord ; le Néogène continental (sans plus de précision) est représenté dans le Sud par des grès et des sables.

Enfin, au Quaternaire, se déposent des sables continentaux dans l'Ouest, tandis que sur les hauts-plateaux, des lacs se remplissent de sédiments (Antsirabé).

Tous ces terrains, cristallins ou sédimentaires, sont traversés par des venues volcaniques dont les plus anciennes sont les coulées, interstratifiées dans le Crétacé, qui affleurent largement à l'heure actuelle dans l'Ouest (Analavelona, Antanimena, etc..). Les coulées de la Côte Est, ainsi que celles de l'Androy, seraient également crétacées. Plus récentes sont les éruptions de l'Ankaratra qui ont débuté à la fin du Tertiaire pour cesser au Quaternaire. Les éruptions de l'Ankaizinana, de Nossi-Bé sont également quaternaires. L'édification de la Montagne d'Ambre a dû commencer au Crétacé pour s'achever au Quaternaire. Ce sont ces différentes régions volcaniques que nous passerons en revue, de façon plus détaillée, dans le chapitre suivant.

Une autre série de faits qui ont des répercussions considérables sur les sols est due aux habitants. La population de Madagascar, qui compte un peu plus de quatre millions d'habitants, est partagée entre un certain nombre de groupes ethniques d'origine diverse (malayo-polynésienne ou africaine). La densité de population est assez faible : 7 habitants au Km². Mais la répartition est très inégale : les régions les plus peuplées sont l'Imérina et le Betsileo (régions de Tananarive, Ambositra, Fianarantsoa) et la Côte Est. De vastes régions de l'Ouest et du Nord sont

.../...

quasi-inhabitées. Les différents groupes ont naturellement leurs particularités raciales et coutumières, mais, pour le pédologue, cette diversité joue peu au prix des points communs qui, eux, ont des répercussions très sensibles sur les sols.

Tous les malgaches, à quelques exceptions près, sont des mangeurs de riz (0,7 à 0,8 kg par habitant et par jour). La riziculture est l'activité fondamentale du malgache qui, chaque fois qu'il dispose d'eau et d'un terrain plat, s'y installe une riziè-re irriguée. Sur le versant Est, où les pluies sont abondantes et les pentes fortes, le riz est cultivé sans irrigation sur défrichement de la forêt par la pratique des "tavy". Ceci a pour effet de faire reculer la forêt et de provoquer la dégradation du sol. Ce type de riziculture est plutôt destructeur, alors que le précédent est nettement conservateur du sol.

Tous les malgaches, cette fois sans exception, présentent un amour qu'on peut qualifier d'immodéré pour le boeuf. Il n'est pas de collectivité ou d'individu qui ne tienne à posséder le plus de têtes de bétail possible. L'élevage tel qu'on le conçoit dans les pays tempérés, n'a pas cours ici ; le boeuf étant un signe de richesse par lui-même, on ne l'élève pas en vue d'une production de viande ou de lait. La nourriture de ce bétail ne pose pas à son propriétaire de problème particulier. Le troupeau est lâché dans la nature la plus grande partie de l'année et il se nourrit du mieux qu'il peut. En fait, il n'y a jamais assez d'herbe pour l'alimenter convenablement toute l'année et la fin de la saison sèche est toujours une période assez critique. Il faut alors supprimer les herbes inaltérables et si possible agrandir le "pâturage". On a alors recours au feu qui fait disparaître cette paille inutile et en même temps ronge les lisières des boisements et chaque année supprimé quelques milliers d'hectares de forêt. Le sol, à nu au moment des premières pluies d'été, est fortement éprouvé par l'érosion.

.../...

**RÉGIONS VOLCANIQUES
ÉTUDIÉES
À MADAGASCAR**

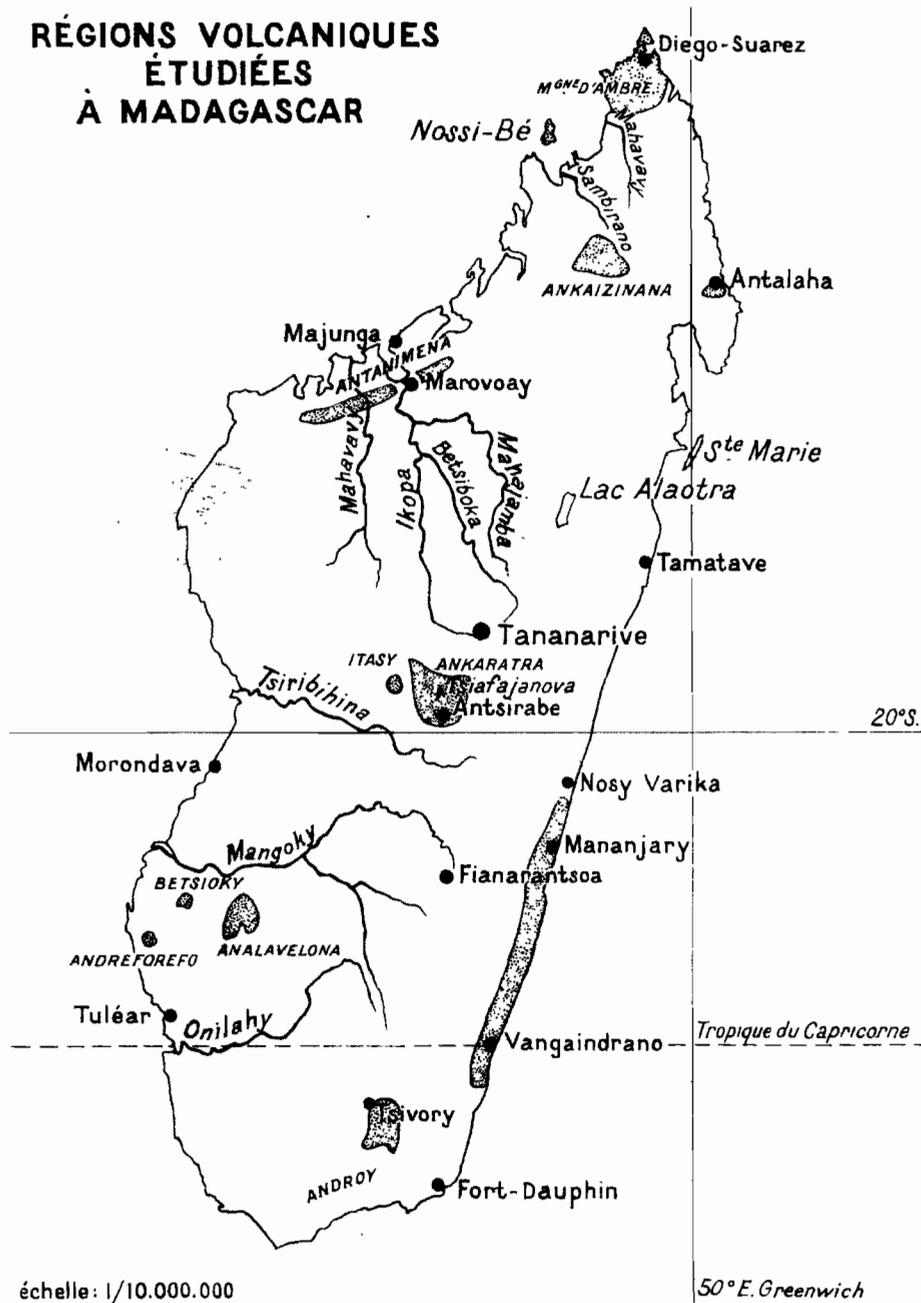


Fig. 2

-- CHAPITRE 2 --

Les principales régions volcaniques de Madagascar

Les régions de l'île où les roches volcaniques basiques affleurent sur une certaine étendue sont les suivantes : dans le Nord ; la montagne d'Ambre et Nossi-Bé ; dans la région centrale l'Ankaizinana, l'Ankaratra et l'Itasy ; dans l'Ouest ; l'Antanimena et l'Analavelona ; dans le sud : l'Andreforefo, Betsioky et l'Androy ; sur la côte Est : la bande s'étendant de Vangaindrano à Nosy Varika (fig.2).

I - la région Nord comprend deux centres volcaniques distincts : la montagne d'Ambre et l'île de Nossi-Bé.

a) La Montagne d'Ambre (fig.3) qui domine au Sud la baie de Diégo-Suarez est connue depuis fort longtemps. Elle a fait l'objet d'une des premières prospections systématiques effectuées dans l'île (P. LEMOINE (29)).

Ce massif occupe une superficie voisine de 2.500 km². Il s'étend depuis Diégo-Suarez jusqu'au Sud d'Anivorano. Il a en gros une forme conique ; il borde la mer à l'Ouest, tandis qu'à l'Est les dernières coulées s'arrêtent à une dizaine de kilomètres de celle-ci. La partie centrale culmine à 1.400 m. Les pentes sont fortes dans le Centre du massif, beaucoup plus douces vers la périphérie qui est constituée par une série de plateaux faiblement inclinés vers la mer.

Le climat du massif d'Ambre est assez spéciale et tranche nettement sur celui de l'ensemble de la région Nord. L'alizé soufflant du Sud-Est est presque toujours chargé d'humidité, quelle

.../...

que soit la saison. Le pied de la montagne (Diégo-Suarez) conserve un climat de type côte Ouest avec 0,90 (1)m de pluie tombant en quatre mois. A mesure que l'on s'élève, la pluviométrie augmente ; 1,36 m à Ambahivahibé, 2,3 m à Joffreville, 2,95 m aux Roussettes. La température décroît : 26,9° à Diégo-Suarez, 24° à Ambahivahibe et à Joffreville, 19° aux Roussettes.

La répartition de la pluviométrie n'est pas aussi simple qu'elle le paraît à première vue. On pourrait supposer que la face Est, exposée à l'alizé, est la plus arrosée. Les renseignements fournis par les postes pluviométriques du versant Ouest accusent des précipitations nettement plus élevées à altitude égale. A l'Est, Ambavahibe à 400 m ne reçoit que 1,36 m de pluie tandis que Andranofanjava à 100m sur le versant Ouest 1,8 m. Le poste pluviométrique d'Ankivanja, situé plus au Sud donne un chiffre analogue. Cette inégalité nous paraît due à l'influence de la mousson.

La végétation est le reflet des conditions climatiques (H. POISSON, 44). Sur le pourtour, en particulier dans le Nord la végétation est à tendance xérophytique nette avec les genres Adansonia, Pachypodium. Vers 400 m apparaît une fûtaie relativement basse, riche en espèces à feuilles caduques, vers 800 m la forêt est de type ombrophile, beaucoup plus élevée et dense. Au sommet, soumis de façon constante à l'action des vents humides, les arbres se chargent d'une abondance de mousses, lichens et orchidées.

Cette végétation primitive ne subsiste pas partout. La forêt qui recule devant la hache et le feu est remplacée. .../...

(1) Nous devons les valeurs de pluie et température à l'obligeance du Service Météorologique de Madagascar.

sans stade intermédiaire, par la prairie de graminées à Cymbopogon cymbarius et Hyparrhenia rufa. Dans les zones les plus basses Heteropogon contortus est abondant.

Du point de vue géologique, la constitution du massif est assez simple. Le sommet est formé de cendres basaltiques ; le pourtour de basaltes avec des basanitoides et des limburgites ; quelques autres roches, telles que phonolites et tinguaïtes, leur sont associées. Un nombre élevé de cratères bien conservés dont certains sont occupés par des lacs, d'autres vides, se rencontrent du Nord au Sud du massif ; ils sont alignés en gros Nord-Sud. Un certain nombre sont bien connus et facilement accessibles : lac Mahery, Petit Lac, Grand Lac, Lac Antanavo, etc... plusieurs sont cachés dans la forêt.

Le type de volcanisme principal paraît être hawaïen associé à des projections stromboliennes.

Ce massif volcanique s'est édifié, semble-t-il, depuis la fin du secondaire. H. DE ST-OURS (50) résumant les observations de P. LEMOINE et les siennes, distingue quatre phases :

1 -Phase acide - Rhyolites et Trachytes (retrouvés en galets dans le Coniacien et d'âge Turonien probable).

2 -Phase anté-aquitanienne ou du Bobaomby - Pas de preuve certaine d'éruptions dans la montagne d'Ambre.

3 -Phase principale ou récente. Edification de la montagne d'Ambre dans son ensemble.

4 -Phase très récente - Mise en place des cônes, cratères et coulées qui subsistent à l'heure actuelle.

L'édification du massif s'est accompagnée d'effondrements qui ont donné naissance à la baie de Diégo-Suarez. La presque île

.../...

du Cap Diégo paraît être le prolongement de la coulée sur laquelle est bâtie la ville de Diégo-Suarez.

Il est difficile de donner un âge plus précis aux deux dernières phases et par conséquent de dater les sols.

b) l'île de Nossi-Bé (fig.4) est située au large de la côte Nord-Ouest de Madagascar, elle fait face au delta du fleuve Sambirano. Son altitude est relativement faible. La topographie est assez tourmentée dans le détail.

Le climat de l'île appartient au type Sambirano caractérisé par aucun mois très sec, 2 mois secs, 2 moyens, et 7 pluvieux et très pluvieux.

La pluviométrie totale est de 2,3 m. La température moyenne annuelle est voisine de 24°.

La végétation primitive (forêt ombrophile) ne subsiste que très localement sur des pitons rocheux à forte pente. Partout ailleurs, elle a été remplacée par des plantations de cafeiers, Ylang-Ylang ou canne à sucre.

L'examen de la partie volcanique de l'île fait apparaître trois ensembles lithologiques assez différents. Dans la partie centrale et Orientale, le sol est très épais ; le basalte qui n'apparaît pas de façon régulière, doit correspondre à une phase éruptive ancienne. Par dessus celle-ci reposent un certain nombre d'édifices très bien conservés, accompagnés de coulées rocheuses. L'Ouest de l'île est recouverte d'un manteau de cendres basaltiques.

Il n'est pas possible de dater les sols de façon précise.

.../...

NOSSI-BÉ

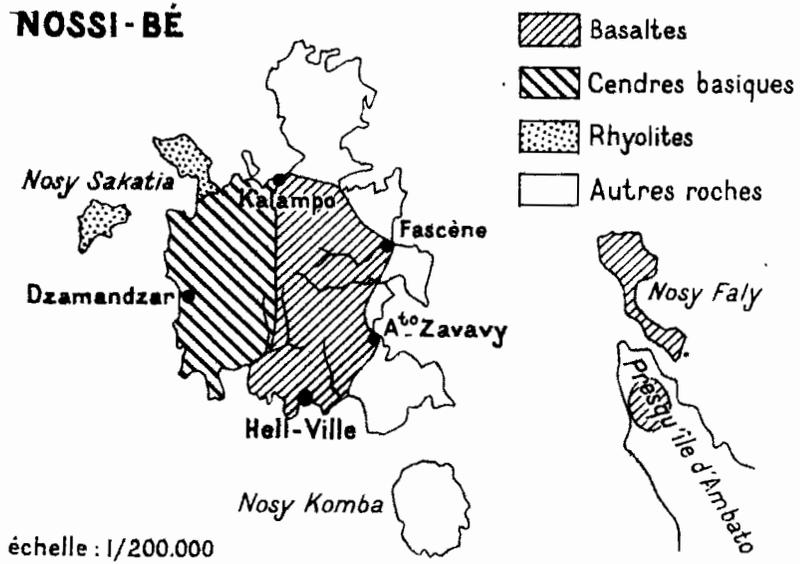


Fig. 4

2 - La région centrale comprend l'Ankaizinana, l'Ankaratra et l'Itasy.

a) l'Ankaizinana est situé au Sud-Est du Sambirano, et au Sud du massif du Tsaratanana. Il ne s'agit pas ici de la zone des cuvettes d'origine alluviale, mais du plateau qui s'étend au Nord-Ouest de celles-ci. Ce plateau, a une altitude de 1700 à 1800 m, domine les bas-fonds de 7 à 800 mètres (5,15,19,53).

Il est constitué par un substratum granitique et gneissique sur lequel se sont épanchées de vastes coulées basaltiques. Certains appareils sont très frais et forment un alignement orienté grossièrement Nord-Sud. Par ailleurs, dans les plaines de l'Ankaizinana de nombreux appareils isolés assez bien conservés sont visibles. Ici, par contre, les coulées ont été généralement de faible étendue.

On peut dans cette région distinguer trois zones principales.

a) le plateau de Bemanevika - il s'étend à l'Ouest d'un méridien passant par ce village. Les coulées y sont abondantes et les cônes et cratères très nombreux. Il se termine aux hauteurs dominant la Sandrakoto.

b) le plateau de Marangaka est situé à l'Est du précédent et s'allonge du Nord au Sud sur une vingtaine de kilomètres. Il n'y a pas d'appareils volcaniques, le relief est beaucoup plus plat que dans le secteur précédent. Les cuirasses y sont très fréquentes.

c) la région des cuvettes. Le volcanisme y est extrêmement localisé. Les appareils y sont très frais ainsi que les coulées encore très rocailleuses et de faible étendue.

.../...

L'ordre dans lequel se sont produites les éruptions n'est pas toujours facile à établir. Certains appareils sont profondément érodés et semblent nettement plus anciens que les autres. Le plateau de Marangaka est plus fortement pénéplané et cuirassé. Aucun centre d'émission n'y est visible. Il est possible qu'il s'agisse là d'une phase assez ancienne.

Par contre, les volcans du plateau de Bemavenika et certains de ceux des plaines sont d'une fraîcheur remarquable, et très peu attaqués par l'érosion. De plus, les coulées se sont épanchées dans les vallées actuelles, ont barré les exutoires de cuvettes et transformé celles-ci en lacs et marais.

Le climat de l'ensemble de l'Ankaizinana ne peut être connu avec grande précision. En effet, les seules stations météorologiques sont installées dans les plaines à Betainkankana (station agricole) et à Mangindrano à une altitude de 1.100 mètres environ. Les données fournies par ces stations sont pour la pluviométrie 1,2 m environ ; et une température moyenne annuelle de l'ordre de 20°. Si l'on admet un abaissement de 0,5° par 100 m on peut penser que la température des plateaux de Bemanevika, et Marangaka doivent être voisine de 15 à 16°, quant à la pluviométrie on en est réduit aux suppositions. La position des stations est relativement abritée et l'on peut supposer que les précipitations sur les hauteurs environnantes doivent être nettement plus fortes. Nous pensons, par comparaison avec l'Ankaratra et la Montagne d'Ambre, que l'augmentation de la pluviométrie avec l'altitude doit être effective ici également et que l'on peut compter sur une pluviométrie voisine de 2.000mm. Les observations que l'on peut faire dans le pays lui-même sont les suivantes :

Le vent dominant provient du Sud-Est et souffle régulièrement toute l'année. Pendant la saison fraîche, les brouillards et les

.../...

L'ANKAIZINANA

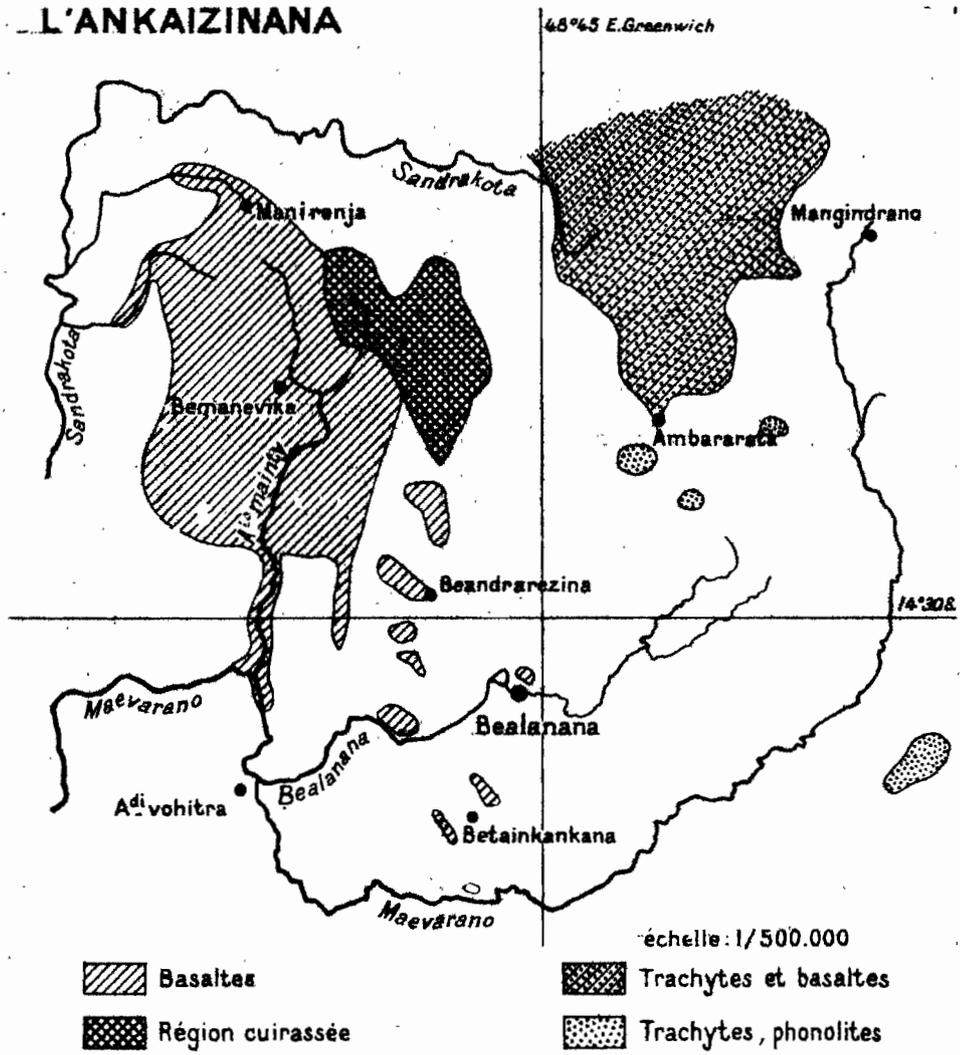


Fig. 5

crachins sont presque quotidiens et cette humidité est d'autant plus sensible qu'on s'élève en altitude. Pendant la saison des pluies, les orages sont fréquents. La température est toujours faible sur les plateaux.

La végétation primitive a pratiquement disparu partout dans les plaines et à Marangaka. Elle subsiste encore abondamment sur le plateau de Bemanevika. Il s'agit d'une forêt du domaine central ; les arbres sont bas et tortueux abondamment pourvus d'épiphytes (orchidées et lichens). Localement on y trouve des arbres de belle venue, surtout dans la partie Nord. Cette forêt est remplacée par diverses formes de dégradation : la savoka à bambous (Nastus capitatus) à bruyères (Philippia floribunda et Helichrysum divers). La prairie de graminées (Aristida) est le dernier stade assez vite atteint car les incendies sont répétés.

b) Le massif de l'Ankaratra (fig. 6) est situé au Sud-Ouest de Tananarive dont il n'est séparé que par une trentaine de kilomètres. Il s'étend vers le Sud jusqu'à Antsirabe.

Sa limite Ouest passe par une ligne Arivonimamo-Faratsiho. A l'Est, il est limité par la route de Tananarive-Fianarantsoa jusqu'à Antanifotsy. Au sud de cette localité il déborde vers l'Est de façon importante jusqu'à Soanindrarinny. Au total sa superficie est voisine de 2.400 Km². Il est compris entre l'altitude 1.200 m à Imerintsiatosika et 2.636 m au Mont Tsiafajavona.

Du point de vue morphologique, ce massif est beaucoup plus complexe que les précédents. Les types de relief sont assez intimement liés à la nature des roches. On peut distinguer :

- 1) la chaîne centrale
- 2) Les plateaux centraux et périphériques
- 3) Les pitons trachytiques
- 4) Les sommets récents

..../...

5) Les plaines de l'intérieur

6) Les plaines du pourtour.

1)- La chaîne centrale s'étend depuis l'Ouest de Miantsoarivo jusqu'à l'Ouest d'Ambohibary. Elle a la forme d'un arc de cercle assez ouvert dont la partie concave est tournée vers l'Est, et la partie convexe vers l'Ouest. Les plus hauts sommets du massif se trouvent dans cette chaîne : Ambohimirandrano, Tsiafakafo, Tsiafajavona, Ambohimariry, Famoizankova, etc... Cette chaîne s'abaisse assez doucement vers le Nord, de façon assez abrupte vers l'Est, par paliers vers l'Ouest et assez brutalement vers le Sud. D'une façon générale, la partie centrale, bien que d'aspect tourmenté, est d'un accès assez aisé. Elle porte des sols jusqu'aux sommets. La partie centrale de cette chaîne est le reste d'une vaste coulée d'ankaratrite qui recouvre vers le Nord des basaltes et vers le Sud des trachytes.

2)- Les plateaux centraux et périphériques. A partir de la chaîne centrale divergent un certain nombre de plateaux souvent très limités au point de vue superficie. Ils constituent plutôt des marches d'altitude différente et fortement entamées par l'érosion. A l'intérieur du massif on peut distinguer : les plateaux de Nanokely vers 2.000 m ; de Laona entre 1.800 et 2.000 m ; celui qui sépare les deux vallées de Manalalondo, le plateau d'Ampamoizamaso. A la périphérie les plateaux d'Imerintsiatosika et d'Arivonimamo. Le plateau d'Ambratotsipihina, de Soanindrariny et de Tritriva.

3)- Un certain nombre de sommets ; trachyphonolitiques ou trachytiques, pointent un peu partout surtout à l'Ouest : Bevohoka, Tsiafakalika, Famoizankova, Vontovorona, les deux Nano.

4)- Au Sud du massif quelques pointements basaltiques ou basanitiques très récents : dans la région de Betafo et Tritriva, etc..

.../...

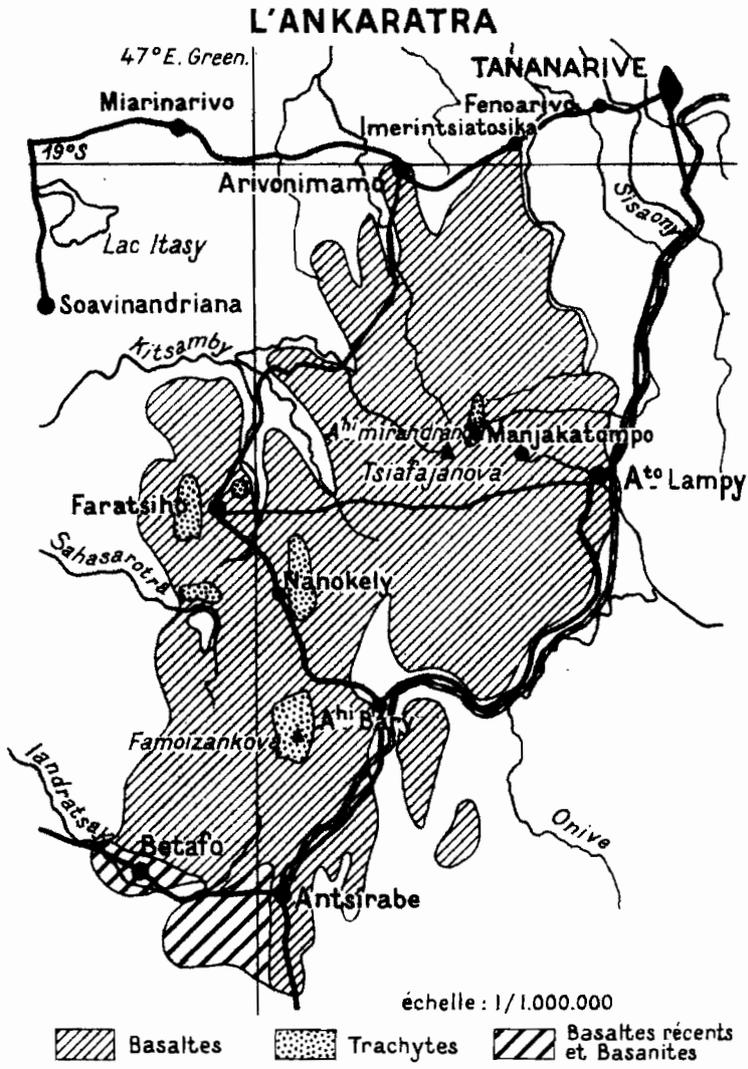


Fig. 6

5)- A l'intérieur et à la périphérie du massif s'étendent un certain nombre de plaines plus ou moins marécageuses dues au barrage de rivières par des coulées volcaniques, plaines de Vivaninony, de Faratsiho, d'Ambohibary, plaine d'Ambohimandroso et d'Antsirabe. Ce schéma donne de l'Ankaratra un aperçu simplifié. Bien entendu dans le détail, les choses sont beaucoup moins simples et l'ensemble paraît extrêmement tourmenté.

A. LENOBLE (30-31) a détaillé la succession chronologique des éruptions de l'Ankaratra que l'on peut résumer comme suit :

Les premières éruptions de la région émettent des laves leucocrates ; en même temps se forme le bassin d'Antsirabe. Après une période d'érosion, émission de laves basiques (basaltes, ankaratrites, etc..) Très près de nous, s'édifient les volcans basanitiques d'Antsirabe -Betafo.

Du point de vue climatique, il convient de distinguer les régions soumises directement à l'action de l'alizé, et celles qui sont à l'abri de ce vent :

a) la partie Est du massif est orientée perpendiculairement aux vents dominants. L'obstacle présenté par la chaîne oblige les vents à monter en altitude ce qui détermine des précipitations fréquentes en toute saison.

Le climat de cette zone peut être défini par celui d'Ambatolampy ou de Manjakatampo. La pluviométrie est forte de décembre à Avril (1,4 m à 1,7 m environ) ; faible mais fréquente sous forme de crachins de Mai à Novembre. La température moyenne est de l'ordre de 20° en saison des pluies, 15° en saison fraîche.

.../...

b) La partie Nord (Imerintsiatosika, Arivonimano) est caractérisée par une pluviométrie légèrement plus faible que précédemment 1,2 m. La température moyenne annuelle est nettement plus fraîche (18°).

c) Dans la partie centrale (altitude supérieure à 2.000m) on peut distinguer deux parties.

Le versant Est reçoit la pluie apportée par l'alizé. Tout le sommet de la chaîne est toujours dans les nuages (Tsiafajavona). La pluviométrie est de l'ordre de 3 m vers 2.600 m ; 2,3 vers 2.000 m. La température au sommet est de 8,8° (d'après le R.P. Colin (13) ; les gels sont fréquents, mais il n'y a jamais de neige. Le versant Ouest à l'abri des vents, est plus sec (Nanokely). La pluviométrie est de l'ordre de 1,7 m ; la température de 13°3.

d) La région Sud (Antsirabé) est caractérisée par une pluviométrie de 1,4 m et une température moyenne annuelle de 16°4.

e) L'Itasy (fig.7).

Le massif volcanique de l'Itasy est situé à une centaine de kilomètres à l'Ouest de Tananarive. Il a une forme grossièrement ellipsoïdale dont le grand axe est orienté Nord-Sud. La longueur est de 35 km, la largeur environ de 12 km. Son altitude est de 1.500 m à 1.700 m et domine d'environ 200 m le plateau gneissique qui lui sert de substrat.

Les roches qui constituent ce massif sont des trachytes, des ordanchites et surtout des basanites. Leur venue en surface est assez récente, si l'on juge par l'aspect des appareils volcaniques qui est d'une grande fraîcheur. On y trouve des cratères et surtout des puys bien conservés. A LENOBLE (32) qui a

.../...

RÉGION DE L'ITASY

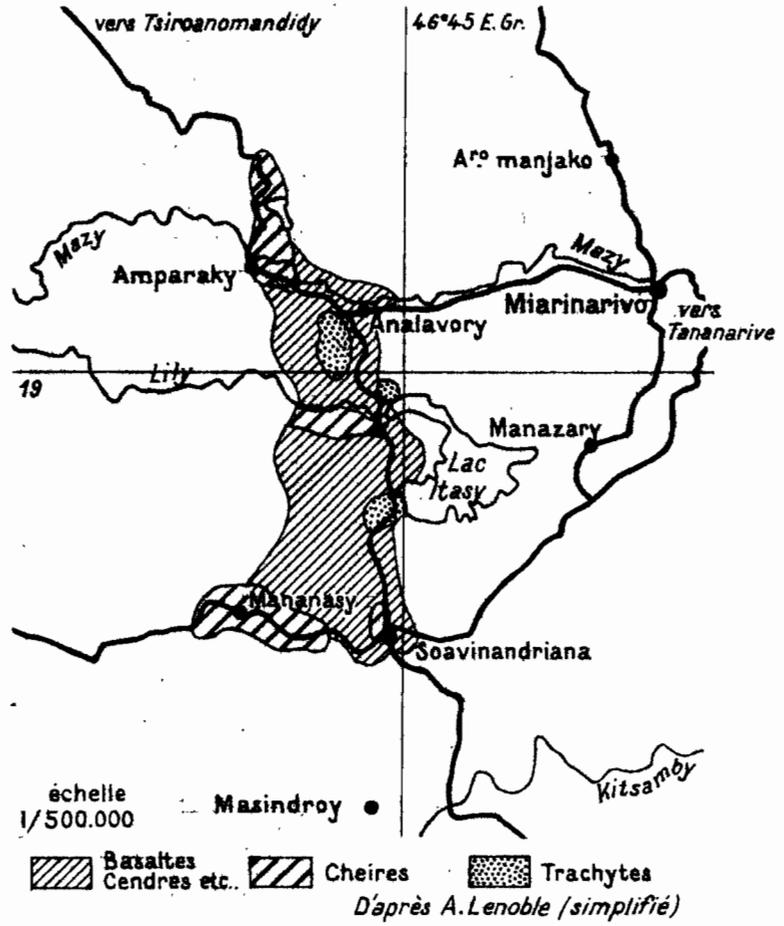


Fig. 7

étudié la géologie de ce massif, a établi la succession des éruptions qui serait la suivante :

- éruptions trachytiques (dômes)
- éruptions basanitiques anciennes
- " trachytiques (coulées)
- " ordanchitiques.
- " basanitiques (coulées).
- " ultravulcaniennes.

Les produits des éruptions ont barré certaines rivières et provoqué la formation de lacs de barrage dont le plus important est le lac Itasy ; les marais de l'Ifanja, au Nord du massif, ont une origine analogue.

Les roches que l'on rencontre dans le massif de l'Itasy sont rarement à l'état pur. La proximité du socle métamorphique fait que les différentes venues volcaniques ont ramené des fragments de gneiss et dans tous les matériaux projetés, on trouve en abondance des fragments de roches métamorphiques. Dans les sols, le quartz est fréquent à l'état de blocs de la grosseur du poing ou de grains assez fins.

En ce qui concerne les roches basiques on peut distinguer deux faciès principaux :

I - les appareils avec leurs coulées. On trouve des volcans basanitiques accompagnés de véritables cheires dans différents endroits du massif en particulier au Nord (Région d'Analavory) au Centre (Ouest d'Ampefy) et au Sud (Soavinandriana à Mananasy).

2 - Les cendres et les scories s'étalent partout dans le massif et vont se déposer surtout à l'Ouest de celui-ci recouvrant

.../...

les sols rouges dérivés de gneiss. Ces cendres sont rarement des produits volcaniques purs.

Le climat qui règne dans l'Itasy est nettement plus pluvieux que celui qui prévaut sur l'ensemble des hauts plateaux environnants ; mais il paraît localisé à la région de Soavinandriana dont l'altitude est un peu supérieure. De plus, le versant Est paraît nettement plus humide que le versant Ouest à l'abri du vent d'alizé qui apporte les pluies. A Soavinandriana la pluviométrie annuelle est de 1.980 mm qui tombent d'Octobre à Avril. Pendant la saison sèche il ne tombe que 80 mm. La température moyenne annuelle est de 17,4°. A Amparaky, localité du Nord-Ouest de l'Itasy, la pluviométrie est de 1.550 mm avec une température annuelle nettement plus élevée (20°). Miarinarivo qui est situé nettement à l'Est de l'Itasy, la pluviométrie est de 1.534 mm.

La végétation primitive a complètement disparu dans l'Itasy. Elle est remplacée, soit par la prairie où abonde Heteropogon contortus, soit par des cultures : haricots, maïs, tabac, soit par des plantations d'aleurites.

3 - Dans l'Ouest de l'île, les régions suivantes ont été étudiées : l'Antanimena (au Nord-Ouest) et l'Analavelona (au Sud-Ouest).

a) l'Antanimena est un vaste plateau allongé Sud-Ouest à Nord-Est, légèrement arqué avec sa partie concave tournée vers la mer. La longueur est de 125 Km, sa largeur de 25 km environ. Les limites Ouest et Est sont en gros constituées par les rivières Andranomavo et Betsiboka. Il est traversé du Sud au Nord par la Mahavavy du Sud.

.../...

LE PLATEAU DE L'ANTANIMENA

15°S

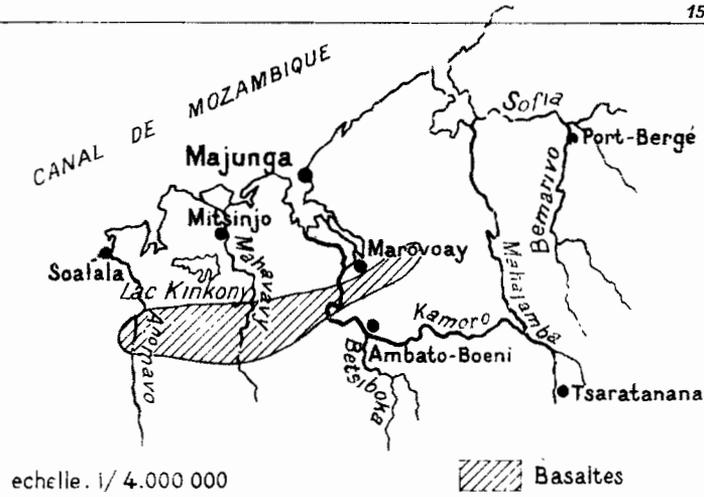


Fig. 8

La roche qui donne naissance aux sols de l'Antanimena est un basalte étudié par A. LACROIX (27) et H. DE ST OURS (49). Il est interstratifié entre deux formations datées du Sénonien et de l'Albien. Son âge turonien ou cenomanien n'est pas fixé avec certitude.

Le climat qui règne sur l'ensemble du plateau ne subit pas de variations importantes d'Est en Ouest. Il est sensiblement le même que celui de Marovoay caractérisé par :

- une température moyenne annuelle de 26°
- une pluviométrie annuelle de 1.580 mm.

Les différences saisonnières sont particulièrement nettes pour la pluie, elles sont peu marquées pour la température.

	<u>Température</u>	<u>Pluie</u>
de Nov. à Avril	28	1.500 mm/
de Avril à Oct.	24	-

La végétation primitive est la forêt tropophile riche en Dalbergia, Stereospermum, etc.. Quelques baobabs existent de loin en loin. Cette forêt est remplacée par une savane très ouverte à Medemia nobilis et Hyphaene shatan. La prairie à Hyparrhenia rufa occupe également de vastes espaces.

b) l'Analavelona (fig. 9) est situé dans le Sud-Ouest de l'île entre les localités de Sakaraha, Ankazoabo et Manombo.

Le plateau long de 15 km et large de 10, est incliné du Nord vers le Sud. L'extrémité Nord est à 1.300m, le Sud est à 600 m d'altitude ; vers le Nord, l'Est et l'Ouest, ce plateau se termine brutalement, par une falaise d'environ 5 à 600 m, sur la

.../...

plaine de l'Ilona et la vallée de la Manandana. Le plateau constituait autrefois une table unique. Actuellement, il est tronçonné par un certain nombre de rivières aux gorges profondes qui isolent une série de plateaux allongés Nord-Sud, les uns étroits, les autres relativement larges. Tous ces plateaux se raccordent plus ou moins vers le Nord en un plateau unique assez étroit.

Du point de vue géologique on peut distinguer de bas en haut les séries suivantes :

- Le Crétacé moyen (Cénomaniens, Turoniens représentés par des grès)
- une première couche de basalte assez mince et n'apparaissant pas partout = les basaltes inférieurs.
- des grès à stratification entrecroisée non datés, assez épais.
- une deuxième couche de basalte couronnant la majeure partie du plateau = les basaltes supérieurs.

Au sud, les basaltes supérieurs disparaissent sous des calcaires campaniens et maestrichtiens.

Seuls les "basaltes supérieurs" dont l'âge doit être sénonien inférieur nous concernent ici. Les basaltes inférieurs n'apparaissent que sur des pentes très fortes et ne portent pas de sols. Ces basaltes sont certainement fissurés. L'eau sourd en abondance au dessous du basalte au contact des grès.

Le climat de l'Analavelona est assez mal connu. Les seules stations météorologiques sont situées à sa périphérie à une altitude bien inférieure. Les données pour Ankazoabo et Sakaraha sont :

.../...

PLATEAU DE L'ANALAVELONA

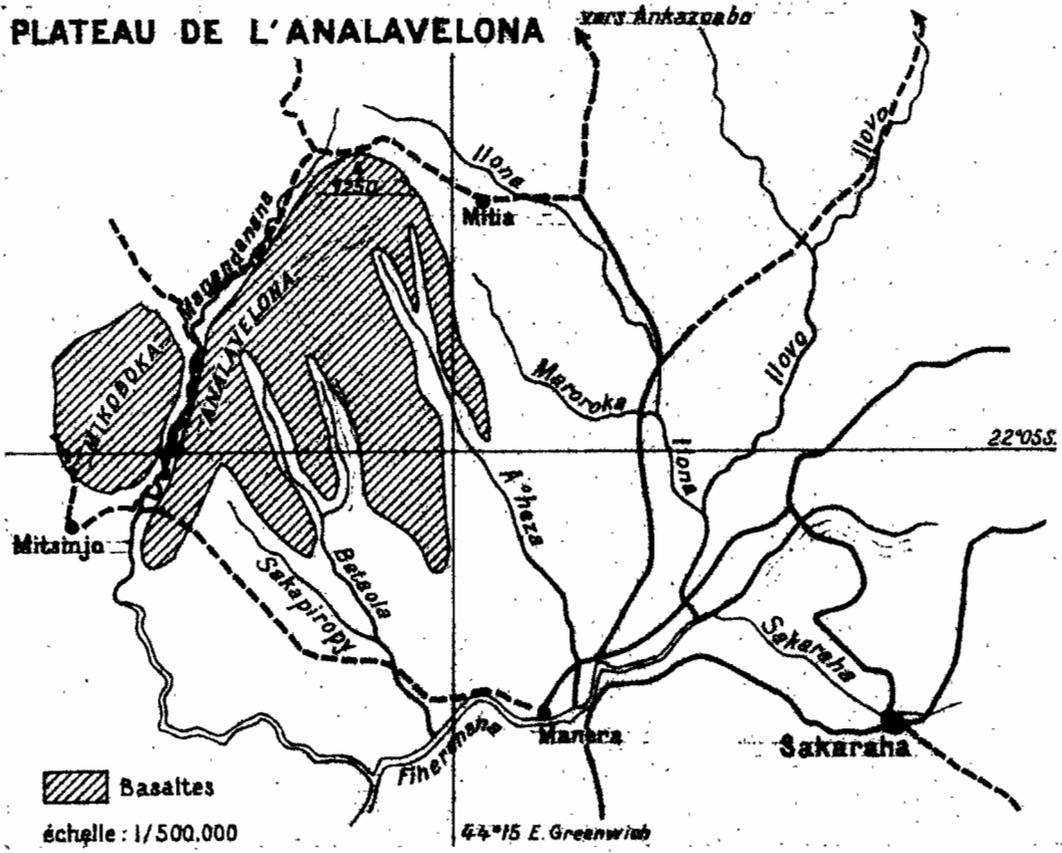


Fig. 9

	Température	Pluviométrie mm
Ankazoabo	24,4	681
Sakaraha	22,9	786

L'Analaveloná est situé à 600 m plus haut que ces deux stations. Si la diminution de 0°,6 par 100 m est valable, la température sera proche de 20°. La pluie ne peut être connue avec précision. Il est assez probable qu'elle dépasse légèrement celle des deux stations périphériques précitées, si l'on en juge d'après l'aspect de la végétation.

La végétation primitive est une forêt **assez** riche en espèces. On y a noté des Dalbergia, Bauhinia et quelques autres légumineuses. Les baobabs sont peu fréquents, les lianes nombreuses. Dans les endroits un peu humides Dracaena, Pandanus sont fréquents avec de grands Begonia. Il n'a pas été noté d'Euphorbes arborescents dans cette forêt.

La forêt détruite (par le feu) est remplacée sans stade intermédiaire par la prairie à Heteropogon contortus et Hyparrhenia rufa. Cette dernière espèce est particulièrement abondante au voisinage même de la forêt où elle atteint parfois 2,5 m de hauteur. A mesure que l'on s'éloigne de la forêt; Hyparrhenia rufa devient de plus en plus petite et se mélange d'Heteropogon contortus. Peu à peu, Heteropogon contortus subsiste seul.

Les arbres n'apparaissent, en pieds isolés que dans les vallées, ce sont les espèces habituelles des savanes du Sud-Ouest: Celastrus linearis, Dicoma tomentosa, Tamarindus indica, etc..

La prairie est soumise actuellement aux feux de brousses. La forêt, en régression, et reléguée à la bordure Nord du plateau, est menacée de disparition.

.../...

c) l'Andreforefo - Betsioky.

Au Nord de Tuléar, signalons l'existence de quelques pointements isolés de basalte d'étendue très variable. Il s'agit de buttes ou de petits plateaux dominant les environs d'une dizaine de mètres tout au plus. Le basalte qui les constitue est postéocène.

Le climat doit être intermédiaire entre ceux de Tuléar et de Befandriana avec une pluviométrie annuelle de 500 mm et une température de 27°.

La végétation est nettement xérophile, mais il ne s'agit pas de bush à épineux.

On ne trouve pratiquement pas de sol sur ces basaltes. Sur l'Andreforefo la roche présente un aspect bulleux et scoriacé. Les arbres introduisent leurs racines entre les blocs.

4 - Dans le Sud, le seul massif volcanique est celui de l'Androy.

Ce massif est situé au Sud Sud-est de l'île entre les localités de Tsivory et Ambovombe. Il intéresse une superficie totale de 2.000 Km². Son altitude est de 5 à 800 m dans la partie centrale.

Le basalte est disposé en coulées horizontales recouvertes partiellement par des rhyolites qui lui sont postérieures. Le réseau hydrographique (Mandrare, Tsivory, Andrantina) est fortement implanté et détermine le compartimentage du massif en plusieurs massifs plus ou moins tabulaires séparées par des vallées profondes. Dans la région de Tsivory, une plaine longue de 8 km et large de 3 km présente un intérêt tout particulier. L'ensemble du massif est pratiquement dépourvu de sol sauf dans la région de Tsivory.

.../...

Le climat de Tsivory est caractérisé par une pluviométrie de 750 mm tombant en quatre mois de Décembre à Mars. La température moyenne annuelle est de 23°.

La végétation primitive a plus ou moins disparu ; dans certains endroits, à l'Ouest, on trouve encore des Adansonia, Pachypodium, Aloè en abondance. Au Nord, la végétation présente un caractère beaucoup moins xérophile avec quelques arbres (Terminalia en particulier).

La végétation secondaire est essentiellement la prairie a Heteropogon contortus.

5 - La Côte Est.

Le basalte affleure le long de la côte Est de l'île depuis Vangaindrano jusqu'à Mahanoro. Les affleurements de cette roche forment une bande continue longue de 400 km et large en moyenne de 25 km. Ce basalte a un faible pendage Est et se termine à l'Ouest par un abrupt parfois fortement marqué. Cette bande côtière ne subit guère de variation importante d'altitude du Nord au Sud. La pluviométrie est bien répartie dans toute l'année 2 à 2,5 m. La température moyenne annuelle est de 23 à 24°, il n'y a pas de forte variation saisonnière.

La végétation est, à l'origine, la forêt ombrophile qui ne subsiste que de loin en loin. Elle est remplacée dans son ensemble par des broussailles (ou savoka) à Ravenala ; quelquefois la dégradation est telle que l'on aboutit à une prairie de graminées où abonde le genre Aristida.

En résumé, le volcanisme s'est manifesté à Madagascar dans toutes les régions de l'île. Dans la grande majorité des cas, les matériaux projetés sont basiques et les roches les plus

.../...

souvent observées sont des basaltes avec accessoirement des basanites et des ankaratrites. Les roches acides sont beaucoup moins fréquentes et leur mode de gisement est peu favorable au maintien des sols.

L'âge exact des éruptions n'est pas toujours facile à établir, étant donné que les coulées et matériaux projetés reposent souvent sur des terrains métamorphiques. Lorsque des restes fossiles sont associés à ces matériaux (restes de plantes ou d'animaux), ils ne permettent pas de dater avec beaucoup de précision la venue éruptive.

L'âge absolu des sols est impossible à déterminer. Toutefois, dans certaines régions, on peut dire d'après l'aspect morphologique des appareils que tel volcan est antérieur ou postérieur à tel autre. Dans la montagne d'Ambre, l'Ankaizinana, l'Itasy, à Nossi-Be, certains appareils présentent une très grande fraîcheur ; les sols qu'ils supportent seront beaucoup plus jeunes que ceux recouvrant des formations aux formes plus molles.

DEUXIEME PARTIE

LES SOLS

--CHAPITRE 3 --

A. La Classification des Sols.

Le problème de la classification des sols est un des plus ardues de la pédologie moderne (59,135,170,179,207,208,209), et il ne semble pas qu'une solution définitive, qui soit admise par tout le monde, ait été atteinte jusqu'à présent. Ceci paraît dû au fait que la pédologie est une science jeune et que son objet est encore incomplètement connu. En effet, si les sols des pays tempérés ont été étudiés assez rapidement, la connaissance de ceux de la zone intertropicale n'a fait de progrès importants que lors des deux ou trois dernières décades. Il y a donc là tout un ensemble de sols récemment arrivés à notre connaissance et qu'il s'agit de classer de façon logique avec ceux plus anciennement connus.

Le premier problème qui se pose est celui du choix des critères de classification. Ceux-ci peuvent être les facteurs de formation du sol (climat, végétation, topographie et drainage, microorganismes, etc...). De l'interaction de ces facteurs résulte une morphologie particulière du sol qui sert de base à la classification. Ou bien, on peut considérer que l'interaction de ces facteurs aboutit à un certain nombre de processus de formation du sol, tels que lessivage, accumulation de matière organique, gleyification, latéritisation etc... Les grandes catégories de sols sont caractérisées par un des processus fondamentaux associés à des degrés divers à un ou plusieurs autres processus.

.../...

L'étude de la littérature pédologique relative à la classification des sols, montre que cette double tendance à prévalu jusqu'à ces dernières années. Le représentant le plus valable de la première tendance était l'école américaine de C.F. MARBUT (148) pour laquelle les grandes subdivisions étaient basées sur le climat, le drainage, l'âge. Dans l'esprit des pédologues français (A. DEMOLON, G. AUBERT, S. HENIN 99) les sols devraient être classés d'après leur mode de genèse, c'est à dire qu'une analyse des processus de formation du sol doit être faite avant d'assigner au sol une place dans une classification. A l'heure actuelle, les divergences tendent à s'estomper peu à peu. Depuis quelques années, les facteurs extérieurs aux sols sont abandonnés au profit des caractères propres du sol. Cependant, ici encore, les avis sont partagés. Les uns s'attachent aux caractères morphologiques seuls, sans essayer de les interpréter. Les autres cherchent au contraire à interpréter ces caractères et à dégager grâce à eux, la genèse du sol. Le classement qui en résulte est forcément moins immédiat, mais satisfait davantage l'esprit par sa plus grande rigueur.

C'est dans cet esprit qu'a été élaborée la classification que nous suivons dans cette étude. Elle demande qu'au préalable soient définis les termes qui seront utilisés dans ce texte et en particulier les processus de formation du sol. Les processus connus à l'heure actuelle sont en nombre limité ; ceux qui prévalent dans la zone intertropicale sont :

La latéritisation. Le mot de "laterite", que nous devons au voyageur britannique F. BUCHANAN (1807) 78, a reçu les acceptions les plus diverses ainsi que les termes qui en résultent : latéritique, lateritisation, etc.. Il en est résulté une telle confusion qu'on a jugé nécessaire de créer des mots nouveaux tels que ferrallitique, siallitique, latosol, etc.. A l'heure actuelle, le même mot a un sens différent suivant le pédologue

.../...

qui l'emploie et l'unité de vue, est, de ce fait, difficile à réaliser. Pour essayer d'y voir clair, un rapide retour en arrière est nécessaire.

Le mot de "laterite" dans le sens de F. BUCHANAN, désignait une formation superficielle rouge susceptible de durcir à l'air et de donner des matériaux servant aux constructions, à la manière de briques. Par la suite, ce terme a été utilisé pour désigner toutes sortes de formations dures ou tendres de la zone inter-tropicale. Les premières études chimiques ont montré (M. BAUER 65-66, J. CHAUTARD et P. LEMOINE 89, M. ARSANDAUX 56, A. LACROIX 27-142, J.B. HARRISON 127, etc..) que l'on assistait, d'une part à un départ de la silice et des bases alcalines et alcalino-terreuses, d'autre part à un enrichissement en hydroxydes de fer et d'alumine. La **latéritisation** paraissait valablement traduite par le rapport Silice/Alumine (F.J. MARTIN et H.C. DOYNE 150) ou par le calcul des éléments latéritiques de L. FERMOR (109) et A. LACROIX (142). Par la suite, cette double présence d'oxydes de fer et d'aluminium fut contestée par un certain nombre d'auteurs dont R.L. PENDLETON, S. SHARASUVANA (174-175), J.A. PRESCOTT (179), G. WAEGEMANS (213), M. VAN DER VOORT (211) entre autres. Pour ceux-ci, la présence d'oxydes de fer est seule caractéristique de latéritisation et le terme de latérite doit être restreint aux seules formations durcies trouvées dans les profils. A vrai dire, s'il y a des sols où les oxydes de fer existent seuls, la présence d'alumine libre n'a aucun caractère accidentel ; elle est de règle sur de vastes espaces du globe, et ceci quelle que soit la roche-mère. A Madagascar, en particulier, la présence d'alumine libre a été mise en évidence dans les sols dérivés de toutes les roches éruptives et métamorphiques. Les roches sédimentaires : grès (à condition qu'ils ne soient pas exclusivement siliceux), calcaires etc.. donnent également naissance à des sols renfermant de l'alumine libre. Les marnes, du fait de leur imperméabilité, paraissent seules évoluer difficilement. Nous sommes donc amenés à séparer

.../...

nettement les trois processus qui étaient jusqu'à présent considérés comme solidaires : l'individualisation simultanée des oxydes de fer et d'aluminium ; l'individualisation des oxydes de fer seuls : le cuirassement ou formation de masses indu-rées dans un profil. De manière à éviter toute confusion dans l'esprit du lecteur, nous croyons préférable d'éviter l'emploi du terme lateritique, si sujet à contestation, et lui substituer celui de "ferrallitique" déjà recommandé par G.W. ROBINSON (185).

Le processus de ferrallitisation se traduit donc par la mise en liberté dans le sol de quantités d'hydroxydes d'aluminium (Gibbsite ou $Al_2O_3, 3H_2O$) et soit d'hydroxydes de fer (Goethite Fe_2O_3, H_2O) soit d'oxyde de fer (Hématite, Fe_2O_3). Les formes mal cristallisées ou colloïdales sont également connues (Stilpnosidérite). Le minéral argileux qui les accompagne est, jusqu'à présent, toujours de type kaolinique. Le processus de ferrallitisation peut exister seul ou être accompagné d'un ou plusieurs des processus suivants : accumulation de matière organique, cuirassement, lessivage et gleyification.

La ferruginisation. Les sols sans alumine libre mais où les hydroxydes et les oxydes de fer sont abondants, sont connus : certains "krasnozems" et "red loams" des auteurs australiens, certains sols rouges décrits par G. WAEGEMANS (213) au Congo Belge etc.. Ils ne sont pas séparés des sols ferrallitiques. G. AUBERT dans son enseignement et dans différentes publications (48,50), les range sous le nom de sols ferrugineux tropicaux. A ceux-ci peuvent être rattachés les sols que certains désignent, sans autre précision, sous le nom de "sols rouges non latéritisés" (H.A. MIDDLEBURG 158) ou de "ferruginous lateritic" (C.R. VAN DER MERWE, 151-152). La ferruginisation consiste essentiellement en la mise en liberté d'oxydes et hydroxydes de fer. Le minéral

.../...

qui les accompagne est, normalement, la kaolinite. Les processus qui peuvent être associés à la ferruginisation sont le cuirassement et le lessivage.

Le cuirassement se traduit par, l'apparition dans un profil d'horizons durcis, massifs, oolithiques, vacuolaires, etc.. Les cuirasses peuvent être alumineuses ou ferro-alumineuses (suivant les roches-mères) ou ferrugineuses. Contrairement aux processus précédents, il n'existe jamais seul et accompagne soit la ferrallitisation, soit la ferruginisation, soit l'hydromorphie. Contrairement à **une opinion souvent émise**, nous ne pensons pas que le cuirassement corresponde à un stade final d'évolution où le durcissement se produit lorsque tout ce qui n'est pas fer ou alumine a été éliminé. Il existe, en effet, des sols pratiquement dépourvus de silice et de bases qui ne sont pas cuirassés et aussi des cuirasses contenant des teneurs appréciables de silice.

La gleyification se traduit par l'apparition dans un profil d'horizons plus ou moins épais de couleur grise, ou grise tachetée de rouge ou ocre. Ces horizons résultent de la réduction et de la réoxydation du fer en milieu alternativement anaérobie et aérobie. Ce processus de gleyification est caractéristique des sols qualifiés d'hydromorphes. S'il existe parfois seul, il est souvent associé à l'un des processus suivants : accumulation de matière organique, cuirassement, calcification. Les minéraux que l'on trouve sont variés et n'ont pas la même spécificité que dans les sols précédents. Dans la zone des sols ferrallitiques, on trouve : gibbsite, kaolinite, hydroxydes de fer ; dans celle des sols ferrugineux tropicaux, montmorillonite, kaolinite et hydroxydes de fer.

L'accumulation de la matière organique qui est le processus dominant des chernozems, n'existe jamais seule dans la zone intertropicale. Elle est toujours subordonnée à un autre

.../...

processus fondamental qui est soit la **ferrallitisation**, soit la gleyification. Contrairement à une opinion parfois avancée, (C.E. KELLOGG 140), les sols de la zone intertropicale peuvent être riches en matière organique. Ferrallitisation et accumulation de matière organique ne s'opposent pas autant qu'on le croyait (G. AUBERT 60).

La calcification se traduit par l'apparition dans le profil de calcaire libre et par la saturation quasi-complète du complexe absorbant. Le calcaire se présente soit sous l'aspect de filonets sans forme très précise, soit à l'état de nodules. La calcification n'existe pratiquement jamais seule et accompagne la gleyification.

Le lessivage est la migration en profondeur d'éléments colloïdaux provenant de la partie supérieure d'un profil (argile oxydes de fer) ainsi que de bases. Ce processus est peu fréquent à Madagascar ; il existe rarement seul et accompagne la ferruginisation et la gleyification. Il n'a pas été noté en même temps que la ferrallitisation.

La salinisation est bien connue dans les régions semi-arides de l'île. L'alcalinisation ou fixation de sodium sur le complexe absorbant existe à Madagascar ; c'est probablement un processus plus fréquent que l'on ne l'a cru jusqu'à présent.

B. La Classification des Sols dérivés de Roches Volcaniques.

Jusqu'à ces dernières années, on trouvait encore dans les traités de pédologie classiques (G. ROBINSON 184) l'expression de "sols volcaniques", pour désigner les sols dérivés de roches volcaniques. Ce terme, que les utilisateurs reconnaissaient volontiers comme impropre (on aurait pu dire aussi bien : sols

granitiques, sols gréseux, etc..) n'est plus utilisé dans le dernier traité paru, celui de E.C.J. MOHR et E.A. VAN BAREN (165) qui concerne tout spécialement les sols tropicaux. L'usage de ce terme paraît tenir à plusieurs causes.

I - Dans les pays tempérés, où la pédologie a pris naissance, les régions volcaniques sont, soit peu étendues, soit situées en dehors des zones de grande agriculture.

2 - Les sols en question ne paraissent pas entrer aussi facilement que les autres dans une classification valable pour les sols dérivés d'autres roches-mères. H. JENNY (134) signale qu'en Ecosse, là où un granite donne un sol podzolique, un basalte donne naissance à un sol brun. Dans les pays tempérés, où les conditions climatiques ont une influence moins marquée que sous les tropiques, certaines roches-mères sont susceptibles de conférer aux sols des caractères particuliers.

Dans la zone intertropicale, à en juger par l'abondante littérature qui les concerne, les sols dérivés de roches volcaniques ne peuvent plus être étudiés séparément. C'est qu'en effet, sous les tropiques, les roches volcaniques prennent une extension considérable : Afrique Centrale, Inde péninsulaire, Indochine, Australie et surtout Iles du Pacifique (Hawaii en particulier) et de l'Océan Indien (Réunion et Maurice).

Dans toutes ces régions, les sols dits volcaniques sont d'un accès généralement facile et, surtout, ils revêtent une importance économique primordiale. Dans la zone intertropicale, malgré des apparences parfois trompeuses, les processus de formation du sol sont valables pour toutes les roches-mères ; il n'y en a pas qui soient particuliers aux roches volcaniques. Parmi ceux que nous avons énuméré précédemment, les processus suivants concourent, à Madagascar, à la formation des sols dérivés de roches volcaniques : .../...

1 - Ferrallitisation. 2 - Ferruginisation. 3 - Cuirassement.
4 - Accumulation de matière organique. 5 - Gleyification. 6 -
Calcification.

Nous verrons, au cours de cet exposé, que les processus, 1, 2 et 4 résultent essentiellement de l'action des facteurs climatiques ; les processus 3, 5 et 6 résultent de l'action combinée de facteurs climatiques et d'autres tels que le drainage. Le processus "lessivage" n'a pas été observé dans ces sols ; pas plus que ceux de salinisation ou d'alcalinisation.

D'une façon générale, un de ces processus l'emporte nettement sur tous les autres et peut être considéré comme fondamental. C'est lui qui servira à l'établissement des sous-ordres. Il y aura donc, pour Madagascar, les trois sous-ordres suivants :

1. Sous-ordre des sols ferrallitiques.
2. Sous-ordre des sols ferrugineux tropicaux
3. Sous-ordre des sols hydromorphes.

Le groupe sera déterminé par le processus fondamental auquel sera adjoit un autre processus d'importance secondaire mais qui amènera des changements importants dans la morphologie du sol.

Le sous-groupe résultera d'une variation de degré dans l'action d'un de ces processus.

L'ensemble de ces diverses interactions peut être synthétisé par le schéma ci-après.

.../...

PROCESSUS SECONDAIRE

Sous-Ordre	Processus fondamental	Néant		Accumulat. de Mat. Organique		Cuirassement	Calcification
		Groupe	Sous-Groupe	Groupe	Sous-Groupe		
Ferrallitique	Individualisation de Al_2O_3 et Fe_2O_3	Sols ferrallitiques typiques	Sols rouges -Brun-rouge -Brun-jaune -(mavomena)	Sols ferrallitiques humifères	Sols bruns - Ando	Sols ferrallitiques cuirassés	Néant
ferrugineux tropical	Individualisation de Fe_2O_3 seul	Sols ferrugineux tropicaux typiques	Sols rouges Sols jaunes	Néant		Sols ferrugineux tropicaux cuirassés	Neant
Hydromorphe	glyyification	Sols à gley	Sols gris tachetés	Sols hydromorphes à accumulation de matière organique	Sols marécageux Sols de Marais	Sols à cuirasse de mare	Sols Régur

La place qu'occupe un de ces sols dans le schéma précédent résulte toujours d'un choix. Pour nous, le processus qui motivera cette place devra se produire dans le sol et être responsable des principaux caractères morphologiques du sol. Il n'est pas rare de trouver des sols ferrallitiques qui présentent à la partie inférieure de leur profil des manifestations nettes d'hydromorphie (taches, marbrures, etc.). Elles sont le résultat de l'action d'une nappe plus ou moins temporaire. La partie supérieure du profil n'est pas intéressée par cette nappe.

L'examen du tableau précédent montre qu'il peut s'élever plusieurs difficultés pour y placer un sol déterminé. Il est impossible, dans l'état actuel de nos connaissances, de dire, sur le terrain, si un sol renferme ou non de l'alumine libre. Ceci rend difficile la séparation entre sols ferrallitiques et sols ferrugineux tropicaux. Les auteurs anglo-saxons ont résolu la question en groupant l'ensemble des sols précédents sous le nom de "latosol" qui constitue, en quelque sorte, un super sous-ordre. Nous verrons, par la suite, que les régions où se produisent l'individualisation du fer et celle de l'alumine sont bien séparées sur le terrain et correspondent à des conditions climatiques nettement différentes. Le classement d'un sol dans un sous-ordre ou dans un autre ne sera obtenu qu'après une analyse chimique (détermination du rapport silice/alumine) ou physique (analyse thermique différentielle, examen aux Rayons X). Mais ce n'est pas, croyons-nous, un obstacle fondamental. En pétrographie et en minéralogie, l'observation à l'œil, aidée de tests simples sur le terrain n'est jamais considérée comme suffisante et sert de guide à l'examen au microscope polarisant. A mesure que la pédologie se développera, il est certain que les observations que l'on pourra faire sur le terrain, toujours empreintes de subjectivité, devront être complétées par des déterminations de laboratoires toujours plus précises et plus rapides.

.../...

Une autre difficulté que peut soulever ce tableau est l'appellation des sols. E.C.J. MOHR et F.A. VAN BAREN (165) ont attiré l'attention sur la confusion qui pouvait résulter de l'application à des sols tropicaux de qualificatifs ayant déjà acquis droit de cité dans les pays tempérés. Malheureusement, des noms tels que "chernozem" ou "podzol" sont encore peu nombreux c'est pourquoi, nous n'hésitons pas à adopter les termes de "regur" et "ando" qui paraissent bien s'appliquer aux sols analogues de Madagascar.

Les sols dérivés de roches volcaniques peuvent donc se classer de la manière suivante :

Sous-Ordre des sols ferrallitiques.

1 - Groupe des sols ferrallitiques typiques. Ce groupe est caractérisé uniquement par l'individualisation du fer et de l'alumine. Il est subdivisé en quatre sous-groupes : rouge ; brun-rouge ; brun-jaune ; et "mavomena".

2 - Groupe des sols ferrallitiques cuirassés. Au processus de ferrallitisation s'ajoute celui de cuirassement.

3 - Groupe des sols ferrallitiques humifères. Au processus de ferrallitisation s'ajoute l'accumulation de la matière organique. Ce groupe est subdivisé en deux sous-groupes : les sols bruns et les sols "ando".

Sous-Ordre des sols ferrugineux tropicaux.

1 - Groupe des sols ferrugineux tropicaux typiques. Le seul processus qui intervient est l'individualisation des hydroxydes de fer. Ce groupe est subdivisé en deux sous-groupes : rouge et jaune.

2 - groupe des sols ferrugineux tropicaux cuirassés.

.../...

Sous-ordre des sols hydromorphes.

1 - Groupe des sols à gley qu'on peut subdiviser en deux sous-groupes : les sols gris et les sols tachetés.

2 - Groupe des sols à accumulation de matière organique qu'on subdivise en sols de marais et sols marécageux.

3 - Groupe des sols à cuirasse de mare.

4 - Groupe des sols à calcification représentés par les sols "regur".

Tous ces sols correspondent à des conditions de climat de topographie que nous préciserons dans un chapitre ultérieur.

Enfin les sols développés à partir de matériaux volcaniques frais ont été rassemblés sous la rubrique de sols jeunes. Nous leur ajouterons les sols d'alluvions de produits volcaniques.

C. Généralités sur la morphologie des sols
dérivés de roches volcaniques basiques.

Les sols dérivés de roches volcaniques basiques ont, dans les pays de la zone intertropicale, des caractéristiques morphologiques qui leur sont propres et qui les différencient, d'une part des sols des pays tempérés, d'autre part des sols dérivés d'autres roches-mères.

Le premier caractère de différenciation est tout d'abord l'épaisseur du profil. Celui-ci est naturellement plus épais sous les tropiques que dans les pays tempérés, mais il est beaucoup moins épais que celui des sols dérivés d'autres roches-mères placées dans les mêmes conditions climatiques et topographiques.

.../...

Dans les pays tempérés, une épaisseur de l'ordre de 1 m est généralement observée. A Madagascar, la distance entre la surface du sol et la roche-mère intacte est le plus souvent comprise entre 2 et 10 m. Un sol dérivé d'une roche granitique ou gneissique atteindra facilement 20 m. et plus ; la plupart du temps la roche-mère intacte ne sera pas atteinte et la reconstitution du profil devra être effectuée après des observations sur des coupes voisines.

Un autre caractère de différenciation d'ordre général vient de la disposition différente des horizons. Dans les pays tempérés, un des processus fondamentaux est le lessivage qui provoque la formation d'horizons éluviaux et illuviaux affectés des lettres A et B. Ceci facilite beaucoup la désignation des horizons. Dans les pays tropicaux, ce processus est peu fréquent, et, en tous cas, à Madagascar n'a pas été observé sur les sols étudiés. Ceci ne permet pas l'utilisation de la notation précédente. Certains auteurs, comme E.C.J. MOHR (164), ont créé des systèmes de notation d'ailleurs assez compliqués. Par ailleurs, l'épaisseur des horizons est souvent forte et se mesure en mètres plus souvent qu'en décimètres ; les phénomènes qui se produisent dans un horizon sont autres que dans les pays tempérés, et se manifestent par : pénétration plus ou moins profonde de la matière organique, coloration d'un horizon par des formes particulières d'hydroxydes de fer et de manganèse et non migration d'argile ou de fer. Tout ceci fait que, le plus souvent, le profil a un certain aspect d'uniformité ; les changements de couleur s'opérant de manière assez graduelle. Les deux parties les plus distinctes du profil sont le "solum" complètement différencié où les caractéristiques de la roche-mère ont complètement disparu, généralement épais et plus ou moins homogène et de couleur franche et la zone d'altération située entre le solum et la roche-mère. Cette dernière y est reconnaissable par le

.../...

fragments intacts qui y subsistent en plus ou moins grande quantité. Cette zone est beaucoup moins colorée que le solum avec des teintes grises ou violacées. Cette zone d'altération peut être réduite à quelques centimètres.

Le solum présente une gamme de couleurs assez étendue : rouge, jaune, brun ou noir, les teintes sombres sont plus fréquentes que les teintes vives. Lorsque, par exemple, on compare deux sols rouges dérivés, l'un de basalte, l'autre de gneiss, le plus fortement coloré est toujours celui dérivé de gneiss. Dans beaucoup de cas, la structure est peu nette en place. L'examen d'une coupe créée par une tranchée, une excavation due à l'érosion montre que le solum "tient" assez bien. L'ensemble est le plus souvent massif et cohérent. Un bloc examiné de plus près donne des fragments nuciformes ou polyédriques ; les structures grumeleuses et grumeleuses fines caractérisent les sols humifères et sont presque toujours liées à de fortes teneurs en matière organique. Parfois, on observe la structure prismatique, mais toujours à la faveur de vieilles coupes ; cette structure résulte d'un retrait du sol par dessiccation sans rapport avec sa nature physique ou chimique. Les sols "regur" présentent seuls, une structure prismatique nette.

Malgré une roche-mère dépourvue de quartz, la texture est rarement franchement argileuse ; le limon est toujours abondant. Le sable est le plus souvent représenté par de la magnétite ou de fins agrégats qui ne peuvent être détruits par les procédés habituels d'analyse mécanique. Seuls, les sols hydromorphes, qui restent immergés assez longtemps, fournissent des teneurs en argile importantes.

Enfin, une autre caractéristique de ces sols est la pénétration, souvent profonde, de la matière organique qui donne aux

.../...

sols leurs teintes sombres. Alors que, pour un sol dérivé de gneiss ou granite, la pénétration de la matière organique est peu profonde et nettement limitée, cela est rarement le cas pour un sol dérivé de basalte.

La zone d'altération présente une variété d'aspects qui peut tenir à la structure de la roche qui conditionne la présence ou l'absence d'une nappe phréatique à la base du profil. En général, les cendres basaltiques s'altèrent presque immédiatement, c'est à dire que l'on trouve des fragments frais inaltérés enrobés de sol bien formé avec peu ou pas de fragments tendres ou pourris. Lorsqu'on est en présence d'un basalte rocheux, la zone d'altération peut être épaisse, ou bien, réduite à quelques centimètres ou même millimètres. Cette altération rapide se produit dans un nombre limité de cas, mais on trouve des cas de ce genre dans l'Ankaratra, dans la Montagne d'Ambre, à Antalaha. Dans le cas de cette dernière localité, la pellicule d'altération a été analysée ainsi que le sol rouge qui se trouve immédiatement au-dessus. A. Lacroix La Minéralogie de Madagascar (27.).

	Roche	Pellicule d'altération	Sol rouge
SiO ₂ %	48,3	15,5	28,8
Al ₂ O ₃ %	13,2	23,5	23,4
Fe ₂ O ₃ %	5,1	29,1	22,5
FeO %	7,1		
TiO ₂ %	2,4	4,2	2,6
H ₂ O %	3,1	21,5	18,6

Ces résultats montrent que la roche est très rapidement complètement décomposée. Ceci se produit de façon constante lors de l'altération en boule. Ce mode d'altération, fréquent dans tous les pays tropicaux, est courant dans le Nord et l'Ouest de

.../...

l'île où le climat est toujours chaud avec une saison des pluies et une saison sèche nettement tranchée. Sur les hauts-plateaux ce mode d'altération est assez peu fréquent.

Un autre mode d'altération du basalte est caractérisé par la présence, entre le solum et la roche-mère, d'un ou plusieurs horizons de teintes grises ou violacées, qui peuvent être, dans une certaine mesure assimilés à des horizons de gley. Généralement, ces horizons sont beaucoup moins cohérents que le solum, et sont inclinés par rapport à l'horizontale. Souvent, on les trouve humides et ils paraissent toujours plus argileux et plus plastiques que le solum.

Tous ces modes d'altération laissent un résidu, où hydroxydes et silicates sont prépondérants ; les bases sont à peu près complètement éliminées. Ceci se produit sous les climats pluvieux et lorsque le drainage s'effectue normalement. Par contre, dans les régions sèches de l'île (Sud et Sud-Ouest), les bases qui proviennent de la décomposition des minéraux, sont beaucoup moins bien éliminées et s'accumulent sur place, en particulier la chaux dont le basalte est riche. Il n'est pas rare de trouver, dans la partie méridionale de l'île, du basalte en voie d'altération avec, entre les fragments, des filonnets ou des amas de carbonate de calcium. Ce calcium n'est pas totalement éliminé par une pluviométrie insuffisante et s'accumule sur place après avoir fixé le gaz carbonique de l'air. Les sols "regur" des régions semi-arides renferment des carbonates de calcium ainsi formés.

La roche-mère est une roche noire ou bleu foncé qui se présente sous les formes habituelles des laves basaltiques : vastes nappes fluides de type hawaïen ou coulées plus réduites de type strombolien. L'altération est presque toujours

.../...

rapide et l'âge du volcanisme ancien ; aussi est-il peu fréquent d'observer la surface des coulées. Parfois, dans la Montagne d'Ambre on peut observer des laves cordées ou en gratons. Pour les mêmes raisons, la prismation, si elle existe, n'est pas souvent observable. En tous cas, le basalte est très fréquemment fissuré et l'on en a des preuves indirectes : sources à la base des couches de basalte, absence de cuirasses sur de vastes surfaces horizontales, etc.. Les roches présentent une grande homogénéité d'aspect : elles sont microlitiques, rarement vitreuses, les phénocristaux d'olivine ou de plagioclases sont peu fréquemment visibles à l'œil nu ; les variétés porphyriques ; Océanite et ankaramite exceptionnelles. Parfois, on passe à des variétés renfermant de la néphéline virtuelle (basanitoïde) ou exprimée (basanite). L'ankaratrite voit la disparition des feldspaths. La composition de ces roches est caractérisée par des teneurs relativement faibles en silice, mais fortes en chaux et magnésie.

A. LACROIX (27) a publié des analyses complètes de roches volcaniques basiques de Madagascar. Nous reproduisons ici quelques résultats qui concernent les roches des régions que nous avons étudiées. Ces roches constituent un ensemble allant de la sakalavite à silice virtuelle à l'ankaratrite dépourvue de feldspaths.

Sakalavite	362	Plateau de l'Antanimena (Maroala)
Basalte	358	Ankaratra (Tritriva)
	355	Diégo-Suarez
	457	Montagne d'Ambre (Roussettes)
	368	Plateau de l'Analavelona
Basanitoïde	466	Ankaizinana (Sandrakotohely)
	386	Presqu'île du Bobaomby (extrême-Sud)
Basanite	385	Ankaratra (Tsiafakafo)
Ankaratrite	408	Ankaratra (Mont Tsiafajavona)
	411	Ankaratra (Plateau de Laona).

.../...

	362	358	355	457	368	466	386	385	408	411
SiO ₂ %	50,44	47,81	49,38	48,92	42,22	43,88	45,80	42,61	38,74	39,02
Al ₂ O ₃ %	13,94	13,94	12,59	16,16	11,40	14,56	14,06	12,08	11,30	11,05
Fe ₂ O ₃ %	3,49	3,26	4,97	3,72	3,88	3,69	5,16	4,12	4,28	3,52
FeO %	9,72	8,35	8,09	5,14	9,88	8,03	7,95	7,48	7,71	6,65
MgO %	3,96	9,52	7,34	7,66	5,54	7,52	6,96	10,60	11,97	14,33
CaO %	8,88	8,73	11,62	9,64	10,18	12,04	9,25	13,36	14,43	15,30
Na ₂ O %	2,88	2,97	2,59	2,74	2,19	3,02	4,67	2,78	3,02	2,24
K ₂ O %	0,58	0,87	0,88	1,34	0,54	1,92	2,38	1,98	1,92	1,38
TiO ₂ %	3,46	2,07	1,98	0,94	4,26	3,84	2,17	3,64	3,30	3,31
P ₂ O ₅ %	0,23	0,67	0,24	0,49	0,22	0,39	0,89	0,73	1,77	1,23
+ %	1,34		0,31	2,11	1,59	0,81	0,55	0,54	1,28	1,75
H ₂ O		2,16								
- %	0,95		0,09	1,24	1,37	0,27	0,12	0,17	0,60	0,36

-- CHAPITRE 4 --

Les Grandes Categories de Sols dérivés de roches volcaniques
à Madagascar.

A. LES SOLS FERRALLITIQUES.

Les sols ferrallitiques sont caractérisés essentiellement par la présence d'hydroxydes d'alumine dans l'ensemble du solum. Il n'a pas été constaté que l'alumine puisse exister seule sans hydroxyde ou oxyde de fer. Cette présence d'alumine libre, jointe à une constance pratiquement sans défaut de kaolinite, fait que le rapport silice/alumine est toujours inférieur à 2. Des critères comme : faible valeur de la capacité d'échange de bases, faibles teneurs en matière organique, sont applicables à un certain nombre de groupes, mais ne peuvent être étendus au sous-ordre entier.

Les sols ferrallitiques ont été subdivisés en trois grands groupes, dans lesquels on distingue plusieurs sous-groupes :

Les sols ferrallitiques typiques. Aucun phénomène autre que l'individualisation des oxydes de fer et d'aluminium n'est évident de manière notable. En particulier, il n'y a pas de lessivage de l'argile ou du fer, ni accumulation de matière organique, ni cuirassement. Les sols de ce groupe ont été subdivisés en trois sous-groupes : les sols ferrallitiques rouges, brun-rouge, jaune-brun. Quelques mots seront ajoutés au sujet des sols qualifiés de "mavomena".

.../...

Les sols ferrallitiques humifères. L'individualisation des hydroxydes est accompagnée par une accumulation importante de matière organique qui pénètre assez profondément dans le sol. Le solum prend des teintes foncées depuis le brun jusqu'au noir. Les sols de ce groupe ont été subdivisés en sols ferrallitiques bruns et sols ferrallitiques noirs (ou Ando).

Les sols ferrallitiques cuirassés. Les hydroxydes mis en liberté durcissent pour donner lieu à la formation de cuirasses ferro-alumineuses. Les cuirasses uniquement alumineuses n'ont pas été observées (du moins à partir de la roche-mère envisagée).

1 - Groupe des Sols Ferrallitiques Typiques.

Sous-groupe des sols rouges.

a) Localisation, végétation, climat, drainage. Les sols ferrallitiques rouges ont été reconnus, observés et étudiés dans les régions suivantes : bas-plateaux périphériques de l'Ankaratra, en particulier aux environs des localités d'Arivonimamo, Ampahimanga, Imerintsiatosika, Ambatolampy (plaine de Ihazolava) : certaines basses régions de la Montagne d'Ambre (environs d'Ambohitsimihely) ; plateau de l'Analavelona.

Le climat qui prévaut dans toutes ces régions est assez variable. Dans l'Ankaratra, la pluviométrie est comprise entre 1,2 et 1,4 m. avec une température moyenne annuelle de 20°. Sur le pourtour Ouest de la Montagne d'Ambre, la pluviométrie est de 1,8 m. avec une température voisine de 26°. Il aurait été intéressant de connaître les données climatiques de l'Analavelona. Nous avons vu plus haut qu'on peut estimer que la pluviométrie est supérieure à 0,8 m. et que la température est voisine de 20°.

.../...

La végétation primitive est rarement observable sur ces sols. Elle est remplacée, à peu près partout, par une végétation secondaire assez pauvre en espèces. Dans l'Ankaratra, la forêt primaire n'existe plus sur ces sols. On ne trouve que la prairie à Aristida, Ctenium, Trachypogon, et quelques boqueteaux d'Eucalyptus et d'Acacia plantés ou subspontanés. En montagne d'Ambré, la forêt est également détruite. La prairie qui lui a succédé est riche en Aristida rufescens. Dans l'Analavelona, la forêt est remplacée par la prairie à Heteropogon contortus entremêlée d'Hyparrhenia rufa.

Les pentes sont peu importantes et le drainage est assuré normalement dans tous les cas.

b) Morphologie. Parmi les nombreux profils qui ont pu être observé, notons les suivants :

FX II. Plaine de l'Ihazolava. (à l'Ouest d'Ambatolampy, près du village d'Andravola), sous gr minées, avec quelques Eucalyptus et Helychrysum. Terrain plat.

0 - 15 cm	Brun ; assez humifère, argilo-limoneux ; grumeleux assez fin ; peu cohérent ; poreux.
15 - 60 cm	Brun-rouge passant au rouge ; argilo-limoneux grumeleux ; poreux .
60 -120 cm	Rouge ; argileux assez plastique.
120 -160 cm	Rouge ; argileux ; très plastique ; quelques fragments ronds rougeâtre s'écrasant sous les doigts.

la roche-mère n'a pu être atteinte dans ce profil ; il s'agit d'un basalte visible aux alentours.

.../...

FX 34. Plateau d'Ampahimanga (à dix kilomètres au Sud d'Arivorimamo) Boisement d'Eucalyptus avec un sous-bois d'Helichrysum et de Phlippia avec les graminées suivantes : Ctenum concinum, Aristida similis. Terrain plat.

- 0 - 25 cm Rouge foncé, tachant fortement les doigts ; argileux compacte, avec quelques fentes de dessiccation verticales.
- 25 - 120 cm Rouge foncé ; argileux, fentes verticales ; fragments nuciformes assez grossiers.
- 120 - 160 cm Brun à grisâtre ; de même structure passant graduellement au gris.
- à 160 cm Ankaratrite altérée grise.

FX 35. Plateau de Tsimahabeombý (à 2 km. au Sud de Ime-rintsiatosika) sous une prairie de graminées où domine Aristida similis. Terrain plat.

- 0 - 30 cm Rouge foncé ; limono-argileux avec quelques racines fines donnant de la cohésion au sol de structure grumeleuse assez fine.
- 30 - 85 cm Rouge foncé ; massif à polyédrique (fragments de 0,5 à 5 cm de côté) ; concrétions.
- 85 - 150 cm Rouge foncé ; analogue à l'horizon précédent mais dépourvu de concrétions.
- 150 - 180 cm Rouge devenant grisâtre ; horizon de transition
- 180 - 210 cm Gris ; assez argileux assez peu cohérent.
- 210 - 300 cm Roche altérée grise avec par endroits, des boules de basalte s'altérant par écailles.

.../...

S-7 : Plateau de l'Analavelona à 1.000 m d'altitude ; prairie de Heteropogon contortus et Hyparrhenia rufa : terrain en très faible pente vers le Sud.

- 0 - 15 cm Brun à brun-rouge foncé ; limoneux ; grumeleux à nuciforme.
- 15 -100 cm Rouge à brun-rouge ; limono-argileux ; quelques fentes verticales, donnant des fragments nuciformes.
- vers 100 cm Quelques fragments de basalte dans un limon argileux jaune-brun.
- vers 200 cm Blocs de basalte nombreux s'altérant par écailles concentriques.

La comparaison de ces différents profils montre que : le solum est épais de 1 à 1,6 cm et plus, sa couleur est rouge ou rouge foncé et en surface rouge-brun ; sa texture est argileuse ou argilo-limoneuse ; sa structure est grumeleuse ou grumeleuse fine en surface, nuciforme en profondeur ; l'horizon d'altération est assez variable, gris ou jaunâtre, argileux sans structure nette. La roche s'altère fréquemment par écailles, mais ce n'est pas la règle.

c) Caractéristiques Physiques et Chimiques

Réaction. Le pH est moyennement à faiblement acide dans tout le profil, mais cette acidité est variable d'un profil à l'autre. Les valeurs obtenues varient entre 5,7 et 6,7.

Granulométrie. Les fractions argile et limon sont les plus abondantes, puisque chacune d'elles est comprise entre 30 et 40 %.

.../...

Mais il est assez probable qu'il ne s'agit pas de vrai limon. La surface est souvent riche en sable fin constitué en fait de très fin agrégats.

Matière organique. Les teneurs en matière organique totale sont comprises entre 4 et 7%, malgré la couleur rouge du sol. Les teneurs en azote total atteignent 2 et 3% en surface. Le rapport C/N est compris entre 12 et 14. Il est possible qu'un peu de carbone minéral, provenant de la combustion des herbes en saison sèche soit compté avec le carbone organique. Les teneurs en humus sont comprises entre 0,5 et 1,0 %. Avec la profondeur, les teneurs en matière organique, azote et humus diminuent très rapidement, et, à peu de distance de la surface, les valeurs obtenues sont, dans tous les cas, très faibles. Le rapport C/N tombe très rapidement à 5.

Le complexe absorbant. La capacité d'échange n'est jamais très élevée. En surface, les valeurs obtenues varient entre 12 et 15 meq/100 g ; en profondeur, elles tombent à 6 et 8 meq/100 g. La matière organique est certainement responsable des valeurs plus élevées obtenues en surface. Les bases échangeables sont toujours très faibles. Les valeurs suivantes ont été obtenues en surface comme en profondeur.

CaO	0,2 à 0,5 ‰
MgO	0,1 à 0,2 ‰
K ₂ O	0,05 ‰
Na ₂ O	tr.

L'acide phosphorique assimilable fournit rarement des teneurs dosables.

.../...

Les éléments fertilisants extraits par l'acide nitrique concentré bouillant présentent, par contre, des teneurs assez fortes en particulier en acide phosphorique.

CaO	2 à 5	%
K ₂ O	0,2 à 0,7	%
P ₂ O ₅	1 à 5	%

L'analyse du sol au réactif triacide montre que le rapport silice/alumine est bas à très bas dans tout le solum : les valeurs obtenues sont comprises entre 0,2 et 0,7. Les valeurs moyennes des différents constituants sont les suivantes :

SiO ₂	5 à 10	%
Al ₂ O ₃	20 à 25	%
Fe ₂ O ₃	20 à 25	%
TiO ₂	2 à 5	%
H ₂ O	15 à 28	%

L'étude de la fraction argile montre que la kaolinite est toujours présente quoique souvent en faible quantité : la gibbsite et la goethite sont présentes en fortes quantités.

d) Utilisation culturale.

Les sols ferrallitiques rouges sont, dans leur ensemble, peu utilisés du point de vue agricole. On note, sur le pourtour de l'Ankaratra, quelques cultures d'arachide ou de manioc. Dans la plaine de l'Ihazolava, quelques canaux permettent l'irrigation d'un petit nombre de rizières ; aucune culture n'existe sur le plateau de l'Analavelona.

La quasi-totalité de ces sols est livrée aux boeufs qui n'y trouvent d'ailleurs qu'un paturage assez maigre dans l'Ankaratra (Aristida, Ctenium, Trichopteryx, etc.). Dans l'Analavelona, la

.../...

prairie à Hyparrhenia et Heteropogon est meilleure et les troupeaux y sont abondants.

La forêt est totalement absente dans l'Ankaratra ; elle est en voie de régression dans l'Analavelona. Les boisements secondaires de l'Ankaratra sont essentiellement à base d'Eucalyptus et d'Acacia.

Dans leur état actuel, ces sols sont caractérisés par une texture assez lourde, mais une structure assez favorable. Les teneurs en matière organique en azote sont bonnes, tandis que l'humus est assez faible. Les éléments échangeables ou assimilables sont faibles, mais les réserves sont importantes. Les pentes sont le plus souvent peu importantes, aussi l'érosion en "lavaka" ne joue que sur les bords des plateaux ; par contre, le sol mis à nu au début de la saison des pluies est soumis à une érosion en nappe qui est loin d'être négligeable.

Le pronostic agricole n'est donc pas défavorable, à condition d'apporter des engrais organiques et minéraux et d'appliquer des mesures anti-érosives pour limiter l'effet des pluies d'été. Du point de vue pastoral, ces plateaux seraient favorables, dans une certaine mesure, à un fauchage mécanisé après amélioration du pâturage. Toutefois, les pentes un peu fortes, les bords des plateaux pourraient être reboisés ou réembroussaillés.

Sous-groupe des sols brun-rouge.

a) Localisation, végétation, climat, drainage. Les sols ferrallitiques brun-rouge ont été reconnus dans les régions suivantes : région littorale Est entre Vangaindrano et Mananjary pour la région que nous avons parcourue ; G. TERCINIER a

noté des sols analogues aux environs de Mahanoro situé plus au Nord ; dans la partie Ouest de l'Ankaratra aux environs de la localité de Manalalondo ; très localement dans la station forestière de Manjakatempo.

La végétation est très variable suivant les endroits. Sur la côte Est, la végétation primitive est la forêt ombrophile qui est remplacée par la savoka à Ravenala, puis la prairie à Aristida et Pennisetum ; dans l'Ankaratra, les endroits observés portent des boisements de Pinus, Eucalyptus ou Grevillea ou bien alors la prairie à Trachypogon polymorphus.

Le climat diffère d'une région à l'autre. Sur la côte Est, la pluie tombe régulièrement toute l'année et totalise environ 2.300 mm tandis que la température moyenne annuelle est de 23° ; dans l'Ankaratra la pluviométrie doit être voisine de 1.800 mm et la température de 16°.

La partie supérieure des profils paraît être normalement drainée ; à la base des profils, le drainage est certainement moins bon, puisque des horizons gris ou tachetés sont fréquents.

b) Morphologie. Sur la côte Est, un caractère commun à tous les profils est la grande abondance des concrétions.

E I - Profil noté au Sud de Farafangana, sous une savoka à Ravenala madagascariensis avec un tapis d'Aristida et Pennisetum. Terrain ondulé à pente moyenne vers le Nord.

0 - 15 cm : Brun foncé ; racines enchevêtrées nombreuses ; un peu de sol limoneux ; grumeleux ; quelques concrétions.

5 - 25 cm : Brun foncé : concrétions extrêmement nombreuses ; très peu de terre fine entre les concrétions ; un peu de sable quartzeux.

35 - 60 cm : Brun-gris foncé ; argileux ; polyédrique ;

.../...

quelques grains de sable quartzeux ; peu de concrétions.

60 - 130 cm : Brun-rouge ; argileux ; polyédrique, poreux.

130 - 150 cm : Lamelles ferrugineuses ocre, passant à des blocs concrétionnés noirs.

au-dessous de Argile violacée à taches blanches.

160 cm : Le bas de ce profil est affecté par des signes nets d'hydromorphie.

E 4 Entre Lopary et Vangaindrano : prairie de graminées (Aristida similis) et Pteris aquilina. Terrain ondulé, pente faible vers le Sud-Est.

0 - 40 cm : Brun-gris foncé ; un peu de terre fine limoneuse, mais beaucoup de concrétions.

40 - 80 cm : Brun-foncé ; grumeleux avec moins de concrétions argileux.

80 - 90 cm : Brun-rouge ; argileux ; grumeleux ; concrétions rares.

90 - 220cm : Brun-rouge puis rouge jaune, localement brun argileux ; nuciforme pas de concrétions.

220 - 250cm : Violacé ; argileux.

Au Nord de Farafangana, jusqu'à Vohipeno, les concrétions sont toujours très nombreuses et les profils observés sont analogues aux précédents. Plus au Nord, les concrétions deviennent assez rares et on peut noter des profils où elles manquent totalement.

Le sable quartzeux, que l'on peut noter autour de Farafangana, est d'origine éolienne et a été apporté par le vent depuis les plages toutes proches. Il n'est pas rare d'en trouver des amas

.../...

de plus d'un mètre d'épaisseur. Ce sable, tombant sur le sol, s'infiltré entre les concrétions mais ne descend pas beaucoup plus bas. En tout cas, il n'est pas incorporé aux concrétions.

Dans la partie Ouest de l'Ankaratra, aux environs de Manalalondo et au Sud de cette localité en se dirigeant vers Ambatofotsy, on peut noter le profil suivant (FX 32) sous une prairie de Trachypogon polymorphus ; le terrain est mollement ondulé et présente une pente faible vers l'Ouest.

0 - 20 cm : Brun à brun foncé ; limono-argileux ; grumeleux, racines abondantes,

20 - 110 cm : Brun-rouge ; argileux : très compact ; quelques fentes verticales de place en place.

110 et au-dessous : basalte altéré blanc à grisâtre ; argileux humide, sources abondantes à ce niveau.

c) Caractéristiques physiques et chimiques.

Réaction. le pH est toujours acide, sans atteindre des valeurs très basses. En surface, il est compris entre 5,8 et 6,0 ; il décroît toujours avec la profondeur. A plus de deux mètres de la surface, le pH approche de 5,2.

Granulométrie. Sur la côte Est, les déterminations relatives aux horizons supérieurs sont faussées par l'extrême abondance des concrétions. La terre fine comprend de 18 à 20 % d'argile et un peu plus de limon ; les sables sont représentés par des grains de quartz dont nous avons vu l'origine éolienne. En profondeur, l'argile décroît très rapidement et l'on atteint des teneurs souvent supérieures à 40 % ; le limon est compris entre 30 et 40 %.

.../...

Dans l'Ankaratra, les teneurs en limon sont comprises entre 25 et 40 %.

Matière organique. La matière organique totale est voisine de 5 % en surface et décroît très vite avec la profondeur. L'azote total est très voisin de 2 % en surface. Le rapport C/N est généralement de l'ordre de 12 à 13.

Complexe absorbant. La capacité d'échange de base n'est jamais très élevée. En surface, les valeurs obtenues sont comprises entre 12 et 18 méq/100 g. Au-dessous de l'horizon humifère, les valeurs obtenues sont généralement comprises entre 8 et 12 méq/100 g. Les teneurs en bases échangeables sont faibles partout (signalons toutefois qu'elles sont plus élevées sous forêt que sous prairie). Voici les valeurs obtenues dans un profil typique E-4 (entre Farafangana et Vangaindrano).

N°	E-41	E-42	43	44	45
Prof. cm	0-10	35	85	120	220
CaO ‰	0,38	0,27	0,46	0,36	0,18
MgO ‰	0,08	0,04	0,06	0,09	0,04
K ₂ O ‰	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02
Cap. Ech./méq/100g.	13,0	10,1	7,7	10,1	9,0

Le degré de saturation est toujours faible.

Les éléments fertilisants extraits par l'acide nitrique bouillant sont assez faibles, sauf pour l'acide phosphorique. Voici les valeurs généralement obtenues.

CaO ‰	0,9 à 1,1
K ₂ O ‰	0,15 à 0,30
P ₂ O ₅ ‰	1,3 à 2,5

.../...

L'analyse du sol au réactif triacide montre que le rapport Silice/Alumine est assez bas. Les valeurs suivantes ont été obtenues pour les différents constituants :

SiO ₂ %	10 à 25
Al ₂ O ₃ %	17 à 25
Fe ₂ O ₃ %	32 à 45
TiO ₂ %	5 à 7
H ₂ O %	17 à 21

Les concrétions extraites des horizons supérieurs, sont caractérisées par de faibles teneurs en silice et de fortes teneurs en oxydes de fer ; elles présentent les valeurs moyennes suivantes :

SiO ₂ %	0,2 à 2
Al ₂ O ₃ %	14 à 30
Fe ₂ O ₃ %	42 à 55
TiO ₂ %	0,8 à 1,5
H ₂ O %	18 à 19

L'étude des argiles extraites de ces sols montre que la kaolinite est présente à côté de quantités appréciables d'hydroxydes de fer et d'aluminium.

d) Utilisation culturale. Les sols ferrallitiques brun-rouge ne sont pratiquement pas mis en valeur. Quelques zones d'étendue assez faible sont plantées en manioc et autres cultures vivrières dans l'Ankaratra ; en caféiers sur la Côte Est. Dans l'Ankaratra, de vastes zones sont occupées par les graminées où domine Trachypogon polymorphus. Sur la côte Est, la forêt ombrophile existe encore assez souvent ; elle est remplacée par la savoka à Ravenala madagascariensis et la prairie à Aristida sp.

.../...

Dans l'ensemble, les pentes sont assez fortes et la mise en valeur difficile.

Les sols brun-rouge sont caractérisés par une bonne structure de l'horizon supérieur, structure qui est toutefois assez fragile, car elle disparaît avec la déforestation et la mise en culture. Les teneurs en matière organique et azote sont bonnes ; les éléments fertilisants immédiatement disponibles sont en quantités limitées ; les réserves sont peu importantes, sauf en ce qui concerne l'acide phosphorique. Le relief est assez tourmenté et les pentes souvent fortes ; de ce fait, la sensibilité à l'érosion est assez prononcée. Les cultures annuelles exposeront le sol aux méfaits habituels de l'érosion et il sera préférable de consacrer le sol aux cultures arborées qui faciliteront son maintien en place.

Sous-groupe des sols brun-jaune.

a) Localisation, climat, végétation, et drainage. Un ensemble de sols dérivés de roches volcaniques basiques a été réuni dans le sous-groupe des sols brun-jaune. Ils sont localisés dans la partie Nord de l'île, sur le pourtour Est, Ouest et Sud-Ouest de la Montagne d'Ambre ; ainsi qu'à Nossi-Bé (moitié Est de l'île).

Le climat est assez pluvieux (1,2 à 2,0 m) ; la pluie tombe pendant une période plus longue que dans le reste de la partie Ouest de l'île (4 à 6 mois sur le continent, 8 à Nossi-Bé) ; la température est comprise entre 23 et 26°.

La végétation primitive est une forêt intermédiaire entre les types tropophile et ombrophile. A Nossi-Bé dominent les cultures arborées (caféiers et ylang-ylang surtout). Les sols sont normalement drainés sauf parfois en profondeur.

b) Morphologie.

Ces sols présentent un profil assez simple :

.../...

- un horizon humifère, peu épais où la matière organique peut atteindre 6 à 8 %, de couleur brune ; limoneux ; de structure grumeleuse.

- un horizon brun jaune passant parfois au jaune ; argilo-limoneux ; nuciforme à polyédrique, épais de 1 à plusieurs mètres.

- un horizon d'altération de la roche-mère gris à violacé qui peut atteindre plusieurs mètres.

Voici quelques profils notés dans l'Ouest et le Sud-Ouest de la montagne d'Ambre :

2 - 37. Petit massif isolé dans le calcaire de l'Ankarana ; supportant un boisement de Strychnos spinosa.

0 - 3m Brun-jaune ; limono-argileux ; quelques concrétions noires ; bien structuré ; nuciforme à tendance polyédrique ; porosité ordinaire ; cohésion assez forte.

vers 3m Brun-jaune avec nombreuses concrétions rondes de 0,5 à 1 cm de diamètre.

3 - 5 m Gris brun, puis violacé ; texture identique ; structure polyédrique fine, blocs de basalte altérés, gris avec trainées rouille et taches noires.

2 - 42. Partie sud - Ouest de la montagne d'Ambre ; savane à Hyphaene Shatan.

0 - 2 m Brun-jaune ; limoneux ; polyédrique à nuciforme assez grossier ; racines réparties un peu partout ; porosité tubulaire ; cohésion assez faible (tombe facilement en poudre fine).

2 - 3 m Jaune ; limoneux ; polyédrique à nuciforme ; quelques petits fragments de basalte ; porosité ordinaire et tubulaire ; cohésion faible ; tombe en poussière fine.

.../...

3 m boules de basalte s'altérant en écailles donnant des fragments roses piquetés de noir et blanc ; entre les boules un peu de limon jaune.

A Nossi-Bé dans la partie Est de l'île, près de la route allant d'Hellville à Ambatozavavy, sous des broussailles à "Avocat marron", Anacardium occidentale, Fougères diverses etc... on note le profil suivant :

- 0 - 8 cm brun-fonce ; argilo-limoneux ; grumeleux ; bien structuré ; lacis de racines assez serrées ; porosité ordinaire ; cohésion moyenne.
- 50 -100 cm Brun à brun jaune ; argileux ; polyédrique à nuciforme, tassé mais se défaisant bien ; moyennement structuré ; quelques rares concrétions de petite taille ; porosité ordinaire ; cohésion moyenne.
- 100 -150 cm Brun-jaune ; argileux ; grumeleux à nuciforme. Porosité ordinaire ; cohésion moyenne à faible. La roche-mère n'est pas visible à cette profondeur ; un peu plus loin on peut voir du basalte altéré en boules assez petites (10 cm) avec des fragments de basalte frais au milieu d'une argile polyédrique de couleur brun-rouge.

C -Caractéristiques physiques et chimiques.

La réaction est acide dans tous les profils. La surface a un pH voisin de 5,2 ; l'acidité diminue légèrement avec la profondeur, puisque vers 2 à 3 mètres, l'on atteint pH 5,8 à 6,0.

La granulométrie présente des teneurs en argile comprises entre 30 et 45 % en surface avec 20 à 30 % de limon. En profondeur les teneurs en argile ont tendance à augmenter légèrement

.../...

et les chiffres de 50 % ne sont pas rares.

La matière organique est, malgré la couleur brun à brun foncé, relativement peu abondante en surface et ne dépassant pas 4 %. Les teneurs décroissent très vite avec la profondeur et à 50 cm, on n'a pas plus de 0,8 % ; à 100 cm, les teneurs ne dépassent pas 1 %. Les teneurs en azote sont voisines de 2,5 % en surface et décroissent moins vite que le carbone. Le rapport C/N est de l'ordre de 10 en surface et est compris entre 4 et 7 à 100 cm.

Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange comprise entre 23 et 28 méq/100 g en surface. Cette capacité décroît régulièrement avec la profondeur et se stabilise vers 1 m à 10 - 13 méq/100 g. Les teneurs en bases sont faibles dans tous les sols sous culture ou végétation secondaire, sous forêt elles sont nettement plus élevées.

<u>Forêt</u>		<u>Veg. Second.</u>		
surf.	50 cm.	Surf.	50 cm.	
CaO %	3 à 7	1 à 2	0,6 à 1,3	0,5 à 0,8
MgO %	0,8-1	0,3	0,3 à 0,5	0,2 à 0,3
K ₂ O %	0,2-0,3	0,1	0,08	0,05

Les éléments fertilisants extraits à l'acide nitrique bouillant sont meilleures que pour le sous-groupe précédent : voici les valeurs généralement obtenues :

CaO %	1,5 à 3,0
K ₂ O %	0,3 à 0,7
P ₂ O ₅ %	2,0 à 3,5

.../...

L'analyse du sol au réactif triacide donne des valeurs du rapport silice/alumine comprises entre 1,1 et 1,9.

Les minéraux des argiles sont essentiellement la kaölinite et des quantités variables d'hydroxydes de fer et d'aluminium.

d) Utilisation culturale. Les sols ferrallitiques brun-jaune sont mis en valeur de façon plus importante que les sols précédents. Ils constituent quelques uns des meilleurs sols de culture de Madagascar. En effet, ils supportent l'essentiel des plantations de caféiers et d'ylang-ylang de Nossi-Bé. Ceci tient, pour une large part aux conditions météorologiques plus favorables de l'île. Sur le pourtour de la Montagne d'Ambre, la mise en valeur est beaucoup moins poussée ; la répartition de la pluviométrie est tout autre, l'ensemble des précipitations tombant en un petit nombre de mois seulement avec une saison sèche assez prononcée. Les cultures sont à cycle végétatif court, essentiellement maïs et arachides ; lorsque l'eau est disponible, des cultures de riz sont effectuées sur des surfaces planes ou même en pente. Dans les endroits plus humides, des caféiers sont plantés. Cependant, la plus grande partie de ces sols est occupée par la prairie à Hyparrhenia rufa ou Heteropogon contortus, qui ne sert qu'à des pâturages extensifs. Par endroits, enfin, subsistè la forêt riche en légumineuses. A Nossi-Bé, les pentes sont souvent fortes par suite d'un relief assez tourmenté ; sur les versants de la Montagne d'Ambre, par contre, des étendues à pentes peu accusées ne sont pas rares, mais les boules de basalte y sont fréquentes.

Les sols ferrallitiques brun-jaune sont caractérisés par ;

- une texture et une structure assez favorables ;
- de bonnes teneurs en matière organique et azote ;
- des teneurs moyennes à faibles en éléments fertilisants immédiatement disponibles par les plantes (lorsqu'il s'agit de zones cultivées ou occupées par la végétation secondaire).

.../...

- des réserves intéressantes ;
- une assez grande sensibilité à l'érosion en nappe.

Il en résulte que la plantation arborée sera, encore une fois, préférable à la culture annuelle. Celle-ci peut toutefois être entreprise à condition de tenir compte de la pente du sol et de prendre des mesures efficaces contre l'érosion. Des apports d'engrais minéraux et organiques seront également recommandés.

Autre sous-groupe dans les sols ferrallitiques typiques.

Parmi les sols ferrallitiques typiques de Madagascar, il est un sous-groupe qui présente une très large extension dans la partie orientale des hauts plateaux ainsi que sur le versant Est. Il s'agit de sols ferrallitiques présentant un horizon supérieur jaune surmontant un horizon rouge. Des sols de ce genre ont été étudiés dans la région de Fianarantsoa et dans l'Ankaizina (53). Ils dérivent essentiellement de roches métamorphiques ou de roches volcaniques acides (rhyolites au Sud de Vangaindrano). Ces sols sont en relation avec un climat humide où la saison sèche est peu marquée.

Sur roche volcanique basique, ce sol est rare ; il a été observé cependant de façon nette dans une région assez élevée de l'Ankaratra où il est qualifié de "mavomena".

La succession des horizons humifères, jaune puis rouge a pu parfois donner à penser que ces sols avaient subi un lessivage à la partie supérieure du profil. Des analyses que nous avons pu effectuer tant sur les sols dérivés de roches métamorphiques que volcaniques basiques, il ressort que les variations des teneurs

.../...

Mavomena = jaune et rouge.

en fer ou argile sont trop faibles pour que le processus de lessivage puisse être invoqué ici.

a). Localisation, climat, végétation, drainage.

Les sols "mavömena" ont été observé dans l'Ankaratra entre 1.800 et 2.300 m d'altitude, un peu à l'écart des hauts sommets et en particulier près des plateaux de l'Ambohibatazana et de Tampoketsa. Le climat est assez mal connu ; mais par comparaison avec les stations les plus proches, il doit être caractérisé par une pluviométrie comprise entre 1,5 et 1,8 m et une température de 10° à 12°. La forêt a dû exister ici comme sur l'ensemble du massif ; elle est remplacée maintenant par une prairie de graminées entremêlée de bruyères et de fougères. Les pentes sont assez fortes et le drainage bon.

b). Morphologie. Un profil caractéristique est le FX 20 noté vers 2.050 m d'altitude à l'Ouest d'Ambatotsipihina. La végétation est une prairie de graminées avec quelques petites euphorbes. La pente est faible vers l'Est.

- 0 - 20 cm : Brun à brun rougeâtre ; riche en matière organique bien décomposée ; limoneux ; grumeleux fin, très meuble.
 - 20 - 50 cm : Brun-jaune ; argilo-limoneux ; grumeleux.
 - 50 - 100 cm : Rouge-jaune ; argilo-limoneux ; plus ferme que précédemment.
- au-dessous de 100 cm roche-mère altérée.

c) Caractéristiques physiques et chimiques.

La réaction est acide avec un pH de 5,6.

Les teneurs en argile et limon sont très proches les unes des autres et sont comprises entre 21 et 25 % dans les trois horizons.

.../...

La matière organique est très élevée dans l'horizon de surface où elle atteint 20 % avec 7,5 % d'azote. Il n'y a pas de pénétration de la matière organique en profondeur ; à 30 cm les teneurs n'atteignent pas 1 %. Le rapport C/N est élevé en surface comme il est de règle à cette altitude, et décroît avec la profondeur ; il passe de 16,8 à 13 à 50 cm.

Le complexe absorbant présente une capacité d'échange élevée en surface 48 méq/100 g ; lorsque l'influence de la matière organique ne se fait plus sentir , elle n'est plus que 8 à 10 méq/100 g. Les teneurs en bases échangeables sont très faibles dans tous les horizons.

L'analyse du sol au réactif triacide donne pour le rapport silice/alumine des valeurs très faibles : 0,2 à 0,5.

d) Utilisation culturale. L'on ne peut dire que peu de choses de ces sols par suite de leur faible étendue. Ils sont laissés en paturage et parfois cultivés en pomme de terre.

2 - Groupe des Sols Ferrallitiques Humifères -

Dans un certain nombre de régions volcaniques de Madagascar, dans les zones d'altitude, on note des accumulations parfois importantes de matière organique dont l'humification est assez poussée. Les teneurs en matière organique sont supérieures à 10 %, elles atteignent par endroits 30 ou 40 %. L'épaisseur de la couche organique est notable (nous avons vu des profils où elle atteignait 80 cm). De plus, la pénétration de la matière organique atteint les zones profondes du profil et à 1 mètre, on trouve encore des teneurs assez fortes en matière organique.

Par ailleurs, l'étude de la partie minérale du sol montre que les hydroxydes de fer et alumine y sont encore importants

.../...

(mise en évidence par l'analyse thermique et chimique). L'ensemble du profil aura des teintes sombres allant du brun au noir. Il n'a pas été noté, au-dessous de l'horizon de surface, d'horizon gris ou tacheté qui aurait trahi une mauvaise pénétration ou une stagnation de l'eau. L'accumulation de la matière organique doit avoir, selon nous, une cause surtout climatique, jointe à la nature basique de la roche-mère.

Les sols de ce groupe peuvent être séparés en deux sous-groupes : les sols ferrallitiques humifères bruns et les sols ferrallitiques humifères noirs ou sols Ando.

Sous-groupe des sols ferrallitiques humifères bruns -

a) Localisation, climat, végétation et drainage. Les sols de ce sous-groupe s'observent dans les lieux suivants : Montagne d'Ambre, Ankaizinana, Ankaratra. Ils correspondent en général à un climat caractérisé par une pluviométrie supérieure à 1,5 m et une température moyenne annuelle d'environ 16° à 22°.

La topographie est soit des montagnes aux pentes plus ou moins fortes soit des collines arrondies soit des plateaux. Dans tous les cas la végétation primitive est la forêt de type ombrophile ou la forêt d'altitude, riche en épiphytes. La disparition de cette forêt est suivie de son remplacement par une prairie ; parfois on a des broussailles à bambous ou à éricacées.

b) Morphologie. Les profils typiques suivants ont été notés :

1) Montagne d'Ambre, près de la station forestière des Roussettes à 1.200 m d'altitude. Le climat est caractérisé par une pluviométrie supérieure à 3.000 mm, une température moyenne annuelle de 19°, la végétation est une forêt ombrophile dense, riche en épiphytes. La roche-mère est une cendre basique. La pente est moyenne à forte.

.../...

- 0 - 10 cm : Brun-noir très doux au toucher ; racines abondantes avec des débris de feuilles en surface ; limoneux ; grumeleux très fin.
- 10 - 50 cm : Brun foncé ; argilo-limoneux ; grumeleux à grumeleux fin ; quelques racines fines, poreux.
- 50 - 270 cm : Brun à brun clair ; argilo-limoneux ; grumeleux ; racines rares ; poreux.
- à 270 cm : Cendres plus ou moins altérées, grises ou rouge brun.

2) Ankaizinana. Plateau de Bemanevika à 1.700 m d'altitude le climat est pluvieux et frais avec une pluviométrie probable de l'ordre de 1.500 mm et une température de 17° environ. La végétation est une forêt dégradée riche en bambous - lianes. La roche-mère est un basalte.

- 0 - 20 cm : Brun foncé ; limoneux ; grumeleux fin ; quelques fragments de basalte vers 20 cm.
- 20 - 70 cm : Brun jaunâtre ; argileux ; grumeleux fin.
- 70 - 100 cm : Fragments de basalte ; nombreux enrobés dans une argile brune grumeleuse.
- à 100 cm : Basalte.

3) Ankaratra. Versant Est. Altitude 1.900 m à l'Ouest de la Station forestière de Manjakatempo. Le climat est frais et humide ; la pluviométrie est estimée à 2.000 mm ; la température est de l'ordre de 15°. La végétation est une savoka où les arbustes sont nombreux.

- 0 - 35 cm : Brun à brun foncé ; chevelu ; dense de petites racines ; argilo-limoneux ; grumeleux fin ; poreux.

.../...

35 - 50 cm : Brun à jaunâtre ; argilo-limoneux ; polyédrique à nuciforme.

50 - 80 cm : Brun jaune à jaune pâle ; limoneux avec des fragments de basalte assez nombreux.

à 80 cm : Basalte altéré.

4) Ankaratra - versant Ouest. Plateau de Laona. Altitude 2.000 m, la pluviométrie est estimée à 2.000 mm, la température à 16° ; prairie à Aristida similis et Trachypogon polymorphus.

0 - 25 cm : Brun ; limono-argileux ; massif à nuciforme.

25 - 70 cm : Brun ; limono-argileux ; très dur ; nuciforme avec à la base quelques fragments de roche altérée.

On passe rapidement à la roche.

C) Propriétés physiques et chimiques -

La réaction est acide dans tout le profil. Le pH présente des valeurs voisines de 6,0 dans l'horizon humifère et à tendance à s'abaisser légèrement avec la **profondeur** ; 5,5 à 6,0 vers 50-100 cm.

La granulométrie est caractérisée par des teneurs assez faibles en argile: 25 à 35 % légèrement plus fortes en limon: 25 à 40 %. Le sable est constitué de fins fragments de basalte.

La matière organique est forte en surface jusqu'à 20 % et diminue assez lentement avec la profondeur et près de la roche-mère, les teneurs sont encore dosables. L'azote total est assez fort 2 à 10 % et le rapport C/N compris entre 10 et 14.

Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange élevée en surface 20 à 50 méq/100 g. tandis qu'elle diminue fortement en profondeur.

.../...

Les teneurs en bases échangeables sont fortes dans l'horizon humifère des sols forestiers, très faibles au-dessous.

Les teneurs suivantes ont été obtenues aux Roussettes (en Montagne d'Ambre) :

	<u>surface</u>	<u>vers 60 cm.</u>
CaO ‰	4 à 7	0,7 à 1,2
MgO ‰	0,6 à 1,2	0,2 à 0,5
K ₂ O ‰	0,2 à 0,6	0,03 à 0,08

Le rapport silice/alumine est bas dans tous les horizons ; il aurait plutôt tendance à remonter lorsque l'on approche de la roche-mère. Des rapports compris entre 0,7 et 1,4 ont été obtenus dans les différentes régions étudiées.

Les argiles sont constituées surtout de kaolinite et d'hydroxydes de fer et d'aluminium.

d). Utilisation culturale. Les sols ferrallitiques humifères bruns sont des sols de moyenne et forte altitude. Le climat est toujours pluvieux ou très pluvieux avec des températures assez fraîches. La mise en valeur est importante dans les régions où ils présentent une certaine extension.

En Montagne d'Ambre, les sols bruns sont cultivés sur le flanc Est en pommes de terres, maïs, et légumes destinés à Diégo-Suarez. Au sommet du massif, des plantations de quinquinas ont été créées dans la forêt par le Service des Eaux et Forêts.

Dans l'Ankaratra, les sols bruns sont cultivés en pommes de terre. Le Service de l'Agriculture y fait quelques essais d'avoine et de légumineuses. Dans l'Itasy, les principales cultures sont le maïs, les haricots, l'aleurite.

.../...

Dans l'Ankaizinana, des cultures de pommes de terre ont été faites autrefois avec quelque succès ; le caféier arabica n'a pas réussi en raison des gels en saison fraîche.

Par ailleurs, de vastes espaces sont laissés en prairie dans l'Ankaratra, l'Ankaizinana et même en Montagne d'Ambre. Le Service des Eaux et Forêts contrôle la forêt primitive sur le sommet de la Montagne d'Ambre et sur le versant Est de l'Ankaratra. De plus, il entretient et crée des plantations de pins, eucalyptus, grevillea, acacias, etc...

L'étude de ces sols montre que, sous forêt, leur niveau de fertilité est remarquablement élevé, tandis que sous prairie ou cultures annuelles, il est bas à très bas. Les sols forestiers présentent en effet un horizon de surface riche en matière organique, en bases échangeables, parfois en acide phosphorique assimilable, presque toujours en acide phosphorique total. La disparition de la forêt ou d'une couverture arborée efficace entraîne l'élimination rapide de cet horizon. La mise en valeur des sols forestiers est donc assurée, au départ, de cultures rentables, à condition que le sol soit protégé efficacement contre l'érosion. Les planteurs de pommes de terre de l'Ankaratra cultivent actuellement des sols nettement appauvris. Un repos de plusieurs années est nécessaire après chaque récolte. Par contre, les travaux du Service de la Recherche Agronomique ont montré que la réponse aux engrais minéraux et organiques est immédiate et permet une augmentation des rendements dans la proportion de 1 à 5.

Il semble donc qu'en luttant efficacement contre l'érosion (très active en nappe et parfois en ravins) et en rendant à ces sols les éléments minéraux qu'ils ont perdus, on puisse y cultiver des plantes adaptées au climat frais des régions d'altitude.

Sous-groupe des sols ferrallitiques humifères noirs ou "Ando"

Les sols "Ando" font leur apparition dans la littérature pédologique avec J. THORP et G.D. SMITH (209) qui désignent, sous ce vocable japonais, des sols de couleur foncée que l'on observe dans les montagnes volcaniques du Japon et des Philippines. E.C.J. MOHR et F.A. VAN BAREN (165) rangent également sous cette appellation des sols des montagnes d'Afrique Centrale et de Sumatra. Il nous semble que les sols qualifiés par H. JENNY (135) en Colombie de "cold humus soils" et par CLINE, cité par C.E. KELLOGG (139) de "hydrol-humic latosol" puissent être également rangés parmi les sols Ando.

a) Localisation, végétation, climat, drainage. A Madagascar les sols Ando peuvent être observés dans la partie centrale de l'Ankaratra, au-dessus de 2.000 m. La température moyenne annuelle, mesurée par le R.P. COLIN (13) au Mont Tsiafajavona est fraîche avec 8°8 ; la pluviométrie annuelle n'est pas connue avec certitude, mais par extrapolation à partir des postes voisins de la station de Manjakatempo, on peut estimer qu'elle est proche de 3.000 mm.

La végétation primitive a disparu à peu près partout et ne subsiste que dans quelques petits vallons. Les arbres y sont de petite taille assez rabougris et supportent des lichens et orchidées. Ailleurs, le sol supporte une prairie à Pentastichys Perrieri avec quelques Philippia et Helychrysum.

Les pentes sont presque toujours fortes et les profils ne présentent pas de signes d'hydromorphie. Cependant, l'horizon de surface, très riche en matière organique bien humifiée, fonctionne comme une véritable éponge et est presque toujours imbibé d'eau.

.../...

b) Morphologie. Les profils suivants ont été observés dans l'Ankaratra.

0 - 5 cm : Noir ; enchevêtrement de racines.

5 - 60 cm : Noir, tachant fortement les doigts ; limoneux assez ferme mais donnant des fragments finement grumeleux ; poreux.

60 - 85 cm : Brun : limoneux ; grumeleux ; quelques fragments de roche.

85 - 100 cm : Brun-jaune pale ; limoneux ; nombreux fragments de roche.

FX 9 : A proximité du mont Tsiafajavona à 2.550 m d'altitude, sous une prairie à Pentaschichys Perrieri ; la pente est forte vers l'Est.

0 - 7 cm : Noir ; feutrage de petites racines.

7 - 35 cm : Noir à brun-gris foncé ; limoneux ; grumeleux fin.

35 - 60 cm : Brun à brun foncé ; limoneux ; grumeleux ; quelques fragments de roche.

60 - 120 cm : Brun-clair ; argileux ; plus compacte que précédemment ; nombreux fragments de roches.

FX 28 : Près de la route qui mène d'Ambatolampy au col de Mahafompona à 2.100 m d'altitude ; pente faible vers l'Est.

0 - 25 cm : Noir, tachant fortement les doigts ; limoneux ; grumeleux fin.

25 - 40 cm : Brun foncé ; limoneux ; quelques fentes verticales assez espacées ; grumeleux à nuciforme.

40 - 50 cm : Brun clair ; avec encore quelques fentes verticales.

.../...

50 - 70 cm : Gris avec des taches blanches ; argileux ;
plastique.

70 cm : Fragments d'ankaratrite altérée.

C) Caractéristiques physiques et chimiques.

La réaction est assez acide en surface avec un pH de 5,6 environ ; par contre, en profondeur, le pH tend vers la neutralité avec des valeurs comprises entre 6,5 et 6,8 ; toutefois, au voisinage de la roche-mère, le pH redevient nettement plus acide : 5,6 à 6,1.

La granulométrie est difficile à déterminer avec précision en raison des très fortes teneurs en matière organique. L'argile est assez peu abondante en surface ; elle augmente régulièrement avec la profondeur pour atteindre des valeurs voisines de 30 % près de la roche-mère. Le limon est presque toujours supérieur à l'argile et varie dans le même sens qu'elle.

La matière organique est très élevée. En surface, les teneurs dépassent 25 % et tout le profil en renferme des teneurs importantes. Au contact de la roche-mère, on peut encore doser près de 1 %. L'acide humique est particulièrement élevé dans ces sols, puisque des teneurs comprises entre 45 et 65 ‰ ont pu y être dosées. L'azote total présente des teneurs comprises entre 7 et 12 ‰. Le rapport C/N est élevé en surface (18 à 23) et s'abaisse jusqu'à 10 à proximité de la roche-mère.

Le complexe absorbant est caractérisé par de très fortes capacités d'échange de bases (40 à 70 méq/100 g). Par contre, les teneurs en bases échangeables sont faibles à très faibles. Le degré de saturation est très bas.

L'attaque du sol au réactif triacide montre que le rapport silice/alumine approche de 2 en surface ; en profondeur, il est compris entre 1,0 et 1,5.

.../...

Les argiles renferment de la kaolinite, de la gibbsite et des hydroxydes de fer.

d) Utilisation culturale. Les sols Ando occupent des régions d'un accès peu commode et ne sont pratiquement pas cultivés. Quelques troupeaux y paissent pendant les mois les moins pluvieux de l'année (Juin à Août). Le niveau de fertilité de ces sols est actuellement très bas et on ne peut guère envisager d'autre utilisation que le pâturage.

3 - Groupe des sols ferrallitiques cuirassés -

Les sols ferrallitiques cuirassés ont été notés dans différentes régions volcaniques de l'île, en particulier dans l'Ankaizina et l'Ankaratra, ainsi que sur la bande côtière Est. La montagne d'Ambre, le plateau de l'Analavelona en sont totalement dépourvus.

Dans l'Ankaizina, les cuirasses ferrallitiques recouvrent le plateau de M rangaka, à l'Est de Bemanevika ; ce plateau s'étend depuis le rebord Sud de la vallée de la Sandrakoto jusqu'à quelques kilomètres au Nord du village de Beandrarezina. Les cuirasses sont ici assez continues et sont le plus souvent constituées de pisolites jaunâtres ou rouge-clair agglomérés par un ciment rougeâtre.

Dans l'Ankaratra, les cuirasses n'ont été rencontrées que sur le versant Est du massif, tandis que le versant Ouest en est dépourvu. Les localités où des cuirasses peuvent être observées sont entre autres : le plateau d'Ambatomena à l'Ouest d'Ambatolampy ; les plateaux d'Amparihimasina, d'Ambohibatazana et du Tampoketsa. Ces deux derniers plateaux sont situés entre 1.800 et 2.000 mètres ; les précédents entre 1.500 et 1.700 mètres d'altitude. Toutes ces cuirasses n'occupent que des étendues assez faibles ; elles affleurent à la faveur de flancs de vallée et ne semblent pas se poursuivre très loin vers l'intérieur.

.../...

Elles se présentent sous la forme de bancs peu épais (0,5 à 1 m) de couleur rouge clair, d'aspect massif, très légèrement vacuolaire.

Sur la bande côtière Est, les cuirasses sont très fréquentes entre Farafangana et Vangaindrano où elles occupent des plateaux de faible étendue supportant une végétation forestière extrêmement dense. Les cuirasses sont, ici encore, peu épaisses et sont rouge très sombre à noir ; elles sont très fortement vacuolaires.

Ces trois régions présentent donc trois types de cuirasses que nous étudierons successivement.

a : la cuirasse pisolitique de l'Ankaizinana (53) a déjà fait l'objet d'une étude. Nous rappellerons qu'elle est associée à un sol jaunâtre très meuble dont la composition est assez peu différente.

	Res %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	MnO %	perte au feu %
C341	3,4	1,85	35,6	25,0	4,6	0,14	30,4
C342	2,0	0,75	33,7	29,0	4,5	0,12	29,5
C361	6,65	1,75	37,4	32,75	3,0	0,18	17,5

C 341 représente un horizon de surface de 0 à 10 cm

C 342 représente un horizon jaune de 30 à 40 cm

C 361 cuirasse pisolitique à 60 cm.

Les différences analytiques sont assez peu importantes entre le sol et la cuirasse. Il semble donc que la cuirasse s'est formée par durcissement d'un niveau particulier du profil sans qu'il y ait apport important de substance. Il y a donc dans ce cas, accumulation relative des hydroxydes par exportation de la silice et des bases. .../...

Sur le plateau de Bemanevika, où les cuirasses, lorsqu'elles existent, sont du type cuirasse de mare autour de certains points d'eau, on a pu noter un sol où le cuirassement semblé en cours de formation. Il s'agit d'un sol brun présentant vers 40 cm une zone durcie qu'on peut difficilement entailler à la bêche. Cette zone durcie présente encore une composition peu différente de celle des horizons situés au-dessus et au-dessous (53).

L'observation de profils entiers atteignant la roche-mère est ici assez difficile. En effet, sur les flancs des vallées, les blocs de cuirasses sont parfois nombreux.

Il est assez probable que la forêt devait occuper encore très récemment l'ensemble du plateau de Marangaka et que les feux répétés n'en ont eu raison qu'à une époque assez peu reculée. Sur de nombreux flancs de vallées, la forêt est encore intacte, et, à quelque distance, le plateau de Bemanevika porte un manteau forestier assez dense.

On peut raisonnablement penser que la cuirasse, qui est fort étendue n'est pas apparue très brutalement à la suite de la déforestation et que les deux ont fort bien pu coexister. Le basalte qui le constitue paraît correspondre à un vaste épanchement de type hawaïen, dont les bouches de sorties se seraient situées à la partie Nord du plateau. Ce basalte serait assez compact et peu fissuré. Le basalte du plateau de Bemanevika est beaucoup plus récent et si les nappes sont parfois étendues, elles sont accompagnées de cendres et de projections variées. Ce basalte est de plus très fissuré et des orgues sont visibles en différents endroits. Il ne peut qu'exceptionnellement jouer le rôle de niveau imperméable où une nappe peut séjourner pendant une partie de l'année.

La cuirasse de Marangaka paraît devoir être rattachée à une topographie très plane et à un sous-sol perméable qui permet à une nappe phréatique par ses fluctuations (provoquant humectations

et dessications successives), de provoquer la formation de cuirasse.

b : la cuirasse massive de l'Ankaratra peut être observée de façon caractéristique près du village d'Ambatotsipihina en bordure d'un petit plateau se terminant par un abrupt caractéristique. Sur les pentes on peut noter quelques blocs de démantèlement.

Le profil suivant peut être observé sous une prairie de graminées FX 97 -

- 0 - 60 cm : rouge ; argilo-limoneux ; grumeleux ; bien structuré ; quelques racines à la partie supérieure de l'horizon ; le tout assez meuble.
- 60 - 120 cm : Cuirasse massive rouge sombre avec quelques zones blanchâtres, peu étendues.
- 120 - 150 cm : Rouge tacheté d'ocre ; massif ; argileux à argilo-limoneux.
- 150 - 180 cm : Jaune-rouge avec des plages jaunes ; massif argileux.
- 180 - 220 cm : Gris tacheté largement de rouge ; massif ; argileux.

Le bas du profil n'est pas atteint ; la roche-mère intacte doit être à une certaine profondeur, car elle n'affleure pas aux environs. Au centre du plateau (à une centaine de mètres environ) un trou creusé jusqu'à deux mètres n'a permis d'atteindre ni cuirasse ni horizon tacheté, l'on est resté dans l'horizon rouge de surface plus épais.

L'analyse d'échantillons prélevés dans ce profil a donné les résultats suivants :

.../...

N°	Profond	Res %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	H ₂ O { - + }
FX 972	Cuiras- se	2,3	2,0	34,8	34,0	4,8	21,7
973	100	2,8	1,6	32,9	34,8	5,5	22,9
974	160	3,0	2,4	32,2	34,4	5,0	21,3
975	220	2,3	8,2	33,8	31,2	5,8	19,2

Ces résultats montrent qu'il n'y a guère de différence entre la composition de la cuirasse et celle du sol qui se trouve au-dessous. Il y a donc uniquement enrichissement relatif en hydroxydes et durcissement ultérieur de ceux-ci. D'autre part, l'examen du profil montre qu'à la base de celui-ci l'éclaircissement de la couleur, les taches rouges sur fond gris, les phénomènes d'hydromorphie sont prédominants sans que pour cela l'on note une variation importante des teneurs en fer qui est pourtant l'élément le plus mobile. On peut noter à peu de distance de la coupe examinée qu'une source apparaît au niveau de l'horizon gris tacheté. Cet horizon paraît devoir jouer le rôle de zone imperméable qui retient l'eau qui tombe sur le plateau. La cuirasse est donc en relation avec un affleurement de nappe phréatique. Ceci peut être observé assez fréquemment dans différentes zones cuirassées de l'Ankaratra, en particulier près de la route d'Imerintsiatosika à Ambohimandry, à Ambatomena où les cuirasses ont une étendue limitée près des abrupts des thalwegs et n'ont guère d'extension vers l'intérieur.

Les plateaux voisins d'Amparihimasinavalona et de l'Ambohibatazana sont en grande partie cuirassés : la cuirasse est assez continue et appartient au type précédent. Les sols non cuirassés renferment souvent des concrétions. Tous ces sols cuirassés supportent une végétation graminéenne, leurs relations avec la végéta-

.../...

tion primitive ne peuvent être saisies, étant donné que celle-ci a été éliminée depuis longtemps et qu'il n'en reste plus trace à l'heure actuelle.

C : la cuirasse vacuolaire de la bande côtière Est ; le basalte de la zone côtière Est donne naissance, d'une façon générale à des sols ferrallitiques brun-rouge où les concrétions ferrugineuses sont remarquablement abondantes. En certains endroits ces sols sont cuirassés et tout spécialement entre les villes de Farafangana et Vangaindrano près des localités de Lopary et Manombo.

La cuirasse affleure généralement en surface où elle constitue de véritables dalles. Parfois, elle est recouverte par une couche plus ou moins épaisse de sable dunaire amené par les vents de mer. Il n'a pas été possible de voir une cuirasse recouverte par un horizon autochtone, à la manière du profil d'Ambatotsipihina. La végétation qu'elle supporte est, soit la prairie à Aristida très clairsemée, soit une forêt ombrophile nettement plus basse que celle qui pousse sur un sol meuble.

La cuirasse se présente en gros blocs horizontaux jointifs entre lesquels s'introduisent les racines des arbres. Elle est de couleur très sombre presque noire, caverneuse et les nombreux trous sont anastomosés. Il n'y a pratiquement pas de blocs disjoints sur les pentes, même déboisées. Sur les plateaux, c'est le type courant de cuirasse. Lorsque l'on rencontre deux plateaux à des altitudes légèrement différentes, la pente qui les sépare, porte, lorsqu'elle est faible, des blocs cuirassés constitués de concrétions soudées par un ciment foncé. Par contre, sur les pentes, les concrétions sont très abondantes avec parfois quelques gros blocs caverneux.

L'analyse de plusieurs échantillons de ces cuirasses a donné les résultats suivants :

	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂ %	0,8	0,3	tr	1,5	5,0	0,45	0,48
Al ₂ O ₃ %	41,2	14,5	13,1	7,6	11,5	14,48	15,31
Fe ₂ O ₃ %	28,8	65,6	62,1	72,0	65,6	62,09	64,06
TiO ₂ %	3,6	3,7	4,8	3,9	3,5	-	1,64
H ₂ O { + -}	25,4	15,0	18,1	14,6	13,8	17,58	18,56

Les échantillons 1 à 4 proviennent des environs de Lopary ;
l'échantillon 5 provient des environs de Manambo.

Les échantillons 6 et 7 proviennent de Farafangana et ont été
analysés par A. LACROIX (27).

En dehors de l'échantillon 1, tous les échantillons présentent
une très grande richesse en **hydroxyde de fer** avec des proportions fai-
bles il est vrai, mais encore notables en oxydes d'alumine. L'oxyde
de titane est relativement abondant.

Lorsqu'on analyse les sols brun-rouge avoisinants on constate
que leur composition donne les chiffres suivants :

SiO ₂ %	9 à 20
Al ₂ O ₃ %	15 à 20
Fe ₂ O ₃ %	30 à 45
TiO ₂ %	1 à 2
H ₂ O %	17 à 22

On constate donc un notable enrichissement en hydroxydes de fer.

La comparaison entre les sols ferrallitiques brun-rouge et les
cuirasses avoisinantes montre que lorsque la topographie est ondulée,

.../...

les concrétions sont abondantes très près de la surface et que les horizon des concrétions épouse très étroitement les contours assez tourmentés de la topographie. Lorsque le terrain est plat les concrétions sont remplacées par la cuirasse vacuolaire. La cuirasse est plus riche en fer que les concrétions et celles-ci plus que la terre fine. Les fortes quantités de fer doivent pouvoir être attribuées à des migrations latérales ; l'argile rouge sous-jacente pouvant jouer le rôle de niveau imperméable.

B - LES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX -

Les sols ferrugineux tropicaux sont caractérisés, à l'analyse chimique ou thermique, ou aux rayons X, par de fortes quantités d'hydroxydes ou d'oxydes de fer. L'alumine libre est totalement absente. Le minéral argileux que l'on rencontre dans la majorité des cas est la kaolinite.

Les sols ferrugineux tropicaux correspondent, en gros, à une zone climatique aussi chaude, sinon plus, que les sols ferralitiqúes ; mais la pluviométrie est moins abondante et en tous cas plus groupée. A Madagascar, ils correspondent à une température moyenne de 24° à 28° et une pluviométrie annuelle inférieure à 1,5 m. La végétation primitive est la forêt tropophile remplacée très souvent par la savane ou la prairie.

Les sols ferrugineux tropicaux ne présentent pas d'autre processus de formation du sol que celui qui a été défini plus haut. Le lessivage n'est pas constaté sur les sols dérivant de basalte. Le cuirassement n'a pas été observé. A. LACROIX (27) signale des cuirasses ferrugineuses dans l'Antanimena. Malgré de nombreux itinéraires à travers ce plateau il ne nous a pas été donné d'en voir. Il est probable que leur étendue est assez réduite. L'accumulation de matière organique ne se produit

.../...

pas. Les seuls sols dont il sera question ici seront donc les sols ferrugineux tropicaux typiques qui constitueront un groupe unique scindé en deux sous-groupes : les sols rouges et les sols jaunes.

Groupe des sols ferrugineux tropicaux typiques -

Sous-groupe des sols rouges.

a) Localisation, climat, végétation, drainage.

Les sols de ce sous-groupe s'observent sur le plateau de l'Antanimena, dans l'extrême-Nord de l'île à proximité de Diégo-Suarez (Cap Diégo) ainsi que dans la région de Tsivory. Ils correspondent à un climat caractérisé essentiellement par une très longue saison sèche pendant laquelle les précipitations sont quasi-nulles et où la température moyenne annuelle reste élevée (20° à 24°) une saison des pluies où la pluviométrie peut être assez forte (jusqu'à 1,5m) mais tombant en une saison relativement courte en un nombre de mois inférieur ou égal à quatre ; la température est élevée et peut atteindre et dépasser 30°.

La végétation observée est soit la forêt tropophile, soit la plupart du temps, la savane à Médemia nobilis ou à Hyphaene shatan ou Poupartia caffra ou Acridocarpus excelsus, soit la prairie à Hyparrhenia rufa ou Heteropogon contortus.

Les sols rouges occupent des plateaux assez vastes ou bien des pentes plus ou moins fortes. Dans tous les cas, le drainage s'effectue normalement .

b) La morphologie.

Le profil typique est celui que l'on peut noter sur le plateau de l'Antanimena sous une savane à Acridocarpus excelsus avec un tapis d'Aristida rufescens plus ou moins clairsemé.

12 - 20 près du village d'Andrafiabe .

.../...

- 0 - 100 cm : brun à rouge foncé ; argileux ; assez bien structuré ; grumeleux à nuciforme avec quelques fentes verticales ; cohésion moyenne.
- 100 - 170 cm : Brun-rouge ; argileux ; plus ferme qu'au dessus. ; nuciforme.
- 170 - 200 cm : Brun-clair ; roche altérée débutant brutalement avec par endroits quelques taches rougeâtres. L'altération de la roche s'effectue suivant des lignes inclinées plus ou moins parallèles, englobant des boules de petites tailles s'altérant en écailles.

Bien d'autres profils du même type sont visibles sur ce plateau. Sous forêt, l'horizon humifère existe, mais est à peine plus foncé que l'horizon sous-jacent. L'épaisseur du profil est alors beaucoup plus grande. Par endroits, des concrétions d'un rouge très sombre peuvent être observées dans l'horizon rouge.

Dans le massif de l'Androy (Tsivory) les pentes sont d'une façon générale dépouillées complètement de sol. Très localement cependant, on peut observer des endroits qui ont échappé à l'érosion. De plus, dans la plaine, un petit nombre de pointements donnent naissance à des sols rouges.

Au Sud-Ouest de Tsivory on peut noter le profil suivant (S -14).

- 0 - 15 cm : Brun-rouge ; argilo-limoneux ; grumeleux.
- 15 - 50 cm : Brun-rouge ; argilo-limoneux ; grossièrement cubique se brisant en fragments polyédriques luisants.
- 50 - 90 cm : Jaunâtre ; argilo-limoneux ; nuciforme.
- 90 cm : Fragments de basalte plus ou moins altérés.

.../...

c) Propriétés physiques et chimiques -

La réaction est toujours faiblement acide ou neutre. En surface, le pH varie entre 6,3 et 6,9 ; en profondeur, il est compris entre 6,9 et 7,3. Au contact de la roche-mère, il est très faiblement alcalin (7,1 à 7,5). Il est à noter que les échantillons prélevés sous forêt sont toujours moins acides que ceux prélevés sous prairie ou savane.

Granulométrie. L'argile est la fraction dominante (30 à 50 %) le limon est toujours assez élevé (20 à 40 %). Il n'a jamais été trouvé de calcaire dans ces sols.

La matière organique est variable avec le type de végétation supportée par le sol. Sous forêt, les teneurs sont de 8 à 12 %, sous prairie et savane 3 à 5 %. le rapport C/N reste toujours très proche de 10 en surface et diminue très vite avec la profondeur. Les teneurs en matière organique décroissent très rapidement avec la profondeur.

Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange de bases comprise entre 20 et 25 méq/100 g en surface. Cette capacité d'échange diminue avec la profondeur. Les teneurs en bases échangeables sont notables dans ces sols. Les chiffres sont les suivants :

	CaO ‰	MgO ‰	KO ‰
Forêt	4 - 6	1 - 1,3	0,2
Prairie ou savane	2 - 3	0,3 - 0,9	0,1

Les variations à l'intérieur d'un même profil sont peu importantes sous prairie et savane. Le degré de saturation du complexe est presque toujours élevé (70 %)/.

.../...

L'attaque du sol au reactif triacide permet de calculer des rapports silice/alumine toujours très voisins de 2,0.

L'étude des argiles extraites de ces sols montre que, d'une façon générale, la kaolinite est présente en forte proportion. Un seul échantillon contient de la montmorillonite (région de Tsivory). Par ailleurs, l'on trouve des quantités appréciables d'hydroxydes de fer. La gibbsite est toujours absente.

Les concrétions que l'on peut extraire de ces sols sont particulièrement riches en oxydes de fer. Toutefois, au contraire des concrétions extraites des sols ferrallitiques brun-rouge, les teneurs en silice sont appréciables.

d) Utilisation culturale.

D'une façon générale les sols ferrugineux tropicaux rouges ne sont pas mis en culture. Par suite de leur position topographique élevée, il n'est pas possible d'y amener de l'eau d'irrigation et d'y aménager des rizières. Peu de cultures annuelles y sont installées, sauf sur le plateau du Cap Diégo où l'arachide est plantée par les autochtones. D'une façon générale, ces sols sont le domaine des boeufs qu'on y rencontre en grand nombre (en particulier dans l'Antanimena). Les graminées y sont d'une belle venue et assez denses. La forêt occupe encore de vastes espaces avec des arbres de valeur (palissandres). Cette forêt est naturellement en régression par suite des feux annuels particulièrement violents.

L'érosion en lavaka est peu fréquentée ; par contre, l'érosion en nappe est fort active et les zones où la roche-mère est mise à nu sont malheureusement très nombreuses.

D'une façon générale, le pronostic agricole de ces sols est assez défavorable. Certes, l'on pourrait trouver des surfaces planes d'une certaine étendue où l'on pourrait envisager des cultures

.../...

- 150 - 200 cm : Brun-jaune avec quelques taches jaunes ; texture et structure identiques à celles de l'horizon précédent ; concrétions moins nombreuses.
- 200 - 250 cm : Rouge-jaune ; texture et structure identique à précédentes ; encore quelques concrétions. La roche-mère n'est pas visible.

Entre les villages d'Antanimavo et Marerano :

- 0 - 110 cm : Brun-jaune ; argilo-limoneux ; fentes verticales généralement entre les racines des arbres ; sol dur et compacte donnant des fragments nuciformes.
- 110 - 170 cm : Jaune ; argilo-limoneux ; concrétions nombreuses bien réparties.
- à 170 cm : Horizon d'altération grisâtre ; quelques fragments de basalte.

c) Propriétés physiques et chimiques -

La réaction est assez peu acide et le pH est compris entre 6,2 et 6,6. L'argile et le limon sont compris entre 35 et 45 %. La matière organique est assez faible, à la fois en surface et en profondeur ; par contre les teneurs en azote sont relativement fortes ce qui provoque des rapports C/N bas.

Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange nettement plus basse que celle des sols rouges (15 à 16 méq/100 g dans tout le profil). La chaux échangeable est légèrement supérieure à 1% ; la magnésie et la potasse présentent des teneurs très faibles.

L'attaque du sol au réactif triacide donne des valeurs pour le rapport silice/alumine comprises pour les échantillons analysés entre 1,8 et 1,9.

.../...

L'étude des argiles de ces sols révèle une forte teneur en kaolinité associée à des hydroxydes de fer. Il n'y a pas (ou alors en très faible quantité) d'hydroxyde d'alumine.

Les concrétions extraites du sol ont la composition suivante :

SiO ₂	%	12	à	18
Al ₂ O ₃	%	10	à	18
Fe ₂ O ₃	%	30	à	52
TiO ₂	%	0,3	à	2,4
H ₂ O	%	14,5	à	20

d) Utilisation culturale. Vu leur très faible étendue, il n'y a que peu de chose à dire de l'utilisation de ces sols qui ne supportent que des pâturages extensifs. Ils sont soumis à une érosion assez forte.

C - LES SOLS HYDROMORPHES -

Les sols hydromorphes dérivés de roches volcaniques basiques sont assez peu fréquents à Madagascar. Ceci tient, en grande partie, aux formes assez tourmentées des massifs volcaniques qui, présentant souvent des pentes notables, ont un drainage naturel, normalement assuré. Dans certaines régions, comme le massif de l'Ankaratra, l'Ankaizinana, des coulées plus ou moins récentes ont barré des vallées ce qui a provoqué en amont des barrages, des retenues d'eau qui se sont peu à peu comblées par le jeu de l'alluvionnement. Dans ces dépressions, l'on trouve actuellement des sols hydromorphes mais formés à partir de matériaux très divers ; aux apports basaltiques se sont ajoutés des apports trachytiques, granitiques ou gneissiques. C'est le cas des grandes cuvettes intérieures d'Ambohibary, de Vinaninony, de Faratsiho dans l'Ankaratra.

Par contre dans certaines régions de l'Ouest, du Sud et du

.../...

Sud-Ouest de l'île, le drainage naturel s'effectue assez mal par suite de la faiblesse des pentes et d'une pluviométrie insuffisante pour créer des exutoires permanents aux cours d'eau. Ce sera le cas de la plaine de Tsivory, et de certains endroits des plateaux de l'Antanimena et de l'Analavelona.

L'eau qui stagne pendant une période assez longue de l'année sur des matériaux basaltiques provoque la formation d'un gley et parfois une accumulation de matière organique. Lorsqu'elle s'évapore sur place, l'élimination des produits provenant de la décomposition de la roche, se fait mal; la calcification a lieu avec apparition de nodules calcaires dans le profil. Parfois, un cuirassement local se produit avec formation de petites cuirasses de mare.

Les sols hydromorphes sont donc divisés en quatre groupes. Le peu d'extension de ces sols ne justifie pas une subdivision ultérieure.

Groupe des sols hydromorphes à gley.

Ces sols sont ni très fréquents, ni vraiment typiques; cependant on peut observer certains sols qui peuvent leur être rapprochés.

a) Localisation, végétation, drainage.

Les sols de ce groupe ont été notés dans une zone basse du plateau de l'Antanimena appelée plaine de l'Andriribe (52). Le climat est celui qui est valable pour l'ensemble de l'Antanimena. La végétation est une prairie dense d'Hyparrhenia rufa. Par sa situation au pied d'une cuesta de "sables roux", le drainage est certainement défectueux en saison des pluies.

b) Morphologie. Le profil que l'on peut noter dans la plaine de l'Andriribe est le suivant (12. - 26) :

.../...

- 0 - 10 cm : Brun-gris très foncé; moyennement argileux ; grumeleux assez fin ; meuble.
- 10 - 20 cm : même couleur ; mais la structure est nuciforme,
- 20 - 80 cm : Brun-gris foncé, passant graduellement au brun-gris; assez argileux ; compact donnant des fragments à tendance polyédrique. On peut noter quelques rares taches rouges. Vers la base de cet horizon, apparaissent quelques fragments de basalte qui deviennent de plus en plus nombreux.

c) Propriétés physiques et chimiques -

La réaction est nettement acide (inférieur à 6,0) - Les teneurs en argile sont moyennes : 20 à 30 % ; le limon est légèrement inférieur.

La teneur en matière organique, malgré un horizon de surface assez foncé, est en surface de 3 % , la teneur en azote est voisine de 1,2 ‰. Le rapport C/N est supérieur à 10.

Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange de bases de 40 méq/100 g. Les teneurs en chaux et magnésie sont élevées dans tout le profil, les teneurs en potasse sont bonnes en surface, faibles en profondeur.

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

L'attaque du sol au réactif triacide donne un rapport silice/alumine de 3,2.

L'étude de l'argile montre que de fortes quantités de montmorillonite sont présentes avec un peu de kaolinite.

d) Utilisation culturale. Ce sol de l'Andriribe est actuellement utilisé comme pâturage extensif. Il est certain que, si l'irrigation pouvait être réalisée, la riziculture y serait intéressante. On pourrait par l'amélioration du pâturage, y créer une

• belle zone d'élevage.

Groupe des sols hydromorphes à accumulation de matière organique -

Dans l'ensemble de Madagascar, deux sous-groupes de sols hydromorphes où l'accumulation de matière organique est importante, ont été reconnus: les sols de marais et les sols marécageux. Ces deux sous-groupes ont une certaine extension dans les régions volcaniques, mais les sols observés ne dérivent presque jamais uniquement de roches volcaniques basiques. La roche-mère est toujours un mélange de débris basaltiques, trachytiques, et gneissiques ; ce qui fait que l'on n'a pas une roche-mère unique. Cependant, près de Nanokely sur la ligne de partage des eaux de l'Onive (drainant vers l'Océan Indien) et de la Kitsamby (drainant vers le canal de Mozambique) l'écoulement des eaux se fait parfois mal et localement, ils se développent des sols de marais immergés presque toute l'année.

Voici le profil qui a été noté (n° FX 93) sur le plateau de Nanokely, dans une zone déprimée, d'ailleurs d'étendue très limitée.

- 0 - 60 cm : brun-gris, très foncé ; pâte argilo-végétale gorgée d'eau ; racines non décomposées très abondantes.
- 60 - 80 cm : Brun foncé ; argileux ; encore quelques racines.
- 80 - 100 cm : Rouge-jaune argileux plastique.

Propriétés physiques et chimiques -

La réaction est acide à très acide en surface (pH 5,3) ; en profondeur elle est moyennement acide (6,0 à 6,3). Les teneurs en matière organique (qui ne présente pas la structure de la tourbe) sont très élevées en surface 34 % ; à 80 cm, elles sont encore

.../...

fortes 8 %. Les teneurs en azote sont fortes en surface 16,5 %. Le rapport C/N est de 12,5. Le complexe absorbant présente une très forte capacité d'échange de bases : 78,5 méq/100 g en surface, 40 méq/100 g à 80 cm. Les teneurs en bases échangeables sont très faibles.

Utilisation culturale. Ces sols sont très peu étendus et n'ont aucune utilisation.

Groupe des sols hydromorphes à accumulation de calcaire.

Les sols noirs tropicaux ou "Regur".

Dans de nombreuses publications africaines (153), hindoues (64-201) ou américaines, on peut trouver des renseignements précis sur les conditions de formation, la morphologie, les caractéristiques physiques et chimiques de ces sols. Les plus récentes sont celle de H. OAKES, et J. THORP (170) et de R.W.SIMONSON (195-196). Ce dernier consacre une étude particulière au "Regur" des Indes. Dans différentes régions de Madagascar, on trouve des sols, qui, par leur morphologie et leurs propriétés, ont beaucoup de points communs avec ces derniers. C'est pourquoi nous adopterons l'appellation hindoue.

a) Localisation, climat, végétation, et drainage.

Les sols "Regur" ont été notés à Madagascar dans le Sud et le Sud-Ouest de l'île, très localement sur le plateau de l'Analavelona et près de Betsioky ; aux environs de Tsivory, ces sols prennent une certaine étendue. Aucun sol des hauts-plateaux des régions côtières Ouest, Est ou Nord peut leur être rapproché.

Le climat qui prévaut dans les régions à "Regur" est à tendance semi-aride. Une très longue saison sèche de près de neuf

.../...

mois pendant laquelle les précipitations sont quasi-nulles et la température moyenne supérieure à 20° ; une saison des pluies très irrégulière où la pluviométrie ne dépasse pas guère 0,8 m et la température moyenne est supérieure à 27°.

La végétation ne présente pas de caractères très particuliers : forêt tropophile, lorsqu'elle subsiste encore, ou prairie à Heteropogon contortus.

La topographie est toujours plane et en saison des pluies l'écoulement général des eaux est ralenti ; de plus, par suite de la texture argileuse et de la structure du sol, le drainage interne est certainement mauvais. Il est à remarquer toutefois que, sur certaines pentes faibles, de tels sols peuvent être également observés.

b) Morphologie. Les caractéristiques essentielles de ces sols peuvent se ramener aux points suivants :

Une texture très argileuse ; une structure massive avec une tendance à la formation de fentes de retrait importantes jusqu'à une assez grande profondeur. L'altération de la roche donne naissance à des carbonates de chaux, particulièrement abondants à la base du profil sous forme de lamelles et de nodules répartis dans l'ensemble du profil.

Un profil caractéristique (S-16) a été noté à l'extrémité Est de la plaine de Tsivory, sous une prairie d'Heteropogon contortus ; terrain plat.

- 0 - 15 cm : Brun foncé ; argileux ; grumeleux à nuciforme.
- 15 - 40 cm : Brun-gris ; argileux ; quelques fentes verticales, grossièrement nuciforme.
- 40 - 50 cm : Brun-gris ; identique à l'horizon précédent mais avec de nombreux nodules calcaires.

50 - 95 cm : Olive ; argile plastique avec de rares nodules calcaires.

à 95 cm : basalte altéré, calcaire.

A l'Ouest du massif de l'Androy, près du village d'Antranotany on note : S-22.

0 - 15 cm : Gris argileux,; nuciforme à polyédrique ; quelques nodules calcaires.

15 - 80 cm : Gris ; argileux ; plastique avec tendance polyédrique lorsque le sol est sec.

80 - 90 cm : niveau d'accumulation calcaire.

90 -100 cm : Basalte altéré ; calcaire.

Dans la région de Betsioky, au milieu d'une plaine de "sables roux", pointent quelques petits sommets basaltiques. Ces sommets sont quasi-nus et il est difficile d'y trouver la moindre trace de sol. Par contre, sur le pourtour de certains d'entre eux existe une véritable zone d'épandage de matériaux fins vraisemblablement arrachés aux pointements basaltiques. Ce sont des zones planes occupées par des acacias épineux et des graminées.

Le profil qu'on peut noter est le suivant : S-9.

0 - 20 cm : Brun-gris foncé ; argileux; fentes verticales ; fragments durs nuciformes à tendance polyédrique ; non calcaire.

20 - 35 cm : Brun-gris très foncé ; argileux ; nuciforme ; non calcaire.

35 - 90 cm : Brun jaune foncé ; argileux ; plastique ; nodules calcaires abondants.

au-dessous de 90 cm des fragments de basalte apparaissent.

Sur le plateau de l'Analavelona, dans une zone un peu déprimée, on peut noter un sol (S-5) qui, par ses caractères morphologiques et ses propriétés physiques et chimiques se rapprochent beaucoup des précédents.

- 0 - 20 cm : Noir ; grenu ; argileux ; fentes de retrait de 3 à 4 cm de profondeur.
- 20 - 60 cm : Noir ; argileux ; plastique ; compact.
- 60 - 120 cm : Gris ; argile plastique avec quelques fragments de basalte.
- 120 - 150 cm : Beige à jaunâtre ; argile mêlée de fragments de basalte très nombreux.

Ce sol ne renferme pas de calcaire libre, mais présente une très grande richesse en chaux, son pH est neutre ou alcalin. On peut penser que ce sol présente un stade d'évolution proche des précédents.

c) Propriétés physiques et chimiques -

Réaction : Le pH est légèrement acide en surface 6,1 à 6,4 (dans l'Analavelona 6,9). Il augmente notablement avec la profondeur et au voisinage de la roche-mère, il atteint 8,8 (7,5 seulement dans l'Analavelona). Les teneurs en calcaire de la terre fine augmente régulièrement avec la profondeur mais ne sont jamais très élevées.

Granulométrie : En dehors de l'horizon de surface, où les teneurs ne sont pas très élevées, tout le reste du profil est caractérisé par des quantités d'argile assez fortes (40 à 50 %) Le limon est toujours compris entre 20 et 30 %.

Matière organique : Malgré les teintes foncées du sol, les teneurs en matière organique ne sont pas très élevées 4 à 5 % environ en surface. L'azote total est assez élevé (plus de 2%). Le rapport C/N varie entre 12 et 14. En profondeur, les teneurs en carbone et azote et le rapport C/N décroissent très vite. Les

.../...

teneurs en humus sont peu élevées (1,5 ‰) en surface.

Complexe absorbant. La capacité d'échange de base est comprise entre 40 et 50 méq/100 g dans tout le profil. Les teneurs en chaux et magnésic échangeables sont fortes dès la surface (CaO 3 à 5 ‰, MgO 0,7 à 1,2 ‰) et augmentent avec la profondeur (Mg 1,8 à 2,2 ‰ à un mètre). Les teneurs en potasse échangeable sont faibles dans tout le profil. Des teneurs appréciables en sodium échangeable ont été obtenues à la base des profils 0,15 à 0,20 ‰.

L'attaque du sol à l'acide nitrique bouillant fournit des teneurs en chaux élevée (1 à 2 ‰) ainsi qu'en acide phosphorique (1 à 3 ‰). Les teneurs en potasse sont variables (0,3 à 1,7 ‰).

Les argiles sont caractérisés par un rapport silice/alumine compris entre 3 et 4. Les minéraux qui ont pu être identifiés sont la montmorillonite et la kaolinite.

d) Utilisation culturale. A l'heure actuelle, les sols "Regur" ne font l'objet d'aucune culture. Une très faible partie est occupée, dans la plaine de Tsivory par quelques lambeaux de forêt tropophile ; tout le reste porte une prairie où domine Heteropogon contortus.

En culture sèche, le coton paraît possible. Dans la plaine de Tsivory, le fauchage des graminées pourrait être réalisé.

Groupe des sols hydromorphes cuirassés (cuirasse de mare).

L'on a rarement l'occasion d'observer des cuirasses de mare dans les formations uniquement basaltiques. Ces cuirasses ont une très faible étendue et sont liées à une nappe d'eau plus ou moins temporaire sans écoulement permanent. Dans la partie Nord de la plaine de Tsivory, près de la localité de Soasaha on peut observer le profil suivant :

.../...

- 0 - 25 cm : Gris à noir ; sablo-argileux ; grumeleux à nuciforme.
- 25 - 45 cm : Gris avec taches ocre ; sablo-argileux ; nuciforme.
- 45 - 75 cm : Cuirasse bleu acier avec taches jaunes et grises ; vacuolaire.
- 75 -120 cm : Ocre avec taches noires isolées ; sablo-argileux
- 120 -150 cm : Gris et ocre, taches alternantes, sablo-argileux.

Il ne s'agit pas ici d'un sol dérivé uniquement de basalte mais de matériaux basaltiques mélangés à des apports sableux du Nord de la plaine.

La cuirasse a pour composition :

Res %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	H ₂ O %
41,9	7,1	3,2	35,2	3,1	9,3

Le fer a été mis en mouvement et s'est concentré dans un bas-fond pour former la cuirasse.

D - LES SOLS JEUNES -

Les sols jeunes sont reconnaissables sur le terrain à un certain nombre de caractères. On les observe sur des appareils ou coulées volcaniques bien conservés qui témoignent, par leur fraîcheur, d'un âge récent. Les sols sont relativement peu épais et sont riches en cailloux de taille variée. Leur morphologie et leurs propriétés différent sensiblement

.../...

de celles des sols environnants. (1).

a) Localisation, végétation, drainage.

Des sols jeunes ont été notés dans les régions suivantes : Montagne d'Ambre, Nossi-Bé, Ankaizinana, Ankaratra, Itasy, Ils dérivent, soit de basalte rocheux, soit de cendres basaltiques. La végétation qu'ils supportent est parfois assez particulière. Le pédoclimat est le plus souvent sec à très sec, par suite de la perméabilité des roches, aussi la végétation sera-t-elle différente de celle des sols environnants. Elle sera à tendance xérophytique même dans des régions très pluvieuses. C'est le cas de la Montagne d'Ambre et de l'Ankaizinana. A Ambatoafo près de Bealanana, une coulée basaltique récente supporte quelques baobabs, bien que l'altitude soit supérieure à 1.000 m et la pluviométrie de 1,2 m par an ; ailleurs, les Kalanchoe abondent. En Montagne d'Ambre, les repérages des coulées récentes peut se faire grâce aux différences de végétation. Lorsque cette végétation a disparu, elle est remplacée par des plantes herbacées banales.

b) Morphologie. Pied du Mont Iavoka entre Antsirabe et Betafo (dernière manifestation volcanique de l'Ankaratra (FX 82):

0 - 10 cm : Brun-gris très foncé ; limoneux à sableux avec quelques cailloux ; grumeleux fin à particulière.

10 - 50 cm : Brun-rouge foncé ; gros blocs de basalte bulleux couverts par un endroit jaunâtre.

Pied du Mont Tritriva au Sud-Est d'Antsirabe (FX 92).

0 - 50 cm : Brun-olive foncé ; grumeleux très fin ; limoneux.

50 - 80 cm : Brun-rouge foncé ; grumeleux fin ; limoneux

.../...

(1). En Europe centrale, les sols jeunes sont dénommés Ranker à Kubiens.

quelques débris de cendres.

à 80 cm : Cendres grises.

Coulée de l'Ambohiboridramanga entre Beanamalao et Ambodipont (versant Est de la Montagne d'Ambre) (1-72).

0 - 30 cm : Brun-gris foncé ; racines et pierres abondantes ; limoneux ; nuciforme à polyédrique, bien structuré (agrégats de 0,2 à 0,4 cm) ; poreux.

à 30 cm : Rochers abondants séparés par très peu de sol.

Volcan Voririky au centre de l'île de Nossi-Bé.

0 - 20 cm : Brun-rouge foncé ; argilo-sableux avec petits cailloux de basalte bulleux assez nombreux ; structure bien développée, nuciforme (0,2 à 0,4 cm) ; poreux ; racines nombreuses ; cohésion moyenne à forte.

20 - 80 cm : Brun-rouge ; argileux avec quelques cailloux de basalte ; structure plus grossière ; fentes de dessiccation ; nuciforme à tendance polyédrique : quelques fragments à bord anguleux ; poreux ; cohésion moyenne à forte.

80 - 120cm : Brun clair à gris avec taches grises et rouille ; fragments de basalte altéré s'effritant facilement ; poreux ; cohésion faible.

à 120 cm : Basalte bulleux altéré ; rougeâtre à violacé assez tendre.

Domaine de Djamanjara (Nossi-Bé) sous canne à sucre.

.../...

- 0 - 50 cm : Brun-gris foncé ; argileux avec quelques grains de cendres non décomposés ; nuciforme à grumeleux grossier ; bien structuré : chevelu de racines denses ; poreux ; cohésion moyenne.
- 50 - 80 cm : Brun-clair ; argileux avec fragments de cendres.
- à 80 cm : Cendres altérées.

Dans le massif de l'Itasy, des sols très peu développés s'observent également. Des coulées d'une très grande fraîcheur sont fréquentes. On ne peut guère parler ici de profil. En écartant les pierres, on peut trouver un peu de sol.

c) Propriétés physiques et chimiques -

Réaction : le pH de ces sols est normalement acide 6,0 à 6,4 en surface ; 6,2 à 6,9 en profondeur.

Granulométrie. La granulométrie est assez variable ; l'argile est souvent abondante 20 à 40 % et le limon est généralement compris entre 20 et 25 %. Le reste est en sable fin et grossier.

Matière organique. Une des caractéristiques de ces sols est leurs fortes teneurs en matière organique. On trouve normalement entre 8 et 10 % de matière organique totale. Les teneurs en azote total sont également élevées : 6 à 8 %. Les rapports C/N sont inférieurs à 10 : 8 à 9. Les teneurs en acide humique sont également élevées 4 % environ.

Complexe absorbant. La capacité d'échange des sols est normalement assez élevée : 40 méq/100 g environ. Cette capacité ne varie guère avec la profondeur. Les teneurs en bases échangeables sont relativement faibles (CaO : 1 à 2 % ; MgO environ 0,3 % ; K₂O moins de 0,1 %).

.../...

Les réserves minérales présentées par ces sols sont remarquablement élevées, puisque les teneurs en chaux varient entre 3 et 17 ‰, les teneurs en potasse entre 0,3 et 2‰, l'acide phosphorique entre 1,8 et 4,3 ‰ .

Le rapport silice/alumine du sol est presque toujours supérieur à 2,0. Dans la fraction argile, on a pu mettre en évidence la présence de montmorillonite, kaolinite et gibbsite.

d) Utilisation culturale. Les sols jeunes ne présentent qu'une superficie assez réduite. La forêt ou la prairie occupe la plupart d'entre eux. Ils ne sont cultivés que lorsque le sol est suffisamment épais : cultures vivrières diversées dans l'Ankaratra et l'Itasy, ou caféiers à Nossi-Bé. Sauf ceux qui dérivent de cendres, ces sols sont fortement caillouteux et peu épais ; leur perméabilité est grande ; leur richesse en éléments fertilisants moyenne à bonne. Les réserves, par suite de la proximité de la roche-mère sont importantes. Par suite de leur faible épaisseur, les plantes peuvent souffrir du manque d'eau en saison sèche.

Ces sols sont assez favorables aux plantes dont les racines ne pénètrent qu'à une profondeur peu importante.

E - LES SOLS ALLUVIAUX -

Les sols alluviaux dérivant uniquement de matériaux basaltiques ne sont pas extrêmement fréquents. Il est rare, comme pour les sols hydromorphes, que les matériaux arrachés aux régions volcaniques basiques ne soient pas mélangés à des matériaux provenant des régions cristallines ou sédimentaires. Ce n'est que dans des zones réduites du pourtour de certains massifs que l'on peut trouver de tels sols : dans l'Ouest de la Montagne d'Ambre et sur le versant Est de l'Ankaratra. .../...

a) Localisation, végétation, drainage.

Les alluvions basaltiques ont été notées dans un certain nombre de vallées de l'Ankaratra, bordant les rivières de Manalalondo de l'Andranomaria, de l'Ihazolava etc... Dans le massif d'Ambre, dans les vallées de la Sahinana, de la Mahagaga, de la Sandrapiana, du Rodo, etc.. Ces sols alluviaux présentent des étendues très variables. Seules, les alluvions du Rodo atteignent une superficie voisine de 2.000 ha. La végétation primitive est rarement conservée, car les sols sont presque toujours mis en valeur. La proximité des cours d'eau fait que la riziculture y est très répandue. Le drainage naturel est souvent bon ; mais on peut noter parfois une certaine tendance à l'hydromorphie peu accentuée en raison de la jeunesse des sols.

b) Morphologie. Voici quelques profils notés dans les alluvions basaltiques : Ankaratra FX 10, dans la vallée de la rivière qui coule au Nord de la vieille route d'Ambatolampy à Faratsiho.

0 - 10 cm : Brun très foncé ; argilo-limoneux ; grumeleux fin.

10 - 120 cm : Brun ; argileux ; massif.

FX 24 : Dans la plaine de Ambohibary, au débouché d'une rivière descendant du massif de l'Ankaratra.

0 - 15 cm : Brun gris foncé ; argilo-limoneux ; grumeleux.

15 - 60 cm : Brun ; argileux ; très humide ; massif.

au-dessous de 60 cm : nappe phréatique.

Dans la Montagne d'Ambre, 1 - 47 : vallée de la Mahagaga.

0 - 20 cm : Brun jaune foncé ; argilo-limoneux ; massif se défaisant en fragments polyédriques.

20 - 60 cm : Brun ; argilo-limoneux ; sans structure nette.

.../...

1 - 61 . Vallée du Rodo, pas de profil bien différencié : le sol est brun, limono-sableux fin ; la structure est à tendance polyédrique ; la cohésion est moyenne à forte.

Dans la partie Nord du plateau de l'Antanimena, une petite rivière apporte dans la plaine de Manaratsandry des alluvions basaltiques près de la localité d'Ampijoroa, on note que (13-40) :

Il n'y a pas d'horizon humifère notable ; la couleur passe du brun foncé au brun-rouge ; la texture est sablo-argileuse avec une structure nuciforme.

c) Caractéristiques physiques et chimiques.

Réaction : Les alluvions basaltiques sont généralement acides en surface (5,9 à 6,2) ; en profondeur le pH est faiblement acide ou neutre (6,5 à 7,0). Les alluvions du Rodo sont neutres dans tout le profil.

Granulométrie. Les différentes fractions sont représentées d'une façon très hétérogène, puisque c'est tantôt la fraction sable (fin) qui domine, tantôt l'argile ou le limon.

Matière organique. Le carbone organique est très élevé dans l'Ankaratra où l'on note près de 18 % de matière organique totale. Les teneurs des alluvions des vallées de la montagne d'Ambre et de l'Antanimena sont beaucoup moins fortes 2 à 5 %. Les teneurs en azote sont très fortes dans l'Ankaratra (10 à 12 ‰), beaucoup moins ailleurs : 1,7 à 3 ‰. Le rapport C/N reste compris entre 9 et 11.

Le complexe absorbant : est caractérisé par une capacité d'échange de bases élevées dans l'Ankaratra 50 à 70 méq/100 g dans les autres plaines, cette capacité d'échange varie entre

.../...

30 et 35 meq/100 g. En profondeur, les capacités d'échange obtenues sont beaucoup plus faibles. Les teneurs en bases échangeables varient de façon inverse de la pluviométrie. Dans l'Ankaratra, les teneurs sont faibles à très faibles, tandis que dans les régions plus sèches de la montagne d'Ambre et du Rodo, les teneurs sont relativement élevées.

Exemples des teneurs en chaux échangeable de certaines alluvions d'origine basaltique.

Lieu	Ankaratra	M ^{ne} Ambre	Antanimena	M ^{ne} Ambre
Rivière	Ihazolava	Anofanjava	Ampijoroa	Rodo
pluviométrie	1,7 à 2,0 m	1,6 à 1,8 m	1,2 à 1,4	< 1,0
CaO ‰	0,5	2,9	4,6	4,7

Les teneurs en potasse échangeable varient dans le même sens.

d) Utilisation culturale.

La plupart des alluvions basaltiques (à l'exception de celles du Rodo) sont cultivées. Les principales cultures sont le riz, (lorsque l'irrigation est possible), le maïs, le sisal. On pourrait prévoir, après régularisation des cours d'eau, une extension plus importante de la riziculture. La plaine du Rodo est seule à ne pas être cultivée à l'heure actuelle. Sa mise en valeur nécessiterait d'importants travaux. Le coton est une plante qui s'accommoderait bien, semble-t-il, du climat et du sol.

F - LES SOLS D'ABLATION -

D'importantes étendues volcaniques sont à peu près totalement privées de sol et la roche, plus ou moins désagrégée, affleure assez souvent. Cet état de choses peut être attribué, dans ce cas, à l'érosion qui a décapé complètement le sol jusqu'à la roche-mère. Cette érosion est due d'abord à la déforestation, suivie

.../...

d'incendies répétés. Elle est particulièrement sensible dans les régions à saison sèche prolongée et à pentes fortes, comme c'est le cas dans le Sud et dans l'extrême Nord (presqu'île du Bobaomby). Dans l'Ouest elle est beaucoup moins avancée et les zones caillouteuses sont moins fréquentes que les zones pourvues de sel.

Dans la plupart des cas, le sol, assez rare, que l'on trouve entre les pierres peut être considéré comme un premier terme de désagrégation de la roche. Des échantillons ont été prélevés dans le Bobaomby et dans le massif volcanique de l'Androy. Ils sont de couleur brun-rouge à brun et ont présenté des teneurs moyennes en base, une capacité d'échange de base de 30 à 50 méq/100 g.

Naturellement aucun usage ne peut être fait de ces sols où seules poussent des graminées.

-- CHAPITRE 5 --

Relations des sols dérivés de roches volcaniques
entre eux et avec les sols dérivés d'autres roches-mères.

A. Relations entre les différents sols dérivés de roches
volcaniques basiques.

--

Les observations que l'on peut faire sur les sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar montrent que la formation des sols est fonction du climat, du drainage, de la végétation, elle-même en relation avec le climat et le drainage.

Ces trois facteurs déterminent l'action des processus de formation du sol suivants :

- Ferrallitisation
- Ferruginisation
- Cuirassement
- Accumulation de matière organique
- Calcification

On peut distinguer dans l'île, deux vastes ensembles :

1 - la région périphérique où la température est comprise entre 23 et 28° et où la pluviométrie varie de 500 à 3.000 mm. Les processus de formation du sol qui interviennent sont : ferrallitisation, ferruginisation, hydromorphie, cuirassement, et calcification.

2 - La région centrale où la température est inférieure à 22° (22° à 8,8°) et la pluviométrie comprise entre 1.200 ou 3.000 mm. Les processus de formation du sol qui interviennent sont : ferrallitisation, hydromorphie, cuirassement, et accumulation de matière

.../...

organique.

Ceci peut être synthétisé par le tableau suivant :

	Température	Pluviométrie mm	drainage normal	drainage difficile
Région périphérique	22 - 28°	> 1500	Sols ferrallitiques typiques	Sols hydromorphes divers
		< 1500	Sols ferrugineux tropicaux	Sols hydromorphes Regur
Région centrale	9 - 22°	> 1700	Sols ferrallitiques humifères	Sols hydromorphes divers
		< 1700	Sols ferrallitiques typiques	

On voit que le processus de ferrallitisation est largement prépondérant à Madagascar puisqu'il interesse la totalité de la région centrale et une grande partie de la zone périphérique. L'observation prouve que dans la région Ouest avec une pluviométrie de 1,5 m (environs de Marovoay, de Port-Bergé), les sols sont ferrugineux tropicaux. Dans le Nord-Ouest, au-delà du Sambirano, avec une pluviométrie de 1,8 m (zone au Nord d'Ambilobe), une ferrallitisation légère commence à se produire (rapport silice/alumine compris entre 1,6 et 1,9). Par conséquent la limite Ouest de la ferrallitisation est soit l'isohyète 1.500 mm (dans le Nord et le Sud) soit la bordure occidentale des hauts-plateaux (centre Ouest). Cette limite coïncide assez bien avec la ligne d'égale valeur du coefficient de Meyer : 225 établie par C. MOUREAUX et G. TERCINIER (35). Cette limite est donc assez différente de celle qu'avait proposée A. LACROIX (27) qui la plaçait assez loin vers le Sud-Ouest en gros entre Tuléar et Fort-Dauphin.

.../...

Cette grande coupure permet de séparer les deux sous-ordres fondamentaux à Madagascar. C'est naturellement une limite valable en gros, à l'échelle du territoire, et des causes locales (particularités du drainage, de topographie, de micro-climat) feront qu'elle peut cesser d'être valable à l'échelle d'une région déterminée. Il est possible de trouver des plages ferrallitiques dans la zone des sols ferrugineux tropicaux, comme on peut trouver des plages ferrugineuses tropicales dans la région des sols ferrallitiques.

a) Sols ferrugineux tropicaux dans la zone ferrallitique.

Près d'Antalaha (côte Nord-Est de l'île avec une pluviométrie bien répartie sur toute l'année de 2.100 mm et une température moyenne annuelle de 24°), deux sols rouges ont été examinés et analysés. L'un présentait dans tout le profil un rapport silice/alumine voisin de 0,8. D'après ce que nous verrons plus loin à propos de ce rapport, c'est la valeur qu'on pouvait s'attendre à trouver dans cette région. Par contre le deuxième sol présentait un rapport silice/alumine très proche de 2 (2,05 à 1,99) dans tout le solum ; par contre au niveau de la roche-mère ce rapport tombait à 1,1.

Près d'Antsirabe, le petit massif du Mandray avait déjà fait l'objet d'une étude d'A. LACFOIX (27), la composition du sol rouge qu'il supporte pouvait permettre de la placer parmi les sols ferrugineux tropicaux rouges. Les échantillons que nous avons prélevés sur ce massif nous ont donné des valeurs légèrement inférieures à 2 (1,3 à 1,8), en tous cas plus élevées que celles qu'on trouve normalement autour d'Antsirabe (0,8 à 1,1).

Dans l'état actuel de nos connaissances, il est difficile de présenter une explication logique de ces deux particularités. Il ne semble pas que le drainage soit défectueux dans aucun cas et l'examen des profils ne permet pas d'élucider la question.

.../...

b) Sols ferrallitiques dans la zone des sols ferrugineux tropicaux.

Ce cas n'a pas été observé pour les sols dérivés de roches volcaniques basiques. Toutefois, un exemple très net peut être observé pour les sols dérivés de calcaires dans la région de Majunga.

La répartition des différents groupes et sous-groupes pose des problèmes moins généraux et demande des solutions plus précises. L'étude de la répartition des sols dans les deux massifs de la montagne d'Ambre et de l'Ankaratra où les variations climatiques sont rapides sur un territoire limité doit nous permettre de serrer le problème d'assez près.

a) Montagne d'Ambre. Rappelons que ce massif situé dans l'extrême Nord de l'île présente une forme conique, qu'il varie en altitude de 0 à 1.400 m, qu'il est soumis aux vents d'alizé sur sa face Est et Sud-Est, que l'influence de la mousson est prépondérante à l'Ouest. Le climat y est chaud et sec sur la périphérie et très humide et beaucoup plus frais au sommet. Le volcanisme est relativement ancien sauf au Centre et dans la moitié Sud où les édifices sont d'une très grande fraîcheur.

L'examen du parcours cap d'Ambre au sommet du massif montre que l'on a successivement (fig. 10) :

Les sols semi-squelettiques du Bobaomby. Cette presqu'île présente un relief particulièrement tourmenté, bien que l'altitude n'y dépasse guère 250 m. Le déboisement y est presque total et la roche-mère y affleure à peu près partout. Dans de rares endroits, on peut constater que le sol devait y être à l'origine ferrugineux tropical rouge.

.../...

Les sols ferrugineux tropicaux rouges typiques du Cap Diégo et Diégo-Suarez, formés sous une pluviométrie assez faible (0,9m) et une température de 28°.

La topographie est plane ou à très faible pente vers le Nord.

Les premiers sols ferrallitiques apparaissent vers Sakaramy. La pluviométrie enregistrée dans cette station est de 1,2 m ; mais, étant donné le très petit nombre d'années sur lesquelles les mesures ont porté, il est possible qu'elle soit plus élevée. On note alternativement des sols ferrallitiques rouges et brun-jaune, ces derniers devenant prépondérants à mesure qu'on s'élève en altitude. La mise en liberté de l'alumine est encore peu importante (les rapports silice/alumine varient de 1,6 à 1,8). En général, les sols rouges correspondent à des monticules ou d'anciens édifices volcaniques ; les sols brun-jaune à des nappes étendues.

Peu à peu, vers Joffreville (où la pluviométrie est déjà importante et la température plus fraîche), les sols ferrallitiques humifères apparaissent et occupent tout le sommet du massif. Les teneurs en matière organique ont beaucoup augmenté, le rapport silice/alumine s'abaisse entre 1,0 et 0,7.

Une succession de sols analogues pourra s'observer sur le versant Est du massif, avec toutefois cette différence que les sols ferrallitiques humifères descendent beaucoup plus bas (vers 500 m environ). Ceci nous paraît dû à l'exposition de ce versant par rapport au vent d'Est toujours humide même en saison sèche.

Sur le versant Ouest, des Roussettes à Mangoaka ou des Roussettes au delta de la Mahavavy, l'on reste toujours dans le domaine des sols ferrallitiques (sols ferrallitiques humifères brun au sommet, sols ferrallitiques brun-jaune à la base). Sur la périphérie, la température est toujours élevée 26 à 28° et la pluviomé-

trie est encore forte 1,6 à 1,8 m (postes d'Ankivanja et Andranofanjava). L'on a ici des sols où l'individualisation de l'alumine est encore peu prononcée (silice/alumine de 1,6 à 1,9).

Ainsi les sols de la montagne d'Ambre paraissent présenter un ensemble assez cohérent. Lorsque la température est très élevée et la pluviométrie assez faible, se développent les sols ferrugineux tropicaux ; une élévation de la pluviométrie se traduit par la disparition des teintes rouges et l'apparition de quantités réduites d'alumine libre. L'augmentation de la pluviométrie (jointe à une diminution de la température) favorise l'accumulation de la matière organique, une mise en liberté plus grande d'alumine. Le passage d'un sous-groupe à un autre est toujours graduel.

b) Le massif de l'Ankaratra. Situé au coeur de l'île, il s'élève de 1.200 m à 2.630 m. Il a une configuration beaucoup moins régulière que la montagne d'Ambre et comprend quelques zones de roches acides assez étendues. Il est, lui aussi, exposé à l'alizé sur sa face Est. La température passe de 17-18° sur la périphérie à 8°8 au sommet. La pluviométrie est comprise entre 1,2 et 1,4 m à la base ; nous avons lieu de penser qu'elle atteint 3 m au sommet.

Examinons deux itinéraires : l'un allant de la base Est vers le Mont Tsiafajavona (2.636 m) ; l'autre allant d'Arivonimamo (1.400 m) vers le plateau de Laona (2.000 m) (c'est à dire à l'abri de la chaîne principale) (Fig. 11).

I - La face Est - les sols ferrallitiques typiques rouges de l'Ihazolavo ou d'Ambatotsipihina sont formés sous un climat assez frais (17 à 18°) mais une pluviométrie assez basse 1,2 à 1,4 m, tombant en un petit nombre de mois (4). L'accumulation de la matière organique ne se produit pas, mais l'individualisation de l'alumine est importante (silice/alumine 0,2 à 0,7) :

.../...

fréquemment, lorsque la topographie sera favorable, le cuirassement pourra se produire.

Dès Manjakatempo, où la température a diminué mais la pluviométrie augmenté ainsi que le nombre de mois de pluie (5 à 6), apparaissent les sols ferrallitiques humifères bruns. La matière organique s'accumule, l'individualisation de l'alumine est moins forte que précédemment (silice/alumine 0,7 à 1,2).

Le sommet de la chaîne, où la pluviométrie est certainement très élevée (nous l'estimons à 3 m) et la température beaucoup plus faible (8,8°) est le domaine des sols Ando très riches en matière organique. L'individualisation de l'alumine est moins poussée qu'à une altitude inférieure (silice/alumine 1,5 à 2,0).

2 - L'axe Nord-Sud à l'Ouest de la chaîne principale.

Les sols ferrallitiques typiques rouges occupent la région d'Imerintsiatosika et Arivanimamo sous un climat analogue à celui de l'Ihazolava. Les zones cuirassées existent, moins fréquentes qu'à l'Est.

A mesure qu'on s'élève vers Manalalondo (1.800 m), la couleur rouge s'atténue et on passe à des sols brun-rouge. Le plateau de Laona entre 2.000 et 2.200 m porte de nouveau des sols ferrallitiques humifères bruns.

Après la coupure Manalalondo-Faratsiho, le plateau de Nanokely porte de nouveau des sols ferrallitiques humifères bruns. Plus au Sud, on descend très brutalement sur la plaine d'Ambohivary bordée de sols ferrallitiques typiques rouges.

Les sols de l'Ankaratra constituent comme la montagne d'Ambré, un ensemble assez cohérent. Sur la périphérie du massif où la pluviométrie est comprise entre 1,2 et 1,4 m et la température entre 16 et 18° se développent des sols ferrallitiques

.../...

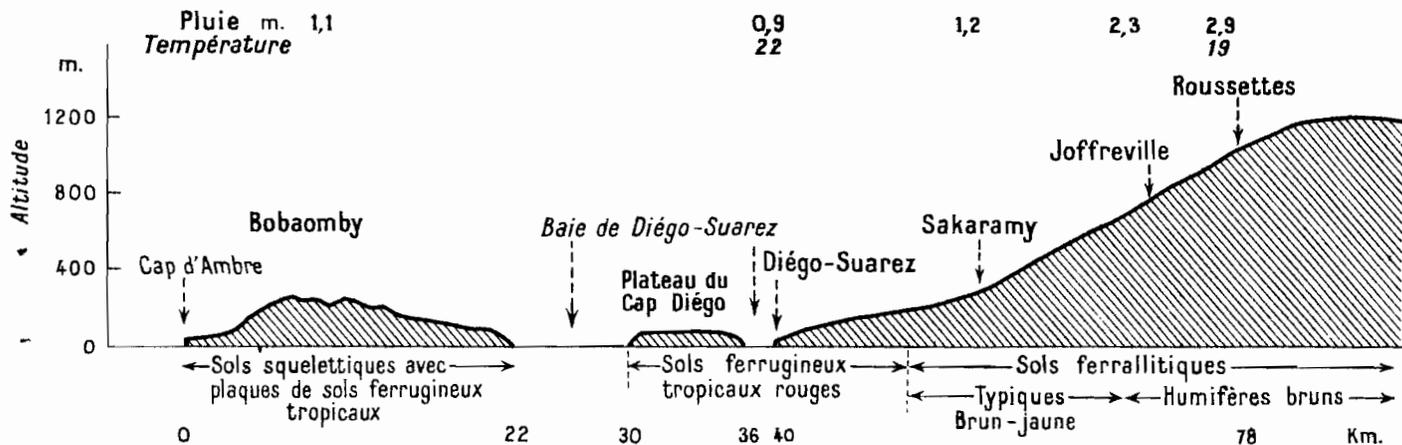


Fig. 10
Variations des sols avec l'altitude en montagne d'Ankaratra

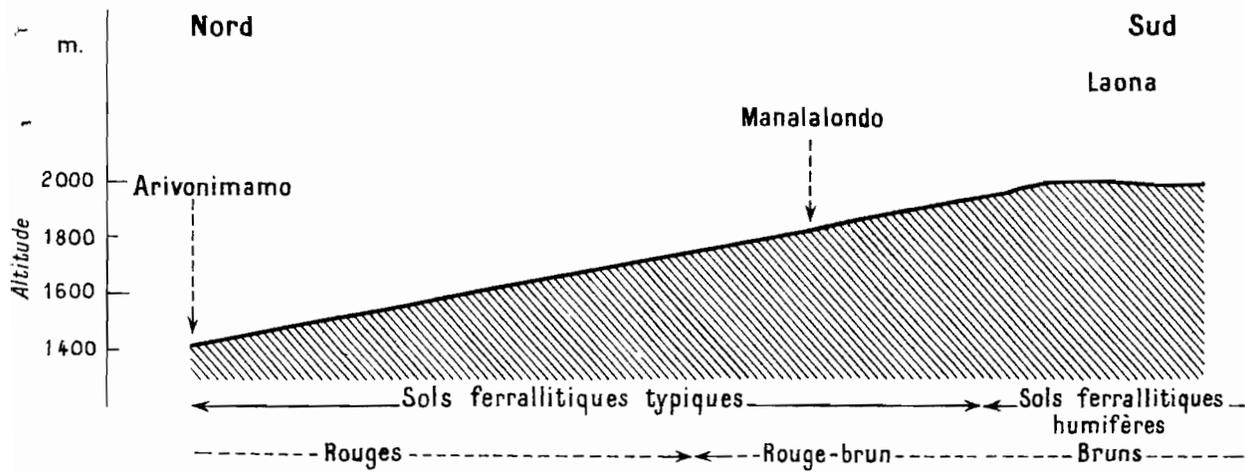
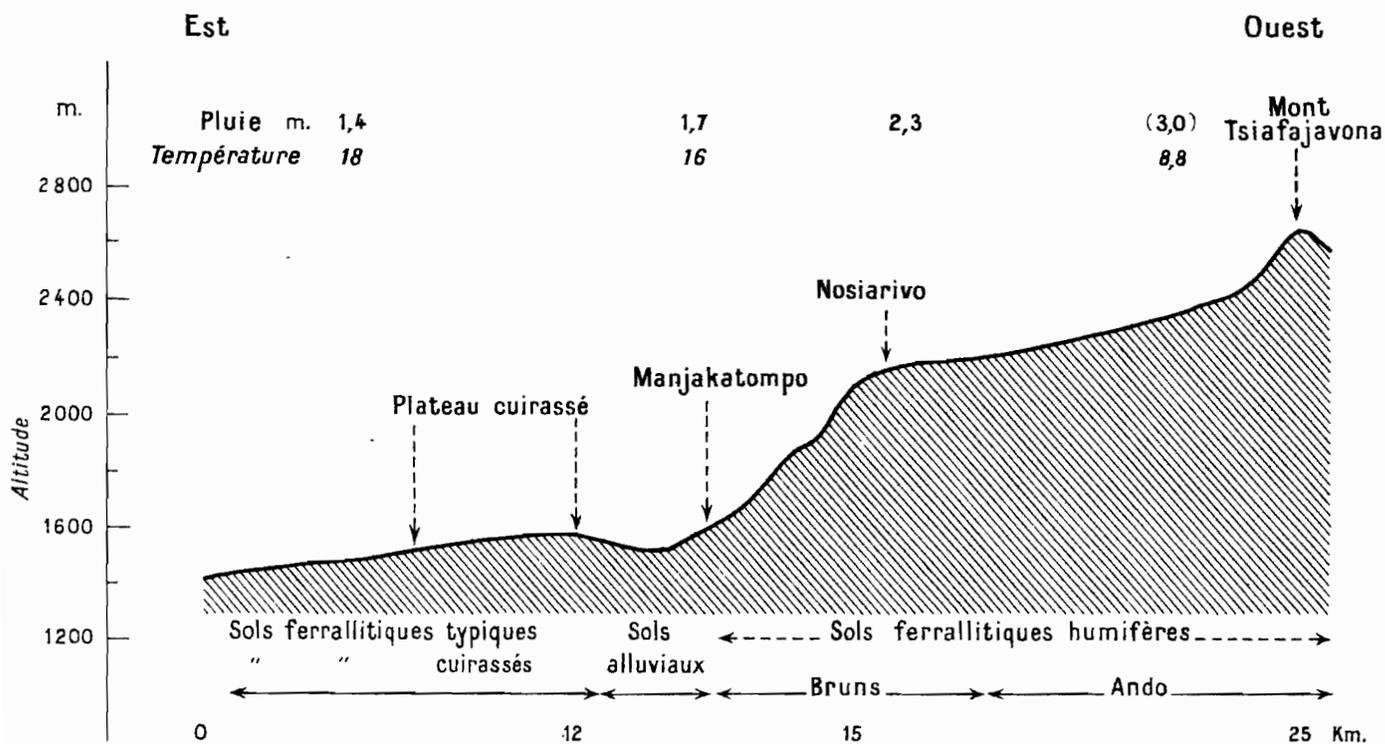


Fig. 11
Variation des sols avec l'altitude dans l'Ankaratra

typiques rouges. Lorsque la température se refroidit et que la pluviométrie augmente, apparaissent vers l'Ouest un type intermédiaire brun-rouge (qui manque à l'Est), puis les sols ferrallitiques humifères bruns riches en matière organique et en alumine libre. Vers les sommets humides et très frais l'accumulation de la matière organique est très forte, mais l'individualisation de l'alumine modérée.

Si l'on compare cet ensemble de sols à ceux de la Montagne d'Ambre, deux remarques peuvent être faites :

- 1°) l'augmentation de la matière organique concorde avec celle de l'altitude dans les deux cas.
- 2°) Tandis qu'en Montagne d'Ambre, le rapport silice/alumine diminue avec l'altitude ; il augmente avec celle-ci dans l'Ankaratra.

Relations entre les sols de ces deux massifs et les sols des autres régions volcaniques de l'île.

Si les sols du sous-groupe Ando n'ont pas été notés ailleurs que dans l'Ankaratra, les sols ferrallitiques humifères bruns existent dans deux autres régions : l'Ankaizinana (Bemanevika) et l'Itasy. Dans ces deux cas il s'agit de zones d'altitude (environ 1.700 m). Dans l'Ankaizinana les valeurs climatiques ne sont pas connues. Si l'on applique les règles de diminution de la température et augmentation de la pluviométrie valables ailleurs, on peut estimer, en gros, que la pluviométrie est voisine de 1,7 m et la température de 16°. On aurait donc une région analogue à la partie moyenne de l'Ankaratra. Les valeurs climatiques de l'Itasy sont mieux connues, pluviométrie : 1,8 à 2,0 m et température 16° à 18°. La correspondance avec l'Ankaratra est encore valable ici.

.../...

Les sols brun-rouge de la Côte Est constituent une individualité assez particulière. Ils sont formés sous un climat toujours pluvieux (2,3 m environ bien répartis sur toute l'année) et toujours chaud (23 à 24°). Il en résulte une accumulation modérée de matière organique associée à une individualisation poussée de l'alumine.

A Nossi-Bé où règne un climat assez analogue, on devrait s'attendre à trouver des sols très voisins. Mais cette île comprend au moins 50 % de sols jeunes ou très jeunes et la partie de l'île qu'on peut considérer comme portant des sols anciens a pu être rajeunie par des projections de cendres provenant des nombreux cratères qui subsistent intacts à l'heure actuelle.

Les sols ferrugineux tropicaux rouges de la côte Ouest peuvent être rapprochés de ceux de l'extrême Nord de l'île, ils se sont formés sous 26° de température moyenne et une pluviométrie de 1,5 m ; l'accumulation de la matière organique ne s'y produit pas et leur rapport silice/alumine est égal à 2,0.

Le climat de l'Analavelona est assez difficile à connaître. Cette région est située en dehors de l'action directe de l'alizé ; aussi l'estimation de la pluviométrie à partir des données des stations voisines nous paraît assez hasardeuse. Si la diminution de la température avec l'altitude est encore valable ici, on doit pouvoir l'estimer à 20° environ. Les sols rouges qui occupent le plateau entier ne présentent pas d'accumulation de matière organique ; leur rapport silice/alumine approche de 2 (1,5 à 1,8). Ceci devrait permettre de les placer génétiquement dans les sols ferrallitiques rouges ; en même temps ils constitueraient une transition vers les sols ferrugineux tropicaux rouges.

Dans l'Ouest et le Sud-Ouest, la pluviométrie est insuffisante pour assurer la mise en liberté de l'alumine. Le drainage prend alors une grande importance comme facteur de formation du sol.

Aux sols normalement drainés seront associés de plus en plus fréquemment des sols hydromorphes d'où les bases seront incomplètement entraînées. Des sols hydromorphes regur où la calcification sera importante seront notés dans les plaines d'où l'évacuation de l'eau sera difficile.

Cet ensemble d'observations nous permet de constater que la répartition des sols dérivés de roches volcaniques à Madagascar est liée essentiellement au climat et au drainage. L'isohyète 1.500 mm, ou la ligne d'égale valeur 225 du coefficient de non-saturation de Meyer permet de séparer les sols ferrallitiques des autres sols. Par ailleurs, les variations climatiques qu'on peut observer dans une région d'étendue restreinte ou même à l'échelle de l'île entière, permettent d'expliquer la répartition des différents groupes et sous-groupes. Les sols sont donc étroitement "enchaînés" les uns aux autres et le passage de l'un à l'autre s'effectue généralement sans solution de continuité.

Cet enchaînement qui nous paraît valable pour les catégories de sols s'applique également aux propriétés des sols. Ceci fera l'objet de la deuxième partie de cette étude.

B - Comparaison entre les sols dérivés de roches volcaniques basiques et ceux dérivés d'autres roches-mères.

La comparaison entre les sols dérivés de roches volcaniques basiques et ceux dérivés d'autres roches-mères permet d'effectuer les constatations suivantes.

I - Il y a peu de différences fondamentales au niveau des sous-ordres. Là où les autres roches-mères donnent naissance à des sols ferrallitiques ou ferrugineux tropicaux, les roches volcaniques basiques donnent, en général, des sols appartenant aux mêmes sous-ordres. Ceci a pu être mis en évidence au cours de pros-

.../...

pections ou tournées dans différentes régions de l'île.

Dans l'ensemble des régions orientale et centrale, la roche-mère dominante est soit le gneiss soit le granite. Dans la région centrale, à l'Ouest d'Ambositra, les roches sont un peu plus variées ; on voit affleurer des masses importantes de micaschistes, quartzites et cipolins, ainsi que des gabbros. La plupart de ces roches donnent naissance à des sols ferrallitiques. (1). Le calcaire, après décalcification produit une argile dans laquelle la mise en liberté de l'alumine peut se produire. Une mention spéciale doit être faite pour les quartzites et les sables côtiers. Dans les régions déboisées du centre, les quartzites sont désagrégées et le sable produit est entraîné par l'érosion. Lorsque la couverture végétale a subsisté (environs de Périnet, ou à l'Est de Fianarantsoa) le processus lessivage est grandement favorisé par la perméabilité du milieu, et l'entraînement en profondeur du fer et de l'humus se produit. Sur la Côte Est, des sables dunaires ont été fixés par la végétation et donnent naissance à de véritables podzols (1).

Sur la côte Ouest, les roches-mères sont très variées, les roches métamorphiques sont peu abondantes, mais toute la gamme des roches sédimentaires est représentée. La plupart des roches donnent naissance à des sols ferrugineux tropicaux. Des sols appartenant à ce sous-ordre ont été notés sur arkoses, sables, grès, calcaires divers. Les marnes et argiles présentent du fait de leur imperméabilité un comportement différent. Dans la région de Tsaramandroso (Sud-Est de Majunga) un niveau de marnes arrive en affleurement. Lorsque la topographie est un peu tourmentée, il n'y a pas de sol et la marne affleure à nu. En plaine, le drainage s'effectue mal et des sols appartenant au sous-ordre hydromorphe

.../...

(1) cf. J. Riquier - Mem. Inst. Sci. Madag. D III.

se développent (accumulation de matière organique, calcification).

Dans l'extrême Sud, sous une température assez élevée et une pluviométrie réduite (3 à 600 mm), un grand nombre de roches continuent à donner naissance à des sols ferrugineux tropicaux à condition que le drainage soit bien assuré ; c'est le cas des sables et des grès. Par contre, les roches calcaires donnent lieu à des sols relevant du sous-ordre calcimorphe qui se traduit par l'apparition de nodules calcaires et même à des croûtes calcaires. Lorsque le drainage est défectueux se développent des sols hydromorphes.

Type de climat	Région	Roches volcaniques basiques	Roches volcaniques acides	Roches plutoniques ou métamorphiques	Roches calcaires	Sables et grès
Equatorial	Côte Est Sambirano	Sols ferral.	Sols ferral.	Sols ferralli.	X	Sols ferral.
Tropical d'altitude	Centre	Sols ferral.	Sols ferral.	Sols ferralli.	Sols Ferrallit.	0
Tropical à deux saisons	Ouest	Sols ferru. tropi.	X	Sols ferrugi. tropic.	Sols ferralliti ou ferrugin. tropicaux	Sols ferrugi. tropic.
Semi-aride.	Extrême Sud.	Sols ferrugineux tropic. ou hydromorphes.	0	Sols ferrugin. tropicaux ou squelettiques	Sols ferrugineux tropicaux ou calcimorphes.	Sols ferrugineux tropicaux.

X : Non observé

0 : Néant.

2 - Des différences assez sensibles s'observent au niveau des groupes. Le processus "accumulation de matière organique" prend une certaine importance pour les sols dérivés de roches volcaniques basiques, alors que les sols dérivés d'autres roches-mères ne sont pas ou très peu intéressés par ce processus. Le processus "lessivage" qui n'affecte pas les sols dérivés de roches volcaniques basiques prend une certaine importance pour les sols dérivant de grès, arkoses et sables dans la région Ouest.

L'accumulation de la matière organique est faible pour les sols dérivés de roches plutoniques ou métamorphiques. On peut noter, sous forêt ombrophile des teneurs en matière organique atteignant 5 à 8 % ; mais l'épaisseur de l'horizon humifère est de 20 cm environ et il n'y a pas pénétration de matière organique en profondeur.

Cependant, dans deux régions on peut noter des profils de sols dérivés de trachyte dont la morphologie est assez semblable à celle des sols dérivés de basalte : environs de Faratsiho et Itasy.

Voici un profil noté dans l'Itasy au pied du Mont Ingilofotsy vers 1.700 m d'altitude, sous une plantation d'Aleurites.

- 0 - 60 cm Brun-gris foncé ; limono-sableux fin ; grumeleux fin ; très meuble ; bien structuré ; poreux ; racines abondantes ; cohésion assez faible.
- 60 -110 cm Brun ; limono-argileux ; avec un peu de sable fin ; nuciforme ; poreux tubulaire.
- à 110 cm Roche altérée grise (trachyte).

Il est à noter que ce profil, assez analogue à celui qu'on observe sur roche volcanique basique, dérive d'un trachyte calcaire assez riche en chaux.

.../...

Dans l'ensemble de la région Ouest, les sols ferrugineux tropicaux appartiennent d'une façon générale au groupe "typique". Cependant, certains grès et sables (il ne s'agit bien entendu pas de grès ou sables purement siliceux), donnent naissance à des sols dont la partie supérieure est lessivée en fer et en argile. Voici un profil caractérisant la série d'Anjiajia (région Sud-Est de Majunga). La roche-mère est un grès assez argileux ; la végétation une savane assez lâche où les espèces arborées dominantes sont Poupartia caffra et Acridocarpus excelsus, avec un tapis de graminées de Hyparrhenia rufa.

0 - 5 cm	Gris, un peu rougeâtre, légèrement humifère ; sableux ; grossièrement nuciforme.
5 - 30 cm	Rouge pâle ; sableux ; un peu massif donnant des fragments nuciformes à polyédriques.
30 - 100 cm	Rouge ; sablo-argileux ; compacte.
100 - 130 cm	Brun-rouge avec quelques taches blanches.
à 130 cm	Grès en voie de décomposition ; sablo-argileux.

Il est à noter que dans la zone d'accumulation, ainsi que dans la zone tachetée, de la montmorillonite a pu être mise en évidence (aux Rayons X) à côté de quantités appréciables de kaolinite et hydroxydes de fer.

3 - Les différences entre les sols sont plus frappantes au niveau des sous-groupes. Les profils présentent alors des différences morphologiques nettes qui ne correspondent pas à des processus pédologiques différents, mais à des variantes de ceux-ci.

a) Côte Est et rebord oriental des hauts-plateaux. Nous avons vu que les basaltes de la Côte Est donnaient naissance à un sol ferrallitique typique brun-rouge. Les roches métamorphiques (gneiss) que ce soit sur le rebord oriental des hauts-plateaux ou sur la plaine côtière donnent naissance à des sols ferrallitiques typiques que nous avons qualifiés de "mavomena". Un

profil caractéristique est celui qu'on peut observer à l'Ouest de Fianarantsoa dans la station forestière d'Ampamaherana.

- 0 - 20 cm Gris brun foncé ; sablo-argileux ; grumeleux ; nombreuses petites racines.
- 20 - 45 cm Jaune pâle à jaune-brun ; sablo-argileux ; massif donnant fragments nuciformes ; à la base de cet horizon des concrétions de forme assez irrégulière, de dimensions variant de 3 à 10 cm sont fréquentes ; elles présentent une couche extérieure brun-rougeâtre épaisse de 1 à 1,5 mm, la partie intérieure est constituée de grains de quartz avec de fines paillettes de gibbsite.
- 45 - 105 cm Rouge ; sablo-argileux ; compacte ; vers la base apparaissent des fragments de roche en voie d'altération.

au-dessous de 105 cm sur plusieurs mètres :

Roche altérée où la disposition des lits de minéraux est bien visible ; pas de zone tachetée à proprement parler ; la roche-mère intacte n'est pas visible.

Les caractéristiques physiques et chimiques de ces sols sont les suivantes : une réaction acide (pH compris entre 5,0 et 5,5) ; des teneurs en matière organique variant entre 3 et 9 % en surface, mais diminuant très rapidement avec la profondeur ; un rapport C/N compris entre 10 et 12 ; un complexe absorbant caractérisé pour une capacité d'échange de 15 à 23 méq/100 g en surface, 6 à 8 méq/100 g en profondeur, des teneurs en bases échangeables très faibles dans tout le profil, même sous forêt, un rapport silice/alumine de 0,4 à 0,8.

Sur la bande côtière des rhyolites affleurent en plusieurs endroits. Les sols qui en dérivent présentent un profil très semblable. La distribution des horizons est identique ; la zone d'altération est très réduite. On peut noter des amas concrétionnés ou des masses durcies que l'on trouve d'une part dans les sols brun-rouge et dans les sols mavomena.

Composition%	Res %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	H ₂ O %	
Nature du Sol							
Sol brun-rouge/Basalte	6,2	2,8	16,0	52,2	3,5	19,0	
Sol mavomena/Rhyolite	2,4	11,5	54,8	4,0	0	27,2	
" /Gneiss	extérieur	11,4	9,95	20,95	34,9	1,0	20,5
	intérieur	5,6	0,95	59,1	3,4	0,25	30,5

B - Hauts-Plateaux - Sur l'ensemble de la région centrale les sols dérivés de gneiss, de granites et de gabbros donnent naissance à des sols ferrallitiques typiques rouges comme pour le basalte. Ces sols sont en général assez épais avec un horizon rouge de 1 à plusieurs mètres, surmontant une zone d'altération claire ou bariolée. Signalons qu'une zone tachetée à pu être observée dans des sols dérivés de gneiss près d'Ambatomanoïna (à 100 km au Nord de Tananarive). Ces sols qu'occupe la prairie de graminées sont sujets à une érosion intense. Jusqu'à 1.700 ou 1.900 m.d'altitude, ces roches-mères continuent à donner naissance à des sols ferrallitiques typiques rouges, alors que les roches volcaniques basiques donnent des sols ferrallitiques humifères bruns.

c - Côte Ouest - Dans cette région les roches volcaniques basiques supportent des sols ferrugineux tropicaux rouges et localement jaunes. Les autres roches-mères donnent également des sols appartenant à ce sous-groupe. Ceci a pu être montré (52-53) pour les gneiss, les grès, les sables et les calcaires. Ces différents sols renferment essentiellement de la kaolinite et des hydroxydes et oxydes de fer, sans gibbsite. Le rapport silice/alumine est égal ou légèrement supérieur à 2,0.

Les profils qu'on pourra observer varieront essentiellement par l'épaisseur des horizons et les différences se feront au niveau des familles.

	épaisseur du solum	épaisseur de zone d'altération
Basalte	2 à 4 m	1 à 2 m
Grès	2 à 3 m	1 à 2 m
Sables	5 à 12 m	mal connu
Calcaire	1 à 1,5 m	quelques centimètres

Les sables continentaux supportent des sols ferrugineux tropicaux rouges ou jaunes très profonds. Les calcaires, au contraire, des sols argileux jaunes très peu épais.

d - Dans l'extrême Sud - Les sols squelettiques sont fréquents sur toutes les roches-mères. Toutefois dans des conditions de bon drainage, sables, gneiss (rarement), et basalte continuent à donner naissance à des sols ferrugineux tropicaux rouges. Les calcaires fournissent des sols à croûte calcaire (46). Il n'a pas été observé de sols régur sur d'autres roches-mères que le basalte.

TROISIÈME PARTIE

ÉTUDE DE QUELQUES PROPRIÉTÉS

des SOLS.

Le nombre des propriétés qui peuvent servir à caractériser un sol est particulièrement élevé. Ceci tient à la position particulière de la pédologie, branche de l'ensemble plus vaste de la science du sol. En effet, il n'y a pas, en dehors de l'observation morphologique du profil, de méthodes d'étude du sol qui soient spécifiques de la pédologie. Il faut faire appel à des méthodes de sciences telles que la physique, la chimie, la minéralogie, etc..

Les résultats obtenus servent à augmenter notre capital de connaissances sur les sols et permettent de mieux connaître ceux-ci. Une fois, le sol bien connu, dans son état actuel, il est possible d'inférer d'une part ce qu'il a été et d'autre part, ce qu'il sera dans l'avenir, en d'autres termes, quel est son mode d'évolution.

Parmi les propriétés des sols on peut distinguer deux grandes catégories, les unes qu'on peut considérer comme fondamentales qui concernent le sol en soi, indépendamment de ses applications futures, les autres concernent ses utilisations par le praticien (agriculteur, sylviculteur, ingénieur chargé de la construction de routes, digues, etc...). Les critères utilisés pour caractériser le sol seront différents dans l'un ou l'autre cas.

Il nous a semblé, dans cette étude préférable de nous en tenir à la première catégorie de critères. Dans celle-ci, le choix est encore vaste.

Le sol, en première approximation, peut se ramener à deux parties essentielles dues à sa position à la limite de la biosphère et de la lithosphère. Une partie comprenant des organismes vivants et les produits de transformation de ceux-ci et une partie minérale provenant de la décomposition et de la transformation des roches sous l'influence des facteurs climatiques, du

.../...

drainage, etc... qui conditionnent eux-mêmes l'activité des organismes vivants. Nous avons choisi parmi toutes celles qui concernent le sol, les propriétés qui caractérisent ces deux fractions essentielles du sol.

a- Matière organique - matière organique totale, azote et une fraction provenant de la transformation de la matière organique l'acide humique.

b- Des propriétés caractérisant à la fois la fraction organique et la fraction minérale ; réaction ; le complexe absorbant (avec la capacité d'échange de bases, les bases échangeables).

c- Propriétés caractérisant la fraction minérale du sol et les rapports qui peuvent exister entre les différents constituants. Enfin, deux fractions particulières du sol : les concrétions et l'argile ont fait l'objet d'une étude spéciale. En effet, un grand nombre de "qualités" du sol résultent pour beaucoup de la nature de sa fraction argile. De plus, c'est l'argile qui permet le mieux de caractériser le sol.

Beaucoup d'autres propriétés auraient pu être choisies telles que la composition granulométrique, le comportement du sol vis à vis de l'eau, etc... Mais d'une part, il est nécessaire de se limiter et d'autre part, beaucoup de ces propriétés peuvent être déduites en grande partie de précédentes.

Au cours de cette étude nous nous efforcerons de montrer les relations qui peuvent exister entre chacune de ces propriétés du sol et un certain nombre de facteurs de formation du sol, nature du couvert végétal, facteurs climatiques. Nous étudierons également l'influence de l'altitude qui est une façon détournée de faire intervenir le climat. Il sera également question des variations qui peuvent se produire avec la profondeur du sol. Il ne sera pas question ici des microorganismes qui, certes, ont leur intérêt. Mais leur étude demande à être faite par un spécialiste.

.../...

Les modes opératoires suivants ont été utilisés.

Matière organique totale. Le carbone organique a été dosé suivant les techniques proposées par P. ANNE (215) et E.R. GRAHAM (220). L'attaque du sol est effectuée avec le mélange sulfochromique préconisé par P. ANNE et la teneur en carbone est estimée suivant la méthode colorimétrique de E.R. GRAHAM. La teneur en matière organique s'obtient en multipliant la teneur en carbone par 1,724.

L'azote total est dosé suivant A. DEMOLON et D. LEROUX (219) toutefois, au mélange sulfate de cuivre, sulfate de potasse qui sert de catalyseur, nous ajoutons un peu de sélénium pour accélérer la minéralisation.

L'acide humique est dosé suivant la technique de R. CHAMINADE (218), par extraction à l'oxalate d'ammonium à 3 %, suivie de précipitation de l'acide humique par l'acide sulfurique, redissolution par la soude et dosage au permanganate de potassium décimormal.

Le pH est déterminé à l'aide d'un potentiomètre à électrode de verre. Un rapport sol/eau de 1/2,5 est utilisé.

La détermination de la capacité d'échange de bases et le dosage des bases échangeables sont effectuées suivant les techniques proposées par M. PEECH (222). Le dosage de la chaux, de la potasse et de l'acide phosphorique totaux après attaque du sol à l'acide nitrique bouillant se font suivant A. DEMOLON et D. LEROUX (219).

Pour l'analyse complète du sol, des concrétions et de l'argile, l'attaque est effectuée par le mélange triacide de J. BAEYENS (216) ; nous avons toutefois adopté un certain nombre de techniques analytiques nouvelles, en particulier en ce qui concerne le dosage de la silice (223). La capacité d'échange des argiles est estimée suivant R.C. MACKENZIE (221). .../...

-- CHAPITRE 6--

La Matière Organique

La matière organique des sols malgaches a été longuement étudiée par R. PERNET (40) qui en a montré l'importance dans la détermination des caractères physiques et chimiques d'un sol. Il a montré également l'influence du couvert végétal sur les propriétés de la matière organique. Au cours de ce chapitre nous nous efforcerons de montrer sous l'influence de quels facteurs varie la matière organique des sols dérivés de roches volcaniques basiques. Nous étudierons le carbone organique et l'azote total d'une part et l'acide humique d'autre part.

A - MATIERE ORGANIQUE, AZOTE ET RAPPORT C/N.

a) Relation entre Carbone, azote et la nature du sol.

Les teneurs en matière organique ont servi, dans la première partie de cet exposé, à caractériser deux grands groupes de sols ferrallitiques, à savoir, les sols ferrallitiques typiques où les teneurs en matière organique sont peu importantes (inférieures à 7 %) et où les couleurs sont assez vives (rouge, brun-rouge, brun-jaune), les sols ferrallitiques humifères où les teneurs en matière organique dépassent 7 % en surface et restent importantes en profondeur (ce qui n'est pas le cas des sols précédents). Ce dernier groupe est divisé en deux sous-groupes d'après l'intensité d'accumulation de la matière organique avec les sols ferrallitiques bruns et les sols Ando.

Les sols ferrugineux tropicaux ne présentent jamais d'accumulation importante de matière organique.

.../...

Dans les sols hydromorphes, un grand groupe est également caractérisé par l'accumulation de matière organique et la séparation entre sols de marais et sols marécageux est basée sur la nature de cette matière organique et l'intensité de son accumulation.

Les sols jeunes présentent, eux aussi, des teneurs assez fortes en matière organique.

Cette distinction entre les sols aurait pu valablement se faire d'après les teneurs en azote total dont les variations sont assez semblables à celles de la matière organique ; cette dernière présente l'avantage de pouvoir, dans une certaine mesure, s'apprécier à l'oeil.

Les variations du rapport C/N sont moins importantes d'un groupe à l'autre. L'ensemble des résultats obtenus a été rassemblé dans le tableau ci-dessous.

Sous-ordre	Groupes et Sous-groupes	Matière Organique %	Azote ‰	C/N	
Sols ferrallitiques	Typiques	3 à 7	1,6 à 3,8	8,6 à 12,4	
	Humifère {	Bruns	7 à 30	5,7 à 9,2	11 à 17
		Ando	> 30	7,4 à 13,3	13 à 23
Sols ferrugineux tropicaux	Typiques	2 à 8	1 à 5	9 à 12,5	
Sols hydromorphes	Marais	30 à 40	16,5	12,0	
	Regur	4 à 5	1,5 à 2,4	11,7	
Sols jeunes	Tendance ferrallitique	3,8 à 11,2	1,8 à 6,85	9,3	
	Tendance hydromorphe	1,0 à 6	0,8 à 1,5	8,6	

.../...

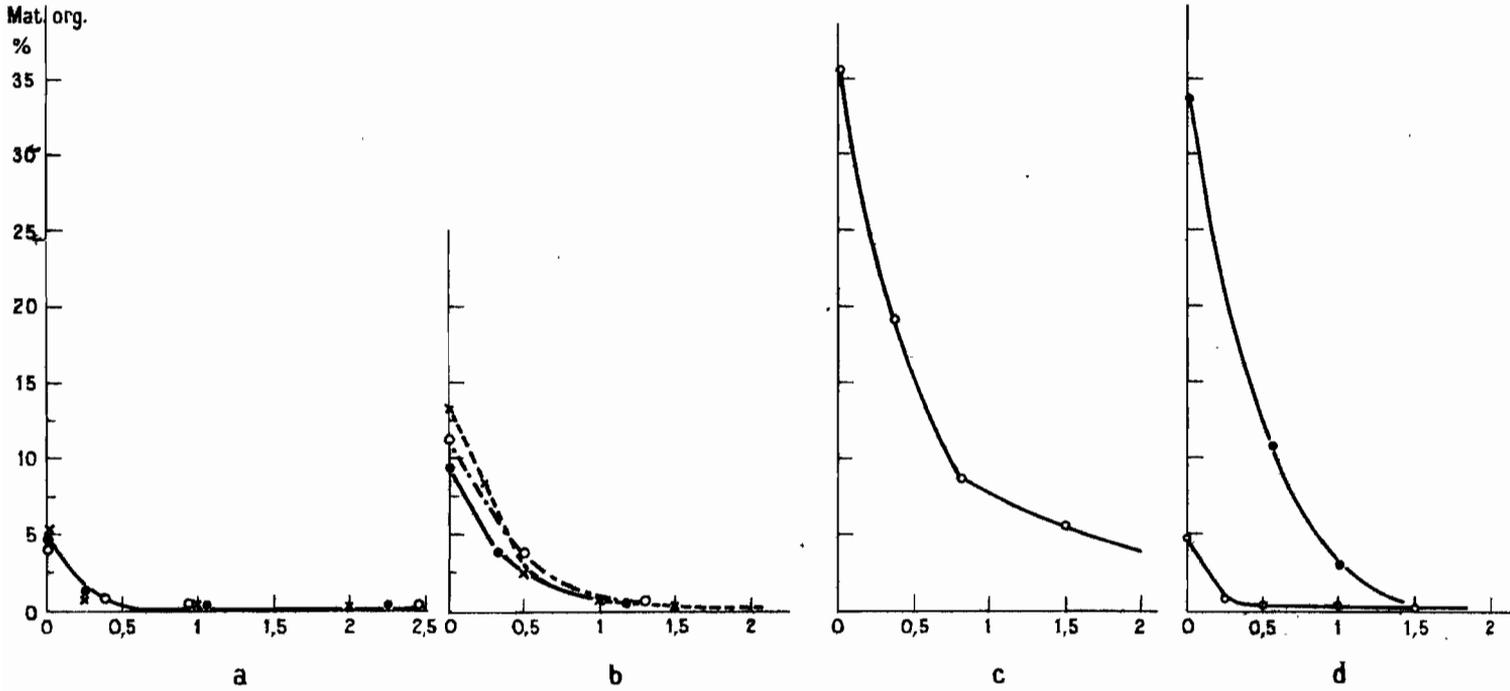


Fig. 12
 variation des teneurs en matière organique avec la profondeur des sols
 a - sols ferrallitiques typiques
 b - sols ferrallitiques humifères bruns
 c - sols Andos
 d - sols hydromorphes
 o marais
 • régulier

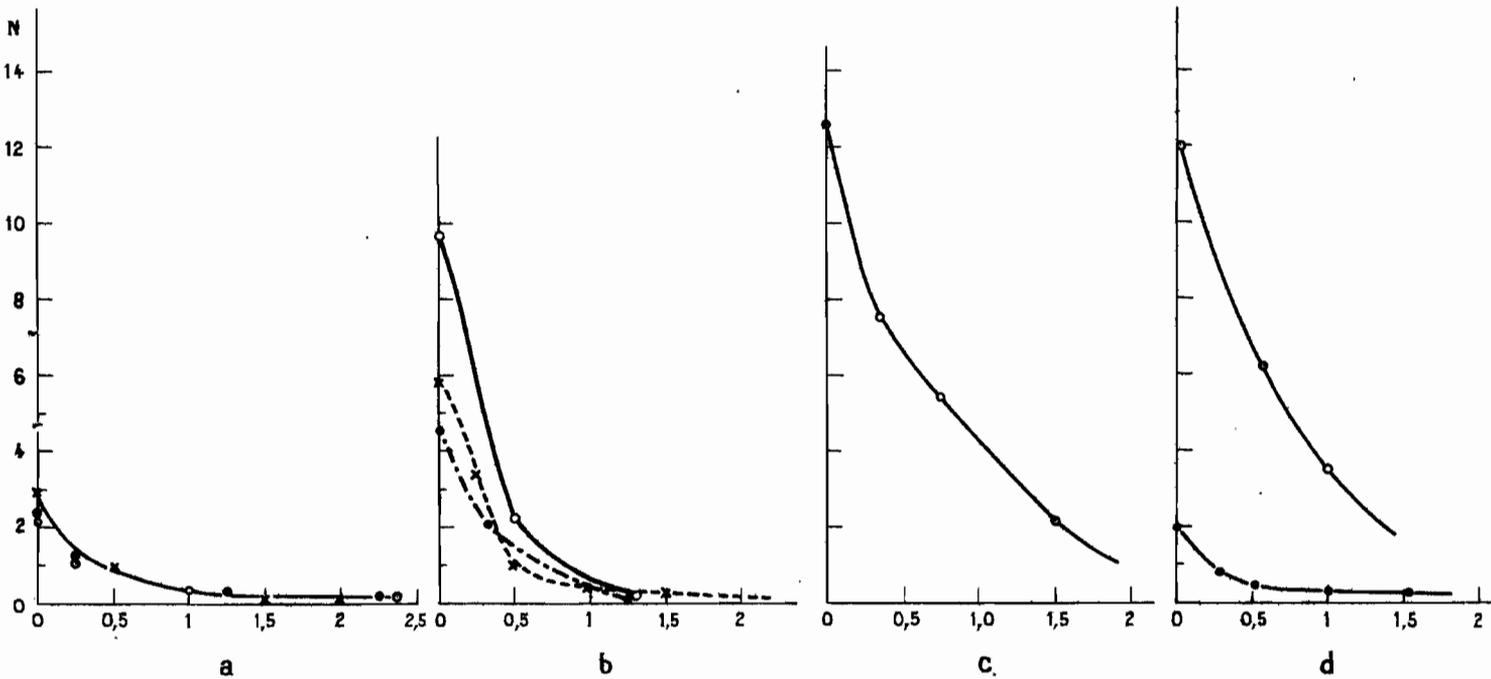


Fig. 13
 variation des teneurs en azote avec la profondeur des sols.
 o marais
 • régulier

L'ensemble de ces résultats montre, dans le sous-ordre ferrallitique, une croissance régulière de la matière organique totale, de l'azote total et du rapport C/N quand on passe du groupe typique au groupe humifère, avec un maximum pour les sols Ando. Les sols ferrugineux tropicaux ont des teneurs moindres en matière organique et azoté (souvent encore très fortes), mais le rapport C/N reste voisin de 10. Les sols jeunes ont de bonnes teneurs en matière organique et azote (en région humide) et le rapport C/N reste légèrement inférieur à 10.

b) Variations du Carbone, de l'Azote avec la profondeur du sol.

Les variations des teneurs en matière organique avec la profondeur du sol sont différentes suivant le groupe ou sous-groupe de sol auquel on s'adresse. Naturellement, dans tous les cas, les teneurs diminuent avec la profondeur, mais pas de la même façon partout. (fig. 12, 13 et 14).

Pour les sols ferrallitiques typiques, certains sols peuvent présenter en surface des teneurs élevées, mais toujours les teneurs diminuent très vite avec la profondeur et les chiffres obtenus sont rapidement très faibles, bien que jamais nuls. Les teneurs en azote varient sensiblement de la même façon. Le rapport C/N diminue également avec la profondeur.

Dans le cas des sols ferrallitiques humifères, les teneurs sont beaucoup plus fortes en surface, mais la diminution avec la profondeur est plus graduelle. Dans le cas des sols Ando, la diminution est encore moins rapide et à 1 mètre de profondeur on a encore des teneurs fortes à très fortes en matière organique totale et azote. Le rapport C/N diminue encore régulièrement avec la profondeur.

Les sols ferrugineux tropicaux se comportent comme des sols ferrallitiques typiques. .../...

Les sols de marais présentent une diminution rapide de la matière organique, de l'azote et du rapport C/N. Les variations dans un sol "Regur" ne sont pas sans rappeler celles d'un sol ferrallitique typique. Les variations dans un certain nombre de profils ont été portées sur un graphique. Nous avons choisi pour un groupe ou sous-groupe, un **profil** jugé caractéristique, de manière à ne pas surcharger inutilement chaque tableau, et de permettre des comparaisons. Tous les sols étudiés supportent une végétation herbacée.

c) Relation entre Carbone, Azote et le rapport C/N et le couvert végétal.

Les teneurs en matière organique du sol et en particulier de l'horizon de surface, sont en rapport assez étroit avec la nature du couvert végétal. C'est naturellement sous forêt que les teneurs sont les plus fortes, moins importantes sous savoka et encore moindres sous prairie.

Voici quelques comparaisons entre les valeurs trouvées sous forêt et sous les formations secondaires avoisinantes :

.../...

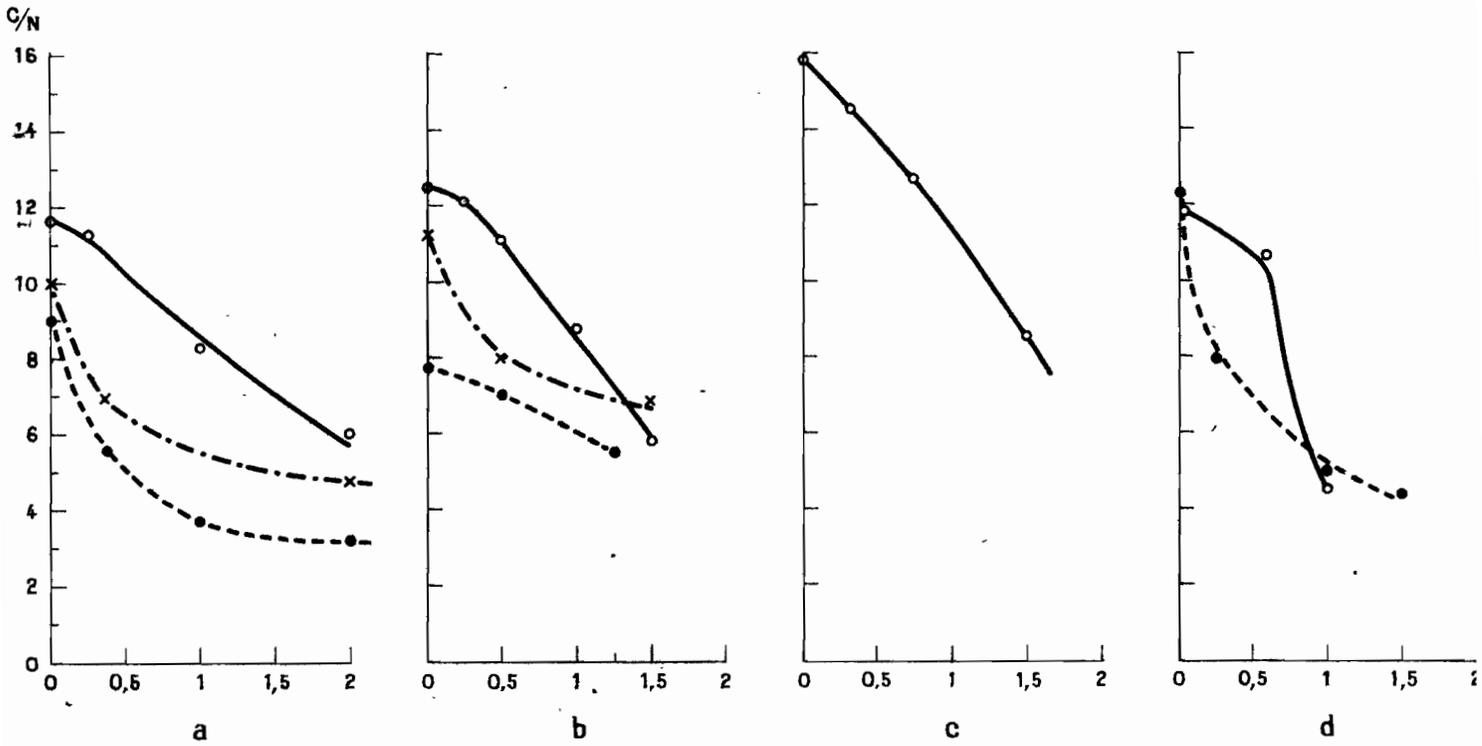


Fig. 14
 variation du rapport C/N avec la profondeur du sol.

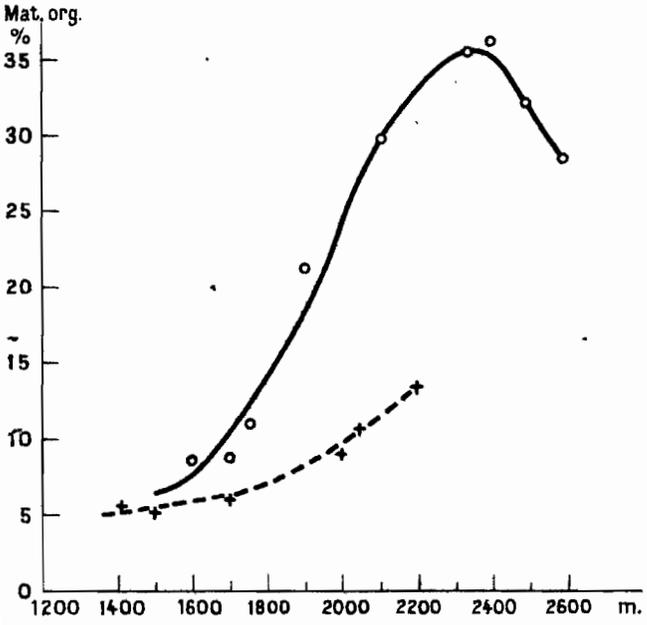


Fig. 15
 variation des teneurs en matière organique et azote avec l'altitude dans l'Ankaravatu

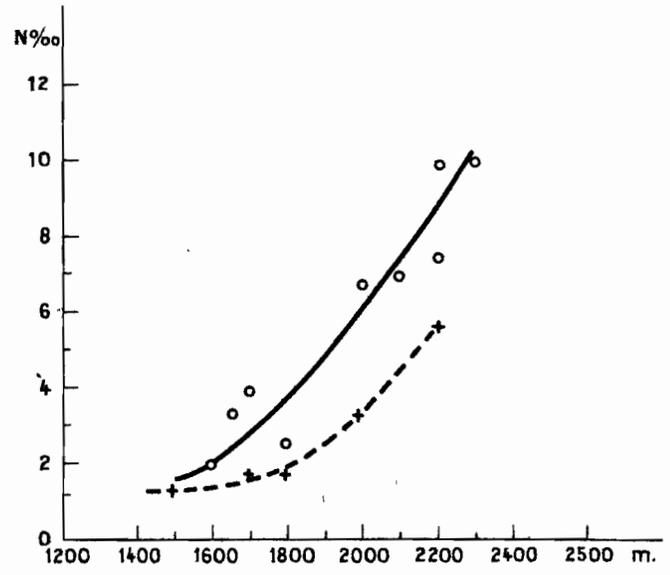


Fig. 16
 • versant Est
 + - Nord

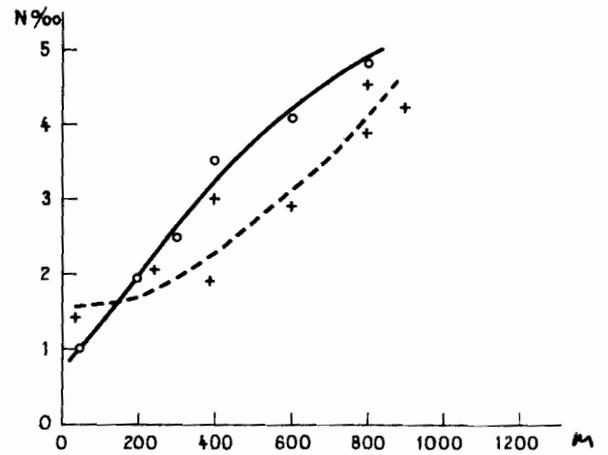
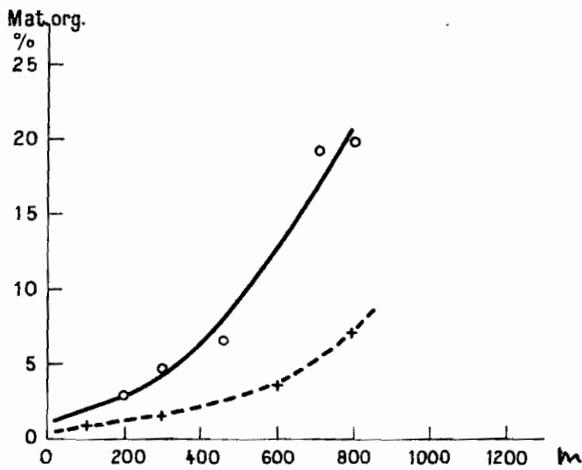


Fig. 17

Fig. 18

variation des teneurs en matière organique et azote en fonction de l'altitude de en Montagne d'Ancône.

o - versant Est + versant Nord

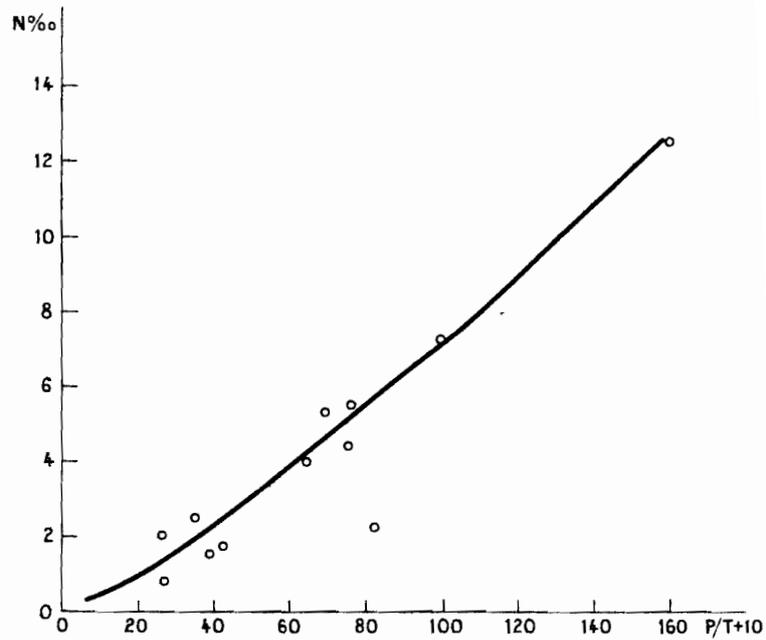
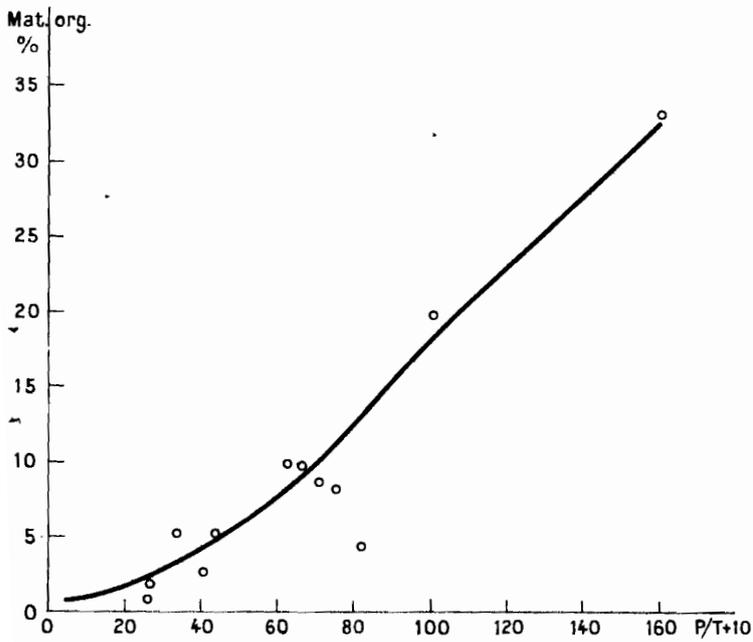


Fig. 19

Fig. 20

variation des teneurs en matière organique et azote avec l'indice d'aridité de De Martonne.

sous-ordre	Groupe ou sous-groupe	Lieu et altitude		Forêt primaire	Savoka ou plantation arborée	Prairie proche de la forêt	Prairie éloignée
Ferrallitiques	Typiques	Côte Est 50 à 150 m	M.O %	11,9	5,1	3,7	-
			N ‰	3,95	2,25	1,6	-
			C/N	17,7	13,3	13,7	-
	Montagne d'Ambre 300 à 500 m	M.O %	11,9	-	8,2	6,8	
		N ‰	6,0	-	4,78	3,5	
		C/N	11,6	-	11,5	11,5	
	Analavelona 1000 à 1200 m	M.O %	13,6	-	3,5	4,6	
		N ‰	9,5	-	5,8	2,65	
		C/N	8,4	-	8,7	10,3	
	humifères	Montagne d'Ambre 1000 m	M.O %	33,1	13,4	7,2	4,9
N ‰			20,5	5,2	4,15	3,78	
C/N			9,4	8,8	10,2	7,8	
bruns	Ankaizina 1.700m	M.O %	22,7	-	9,5	-	
		N ‰	9,8	-	4,8	-	
		C/N	12,4	-	11,5	-	
Ando	Ankaratra 2.300 m	M.O %	23,1	-	29,6	-	
		N ‰	6,3	-	7,4	-	
		C/N	21,5	-	23,4	-	
Ferrugineux tropicaux	Typiques	Antanimena 200 m	M.O % N ‰ C/N	8,2 4,5 9,5	- - -	- - -	2,0 1,0 12,5

Les résultats présentés ci-dessus montrent que, dans la plupart des cas (zones de faible altitude, c'est à dire relativement chaudes), la disparition de la forêt a pour effet de faire diminuer rapidement le stock de matière organique ; l'azote varie dans le même sens, sans que le rapport C/N varie de façon très significative. Notons que sous la forêt ombrophile de la Côte Est, le rapport C/N est assez élevé. Il s'agit probablement ici d'une matière organique encore peu évoluée.

.../...

Dans les régions de forte altitude (pluviométrie élevée, mais température déjà fraîche), la disparition de la forêt n'entraîne pas une diminution sensible du stock de matière organique ni de l'azote. On observe même une légère tendance à l'augmentation de ceux-ci. Le remplacement de la forêt par la prairie à Pentastichys Perrieri dans la zone des sols Ando, ne semble pas avoir été un inconvénient majeur pour le sol.

Dans la station forestière de Manjakatomp sur le flanc Est de l'Ankaratra (entre 1.700 et 2.000 mètres), les différences suivantes peuvent être notées suivant le couvert végétal:

Type de végétation.	Matière Organique %	Azote ‰	C/N
Forêt Primaire	17,0	7,1	14,0
Acacias	21,4	7,6	16,6
Eucalyptus et Pins	10,5	4,7	13,2
Broussailles à Helychrysum	11,1	3,65	17,0
Prairie de Graminées	8,8	4,3	12,1

Ces résultats montrent l'effet variable de la couverture végétale sur un sol identique. L'acacia paraît mieux conserver au sol son stock de matière organique.

d) Relations entre Carbone, Azote et rapport C/N et l'altitude.

Deux régions volcaniques de l'île se prêtent bien à l'étude de la variation de la matière organique en fonction de l'altitude. Ce sont la montagne d'Ambre (0 à 1.400 m) et l'Ankaratra (1.200 à 2.630 m). Dans ces deux massifs, les sols étudiés sont ceux qui supportent une végétation herbacées, afin que les comparaisons

soient valables. Pour le flanc Nord de la montagne d'Ambre, on a pu, par suite de la présence de la forêt jusqu'à une assez faible altitude étudier les variations sous forêt. Les graphiques portés sur les figures 15 à 18, montrent que la matière organique et l'azote augmentent de façon très nette avec l'altitude. Sur le versant exposé aux pluies d'alizé, l'augmentation avec l'altitude est beaucoup plus rapide que sur les faces non soumises directement à ce vent humide. Les graphiques montrent les très grandes différences des teneurs en matière organique qui existent entre la base et le sommet des deux massifs (5 à 35 % en matière organique, 1,5 à 13 ‰ en azote pour l'Ankaratra ; 1,5 à 20 % en matière organique, 1 à 4,5 ‰ en azote pour la montagne d'Ambre). Les variations du rapport C/N ne sont nettes que pour l'Ankaratra. Ces variations avec l'altitude sont en réalité un mode d'approche indirect du climat, car ce que l'on étudie, en fait, sont les modifications des teneurs en carbone et azote en fonction à la fois de la température décroissante et de la pluviométrie croissante. Aussi est-il normal que les valeurs trouvées dans ces deux massifs ne se raccordent pas.

e) Répartition des teneurs en matière organique et azote et du rapport C/N en fonction des valeurs climatiques.

D'une manière très générale, on peut constater que les teneurs en matière organique et en azote ne sont pas réparties au hasard mais qu'elles suivent d'une manière assez précise les variations climatiques.

Les régions de l'île sont chaudes et sèches (pluviométrie inférieure à 1 m) présentent les teneurs en matière organique et azote les plus faibles (0,9 à 2 % pour la matière organique et 0,7 à 1,0 ‰ pour l'azote). A mesure que la température diminue et que la pluviométrie augmente, les teneurs augmentent pour aboutir à la région fraîche mais très pluvieuse du haut Ankaratra

.../...

(33 % de matière organique et 12,5 % d'azote).

L'indice d'aridité, a été calculé pour les points où cela était possible. La variation des teneurs en matière organique et azote en fonction de cet indice est assez significative (fig. 19 et 20).

Le rapport C/N varie peu entre les valeurs 40 et 80 de l'indice de de Martonne mais augmente rapidement au-dessus de la valeur 80 (Fig. 21).

B - L'ACIDE HUMIQUE. Les méthodes de dosage de cette fraction de la matière organique sont assez nombreuses. Elles diffèrent essentiellement par le réactif d'extraction qui peut être la soude ou l'ammoniaque diluées, le fluorure de sodium, l'oxalate d'ammonium. Nous avons adopté dans ce travail, la méthode à l'oxalate d'ammonium telle qu'elle est préconisée par R. CHAMINADE (218).

a) Relations entre les teneurs en acide humique et la nature du sol.

D'une façon générale, tous les sols présentent, dans leur horizon de surface tout au moins, des teneurs en acide humique dosables. Voici comment ces teneurs se répartissent suivant le groupe ou le sous-groupe de sol envisagé. Les résultats ont été rassemblés dans le tableau suivant qui montre des variations assez analogues à celles de la matière organique totale. A l'intérieur du sous-ordre ferrallitique, il y a augmentation graduelle du groupe typique au groupe humifère.

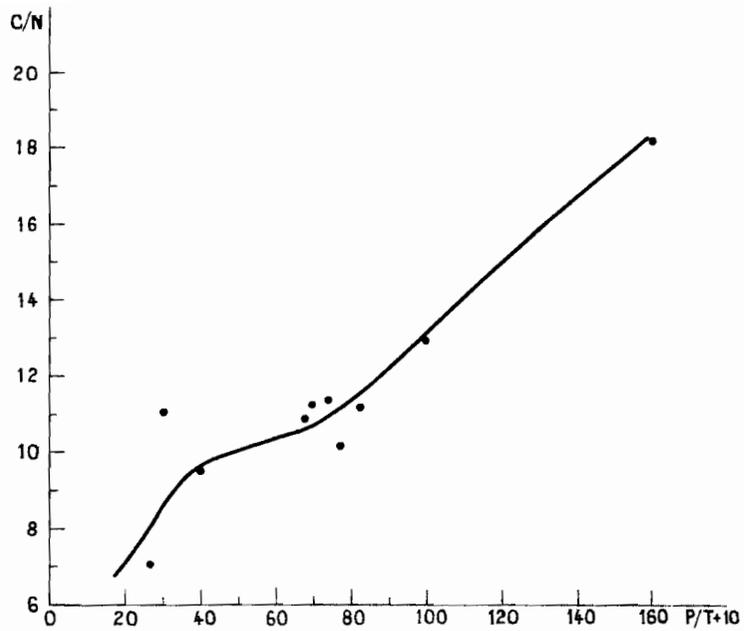


Fig. 21
 variation du rapport C/N en fonction de l'indice
 d'aridité de De Martonne!

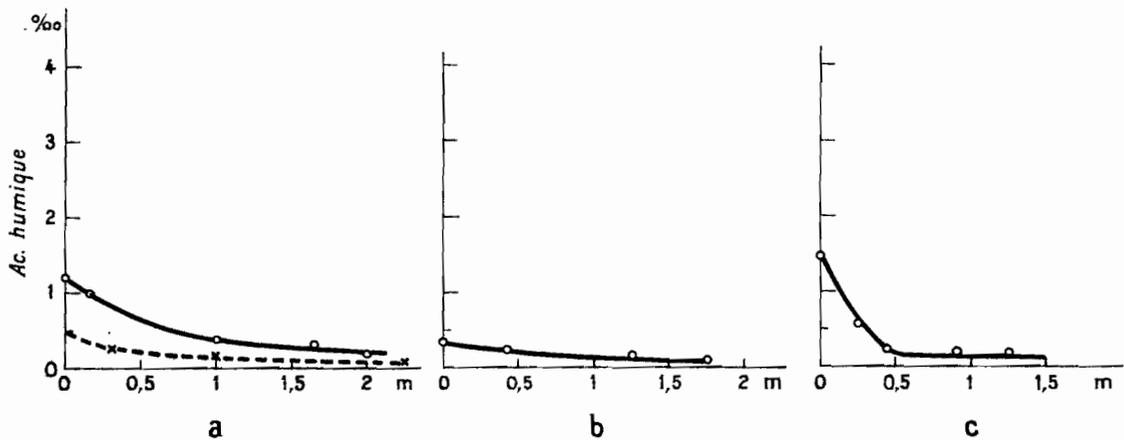


Fig. 22
 variation des teneurs en acide humique avec la profondeur
 du sol

- a - sols ferrolitiques typiques
- b - sol ferrugineux tropical
- c - sol hydromorphe régu

Sous-ordre	Groupe et Sous-groupe	Acide humique ‰	Acide humique Mat. Organique x 100
Ferrallitique	Typique	0,5 à 2	2,4 à 3,8
	Brun humifère	2 à 10	3,5 à 13
	Ando	40 à 65	9 à 18
Ferrugineux Tropical	Typique	0,3 à 0,5	5,3
Hydromorphe	Marais	40	11,4
	Régur	14 à 1,8	2,8 à 3,9
Jeune	Tendance ferrallitique	1,1 à 8,6	1,2 à 10,4
	Tendance hydromorphe	0,2 à 0,5	2,3 à 2,8

En valeur absolue, le sous-groupe Ando présente des teneurs en humus rarement atteintes ailleurs. Le rapport humus/matière organique varie sensiblement dans le même sens que l'acide humique. Les sols jeunes présentent une gamme très large de teneurs en acide humique ; le rapport humus/matière organique est également très variable.

b) Relations entre les teneurs en humus et la profondeur du sol.

Au contraire de ce qui s'observe lorsqu'on examine la matière organique totale, les variations des teneurs en acide humique sont

.../...

très rapides avec la profondeur du sol. Même des sols très riches en acide humique, en surface, ne présentent vers 40 cm de profondeur que des teneurs très faibles. A partir de 50 cm, les valeurs obtenues sont presque identiques, mais dans tous les cas presque insignifiantes. Les variations de l'acide humique avec la profondeur ont été portées sur les figures 22 et 23. Les sols examinés sont des sols types du groupe ou sous-groupe considéré, supportant une végétation secondaire prairie ou broussailles.

c) Relations entre les teneurs en acide humique et le couvert végétal.

La nature du couvert végétal influe sur les teneurs en acide humique du sol comme sur celles en matière organique. D'une façon générale, le sol forestier présente des teneurs plus élevées que le sol supportant la savoka ou la prairie. Voici quelques comparaisons entre les valeurs trouvées dans les différents cas :

Sous-Ordre	Groupe et sous-Groupe	Lieu et altitude	Forêt primaire	Savoka ou plantation arborée	Prairie	
					proche de la forêt	éloignée de la forêt
ferrallitique	Typiques	Analavelona, 1.000 m	8,5	-	2,7	0,4
	humifères	Côte Est 50 m	2,9	1,1	-	0,6
	bruns	Mont. d'Ambre 500 m	9,5	-	3,3	-
		1.000 m	50,5	1,7	3,9	1,0
		Ankaizina, 1.700 m	2,3	-	-	7,0
	Ando	Ankara-tra 2.300 m	14,3	-	-	63,2
Ferrugineux tropicaux	Typiques	Antanimena 200 m	2,3	-	-	0,3

Ce tableau montre que dans les régions de moyenne et basse altitude, chaudes et diversement pluvieuses, la disparition de la forêt provoque un abaissement notable des teneurs en acide humique. Au contraire, dans les régions d'altitude élevée, le remplacement de la végétation primitive par la savoka ou la prairie se traduit par un net accroissement de l'acide humique dans l'horizon de surface.

Dans la station forestière de Manjakatqmpo (Ankaratra), existent des reboisements avoisinants des parcelles supportant des formations végétales variées. Voici les valeurs trouvées entre 1.700 m et 2.000 m,

	Acide humique ‰
Forêt primaire	9,2
Acacias	30,0
Pins et eucalyptus	0,5
Broussailles à Helychrysum	1,0
Prairie	0,8

L'acacia remonte très fortement le stock d'acide humique du sol.

d) Relations entre les teneurs en acide humique du sol et l'altitude.

Les deux régions étudiées seront, comme pour la matière organique totale, l'Ankaratra et la Montagne d'Ambre (fig. 24 et 25).

L'Ankaratra - les teneurs en acide humique des sols ont été suivies sur les faces Est et Nord du massif qui présentent seules des variations régulières d'altitude. Les seuls sols considérés sont ceux qui supportent une végétation herbacée ; les flots boisés étant trop restreints pour donner un ensemble de chiffres comparables aux précédents. L'examen de la figure montre que, sur le

.../...

versant Est, exposé à l'alize, entre 1.400 et 1.800 m, les teneurs en acide humique augmentent assez régulièrement mais peu puisqu'elles passent de 0,5 à 2 ‰. Entre 1.800 et 2.600 m, on assiste à une montée rapide et brutale des teneurs en acide humique qui atteignent vers 2.400 m 60 ‰. Vers 2.600 m, les teneurs en acide humique auraient tendance à se stabiliser ou à diminuer légèrement.

Sur le versant Nord, les valeurs obtenues sont bien plus faibles (30 % sur le versant Est et 10 % sur le versant Nord) mais croissent régulièrement.

2 - Montagne d'Ambre. Des constatations analogues peuvent être faites sur les flancs Est et Nord de la montagne d'Ambre : le flanc exposé à l'alizé présente des teneurs en acide humique beaucoup plus élevées que le flanc Nord.

e) Relations entre les teneurs en acide humique et les valeurs climatiques.

Si l'on porte sur un graphique où figurent en abscisse la pluviométrie et en coordonnée, la température, les teneurs en acide humique des points considérés, on obtient une répartition assez analogue à celle de la matière organique et de l'azote totale. La région où les teneurs en acide humique sont assez faibles (1,0 ‰) occupe une assez vaste superficie. Elle correspond toujours à la zone chaude et sèche. Les lignes d'égale valeur de l'acide humique sont beaucoup plus resserrées à mesure que l'on atteint des zones fraîches mais pluvieuses.

L'étude de la variation de l'acide humique en fonction de l'indice d'acidité de De Martonne montre qu'il y a peu de variation des teneurs jusqu'à l'indice 100 à partir duquel l'accroissement est beaucoup plus fort. (fig. 26).

Conclusions-

L'ensemble des résultats fournis par l'étude de la matière

.../...

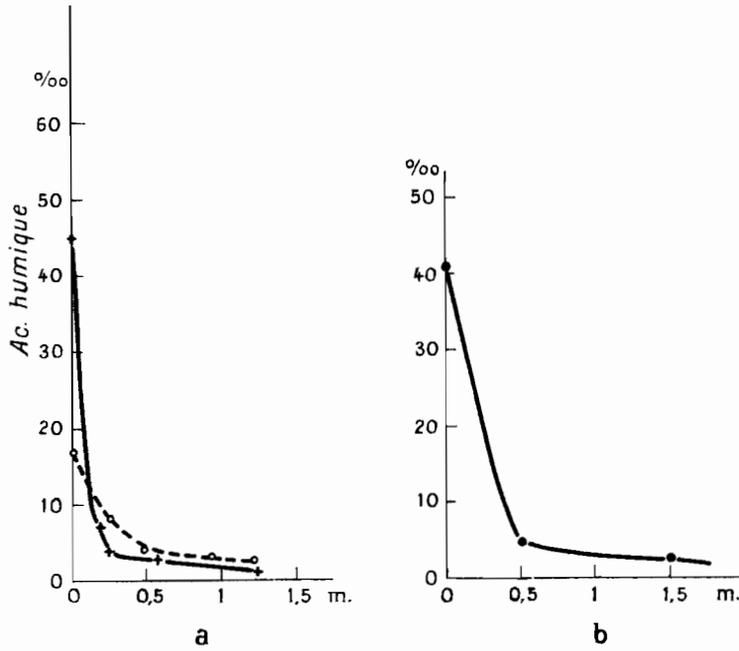


Fig. 23
 variation des teneurs en acide humique avec la profondeur du sol
 a - sols ferrallitiques humifères • sols bruns + sol Ando
 b - sol de marais

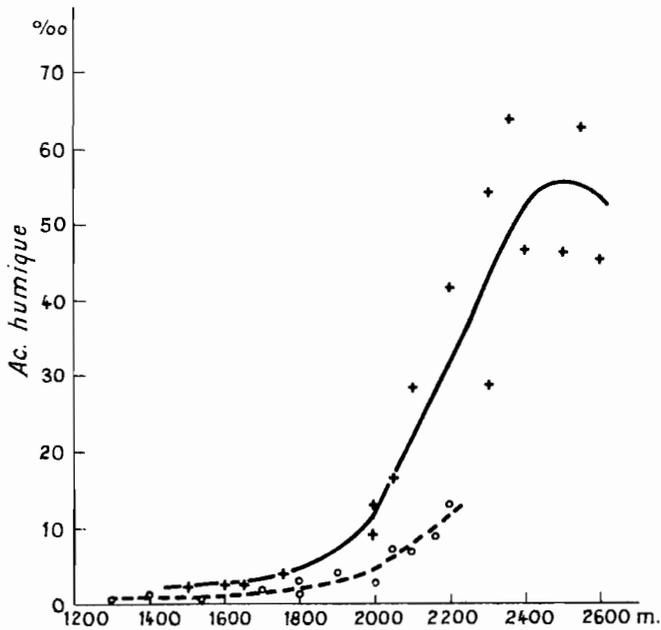


Fig. 24
 variations des teneurs en acide humique en fonction de l'altitude
 Ankaratra + sol versant Est
 • — Nord

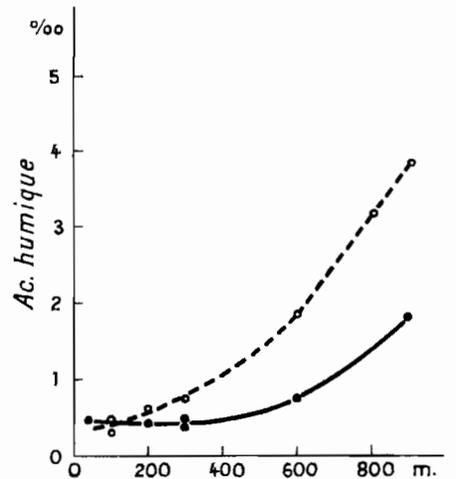


Fig. 25
 M. d'Ambo o Est
 • Nord.

organique (carbone organique, azote, rapport C/N et acide humique permet d'aboutir aux résultats suivants :

1 - Les teneurs en matière organique sont très variables d'un groupe ou sous-groupe à l'autre. L'accumulation est maximum pour le sous-groupe Ando et celui des sols de marais, formés dans des conditions très différentes ; elle est minimum pour les sols ferrallitiques typiques et les sols ferrugineux tropicaux. Le sous-groupe Ando présente des teneurs en acide humique exceptionnellement élevées (45 à 63 %).

Le taux d'humification assez bas pour les sols ferrallitiques typiques et les sols ferrugineux tropicaux et les sols hydromorphes, s'élève notablement pour les sols ferrallitiques humifères et est maximum pour le sous-groupe Ando.

2 - Dans la plupart des sols, la pénétration de la matière organique est faible. Seul le groupe ferrallitique humifère présente en profondeur des teneurs en carbone organique et azote notables. Les teneurs en acide humique dosées en profondeur sont toujours faibles.

3 - Les teneurs en matière organique sont en relation assez étroite avec le type de végétation supportée par le sol. La plupart des sols forestiers présentent des teneurs en carbone organique et azote très supérieures à celles des sols sous végétation secondaire. Dans les régions de grande altitude, cette différence tend à s'atténuer. Dans les régions chaudes, l'acide humique diminue, lorsqu'on passe de la forêt à la prairie ; au contraire, dans les régions fraîches de l'île, l'acide humique est nettement plus élevé sous prairie que sous forêt.

4 - L'augmentation des teneurs en matière organique avec l'altitude est générale. Toutefois, si carbone et azote croissent régulièrement dans les deux massifs étudiés, il n'en est pas de même pour l'acide humique qui, dans l'Ankaratra, augmente très

.../...

brutalement à partir de 1.900 m.

5 - Si l'on tient compte de la pluie et de la température, les teneurs augmentent régulièrement lorsqu'on passe d'une région chaude et sèche à une région humide et fraîche. Les teneurs en carbone, azote, le rapport C/N croissent régulièrement avec l'indice d'aridité de De Martonne. L'acide humique qui subit une augmentation assez brutale à partir de la valeur 100 de l'indice.

L'on a coutume d'admettre que les sols des régions intertropicales et en particulier ceux des zones chaudes et humides sont caractérisés par des teneurs relativement faibles en matière organique (le chiffre le plus souvent avancé est de 2 %). La masse de débris végétaux qui tombe sur le sol est pourtant très élevée ; A. DEMOLON (98) l'évalue à 100 t par hectare et par an. Les valeurs qui ont été trouvées pour les sols étudiés sont, d'une manière assez systématique, plus élevées, et nous avons même un groupe de sols caractérisé par l'accumulation de la matière organique. Il est vrai, qu'à mesure que nos connaissances des sols progressent cette manière de voir est peu à peu modifiée ; M. CLINE (139) aux Hawaï, A. LAPLANTE (144) au Cameroun, J.L. BURNOTTE (79) au Congo-Belge, H. JENNY (135) en Amérique du Sud, citent des sols aux teneurs élevées en matière organique. Cette différence tient, selon nous, à deux ensemble de causes.

Les premiers observateurs tropicaux ont surtout travaillé en Amérique du Sud, en Afrique, dans des zones d'assez faible altitude où chaleur et humidité combinaient leurs effets au maximum pour accélérer la décomposition de la matière organique du sol. Ce n'est qu'assez récemment qu'ont été publiées des études sur les sols des régions d'altitude élevée de la zone intertropicale.

.../...

On s'aperçoit alors que les valeurs trouvées sont sans commune mesure avec les précédentes. Or, Madagascar est une région d'altitude puisqu'une grande partie du territoire est située à plus de 1.000 mètres. Si la pluviométrie demeure élevée, la diminution de la température permet une minéralisation moins poussée de la matière organique.

De plus, si on examine des cartes géologiques même sommaires d'Afrique et d'Amérique du Sud on s'aperçoit que les roches métamorphiques, plutoniques et sédimentaires sont largement représentées et que les sols qui en dérivent présentent une superficie beaucoup plus importante que ceux dérivant de roches volcaniques. En fait, la grande majorité des études pédologiques portent des sols dérivant de la première catégorie de roches. Nous avons vu qu'à Madagascar, les sols dérivés de roches volcaniques sont d'une manière générale beaucoup plus riches en matière organique que les autres.

Si l'on examine le tableau d'analyses du chapitre 3 l'on ne peut manquer d'être frappé par les très fortes teneurs en chaux et magnésie des roches volcaniques basiques. Cette abondance d'alcalino-terreux ne doit pas être étrangère à l'accumulation de la matière organique, et doit favoriser le développement des microorganismes du sol. Nous avons vu que tous les sols jeunes étaient caractérisés par des teneurs souvent élevées en matière organique. L'abondance des bases disponibles doit permettre, dès le départ, une bonne floculation de la matière organique et lui assurer une certaine conservation.

La comparaison de l'Ankaratra et du massif granitique voisin des Vavavato est frappante. Alors que l'Ankaratra est couvert de sols jusqu'au sommet, le Vavavato n'est qu'un vaste chaos de rochers dénudés. D'autres massifs granitiques comme l'Andringitra ou l'Ivohibe ne sont pas mieux favorisés. Il nous paraît logique d'attribuer cette disparité à la nature des bases des deux roches (chaux et magnésie pour le basalte et l'ankaratrite, soude et potasse pour le granite). .../...

-- CHAPITRE 7 --

LE COMPLEXE ABSORBANT

Nous étudierons successivement, la capacité d'échange qui est la mesure du pouvoir de fixation du complexe, les bases échangeables qui peuvent être fixées par le complexe, et le rapport entre les bases échangeables et la capacité d'échange ou degré de saturation.

A - LA CAPACITE D'ECHANGE.

La capacité d'échange d'un sol dépend essentiellement de la nature de ses constituants et avant tout de l'argile et de la matière organique (c'est la fraction humifiée de celle-ci qui joue le rôle le plus important). La capacité d'échange d'un sol résulte donc de la somme des capacités d'échange de sa partie minérale et de sa partie organique. On sait que les minéraux argileux du sol ont une capacité d'échange qui leur est propre. Jusqu'à ces derniers temps on considérait que les oxydes et hydroxydes du sol ne possédaient pas de capacité d'échange. Récemment, M. FIELDS et Al. (110) ont montré que les hydroxydes colloïdaux présentaient eux aussi une capacité d'échange qui, dans bien des cas, n'est pas négligeable. De son côté, l'humus, par ses propriétés acidoïdes est susceptible de fixer des cations.

Voici quelles sont les capacités d'échange de cations des principaux constituants du sol :

.../...

MINERAL		Cap. Ech. en még/100g
Minéraux des Argiles	Kaolinite	8 - 12
	Chlorite	20 - 30
	Attapulgite	20
	Illite	30
	Montmorillonite	80 - 120
	Vermiculite	130
Produits Colloïdaux	Al ₂ O ₃ 3 H ₂ O	350
	Fe ₂ O ₃ H ₂ O	25
	TiO ₂ 2 H ₂ O	190
	SiO ₂	34
Prod. Organique	Ac. Humique	450 - 500

WILLIAMS (214) a proposé de calculer la capacité d'échange à partir des teneurs en matière organique et en argile. Mais il est bien évident qu'une telle formule ne peut s'appliquer que dans le cas de sols renfermant toujours le même type d'argile et ne peut guère se généraliser. De même, il est assez difficile d'appliquer à la matière organique ou même simplement à l'humus, une capacité d'échange déterminée.

Nous avons essayé d'établir quelle pouvait être dans la capacité d'échange des sols, la part qui revenait à la matière organique (ou à l'humus) ; pour cela, une gamme de sols présentant des teneurs en matière organique variables a été soumise aux traitements suivants :

Le sol est humecté par une solution saturée de nitrate d'ammonium et chauffé pendant deux heures dans un four à 200° (à cette température, la capacité d'échange d'une argile n'est pratiquement pas affecté). La capacité d'échange, la matière organique totale, l'humus ont été dosés avant et après le traitement.

.../...

N° Ech.	Cap. Ech. méq/100g	Mat. Org. %	Humus ‰	Hum. x 100 Mat. Org.	Cap. Ech. méq/100g	Mat. Org. %	Humus ‰	Hum. x 100 Mat. Org.
FX201	34,8	21,7	16,4	7,5	16,2	9,9	1,5	1,5
301	39,4	14,6	13,9	9,5	20,9	3,45	0,6	1,7
111	21,6	9,5	4,4	4,7	10,8	4,1	0,5	1,1
211	19,6	7,85	2,35	2,9	9,0	3,2	0,4	1,2
341	7,8	5,8	0,45	0,7	7,4	1,6	0,35	2,5
332	10,7	1,95	0,3	1,3	8,6	0,2	0,1	5,0

Si on calcule les pertes de matière organique et si on calcule les capacités d'échange correspondantes on obtient :

N° échant.	Perte Mat. Orga. %	Perte Ac. humique %	Capac. Ech. calculée pr. Mat. Organ.	Capac. Ech. calculée pr. Ac. humique
F X 201	54,3	90,8	159	115
301	75,9	95,8	166	139
111	56,8	88,6	200	277
211	59,2	82,9	223	533
341	80,1	22,2	9,5	400
332	89,7	66,6	120	1050

Ces résultats montrent que des quantités assez différentes de chaque produit sont détruites, mais qu'aucun d'eux n'est détruit intégralement. Il ne semble pas qu'on puisse parler d'une capacité d'échange déterminée de la matière organique ou de l'humus. Les substances qui donnent naissance à ces produits sont trop variables pour qu'ils puissent se transformer en un nouveau produit homogène.

.../...

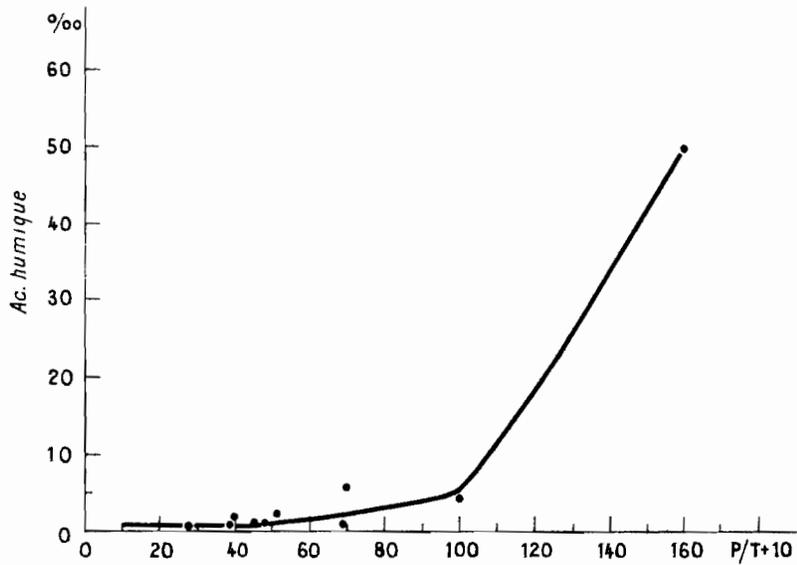


Fig. 26
 variation des teneurs en acide humique avec
 l'indice d'acidité de De Martonne

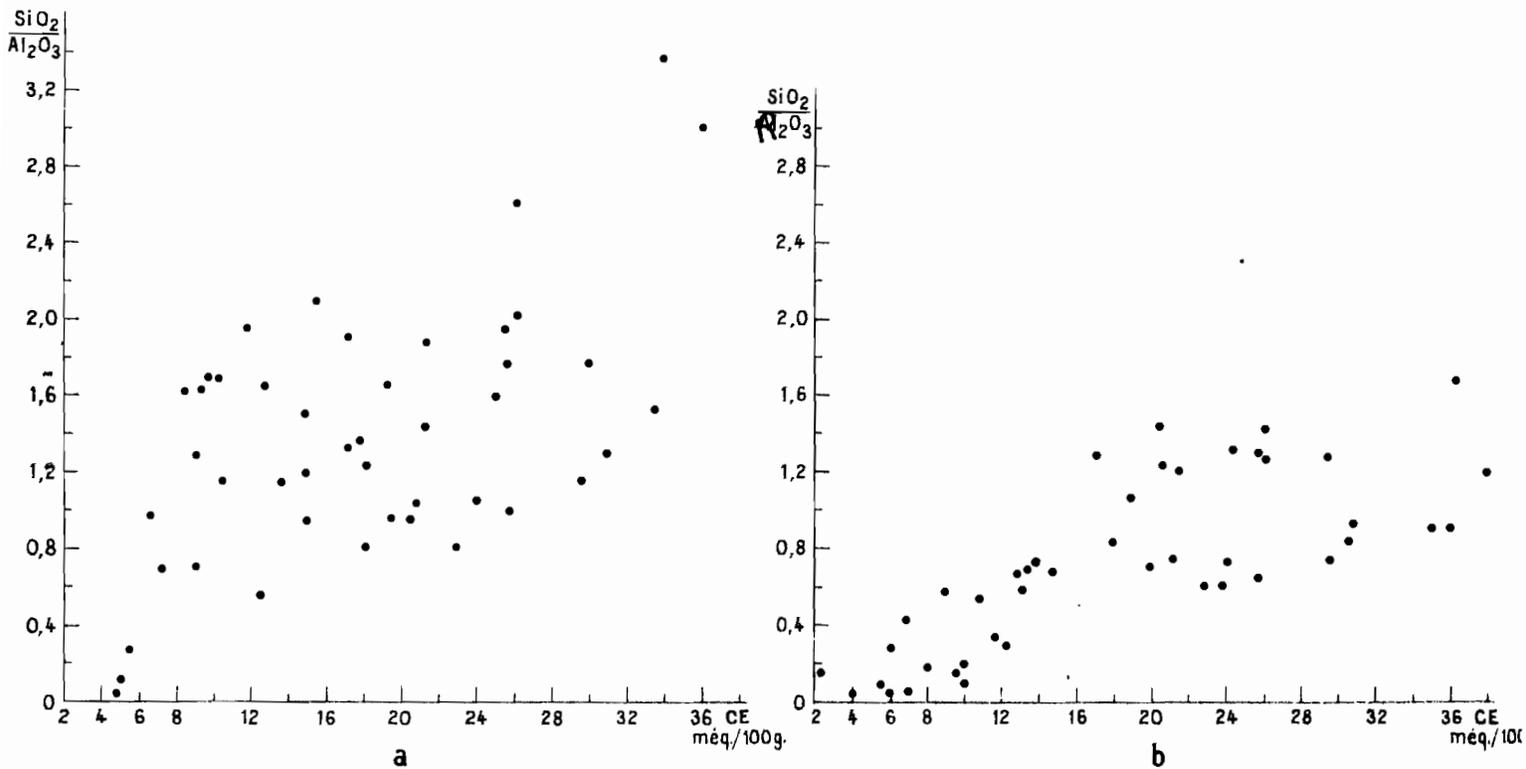


Fig. 27
 variation des rapports silice/alumine (a) et silice/hydroxydes (b)
 en fonction de la capacité d'échange.

En ce qui concerne la partie minérale du sol, MATTSON (97) avait montré que la capacité d'échange des colloïdes argileux du sol croissait-en-même temps que le rapport silice/alumine. Ceci est logique puisque les argiles à capacité d'échange élevée ont également un rapport silice/alumine élevé. Nous avons essayé de voir s'il y avait une corrélation entre la capacité d'échange des sols dérivés de roches volcaniques et leurs rapports silice/alumine et silice/hydroxydes. Les graphiques^{37a} montrent que, en ce qui concerne le rapport silice/alumine, la dispersion est assez forte ; il semble assez logique de tenir compte des hydroxydes de fer qui sont, en principe, dépourvus de capacité d'échange. Les points portés sur le graphique^{24b} montrent que le groupement obtenu est meilleur, mais qu'il est difficile de n dire davantage. (27)

En tous cas, on peut constater que si l'on était en droit de s'attendre à des capacités d'échange faibles pour des sols dont le rapport silice/alumine est faible, c'est-à-dire pour les sols ferrallitiques, l'expérience montre que les valeurs obtenues sont parfois fortes. Avec FIELDS et AL. nous pouvons penser que ces capacités d'échange fortes peuvent être dues à des hydroxydes colloïdaux dont la présence pourra indiquer l'analyse thermique des argiles. Par conséquent, si une capacité d'échange faible est un indice de ferralitisiation poussée, l'inverse n'est pas toujours vrai.

A) Relations entre la capacité d'échange et la nature du sol.

Le tableau suivant donne les valeurs de la capacité d'échange en fonction du groupe ou sous-groupe de sol.

.../...

Ordre -S/Ordre	Groupes et Sous-groupes	Capacité d'échange en			
		még/100 g			
		extrêmes		Moyenne	
Ferrallitique	Typiques	Rouge-Brun	11	26	17
		Rouge	12	25	20
		Jaune-Brun	14	33	28
	Humifères	Brun	22	40	35
		Ando	52	71	63
Ferrug. Tropic.	Typiques	15	35	23	
Hydromorphe	à gley	gris	45		
	à accum.mat.	marais	78		
	organique	marécageux	32		
	à calcification	Regur	30	52	39
Jeune	à tendance	ferrallitique	38	43	41,5
		hydromorphe	30	47	39

Ce tableau montre la croissance de la capacité d'échange quand on passe des sols ferrallitiques typiques aux sols humifères. L'augmentation de la capacité d'échange est due pratiquement à la matière organique. Les capacités d'échanges élevées des sols hydromorphes sont dues à une quantité de matière organique élevée soit à une argile montmorillonitique. Les sols jeunes présentent des capacités d'échange élevées pour ces deux raisons.

b) Variations de la capacité d'échange avec la profondeur du sol.

D'une façon générale, la capacité d'échange est plus forte en surface qu'en profondeur par suite de la présence de quantités variables de matière organique. Dans le cas des sols ferrallitiques typiques, qu'ils soient rouges, rouge-brun ou rouge-jaune, la capacité d'échange diminue rapidement depuis la surface jusqu'à une

.../...

profondeur de 30 à 40 cm, puis se stabilise jusqu'au voisinage de la roche-mère où elle augmente de nouveau. Par contre, dans le cas des sols humifères, la capacité d'échange décroît régulièrement depuis la surface jusqu'à la roche-mère. Les sols ferrugineux tropicaux présentent des variations analogues à celles des sols ferrallitiques typiques. Les sols hydromorphes regur ne présentent que peu de variations du haut en bas du profil. (fig.28-0)

c) Relations entre la capacité d'échange et le couvert végétal.

Dans toutes les régions, étudiées, des différences sensibles se manifestent lorsqu'on compare la capacité d'échange d'un sol sous végétation forestière primitive et celui situé sous végétation secondaire. Le tableau suivant met en évidence ces différences :

Sol	Région	Forêt primaire	Savoka ou plant.arborée.	Prairie
Ferral.Typ. Rouge	Analavelona	55	-	22-36
Brun-rouge	Côte Est	26	-	11-15
Brun-jaune	Nessi-Bé	-	25-28	-
Ferral.humif.Brun	Mont. Ambre	53-88	28-45	30-34
"	Itasy	-	55-74	39-46
"	Ankaratra	50-75	35-60	28-35
Ferrugin. Trop. Rouge	Antanimena	35-40	-	15-25

.../...

Ces valeurs montrent que le défrichement a, en autres, pour effet d'abaisser la capacité d'échange, par suite de l'enlèvement ou de la destruction de la matière organique. Le remplacement de la forêt par la prairie abaisse la capacité d'échange environ de moitié ; son remplacement par des plantations d'arbres maintient ou fait remonter la capacité d'échange à une valeur intermédiaire entre celle de la forêt et de la prairie.

d) Relations entre la capacité d'échange et l'altitude.

Les variations de la capacité d'échange avec l'altitude sont particulièrement nettes dans l'Ankaratra et dans la Montagne d'Ambre. Dans l'Ankaratra, la capacité d'échange passe de 10 à la base à 70 au sommet. Le versant exposé aux pluies d'alizé présentent des valeurs supérieures à celles du versant Nord. En Montagne d'Ambre, les deux versants ont des valeurs sensiblement analogues.

e) Relations entre la capacité d'échange et les valeurs climatiques.

Il ne paraît pas possible de suivre des relations entre la capacité d'échange et les valeurs climatiques, pluie et température comme cela a été fait pour l'humus par exemple. En effet, la capacité d'échange est fonction d'un trop grand nombre de variables (humus, nature et quantité de l'argile, pluie et température). Quoiqu'il en soit, on peut dire que dans les régions chaudes et semi-arides de l'île la capacité d'échange est de l'ordre de 20 méq/100 g ; dans les régions chaudes et pluvieuses, elle est comprise entre 15 et 25 méq/100 g, dans les régions fraîches et très pluvieuses elle dépasse 35.

B - LES BASES ECHANGEABLES.

L'examen de la répartition des bases échangeables dans les sols permet de faire les remarques suivantes :

.../...

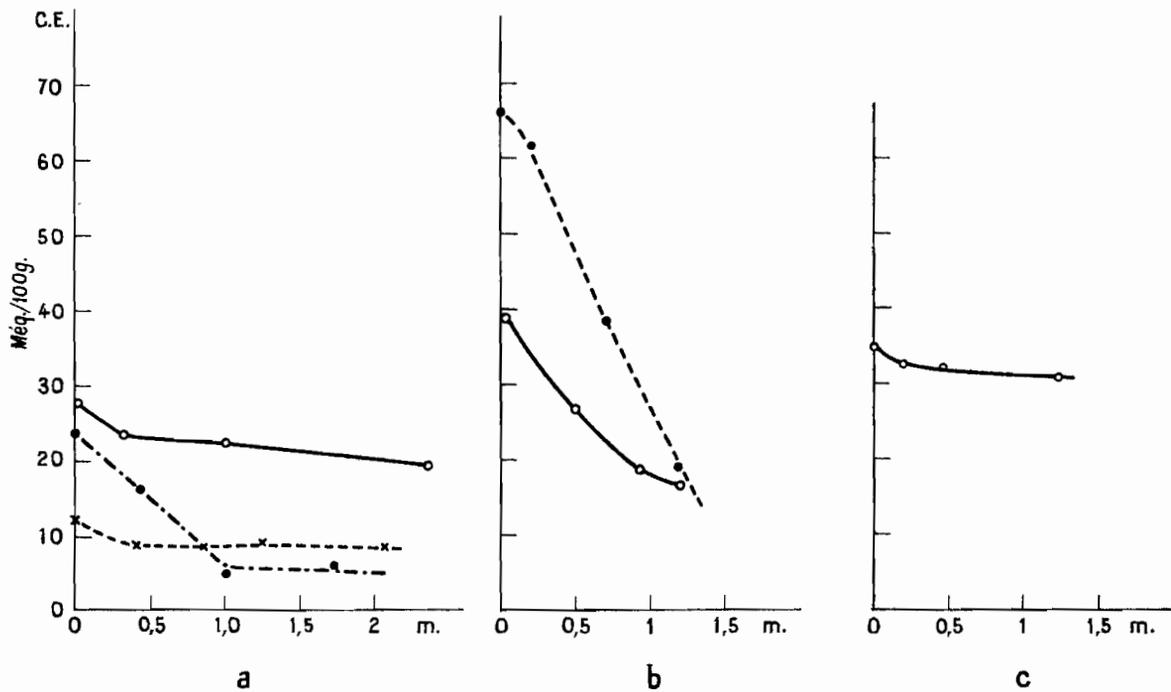


Fig. 28
 variation de la capacité d'échange avec la profondeur du sol
 a - sols ferrallitiques typiques
 b - sols ferrallitiques humides } • Ando
 c - sol régulier } • Brun

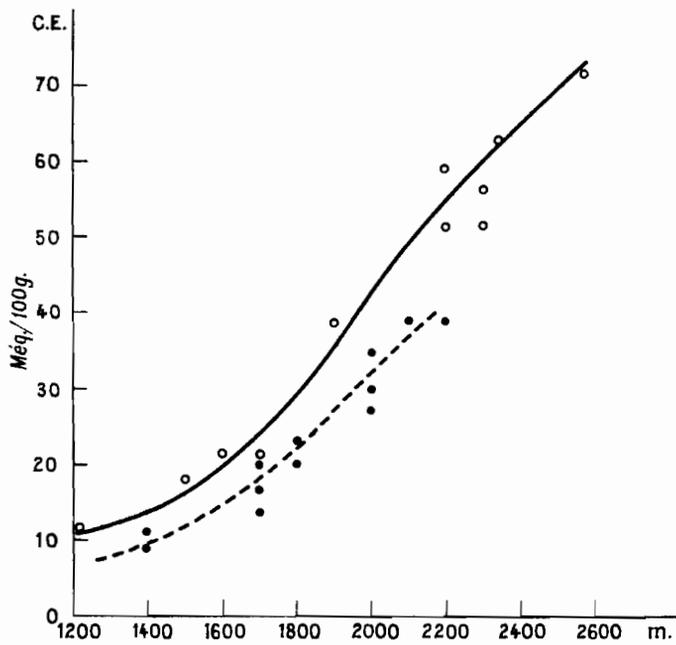


Fig. 29
 variation de la capacité d'échange avec l'altitude
 Ankaratra • versant EST
 • - Nord

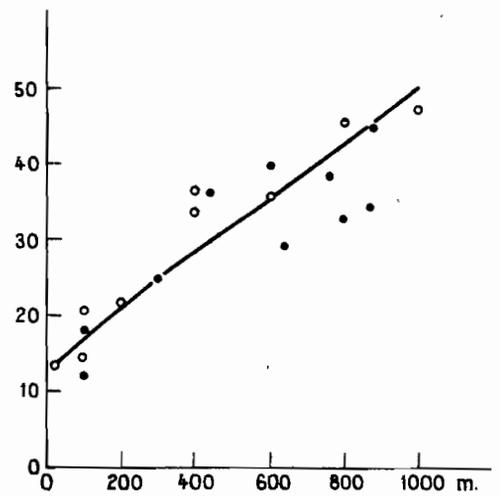


Fig. 30
 M-he d'Anche • EST
 • Nord

Les teneurs en bases échangeables sont liées, beaucoup plus au type de végétation qu'à la nature du sol lui-même.

Les sols forestiers sont beaucoup plus riches en bases échangeables que les sols de prairie. Le rapport des bases est de 3 à 1 et parfois même de 7 à 1.

Si l'on ne considère que les sols sous prairie, on constate que :

Les sols ferrallitiques ne renferment que des teneurs faibles à très faibles sauf ceux de l'Analavelona (qui constituent une transition vers les sols ferrugineux tropicaux.). Les sols ferrugineux tropicaux ont des teneurs en bases moyennes en chaux et en magnésie (un peu faibles en potasse). Les sols hydromorphes de type regur (argile montmorillonitique) ont des teneurs en chaux et magnésie élevée à très élevées, moyennes à faibles en potasse. Les sols jeunes sont toujours bien pourvus en bases.

Les tableaux suivants rassemblent les résultats obtenus pour les principaux groupes et sous-groupes de sols. Les horizons de surface correspondent à un prélèvement entre 0 et 10 cm, les horizons profonds à un prélèvements vers 50 cm.

CaO ‰				
Sols	Forêt		Prairie	
	0-10 cm	50 cm	0-10 cm	50 cm
Ferral. Typiq.	-	-	0,55	0,28
Bas-Ankaratra	-	-	0,49	0,24
Côte Est	3,3	0,3		
Basse Mont.				
Ambre	3,5	1,1	0,94	0,71
Analavelona	6,2	0,9	2,71	1,16
Ferral. Humif.				
Ankaratra	1,2	0,4	0,42	0,36
Mont. d'Ambre	7,2	1,05	1,20	0,40
Ankaizinana	5,7	0,8	1,35	0,52
Ando-Ankaratra	2,7	0,8	0,43	0,24
Ferrug. trop. Typ.	7,8	2,0	1,5	0,8
Hydrom. Régur	-	-	4,95	6,43
Jeunes				
tend. Ferrall.	-	-	2,59	3,32
tend. Hydromor.	-	-		
			4,71	

MgO ‰				
Sols	Forêt		Prairie	
	0-10 cm	50 cm	0-10 cm	50 cm
Ferral. Typ.				
Bas Ankaratra	-	-	0,09	0,05
Côte Est	0,83	0,07	0,19	0,05
Basse Mont. d'Ambre	0,96	0,59	0,36	0,25
Analavelona	1,33	0,24	0,72	0,32
Ferral. Hum.				
Ankaratra	0,2	0,08	0,12	0,07
Mont. Ambre	1,01	0,30	0,54	0,26
Ankaizinana	0,9	0,15	0,23	0,07
Ando (Ankaratra)	0,2	0,09	0,15	0,05
Ferrug. Trop. Typ.	1,32	0,61	0,25	0,10
Hydrom. Regul.	-	-	1,63	1,83
Jeunes	-	-	-	-
tend. Ferral.	-	-	0,93	-
tend. Hydro.	-	-	1,80	-

.../...

K₂O ‰

Sols	Forêt		Prairie	
	0-10 cm	50-cm	0-10 cm	50 cm
<u>Ferral.Typiques</u>				
Bas Ankaratra	-	-	0,06	0,03
Côte Est	0,07	0,03	0,03	0,02
Base Mont.Ambre	0,16	0,08	0,09	0,02
Analavelona	0,20	0,13	0,16	0,08
<u>Ferral.Humif.</u>				
Ankaratra	0,16	0,03	0,09	0,05
Mont.Ambre	0,44	0,06	0,09	0,05
Ankaizinana	0,33	0,03	0,08	0,03
Ando	0,04	0,03	0,08	0,03
<u>Ferrug.Trop.</u> <u>Typ.</u>	0,30	0,08	0,10	0,05
<u>Hydrom.Régur.</u>	-	-	0,11	0,09
<u>Jeunes</u>	-	-		
Tend.Ferral.	-	-	0,26	-
Tend.Hydrom.	-	-	0,19	-

.../...

Rapport CaO/MgO

Sols	Forêt		Prairie	
	0 - 10 cm	50 cm	0 - 10 cm	50 cm
<u>Ferrallit. Typiques!</u>				
Bas Ankaratra			4,4	4,0
Côte Est	2,8	3,3	2,0	3,2
Base Mont Ambre	2,6	1,3	1,8	2,5
Analavelona	3,3	2,6	2,7	2,5
<u>Ferrallit. Humif.</u>				
Ankaratra			2,5	3,4
Mont Ambre	5,1	2,4	1,5	1,0
Ankaizinana	4,5	4,0	4,1	5,4
Ando			2,0	3,0
<u>Ferrug. Trop.</u>				
	4,2	2,3	2,2	5,6
<u>Hydrom. Regur</u>				
			2,1	2,5
<u>Jeunes</u>				
Tend. ferrallit.			2,0	
Tend. hydrom.			1,7	

.../...

Les chiffres présentés ci-contre, montrent comment se répartissent les bases échangeables dans les sols dérivés de roches volcaniques.

D'une façon générale, les bases sont beaucoup plus abondantes dans les sols forestiers que dans les sols sous prairie, quelque soit le sol. Dans les sols ferrallitiques typiques, les sols de l'Analavelona paraissent faire un peu exception. En réalité, comme ils semblent faire transition avec les sols ferrugineux tropicaux, les teneurs qu'ils présentent se rapprochent beaucoup plus de celles de ces sols. En dehors de ceux-ci, les teneurs en bases, bonnes sous forêt, deviennent franchement faibles sous prairie. Les sols ferrallitiques humifères forestiers ont des teneurs en chaux échangeable remarquablement élevées en montagne d'Ambre et à Nossi-Bé. Dans l'Ankaratra, les valeurs sont bien moindres, même sous forêt. La disparition de la forêt amène une diminution brutale des teneurs en bases.

Ceci nous paraît tenir aux causes suivantes :

En Montagne d'Ambre, la roche-mère est une cendre meuble dans laquelle pénètrent les racines des arbres. Tandis que dans l'Ankaratra, la roche-mère est un basalte ou une ankaratrite rocheuse. Le fait de pénétrer la roche-mère permet aux racines de "saisir" les bases libérées lors de la décomposition de la roche. Ces bases passent par l'intermédiaire des solutions vasculaires dans les feuilles et les branches qui en tombant et se décomposant sur le sol enrichissent l'horizon supérieur du sol. L'enlèvement de cet horizon (soit par décomposition ou érosion) a pour effet de faire descendre rapidement les teneurs en bases.

Ceci n'est pas spécial aux roches volcaniques. Dans la région de l'Ouest, nous avons pu observer un sol ferrallitique rouge dérivé de calcaire (silice/alumine = 0,8). Ce sol peu épais était traversé par les racines des arbres qui atteignent le calcaire pulvérisent sans difficulté. Les teneurs en chaux échangeables

.../...

sont particulièrement élevées (8 à 10 %). Dans le même sol, sous prairie, les teneurs atteignent à peine 1,5 %. Certes, l'horizon humifère a été enlevé par l'érosion, mais surtout, les racines de graminées sont insuffisantes, à remonter en surface la chaux de la roche-mère.

D'autre part, près de Fianarantsoa nous avons pu étudier les sols forestiers profonds, dérivés de gneiss. Dans l'horizon organique de surface, les teneurs en bases ne sont pas plus abondantes que dans les prairies voisines. Dans le cas de ce profil très épais, la zone d'altération de la roche est pratiquement hors d'atteinte des racines des arbres.

Dans le cas de sols ferrugineux tropicaux, les sols forestiers sont encore mieux fournis en bases que les sols de prairies ou de savane. Mais la somme des bases est nettement plus élevée que dans le cas des sols ferrallitiques. Ceci tient probablement au fait que la percolation de l'eau à travers ces sols est moins importante que dans les cas précédents.

En ce qui concerne les sols hydromorphes où le drainage est defectueux, la chaux est beaucoup plus difficilement éliminée. Elle s'accumule sur place et peut arriver à former de petits nodules. Naturellement, les teneurs en chaux échangeables sont particulièrement élevées.

Les sols jeunes des régions élevées et pluvieuses sont caractérisés par des teneurs en chaux et magnésie beaucoup plus élevées que les autres. Dans l'extrême Sud, les teneurs sont encore plus fortes.

Dans les sols dérivés de roches volcaniques, les bases échangeables sont beaucoup plus fortes sous forêt, ou culture arborée, que sous prairie (ou culture annuelle). La disparition de la couverture arborée détermine une diminution considérable des bases soit par décomposition rapide de l'horizon organique de surface, soit par enlèvement de cet horizon par le jeu de l'érosion. Ceci peut

.../...

être mis en évidence de manière chiffrée dans un certain nombre de régions proches de la forêt primitive où des prélèvements ont été effectués sous forêt (1), puis à faible distance de celle-ci sous prairie ou végétation arborée secondaire (2), puis à grande distance de la forêt ou sous culture. (3).

LIEU	SOMME DES BASES ECHANGEABLES EN Méq/100 g		
	1	2	3
Base Mont. d'Ambre	33,9	10,9	6,0
Analavelona	29,2	15,7	13,3
Ankaizinana	26,7	23,6	6,0

Toutes ces valeurs montrent l'intérêt qu'il y a à maintenir au sol son couvert arboré et à lutter efficacement contre les effets de l'érosion.

C - LE DEGRE DE SATURATION -

Bien que parfois, l'on obtienne des teneurs en bases échangeables élevées, le degré de saturation est (dans la majorité des cas faibles, à très faible.

Degré de Saturation - (Bases Ech. x 100 / Cap. Ech.)

Sols	Forêt	Prairie
<u>Ferral. Typ.</u>		
Bas Ankaratra	-	9,2
Côte Est	61,8	16,5
Base Mont. Ambre	58,0	21,1
Analavelona	52,4	46,7

.../...

Ferrallit. Humifère	!		!	
Ankaratra	!	10,0	!	33,0
Mont Ambre	!	40,5	!	22,7
Ankaizinana	!	49,6	!	34,9
Ando	!	14,9	!	4,7
Ferrug. Tropic.	!	90,0	!	45,0
Hydrom. Regur	!		!	61,2
Jeunes	!		!	
Tend. Ferrallitique	!		!	38,5
Tend. Hydrom.	!		!	80,0

Ce qui caractérise avant tout l'ensemble des valeurs obtenues pour le degré de saturation est leur grande variabilité. Toutefois, on peut remarquer que la déforestation a pour résultat d'abaisser assez fortement le degré de saturation.

Les sols ferrallitiques typiques sont caractérisés par un degré de saturation moyen. Les teneurs en bases échangeables sont assez élevées, mais les teneurs en matière organique le sont aussi. Par contre, dans les sols ferrallitiques humifères, si les teneurs en bases sont souvent élevées, les teneurs en matière organique sont fortes à très fortes, ce qui a pour effet d'élever considérablement les capacités d'échange. Les sols ferrugineux tropicaux sont fortement saturés lorsqu'ils supportent leur végétation primitive (teneurs assez élevées en bases échangeables, mais teneurs moyennes en matière organique.

Les sols regur sont assez fortement saturés. Leur capacité d'échange est assez élevée par suite de leur argile montmorillonitique ; en même temps, leurs teneurs en bases (chaux et magnésie) sont élevées. Les sols jeunes présentent des degrés de saturation variés suivant que leur évolution est plus ou moins avancée.

L'ensemble de ces résultats montre que :

1 - La capacité d'échange est une grandeur qui varie avec la profondeur du sol, avec la nature du couvert végétal, l'altitude et d'une façon générale avec le climat. Il est intéressant de noter que les sols ferrallitiques n'ont pas systématiquement une capacité d'échange faible. **On obtient des valeurs comprises entre 5 et 70 méq/100 g.** Cette capacité d'échange est due pour une part à l'argile mais surtout à la matière organique dont les teneurs atteignent dans certains sols des valeurs très élevées. Les sols ferrugineux tropicaux ont des capacités d'échange moyennes. Les sols hydromorphes regur ont une capacité d'échange forte en raison de la nature de leur argile.

2 - Les teneurs en bases échangeables sont une des caractéristiques remarquables de ces sols. Dans la plupart des cas les sols forestiers présentent des teneurs en bases échangeables élevées. Nous avons proposé un mécanisme permettant d'expliquer des faits. Tous les sols peu épais présentent des teneurs en bases élevées, tandis que les sols profonds, sont pauvres en bases échangeables. Lorsque la couverture arborée est détruite, une diminution très rapide des teneurs en bases échangeables a lieu immédiatement. Ces faits permettent d'expliquer le haut degré de fertilité des sols vierges et aussi pourquoi les sols de prairie sont d'une fertilité limitée.

3 - Le degré de saturation des sols est très variable. Il est moyen à faible pour les sols ferrallitiques, élevé pour les sols ferrugineux tropicaux et hydromorphes regur. La déforestation accentue toujours la désaturation.

LA REACTION

Le pH des sols a été mesuré systématiquement à l'aide d'un potentiomètre à électrode de verre.

Tous les sols ferrallitiques ont une réaction acide avec un pH compris entre 5 et 6,5. Les sols ferrugineux tropicaux ont une réaction faiblement acide à neutre (pH 6,3 à 7,2). Parmi les sols hydromorphes, les sols marécageux ou de marais sont acides, les sols "regur" sont neutres à alcalins (pH 6,5 à 7,5). Les sols jeunes situés en zone pluvieuse ont un pH acide, tandis que en région semi-aride le pH est compris entre 6,5 et 7,3.

a) Relations entre le pH et la profondeur du sol.

Si l'on suit la variation du pH dans les profils, on constate que cette variation est différente suivant le groupe ou sous-groupe auquel on s'adresse. Dans le cas des sols ferrallitiques typiques, le pH augmente légèrement avec la profondeur puis décroît assez fortement ensuite (Fig 31). Parmi les sols ferrallitiques humifères, les sols bruns et les sols Ando ont un comportement assez différent. Dans le cas des sols bruns, le pH diminue d'abord légèrement de la surface vers la profondeur et croît légèrement ensuite. Dans le cas des sols Ando, la variation est inversée et ressemble à celle des sols ferrallitiques typiques. Pour les sols ferrugineux tropicaux, le pH croît faiblement avec la profondeur. Ceci est également le cas des sols hydromorphes, qu'ils appartiennent au sous-groupe marais, marécageux ou regur.

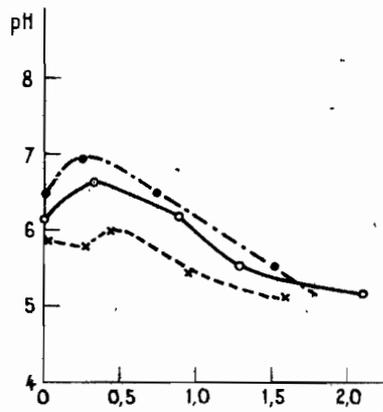
.../...

b) Relations entre le pH et le couvert végétal.

D'une façon générale, le pH est plus élevé sous végétation forestière que sous savoka ou prairie. Ceci doit pouvoir être attribué aux teneurs en bases nettement plus fortes sous végétation arborée que sous végétation herbacée. Le tableau suivant permet d'effectuer quelques comparaisons :

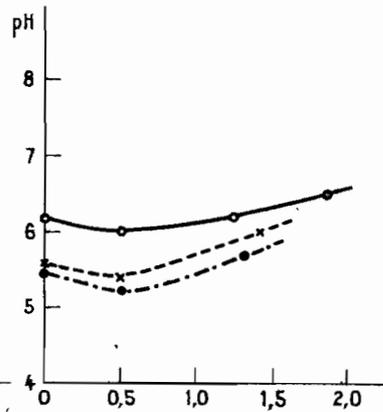
Sols	Lieux	Forêt primaire	Savoka plant.arbo.	ou prairie proche	éloignée
Ferrallitiques Typiques	Base Mont Ambre	6,6		6,0	
	Cote Est	7,1			5,8
	Analave- lona	7,1		6,3	6,4
Ferrallitiques Humifères	Mont d'Ambre (600m)	5,1		5,3	5,5
	Mont d'Ambre (1000m)	4,4		5,9	5,4
	Ankazinanana	5,8		5,5	
	Itasy		6,2	6,0	
Ando	Ankaratre	6,5		5,4	
Ferrugineux Tropicaux	Antanimena	7,0		6,4	

.../...



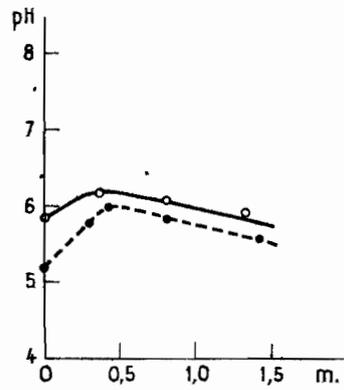
a

Sols ferrallitiques typiques



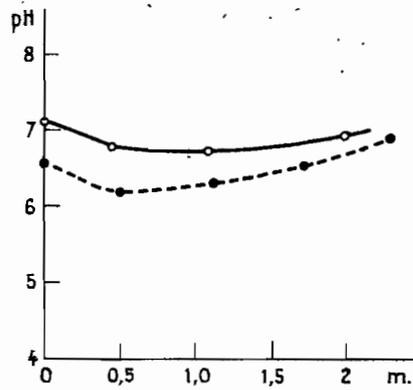
b

Sols ferrallitiques humides



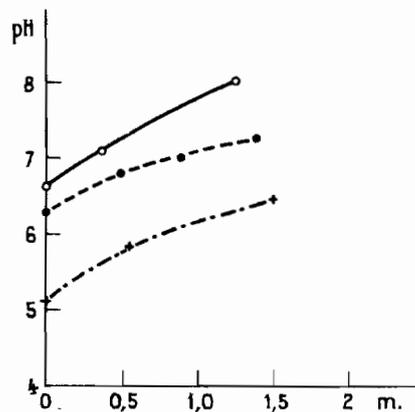
c

Sols Ando



d

Sol ferrugineux tropical



e

Sols hydromorphes
 • • léger
 + moyen

Fig. 31

variation du pH avec la profondeur du sol

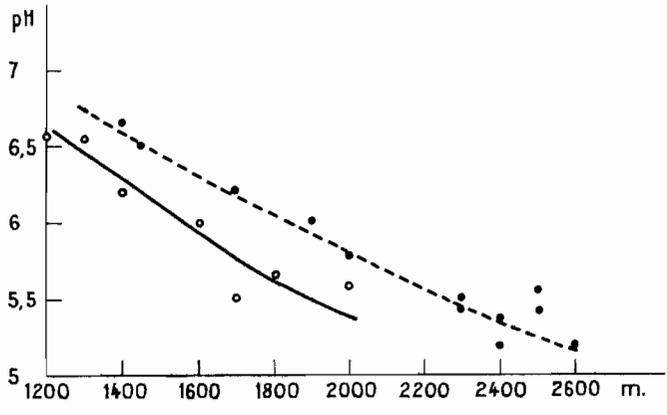


Fig. 32
 variation du pH avec l'altitude Ankaratra
 ● versant Est
 ○ Nord

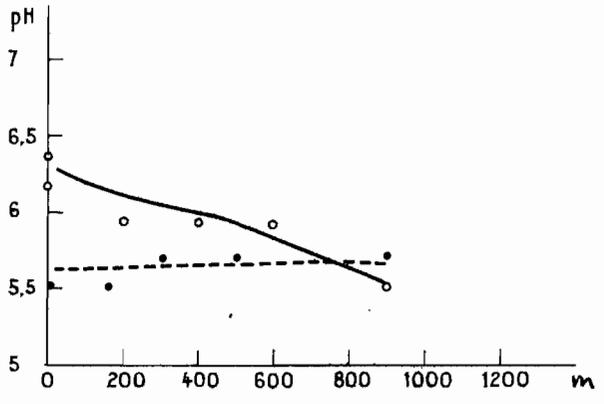


Fig. 33
 variation du pH avec l'altitude M^{re} d'Ambo
 ○ Est
 ● Nord

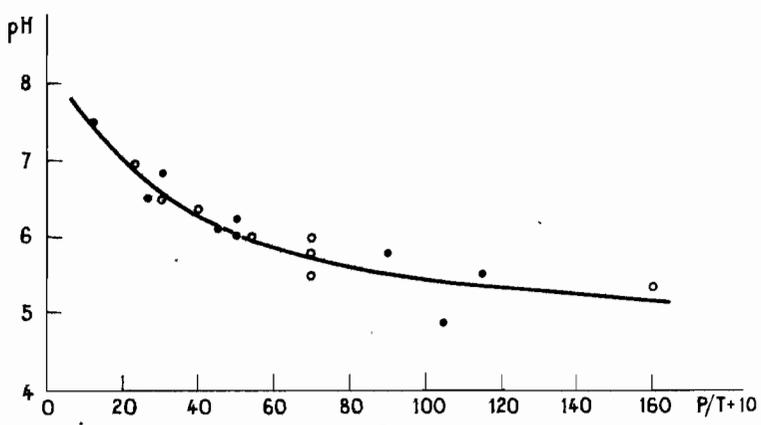


Fig. 34
 variation du pH avec l'indice d'aridité de De Martonne

Le sommet de la montagne d'Ambre s'oppose assez nettement aux autres territoires puisque c'est seulement dans cette région que le pH est plus acide sous forêt que sous plantation ou prairie.

c) Relations entre le pH et l'altitude.

Les variations du pH avec l'altitude sont moins nettes que celles de la matière organique et la capacité d'échange. Elles valent toutefois d'être notées dans les régions de la montagne d'Ambre et de l'Ankaratra. Ces variations ont été portées sur les Fig.32 et 33. A mesure qu'on s'élève en altitude le pH décroît, c'est à dire lorsque la pluviométrie augmente et la température diminue.

d) Relations entre le pH et les valeurs climatiques.

Les valeurs du pH ont été portées sur un graphique dans lequel l'abscisse est la pluviométrie et l'ordonnée la température. L'on peut remarquer que les pH voisin de 7 se groupent dans les régions chaudes de l'île, les pH voisins de 6,0 dans les régions modérément humides et tièdes, les pH bas dans les régions pluvieuses et fraîches. Sur ce graphique, où des valeurs provenant d'autres ont été portées, on peut distinguer 4 zones correspondant aux pH suivants : supérieur à 7,0, compris entre 7 et 6, entre 6 et 5, et inférieur à 5.

L'ensemble de ces résultats montrent que :

Le pH varie notablement d'un groupe ou sous-groupe à l'autre. Les sols ferrallitiques sont toujours acides, les sols ferrugineux tropicaux très faiblement acides, presque neutres, les sols hydro-morphes neutres ou faiblement alcalins.

Dans chaque sous-groupe, les variations du pH avec la profondeur présentent une certaine spécificité. Dans aucun cas, il n'a

.../...

été observé de pH alcalin au voisinage de la roche-mère. Seulement lorsque la roche-mère est intimement mélangée au sol à la base du profil, comme c'est le cas des sols dérivés de cendres de la Montagne d'Ambre, le pH est faiblement acide. Dans les autres sols ferrallitiques, le pH reste acide même très près de la roche-mère. L'élimination des bases est donc totale très près de la roche mère intacte. Les valeurs assez élevées qu'on observe en surface peuvent être expliquées par la relative abondance des bases dont nous avons expliqué la présence dans le chapitre précédent. Dans le cas des sols ferrugineux tropicaux, la quantité d'eau qui percole à travers le sol est bien moindre, aussi les bases sont moins complètement éliminées et le pH est neutre ou très faiblement alcalin près de la roche-mère. En ce qui concerne les sols regur, l'élimination des bases s'y fait difficilement ce qui explique les valeurs élevées du pH qu'on y observe du moins en profondeur.

La suppression de la forêt et son remplacement par la savane ou la prairie a pour effet d'éliminer une grande partie des bases de l'horizon de surface. Ceci provoque une baisse sensible du pH dans tous les sols.

D'une manière générale, le pH est fonction du climat. Lorsque celui-ci est chaud et sec, le pH est neutre ou faiblement alcalin. En région humide, il a tendance à devenir acide. Pour une température donnée, le pH diminue avec la pluviométrie. Le pH diminue lorsque l'indice d'aridité de de Martonne croît.

.../...

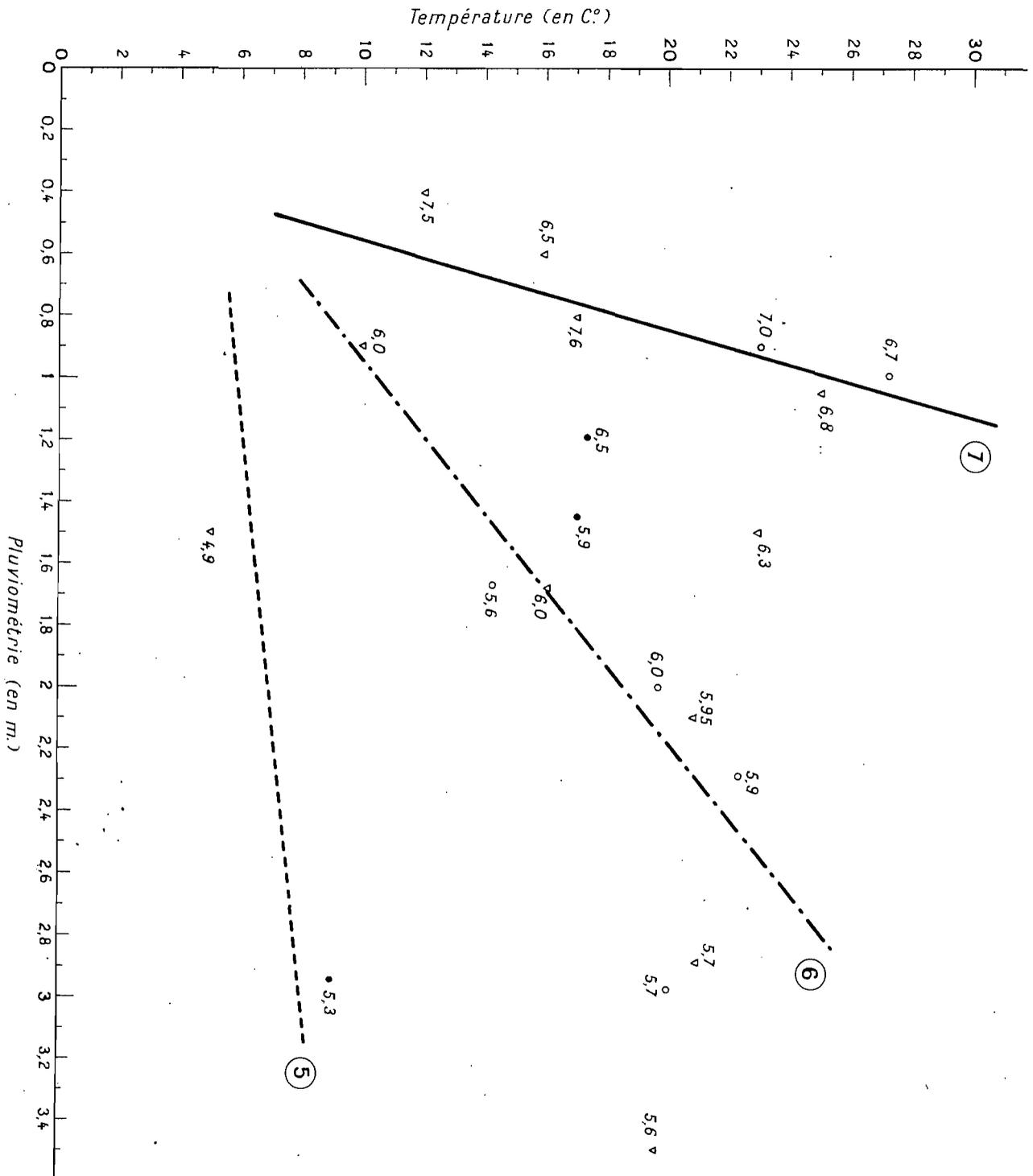


Fig. 35
 variation du pH avec les valeurs climatiques
 ○ valeurs malgaches
 △ — autres pays.

-- CHAPITRE 9 --

A. LE RAPPORT SILICE/ALUMINE

Le rapport Silice/Alumine a été utilisé pour la première fois par J.M. VAN BEMMELEN (69) (70), puis par H. HARRASSOWITZ (126) et surtout par F.J. MARTIN et H.C. DOYNE (150) lors de leur étude sur les sols de la Sierra Leone. Ce rapport a été largement employé par la suite et on lui a adjoint et même souvent substitué le rapport Silice/Hydroxydes. En effet, certains auteurs ont attribué aux hydroxydes de fer une valeur égale sinon supérieure à celle de l'alumine.

La valeur du rapport Silice/Alumine a été critiquée par plusieurs auteurs qui ont déclaré que les renseignements qu'il fournissait étaient trop variables pour pouvoir être utilisés. C'est le cas en particulier de R.L. PENDLETON et S. SHARASUVANA (174-175) C.W. ROBINSON (184), M. VAN DER VOORT (211) G. WAEGEMANS (213). Pour plusieurs d'entre eux, la "latéritisation" est un phénomène qui porte uniquement sur le fer. La mise en liberté de l'alumine est accessoire et il n'y a pas lieu de lui attacher une grande importance. Nous ne pouvons partager cette manière de voir, à la lumière des faits fournis par l'étude des sols malgaches et nous considérons que la mise en liberté de l'alumine est au contraire un processus fondamental.

Par ailleurs, les analyses effectuées par certains auteurs portent uniquement sur des cuirasses qu'ils constatent être très fortement ferrugineuses. Le fer est en effet un élément très mobile et des cuirasses où le fer est très abondant existent également à Madagascar associées à des sols riches en

.../...

alumine libre (région Est de l'île). La façon d'effectuer les analyses a également une grosse importance. La fusion alcaline attaque aussi bien la silice du quartz que celle des silicates. Par conséquent, pour peu que la roche-mère contienne du quartz en quantité appréciable (granite ou gneiss par exemple), le rapport Silice/Alumine sera très variable et évidemment dépourvu de sens. C'est pourquoi, toutes nos déterminations ont-elles été effectuées avec un réactif d'attaque qui laisse le quartz intact.

Un autre type d'objections que l'on fait au rapport Silice/Alumine vient de ce qu'on a trouvé difficile d'établir des corrélations entre le rapport et le climat. E.C. MOHR et F.A. VAN BAREN (165) ont récemment fait le point des opinions assez contradictoires qui existent à ce sujet. La plupart des auteurs se sont attachés à trouver une corrélation entre le rapport Silice/Alumine et la pluviométrie. Les premiers utilisateurs F.J. MARTIN et H.C. DOYNE, montrent qu'en Sierra Leone le rapport diminue lorsque la pluviométrie augmente. N. CRAIG et P. HALAIS (93) à l'île Maurice, T. TANADA (204) aux îles Hawaï, W.S. ROBINSON et R.S. HOLMES (186) aux U.S.A. trouvent une corrélation analogue. Cependant H. VINE (210) en Nigeria ne trouve pas de corrélation et L. GLANGEAUD (115) trouve en A.O.F. une corrélation positive entre le rapport et la pluviométrie.

Peu d'auteurs se sont attachés à trouver une corrélation entre ce rapport et la température. E.M. CROWTHER (95) a trouvé que, pour une pluviométrie constante, ce rapport augmente avec la température. Pour W.O. ROBINSON et R.S. HOLMES (186), au-dessus d'une température de 16°, ce rapport est inférieur à 2. Ces résultats seront confirmés par L.D. BAVER et S.D. SCARSETH (68) dans l'Alabama.

H. JENNY (134) est le seul, à notre connaissance, à relier le rapport Silice/Alumine avec, à la fois pluie et température. Cet auteur a montré que pour des valeurs identiques du coefficient de non-saturation de Meyer, le rapport diminue lorsque la température augmente.

Les opinions en présence sont donc assez contradictoires. Il serait intéressant de savoir exactement la façon dont le rapport a été établi; quelle roche-mère a donné naissance au sol étudié; si l'on n'est pas en présence d'influences climatiques anciennes etc.. De plus, dans la pays où l'étude a été tentée, si les variations de pluviométrie sont importantes, celles de la température sont soit assez faibles soit complètement passées sous silence. A Madagascar, l'on a de fortes variations, à la fois, de la pluviométrie et de la température. Il nous a paru logique d'en tenir compte. Les valeurs du rapport Silice/Alumine se groupent alors de manière cohérente ce qui permet de l'utiliser de façon intéressante.

Voyons comment se répartit le rapport, pour les sols dérivés de roches volcaniques et quelles sont les influences qui provoquent ses variations.

a) Valeurs du rapport Silice-Alumine dans les différents groupes et sous-groupes de sols :

Sous-ordre	Groupes S/Groupes	SiO ₂	/	Al ₂ O ₃
Ferrallitique	Typique Rouge	0,2	à	1,7
	Rouge-brun	0,5	à	1,0
	Brun-Jaune	1,5	à	1,9
	Humifère Brun	0,5	à	1,2
	Ando	1,5	à	1,8
	Cuirassé	0,1	à	0,3
Ferrugin. Tropi.	Typique	1,8	à	2,2
Hydromorphe	Regur			3
Jeune	Région Tend. Ferrallit.	2,5	à	3,5
	Tend. Hydromorphe			3

.../...

Les valeurs portées sur ce tableau correspondent à des échantillons prélevés immédiatement au-dessous de l'horizon humifère. Lorsque celui-ci existe, les valeurs trouvées sont en général un peu plus élevées.

Ce tableau montre que tous les sols ferrallitiques présentent des valeurs inférieures à 2,0. Les sols ferrallitiques typiques présentent une très large gamme de valeurs, sans que cela corresponde à des différences morphologiques précises. Les sols ferrugineux tropicaux ont des rapports très proches de 2,0, tandis que les sols hydromorphes gris et Regur ont un rapport élevé.

Les sols jeunes ont un rapport proche de 2 dans les régions humides (tendance à la ferrallitisation), de 3 dans les régions plus sèches (ferruginisation ou calcification).

Cette valeur de 2,0 est choisie comme "frontière" entre les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux. C'est le rapport moléculaire de la silice et de l'alumine dans la kaolinite. Dès que l'alumine est mise en liberté, le rapport s'abaisse au-dessous de 2,0. Lorsqu'il s'élève au-dessus de 2,0 cela implique qu'un minéral argileux autre que la kaolinite est probablement présent.

Ainsi donc, nous pensons que le rapport Silice/Alumine doit être déterminé sans provoquer l'attaque du quartz qui peut exister dans le sol; que, sans mésestimer l'importance du fer, on ne peut pas négliger l'alumine et qu'enfin l'utilisation du rapport doit être faite en tenant compte à la fois de la pluviométrie et de la température.

b) Variations du rapport Silice/Alumine avec la profondeur.

Le rapport Silice/Alumine présente plusieurs modes de variations en fonction de la profondeur (Fig.36). Notons tout

.../...

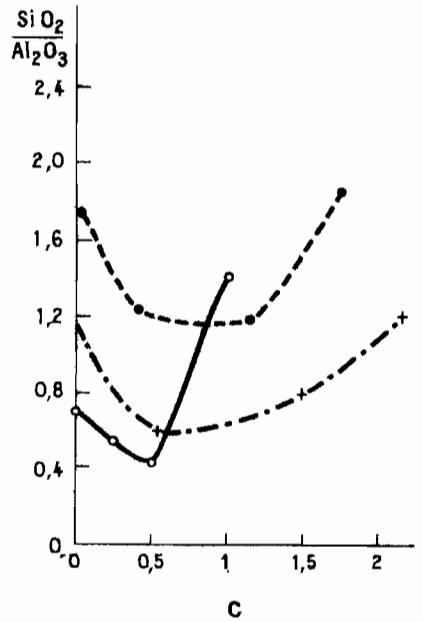
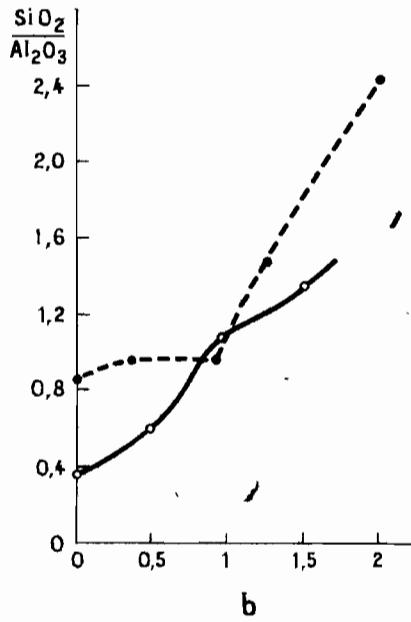
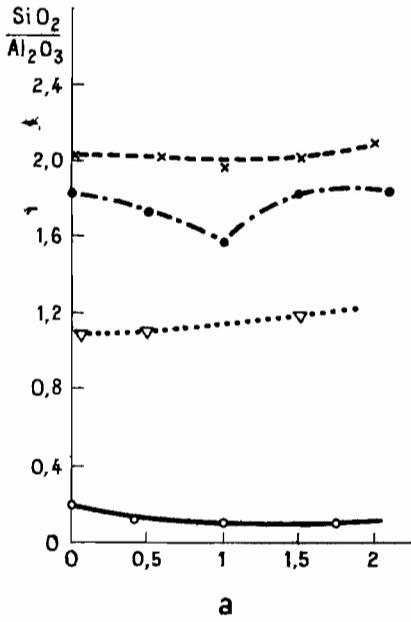


Fig 36

variation du rapport silice/alumine avec la profondeur du sol

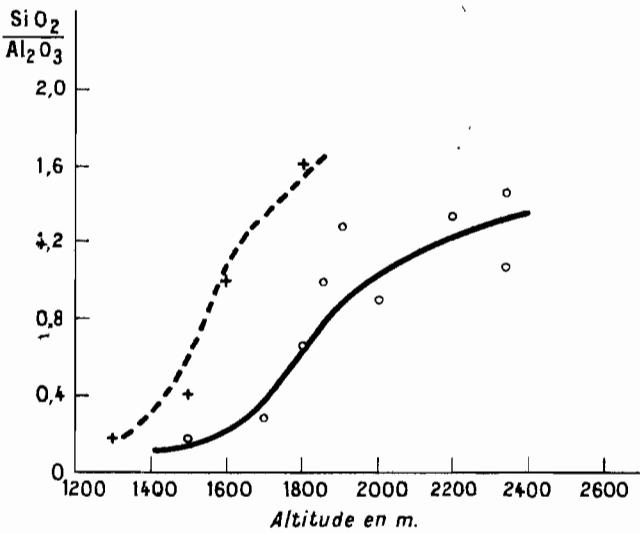


Fig. 37

variation des rapport silice/alumine avec l'altitude de

Ankaratra + Nord
v EST

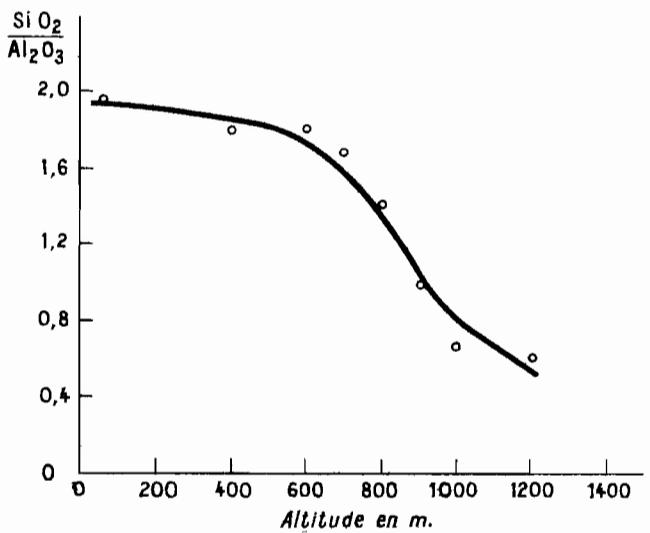


Fig. 38

M^{he} d'Anche

d'abord qu'on peut observer une légère diminution du rapport entre 30 et 50 cm; en d'autres termes, le rapport augmente légèrement dans l'horizon humifère. Ceci est particulièrement net dans les sols ferrallitiques humifères bruns et surtout Ando.

Deux modes principaux de variations peuvent être observés:

1) le rapport reste à peu près constant dans l'ensemble du solum. Ceci a été noté pour certains sols ferrallitiques rouges de l'Ankaratra, de l'Analavelon, les sols ferrugineux tropicaux de l'Antanimena.

2) le rapport diminue régulièrement de la base vers le sommet du solum.

Dans le premier cas, les caractères du sol sont acquis presque au contact de la roche-mère; dans le second, ces caractères ne s'acquièrent que peu à peu. G. AUBERT (60) a déjà noté que ces faits s'appliquent à l'ensemble des sols ferrallitiques. A. LACROIX (27-142) à Madagascar et en Guinée, J.B. HARRISON (127) en Guyane anglaise; S. CAILLERE et S. HENIN (84) en Guyane Française ont montré que pour les roches basiques, la transformation en sol est déjà acquise à quelques centimètres au-dessus de la roche-mère. Il semble que le premier cas corresponde à un sol en équilibre avec les facteurs environnants, puisque l'on observe pour des valeurs très différents du rapport (0,2 dans l'Ankaratra, 1,2 dans l'Analavelona, 1,7 dans la basse Montagne d'Ambre, 2,0 dans l'Antanimena). Au contraire, dans le deuxième cas, la maturité complète n'est pas encore atteinte et des transformations de minéraux se produisent encore dans le sol.

.../...

c) Relations entre la rapport Silice/Alumine et l'altitude.

Les variations du rapport Silice/Alumine ont été examinées dans les deux massifs de la montagne d'Ambre (0 à 1.400m) et de l'Ankaratra (1.200 à 2.600m). Alors que l'étude des précédentes propriétés faisait apparaître des analogies dans les deux massifs, il n'en est pas de même pour ce rapport.

1) En montagne d'Ambre, le rapport Silice-Alumine décroît très régulièrement de la base vers le sommet et ceci quelque soit le versant sur lequel on se place. Entre Mangoaka et la station des Roussettes on peut constater que le rapport varie peu jusqu'à 600 m, mais qu'à partir de cette altitude il descend rapidement et qu'à 1.200 m il n'est plus que de 0,6 (51).

2) Dans l'Ankaratra, on constate que le rapport est très bas sur les plateaux du pourtour (0,1 à 0,4); à mesure qu'on s'élève, il augmente notablement. Au voisinage du sommet du massif il atteint des valeurs comprises entre 1,0 et 1,5 (Fig.37).

Il est à noter que dans l'Ankaizinana, près du terrain d'aviation de Bealanana (1.100 m) le rapport est compris entre 0,3 et 0,5 et que sur le plateau de Bemanevika (1.600 à 1.800 m) les valeurs obtenues sont comprises entre 0,8 et 1,0.

d) Relations entre le rapport Silice/Alumine et les facteurs climatiques.

Ainsi que nous l'avons exposé plus haut, il ne paraît pas possible d'établir une relation entre le rapport Silice/Alumine et une valeur climatique unique à Madagascar par suite des trop grandes variations et de la pluviométrie et de la température. C'est pourquoi, nous ferons de nouveau appel à un tableau portant à la fois pluie et température, sur lequel nous porterons les valeurs du rapport étudié (Fig. 39).

.../...

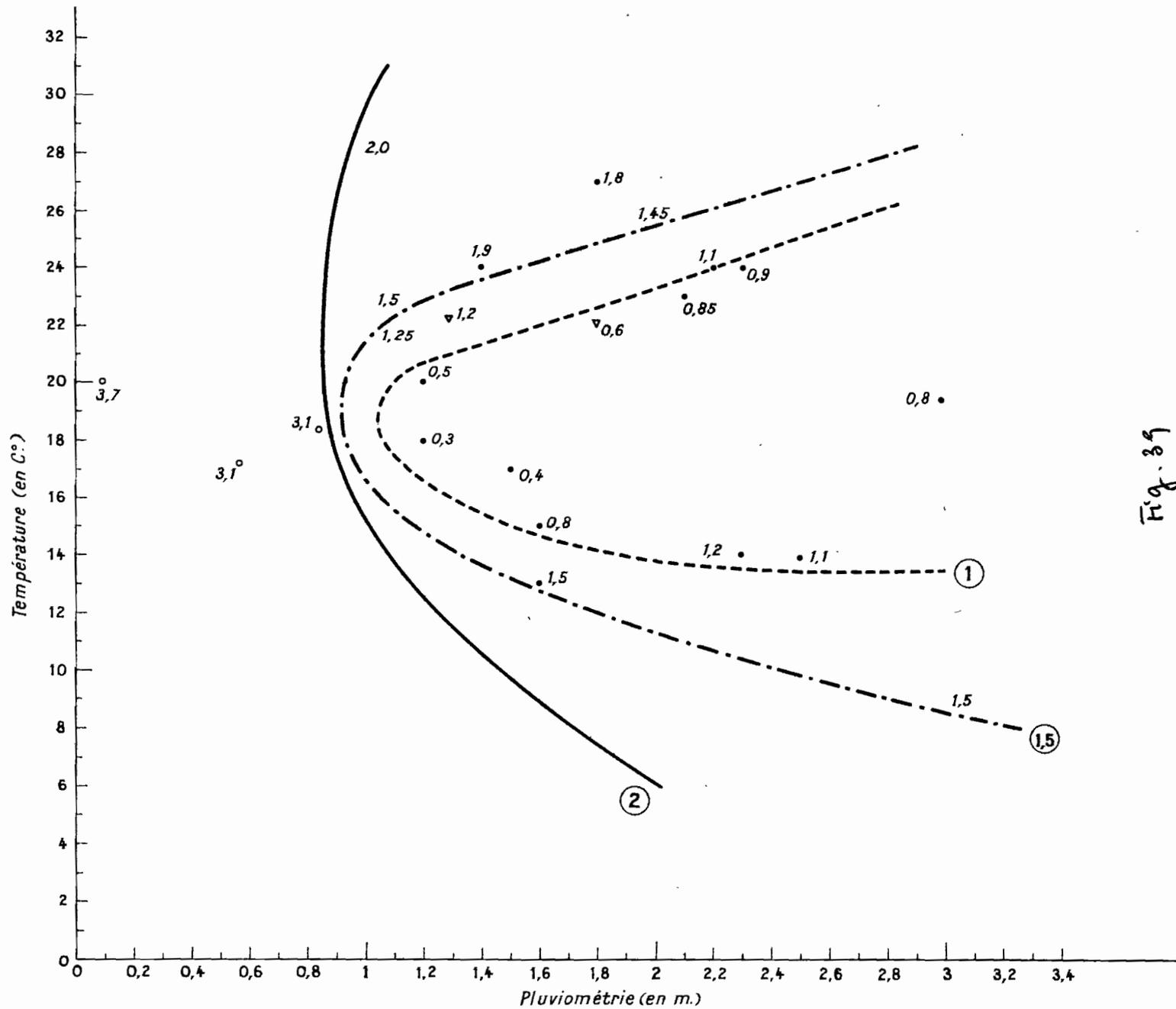


Fig. 39

Répartition des valeurs du rapport silice/alumine en fonction des valeurs climatiques.

L'examen de ce tableau permet de faire les remarques suivantes :

- a - la zone climatique couverte par Madagascar n'intéresse pas l'ensemble du graphique puisque tous les points sont situés dans la zone de pluviométrie supérieure à 1 mètre et inférieure à 3 mètres. La température descend exceptionnellement au-dessous de 10° et ne dépasse pas 30°.

- b - on peut distinguer quatre zones - une zone fraîche et très pluvieuse dans laquelle la ferrallitisation ne doit logiquement pas se produire; le point de l'île le plus proche de cette zone est le Tsiafajavona où le rapport est déjà voisin de 1,5; une zone sèche de température variable où la ferrallitisation ne se produit pas non plus; une zone pluvieuse et chaude domaine de la ferrallitisation; une zone très chaude mais relativement peu humide correspondant aux sols ferrugineux tropicaux.

La zone de ferrallitisation ne correspond donc pas à une pluviométrie et une température déterminées mais à une zone climatique de forme grossièrement triangulaire dont le sommet est situé vers le point 20° et 1m et qui englobe à la fois des régions fraîches et très chaudes.

Interprétation de ce tableau - l'eau qui tombe sur le sol, y pénètre et provoque l'altération des minéraux des roches essentiellement au moyen des ions H^+ et OH^- , qui résultent de sa dissociation. Cette altération sera d'autant plus poussée que la quantité d'eau qui tombe sera plus élevée et que la température sera plus forte. Nous savons en effet avec Van Hoff (cité par H. JENNY 134) que degré de dissociation de l'eau est une fonction exponentielle de la température. L'attaque des minéraux portera d'abord sur les minéraux primaires en produisant des minéraux secondaires qui à leur tour seront attaqués pour laisser un certain nombre de produits finaux.

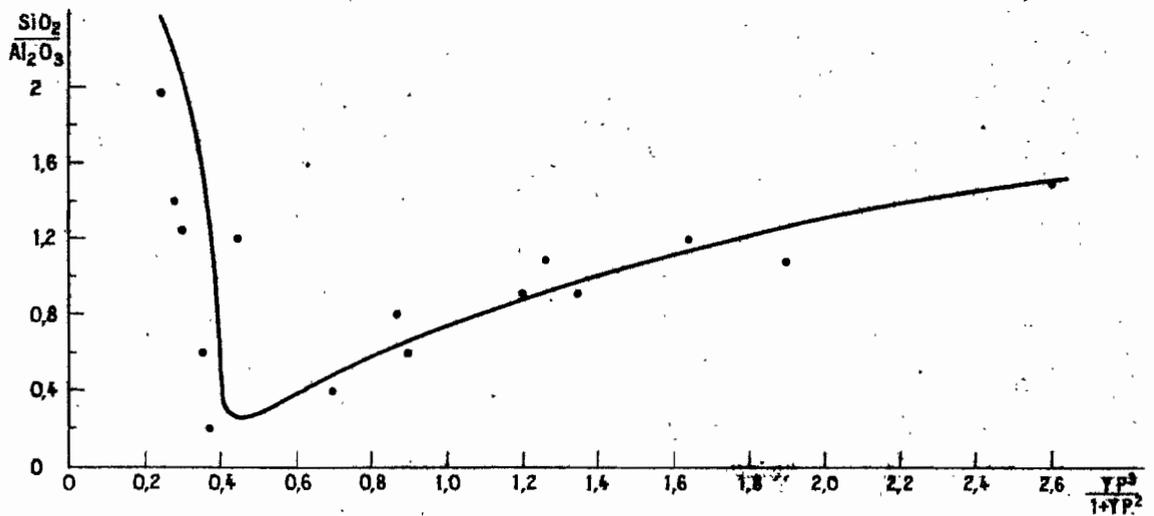
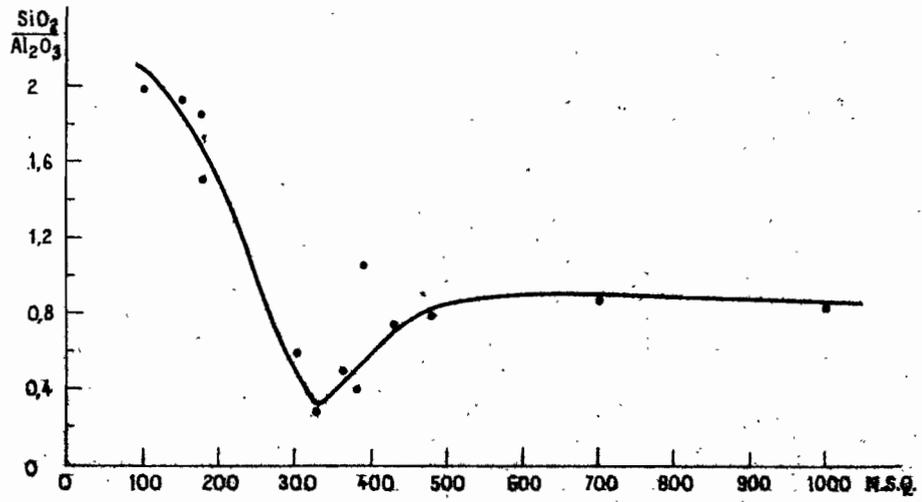
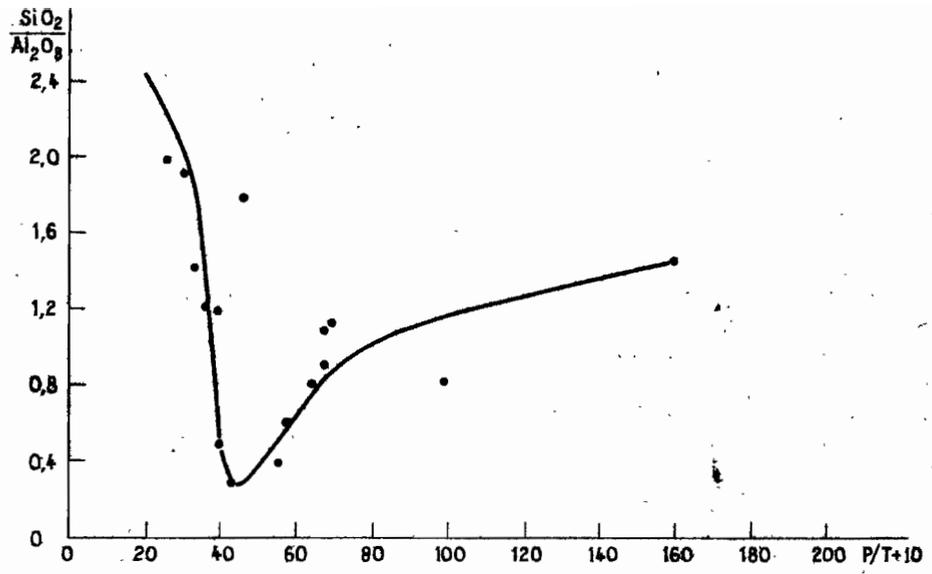
.../...

A mesure que la température augmente, on devrait avoir une ferrallitisation plus poussée. En réalité, c'est l'inverse que l'on observe, car l'évaporation devient de plus en plus importante et l'eau qui pénètre dans le sol est beaucoup moins grande que ne l'indique le chiffre de la pluviométrie. Si l'on calcule le drainage, avec la formule proposée par S. HENIN (128) on constate que pour une pluviométrie donnée, les valeurs obtenues diminuent avec des températures croissantes. Pour une pluviométrie constante $P = 1,4$ m, on obtient par exemple :

T	$D = \frac{Y P^3}{1+Y P^2}$
10	0,82
15	0,67
20	0,55
25	0,48
30	0,43
35	0,38

Il y a donc un véritable antagonisme entre les actions de la pluie et de la température. Lorsque la température est basse, la dissociation de l'eau est faible et l'altération des minéraux sera peu poussée. Lorsque la température est assez élevée et l'eau disponible abondante, les transformations de minéraux dans le sol seront particulièrement importantes. Par contre, lorsque la température est forte et la pluie modérée, l'action évaporante du milieu sera telle que les transformations seront beaucoup moins poussées que dans le cas précédent.

Nos observations permettent de conclure que : 1. Pour une température constante, le rapport Silice/Alumine diminue lorsque



la pluviométrie croît. 2. Pour une pluviométrie constante, le rapport commence par diminuer, passe par un minimum, puis augmente de nouveau.

e) Relations entre le rapport Silice/Alumine et les indices climatiques.

Il est intéressant de ramener les données climatiques à une seule valeur et d'étudier les variations du rapport en fonction de cette valeur. C'est ce que nous avons fait avec l'indice d'aridité de Martonne, le coefficient de non-saturation de Meyer et l'indice de drainage de S. Hénin.

La variation du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ en fonction des trois indices est représentée par des courbes qui ont sensiblement la même allure (Fig. 40 à 42). Notons tout d'abord que la ferrallitisation ne se produit que pour des valeurs supérieures aux chiffres suivants :

Indice d'aridité	40
Indice de non saturation	200
Indice de drainage	0,45

La ferrallitisation est maximum pour les valeurs suivantes :

Indice d'aridité	55
Indice de non saturation	325
Indice de drainage	0,7

Au dessus de ces valeurs, l'intensité de la ferrallitisation diminue graduellement. A. REIFENBERG (180) à propos des sols de Palestine, avait déjà signalé une variation de ce genre pour le rapport $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ en fonction de l'indice d'aridité. Des valeurs supérieures à 200 correspondaient aux sols bruns puis aux podzols.

.../...

B. COMPOSITION DES CONCRETIONS

Les concrétions n'existent pas dans tous les sols étudiés. Elles sont peu fréquentes par rapport à l'ensemble des sols, mais peuvent s'observer localement en très grande quantité. Les concrétions sont particulièrement abondantes dans les régions suivantes: le long de la côte Est, sur le plateau de l'Antanimena, sur le pourtour Ouest de la montagne d'Ambre. Sur les hauts-plateaux les concrétions sont rares dans les sols dérivés de roches volcaniques. On a pu en observer dans l'Ankaizinana en association avec des cuirasses. De vastes régions comme l'Ankaratra, l'Itasy, l'Analavelon en sont presque totalement dépourvues.

a) Concrétions de l'Antanimena. Ces concrétions sont généralement sphériques. Leur taille maximum est celle d'un pois chiche; elles sont très souvent beaucoup plus petites. Leur couleur va du rouge très sombre au noir à reflets bleutés. Elles présentent quelques couches minces concentriques vers l'extérieur et sont massives au centre.

Les concrétions ne sont que rarement concentrées à un niveau déterminé; elles existent en général réparties dans l'ensemble d'un profil à des profondeurs variables entre 0 et 2 mètres. Entre 1,5 et 2 mètres elles deviennent moins nombreuses et disparaissent au-dessous.

De vastes régions de l'Antanimena sont dépourvues de concrétions, elles apparaissent dans certains sols rouges et sont toujours observées dans les sols jaunes. Il n'a pu être observé de cas de mauvais drainage dans ces sols.

Il est intéressant de comparer la composition des concrétions entre elles et celles des concrétions avec celle des sols.

.../...

	No. Echant.	SiO ₂ %	AlO ₂ ³ %	FeO ₂ %	TiO ₂ %	H ₂ O%	SiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	
							Al ₂ O ₃	R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	
Sols Ferrugineux Tropicaux Rouges	13-412	(concr.)	17,5	9,8	54,8	2,6	13,6	3,03	0,66	3,56
		(sol.)	27,6	24,2	26,2	2,95	16,6	1,94	1,15	0,69
	12-541	(concr.)	12,2	11,4	55,3	0,7	16,9	1,74	0,44	3,10
		(sol.)	28,6	26,9	23,8	3,65	14,3	1,80	1,15	0,55
	12-542	(concr.)	14,4	18,2	54,3	0,7	11,9	1,34	0,46	1,91
		(sol.)	29,9	27,3	22,8	3,55	14,7	1,86	1,21	0,53
12-543	(concr.)	12,0	13,6	58,4	0,6	14,4	1,50	0,40	2,66	
	(sol.)	29,5	27,2	23,6	3,8	14,7	1,85	1,18	0,55	
Sol Ferrugineux Tropical jaune	12-252	(concr.)	16,6	13,6	52,0	0,7	14,1	1,73	0,56	2,04
		(sol.)	29,5	27,1	21,6	2,75	16,6	1,85	1,22	0,69
	12-253	(concr.)	13,9	11,6	58,2	0,35	14,0	2,04	0,48	3,21
(sol.)		28,1	25,55	24,6	3,0	15,8	1,87	1,16	0,61	

Lorsqu'on examine la composition des concrétions et celle du sol qui les entoure on constate que :

- Les teneurs en fer sont nettement plus élevées dans les concrétions (de 50 à 58% dans les concrétions alors que l'on n'a que 20 à 26 % dans le sol).

- Les teneurs en alumine, silice et presque toujours titane ont fortement diminué.

- Le rapport Silice/Alumine a varié. Dans deux cas il a augmenté, dans deux il est resté stationnaire, dans deux cas il a légèrement diminué. Toujours les teneurs en silice sont appréciables.

.../...

Explication proposée: Il y a apport d'oxydes de fer de l'extérieur qui se concentre en des points privilégiés, généralement bas. Dans certains cas ce concrétionnement peut s'accompagner de la mise en liberté d'une faible quantité d'alumine; dans d'autres cas il n'y a aucun enrichissement en alumine.

b. - concrétions de la bande côtière Est. Ces concrétions n'ont pas de taille et de forme bien définies. Elles atteignent souvent 1 à 2 cm (parfois on rencontre de gros blocs de 10 à 15 cm) et sont rarement sphériques comme celles de l'Antanimena; leur aspect est assez contourné. Elles ne présentent pas d'écailles concentriques et sont rouge sombre à l'intérieur et noires à l'extérieur.

Leur place dans les profils est constante et s'observe avec beaucoup de régularité dans toute la région basaltique de la côte Est. Rappelons qu'elles sont situées de la manière suivante :

Entre Farafangana et Vangaindrano :

- | | |
|------------|---|
| 0 à 5 cm | Brun; racines enchevêtrées nombreuses; un peu de limon, quelques concrétions. |
| 5 - 35 cm | Brun; concrétions de toutes tailles (0,2 à 2 cm) avec très peu de sol. |
| 35 - 60 cm | Brun; argileux; polyédrique et quelques concrétions, etc... |

Les horizons riches en concrétions peuvent être notablement plus épais et atteindre 50 à 80 cm; ils sont alors exploitables par le Service des Travaux Publics, qui emploie cette "grenaille" au rechargement des routes. Les profils renferment des concrétions en abondance occupent presque toujours des pentes moyennes à fortes. Lorsque le terrain est plat, les concrétions peuvent exister encore mais sont très fréquemment remplacées par de gros blocs qui passent à la cuirasse caverneuse.

.../...

C'est entre Farafangana et Vangaindrano que les concrétions sont les plus abondantes. Au Sud de cette dernière localité elles sont moins nombreuses, tandis que'au Nord de Farafangana on en trouve encore jusqu'à Vohipeno. Près de Manakara, à Mananjary, on peut observer des profils entièrement dépourvus de concrétions, d'autres où les concrétions sont présentes en petit nombre, mais toujours à la même place.

Une caractéristique intéressante est la variation de la composition lorsque l'on va de Vangaindrano au Sud à Mananjary au Nord.

Localité	No Echan.	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	H ₂ O%	SiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	
							Al ₂ O ₃	R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	
Sud	Vangaindrano	E 41	2,95	16,8	53,7	3,7	19,9	0,38	0,09	2,24
	Lopary	E 31	3,1	22,2	47,4	3,6	21,6	0,23	0,10	1,37
	Ankarana	E 21	0,5	19,4	56,0	2,3	19,4	0,04	0,01	1,84
	FarafanganaS	E 11	5,7	14,4	56,5	2,7	18,6	0,64	0,12	2,50
	FarafanganaN	E 61	4,5	32,8	33,6	4,2	22,1	0,23	0,14	1,09
	Manakara	E 81	0,8	34,7	38,4	3,9	19,8	0,03	0,01	0,70
	Irondro	E 91	16,6	19,3	33,4	6,3	21,4	1,46	0,67	1,10
Nord	Mananjary	E 111	17,5	24,95	27,9	5,7	21,9	1,19	0,69	0,71

Ces valeurs montrent que de Vangaindrano à Farafangana les teneurs en oxyde de fer varient entre 47,4 et 56,5% et s'abaissent graduellement au Nord de cette localité de 38,4 à 27,9%. Corrélativement, l'alumine relativement faible au Sud a tendance à augmenter vers le Nord: une remarque analogue peut être faite pour les teneurs en silice. Le rapport Silice/Alumine qui présente des valeurs variables mais faibles (0,04 à 0,64) augmente

.../...

notablement et atteint 1,2 et 1,4. Le rapport Fe_2O_3/Al_2O_3 présente de fortes valeurs au Sud; au Nord elles sont nettement plus faibles.

La comparaison entre la composition des concrétions et celle du sol est moins aisée (dans certains cas), par suite de très faibles quantités de terre fine entre les concrétions. Toutefois, il est possible d'effectuer partout des comparaisons avec le sol se trouvant immédiatement au-dessous.

Localité	N° Echantillon		SiO ₂	AlO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	H ₂ O	SiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
			%	%	%	%	%	Al ₂ O ₃	R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Vangaindrano	E 41	{ concr.	2,95	16,8	53,7	3,7	19,9	0,38	0,09	2,24
		{ sol.	10,8	19,2	38,4	7,7	21,4	0,95	0,42	1,27
Farafangana	E 61	{ concr.	4,5	32,8	33,6	4,2	22,1	0,23	0,14	1,09
		{ sol.	16,2	24,3	31,4	3,3	22,9	1,13	0,62	0,82
Mananjary	E 111	{ concr.	17,5	24,95	27,9	5,7	21,9	1,19	0,67	1,10
		{ sol.	24,4	22,6	31,0	1,4	18,8	1,84	0,98	0,87

Ces comparaisons montrent que le passage du sol à la concrétion s'effectue avec enrichissement en fer, mais également avec départ de silice, puisque l'on assiste dans la plupart des cas à un abaissement important du rapport Silice/Alumine. Dans cette région de la côte Est, le cuirassement pourrait représenter le terme ultime du concrétionnement, puisque dans les cuirasses, si les teneurs en silice sont aussi faibles, celles en oxydes de fer sont encore plus élevées et en alumine légèrement plus faibles.

Près de Mananjary, par contre le concrétionnement ne semble pas s'être accompagné d'un gros départ de silice. Il s'agit plutôt du durcissement d'un matériau préexistant.

.../...

En résumé il semble qu'on puisse distinguer trois modes de concrétionnement :

- 1) Durcissement d'un matériau préexistant avec apport modéré de fer mais avec départ appréciable de silice (Mananjary).
- 2) Durcissement accompagné d'apport d'oxyde de fer important avec peu ou pas de départ de silice (Antanimena).
- 3) Durcissement accompagné d'apport d'oxydes de fer et départ important de silice (Vangaindrano-Farafangana).

Dans ce chapitre, nous avons étudié successivement le rapport Silice/Alumine du sol et la composition des concrétions fréquentes dans certains profils.

Le rapport Silice/Alumine, en dépit de certaines divergences d'opinion à son sujet, nous paraît susceptible d'être utilisé pour caractériser un sol dérivé de roches volcaniques basiques. La valeur 2,0 de ce rapport est utilisée pour séparer les sols ferrallitiques des autres sols de l'île.

Le rapport peut rester stable dans un profil ou bien diminuer de la profondeur vers la surface et croître de nouveau. Ce dernier mode de variation est caractéristique des sols ferrallitiques humifères. Le rapport diminue avec l'altitude en montagne d'Ambre; il augmente au contraire dans l'Ankaratra. Ceci tient surtout aux variations de température. Les résultats obtenus dans le Haut Ankaratra nous permettent de constater que la ferrallitisation est possible dans des régions même fraîches pourvu que la pluviométrie soit suffisante.

Il est possible de relier la ferrallitisation avec les valeurs climatiques et un certain nombre de rapports dérivant de ces valeurs. Il est possible de mettre en évidence une zone climatique où l'intensité du processus est maximum.

.../...

L'étude de la composition des concrétions permet de constater qu'elles sont de nature assez variable et que d'une façon générale, elles diffèrent sensiblement du sol environnant. Dans la plupart des cas, elles résultent du durcissement d'un matériau enrichi en fer, avec ou sans départ important de silice. Notons que les concrétions où le départ de silice est peu important appartiennent à la région Ouest caractérisée par l'absence de ferrallitisation.

.../...

--CHAPITRE 10--

Etude de la Fraction argile

La fraction argile, au sens granulométrique, du sol, qu'il soit tempéré ou tropical, est celle qui paraît la plus susceptible de donner des renseignements valables sur sa genèse et son mode d'évolution. Cette fraction a été étudiée dans tous les sous-ordres : ferrallitique, ferrugineux tropical, hydromorphe, ainsi que dans les sols jeunes. Alors que les premiers permettent de connaître l'état actuel du sol, les sols jeunes sont susceptibles de nous fournir de précieux renseignements sur l'état antérieur du sol, les stades intermédiaires par lesquels il est passé avant de prendre l'état que nous lui connaissons actuellement.

Les argiles ont été étudiées suivant des techniques très différentes : par l'analyse chimique, par étude thermo-pondérale, par analyse thermique différentielle et par examen aux rayons X.

a) Analyse chimique - L'attaque de l'argile a été effectuée par le réactif triacide de J. BAYENS (216) précédemment utilisé pour le sol entier. La silice et les différents métaux ont été dosés suivant des techniques qui ont été exposées en détail par ailleurs (223). Les rapports $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ont été calculés.

La capacité d'échange de bases des argiles a été déterminée suivant une semi-microméthode inspirée de R.C. MAC KENZIE (221)

.../...

b) Analyse thermo-pondérale - Cette analyse a été conduite de deux manières différentes. A l'Institut de Recherches Scientifiques de Madagascar, c'est la méthode par points préconisée par E.M. BASTISSE (217) qui a été utilisée.

A l'Institut d'Etudes et de Recherches tropicales, à Bondy, une thermobalance Chevenard-Joumier qui permet d'obtenir l'enregistrement de la perte de poids en fonction de la température a été employée.

Les départs d'eau suivants ont été notés :

- entre 100° et 200° : eau hygroscopique ; eau des hydroxydes colloïdaux ; eau d'absorption de la montmorillonite.
- vers 250° : eau de constitution des hydroxydes cristallisés.
- entre 400° et 600° : eau de constitution de minéraux comme la kaolinite.

Dans les cas envisagés, il n'y a jamais de carbonates : les seules substances présentes sont des oxydes, hydroxydes ou silicates phylliteux.

c) Analyse thermique différentielle. L'appareil utilisé à l'IDERT comprend les éléments suivants : trois couples thermo-électriques, un four électrique et un enregistreur de coordonnées (Le chatelier-Saladin). On a opéré avec le maximum de sensibilité ; la montée en température dure environ deux heures (de 20° à 1000°).

Les courbes obtenues présentent les traits suivants :

Crochets endothermiques :

Entre 100° et 200° : eau hygroscopique ; eau des hydroxydes colloïdaux ; eau d'absorption de la

.../...

- montmorillonite.
- vers 350°-360° : départ de l'eau des hydroxydes cristallisés.
- vers 550°-580° : départ de l'eau de constitution de la kaolinite.
- vers 600°-700° : départ de l'eau de constitution de la montmorillonite.

Crochets exothermiques :

- vers 900°-1000° : recombinaison de la silice et de l'alumine des silicates ; ce crochet est parfois simple, parfois multiple.

d) Analyse aux rayons X. Les diagrammes de rayons X ont été obtenus au laboratoire de l'I.D.E.R.T. à Bondy. L'appareil a été fourni par la North American Philips Co. avec une chambre de 114,59m Des tubes à anticathode de fer et de cuivre, donnant un rayonnement de 1,936 Å et 1,539 Å permettent d'obtenir des spectres de poudre et d'agrégats orientés.

Les raies suivantes permettent de caractériser les minéraux :

Groupe de la kaolinite : 7,15 et 3,55 Å dans le cas d'un agrégat orienté. Lorsqu'on effectue un spectre de poudre, aux raies précédentes s'ajoutent les suivantes : 4,45 - 3,65 - 2,55 Å. Dans le cas d'une métahalloysite, la raie principale passe à 7,3 - 7,4 Å
Illite : raie principale à 10,1 Å ; autre raie à 3,33 Å,
Montmorillonite : l'espacement principal est de 14 Å, lorsque l'ion Ca⁺⁺ a été employé comme flocculant. Tous nos échantillons ont été dispersés à la soude et flocculés à l'acide chlorhydrique ; la raie principale correspond à 12,3 Å. Comme caractères complémentaires, nous avons utilisé le chauffage à 500° qui élimine l'eau comprise entre les feuillets et ramène l'espacement à environ 10,0 Å ; tandis que le traitement au glycérol écarte les

.../...

feuilletés et élève l'espacement à $\approx 7 \text{ \AA}$.

Le seul minéral purement alumineux est la gibbsite caractérisé par les raies à 4,8 et 4,35 \AA . Les minéraux ferrugineux sont l'hématite (raie principale à 2,69 \AA) et la goethite. Ce dernier minéral est assez difficile à mettre en évidence aux rayons X. En définitive, sa présence sera précisée par l'analyse chimique et le calcul.

Malgré la mise en oeuvre de tous ces moyens, la détermination précise des minéraux entrant dans la composition de la fraction argile n'est pas toujours aisée. Des difficultés peuvent parfois s'élever pour l'établissement des compositions minéralogiques en particulier du fait de la présence d'impuretés colloïdales qui masquent plus ou moins les raies principales, surtout lorsqu'il s'agit de produits ferrugineux.

A. Répartition des minéraux des argiles suivant les catégories de sols.

I - LES SOLS FERRALLITIQUES.

Les sols ferrallitiques sont caractérisés par la présence dans des proportions divers de gibbsite, d'oxydes et hydroxydes de fer et d'un minéral de type kaolinique. La coexistence de gibbsite et de kaolinite se traduit par un rapport silice/alumine inférieur à 2. Les capacités d'échange ne sont pas toujours aussi faibles que l'on pourrait s'y attendre. Les courbes de perte en eau sont caractérisées par des départs d'eau importants à 250°, des départs moindres à 450°. Les courbes d'analyse thermique différentielle présentent souvent des crochets endothermiques faibles à 150° ; souvent très fortes entre 280° et 400° suivis d'un crochet endothermique à 550° un crochet exothermique d'allure variable entre 900° et 1000°. Les diagrammes de Rayons X permettent de noter les raies de la kaolinite et de la gibbsite.

.../...

Sols ferrallitiques typiques. Les argiles extraites d'un sol ferrallitique typique rouge ont été examinées en détail, nous leur comparerons d'autres argiles extraites de sols appartenant au même groupe.

Etude du profil FX 35 - Ce profil a été échantillonné sur le plateau qui s'étend immédiatement au Sud d'Imerintsiatosika à 1300 m d'altitude, à 25 km environ à l'Ouest de Tananarive. Le sol, qui est bien en place, est épais d'environ 2,5 m ; il présente une pente très douce vers le Nord et supporte une prairie de graminées.

Les résultats suivants ont été obtenus :

a) - Analyse chimique -

Profils	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	Total		
cm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
Fx351	10-11	37,1	20,9	3,9	0,55	0,65	0,4	0,2	0,3	2,3	2,3	100,9		
352	45	12,3	38,6	2,0	3,4	2,0	0,8	0,4	0,1	5,0	2,8	21,1	99,6	
353	120	22,6	37,9	1,2	3,6	0,6	0,5	0,3	0,2	2,0	2,5	1,9	100,45	
354	190	31,9	30,7	1,7	3,3	0,6	0,4	0,6	0,5	0,5	7,5	1,6	100,0	
355	450	36,4	31,3	1,7	5,2	2,6	0,5	0,4	0,8	0,1	5,6	0,1	144	100,5

.../...

	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$	$\text{F}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	Cap.Ech.
Fx 351	0,51	0,38	0,36	27,5
352	0,54	0,40	0,33	13,7
353	1,01	0,83	0,21	20,6
354	1,76	1,52	0,16	31,0
355	1,98	1,75	0,13	34,4

b) L'Analyse thermo - pondérale fournit les indications suivantes :

Départs d'eau à 100° ; assez importants vers la base du profil, peu importants vers le sommet.

Départs d'eau à 250° ; faibles à la base, deviennent de plus en plus forts à mesure qu'on se rapproche du sommet du profil.

Départs d'eau à 450° ; importants à la base du profil décroissent d'intensité à mesure qu'on approche de la surface.

c) Analyse thermique différentielle.

Crochets endothermiques :

Entre 100 et 230° ; importants à la base du profil, peu accusés au sommet.

300 et 350° ; très faibles à la base ; deviennent de
.../...

(entre 300° et 350°) plus en plus accusés à mesure qu'on approche au sommet du profil.

480° à 600° ; très fortement marqués à la base du profil deviennent de plus en plus faibles à mesure qu'on atteint la surface.

Crochet exothermique :

assez net vers 950°, à la base du profil ; devient peu aigu vers le sommet de celui-ci.

d) Examen aux Rayons X. Trois échantillons de ce profil ont été examinés aux Rayons X. Les raies suivantes ont été obtenues : Echantillon Fx 351. 7,2 Å (faible) ; 4,8 Å (forte) ; 4,35 ; 3,55 ; 2,65 (moyennes)
Echantillon Fx 353. 7,2 Å (moyenne), 4,8 Å (très forte), 4,35 Å (forte), 3,55 Å (moyenne), 2,65 Å (assez faible), 2,48 ; 1,57 ; 1,45 (moyenne).
Echantillon Fx 355. 7,35 Å (forte), 4,35 (très forte), 3,55 ; 2,5 ; 2,3 ; 1,6 Å (moyenne).

Cet ensemble de données indique la présence des constituants essentiels suivants :

- Produit kaolinique : présent en quantités variables dans tout le profil ; à la base, les teneurs sont appréciables, elles décroissent de la profondeur vers la surface.

- Gibbsite : ce produit est responsable de l'essentiel des départs d'eau à 250° à la thermobalance et des crochets endothermiques à 350° à l'analyse thermique différentielle. Il est identifié aux rayons X dans les échantillons Fx 351 et 353 par les raies à 4,8 et 4,35 Å. Au contraire de la kaolinite il augmente fortement de la base vers le sommet du profil.

- Goethite : ce produit ne peut être mis en évidence de manière directe par les différents modes d'étude utilisés. Sa présence s'impose par le calcul.

.../...

- Hématite : cet oxyde est mis en évidence aux rayons X par la raie à 2,67 Å. Il remplace la Goethite dans la partie supérieure du profil.

Etablissement de la formule minéralogique. (1)

Echantillon Fx 355. Le minéral dominant est de type kaolinique. Il n'y a pratiquement pas de gibbsite. Si toute l'eau partant entre 200° et 400° est attribuée à la goethite, celle qui part au dessous de 200° ne peut être imputée à des produits colloïdaux et par conséquent doit être liée au produit kaolinique. Environ 2 molécules d'eau doivent être liées à 1 molécule de kaolinite.

Echantillon Fx 354. Les remarques faites pour l'échantillon précédent peuvent encore s'appliquer ici. On constate toutefois que le minéral kaolinique a diminué tandis qu'une notable quantité de gibbsite est maintenant présente.

Echantillon Fx 353. La gibbsite a encore augmenté. L'eau partant au-dessous de 200° est assez faible ; on peut en conclure que le minéral argileux est maintenant de la kaolinite qui a diminué en quantité. La goethite est remplacée par de l'hématite.

Echantillon Fx 352. La kaolinite continue à diminuer tandis que la gibbsite augmente encore.

Echantillon Fx 351. La diminution de la kaolinite et l'augmentation de la gibbsite se poursuivent. La teneur en hématite s'est accrue légèrement. Les dépôts d'eau de la

(1) L'eau partant entre 400° et 600° est attribuée à la kaolinite ; celle qui part entre 200° et 400° aux hydroxydes cristallisés. L'alumine de la gibbsite est calculée en retranchant à l'alumine totale, celle qui est combinée à la kaolinite.

.../...

gibbsite et de la kaolinite sont ici mal différenciées ; aussi la formule est-elle moins aisée à établir.

	Fx 351	Fx 352	Fx 353	Fx 354	Fx 355
Kaolinite + 2 H ₂ O				77,8	86,7
Kaolinite	24,3	26,4	50,0		
Gibbsite	42,3	43,4	27,8	5,5	-tr-
Goethite				8,7	8,3
Hématite	20,9	19,7	12,8		
TiO ₂ 2 H ₂ O			5,2	4,8	3,6
TiO ₂	3,9	4,2			
Eau hygrosco.	2,5	3,0	1,8		
Matière orga.	2,5				
Total	96,4	96,7	97,6	96,8	98,2

Cet ensemble de résultats nous permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Le minéral argileux qui nous est accessible immédiatement au-dessus de la roche-mère est de nature kaolinique. On peut lui adjoindre deux molécules d'eau et le classer comme métahalloysite. Vers le sommet du profil, ce minéral est remplacé par de la kaolinite.

.../...

2. Il n'y a pas de gibbsite à la base du profil. Peu à peu, ce minéral va apparaître et croître progressivement jusqu'à proximité de la surface. En même temps, les teneurs en kaolinite vont décroître. Cette gibbsite ne peut provenir que de la décomposition de la kaolinite.

3. Le minéral ferrugineux qui apparaît à la base du profil est hydraté (goethite); en surface, il est remplacé par de l'hématite.

Autres résultats fournis par les sols ferrallitiques typiques.

Un certain nombre d'échantillons provenant de différents sous-groupes des sols ferrallitiques typiques ont également été examinés.

Voici quelques données concernant ces sols :

a) Composition chimique.

S/Groupe	Lieu	Prof. cm	No	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	H ₂ O %	H ₂ O- %		SiO ₂ Al ₂ O ₃	SiO ₂ Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃
Rouge	Ankara	45	Fx 212	107	378	167	46	5,0	243		0,46	0,36	0,28
Brun-rouge	Côte Est	65	E32	201	282	295	28	2,5	137		1,21	0,70	0,66
Brun-jaune	Base Mt Ambre	75	I282	306	276	224	12	2,8	132		1,88	1,24	0,51

b) Analyse thermo-pondérale. Les courbes de perte en eau présentent; à des degrés variables, des départs d'eau correspondant aux hydroxydes cristallisés entre 200 et 400°, et à un minéral de type kaolinique entre 400° et 600°.

.../...

c) Analyse thermique différentielle. Les courbes sont caractérisées par des crochets endothermiques entre 250° et 400° et vers 550° confirmant la présence d'hydroxydes cristallisés et d'un produit kaolinique. Lorsque le produit kaolinique est peu abondant, le crochet exothermique à 950° est peu accusé.

d) Examen aux rayons X. Les raies suivantes ont été notées :

Fx 212 4,8 Å (forte) 4,35 Å (moyenne) 2,65 Å (forte).
 E 32 7,2 Å (moy.) 4,8 Å (faible) 4,3 Å (faible) 3,6 Å (forte) 2,7 Å (moy.).
 I 282 7,2 Å (moy.) 4,45 (faible) 4,15 (faible) 3,6 Å (forte) 2,65 Å (faible).

Cet ensemble de résultats montre que ces échantillons renferment les mêmes constituants que ceux qui avaient été trouvés dans le sol caractéristique précédent.

Sols ferrallitiques humifères.

A. Sols bruns. Le sol Fx 1 provenant de l'Ankaratra (Station forestière de Manjakatempo, à 1800 m d'altitude, a été choisi pour caractériser le sous-groupe.

a) Composition chimique

No	Prof cm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	OH ⁻	H ₂ O+	Total
Fx11	0-10	825	419	8,0	22	058	025	075	020	040	62	31,2	99,55
12	50	945	374	18,9	24	051	025	040	015	025	26	27,6	99,9
13	110	249	391	13,3	04	094	030	040	025	030	29	18,3	101,1
14	150	225	301	19,5	32	089	030	025	035	040	27	12,3	99,35
No		SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	Cap	Ech.							
Fx11		0,33	0,29	0,12		38,1							
12		0,42	0,32	0,32		12,5							
13		1,08	0,89	0,21		8,0							
14		1,60	1,16	0,41		17,5							

.../...

b) L'analyse thermo-pondérale donne les indications suivantes :

Les départs d'eau au dessous de 200° sont assez importants pour les échantillons de surface (jusqu'à 6 %) , moindres en profondeur. Les départs d'eau entre 200 et 400° deviennent de plus en plus importants de la base au sommet du profil étudié. Les départs d'eau entre 400° et 600°, importants à la base du profil, diminuent au contraire vers le sommet du profil.

c) A l'analyse thermique différentielle, on note les crochets suivants :

Crochets endothermiques.

entre 100 et 250° : peu accusés sauf au sommet du profil.

entre 300 et 400° : peu importants à la base du profil, deviennent de plus en plus accusés à mesure qu'on approche de la surface.

entre 500 et 600° : fortement marqués à la base du profil, deviennent faibles en surface.

Crochet exothermique.

Le crochet situé entre 950° et 1000° n'est bien marqué qu'en profondeur.

d) Examen aux rayons X. L'échantillon Fx 13 a fourni les raies suivantes : 7,25 Å (assez large et forte), 4,85 Å (forte), 4,35 Å (très forte), 3,55 Å (moyenne), 2,55 et 2,35 Å (moyennes).

Cet ensemble de résultats indique que les mêmes produits que dans les sols précédents sont présents dans ce profil.

Etablissement de la formule minéralogique.

Echantillon Fx 14. Dès la base du profil, une forte quantité d'un minéral kaolinique est présent ainsi qu'une teneur déjà

.../...

appréciable en gibbsite.

Echantillon Fx 13. La kaolinite a diminué, tandis que la gibbsite a augmenté.

Echantillon Fx 12. Le minéral kaolinique a diminué fortement. Une certaine quantité d'eau partant avant 200° peut lui être attribué. Le fer et le titane sont sous forme hydratée.

Echantillon Fx 11. Le minéral kaolinique continue de diminuer tandis que la gibbsite croît. Un peu de matière organique est présente dans cet échantillon.

Les compositions sont groupées dans le tableau suivant :

	Fx 11	Fx 12	Fx 13	Fx 14
Kaolinite	17,7	20,3	55,0	60,9
Gibbsite	53,6	45,6	27,5	9,4
Goethite	9,0	20,9	14,6	21,6
TiO ² 2 H ² O	3,2	3,4	0,5	3,2
Eau hydr.	6,5	2,6	2,8	2,7
Mat. Org. Résid.	9,9	4,9	-	-
T o t a l	99,9	97,7	100,5	97,8

L'étude des argiles de ce profil montre que, comme dans le sol ferrallitique typique, le minéral kaolinique formé au-dessus de la roche-mère diminue très fortement depuis la profondeur jusqu'à la surface, tandis que la gibbsite augmente très fortement. L'hydratation des minéraux est incomplète à

.../...

à la base du profil tandis qu'elle est très poussée en surface. Il n'a pas été possible de se débarrasser complètement de la matière organique de l'échantillon Fx 11 ; elle doit être très résistante à l'action oxydante de l'eau oxygénée.

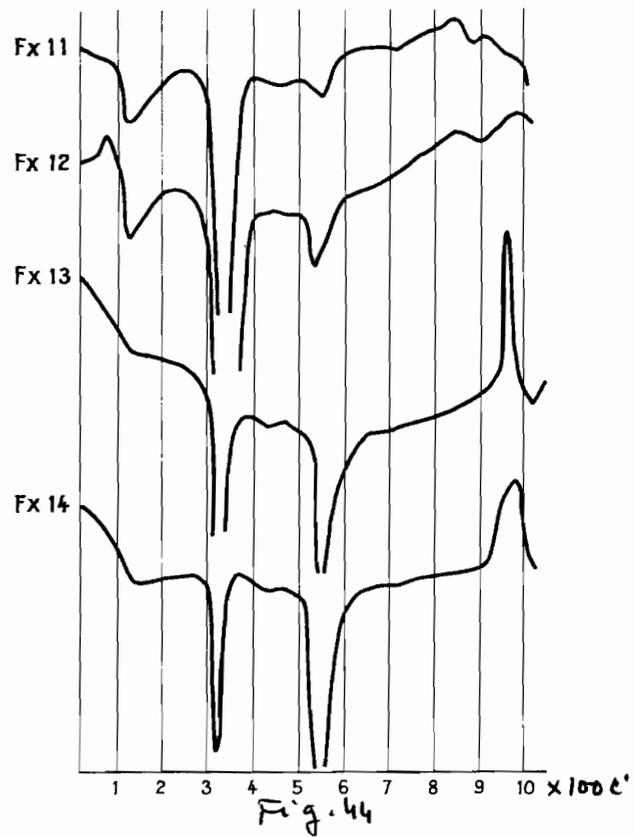
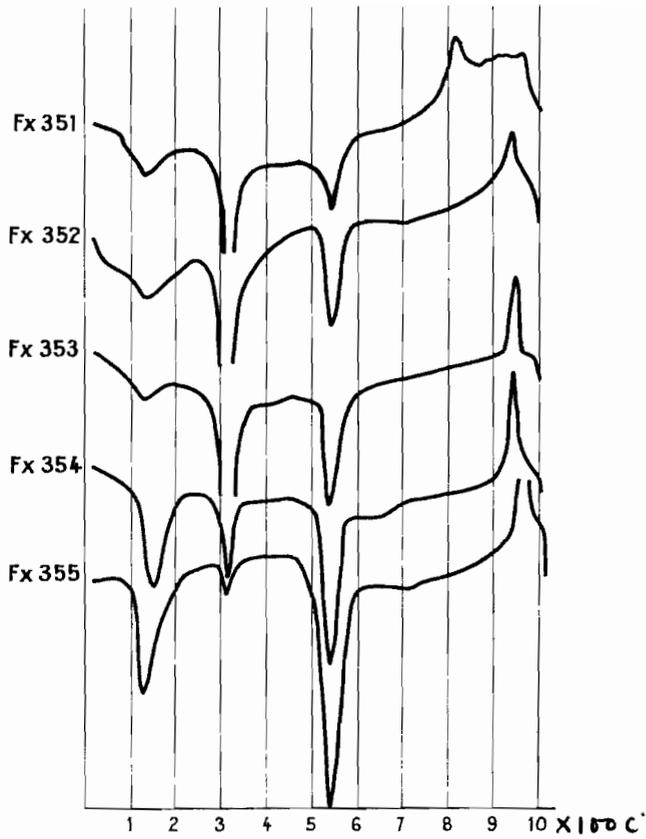
B. Sol Ando. Le profil Fx 28, échantillonné à 2300 m dans l'Ankaratra a été choisi pour caractériser le sous-groupe. Seuls les échantillons de profondeur sont étudiés, en raison des trop grandes quantités de matière organique présentes en surface et dont il est impossible de se débarrasser.

a). Composition chimique.

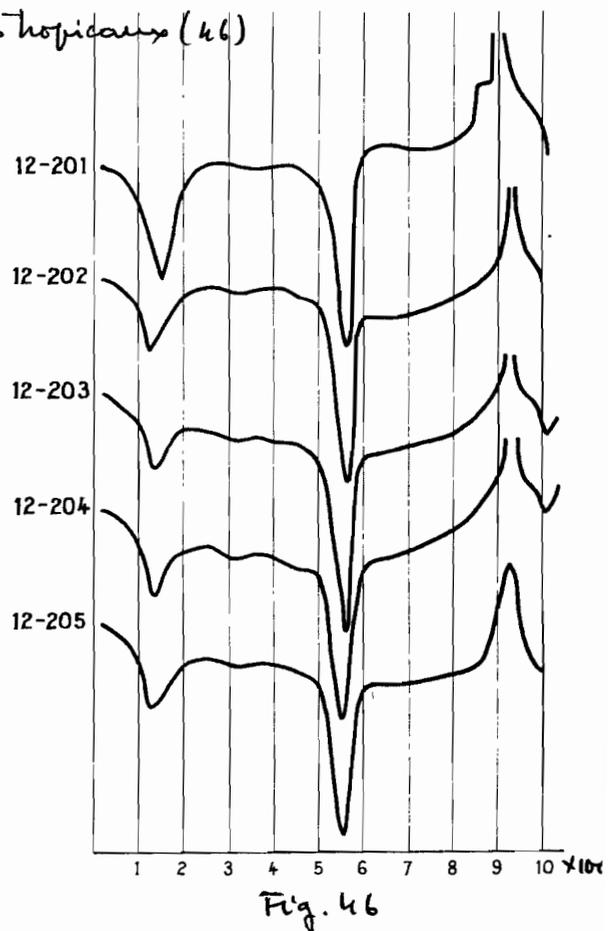
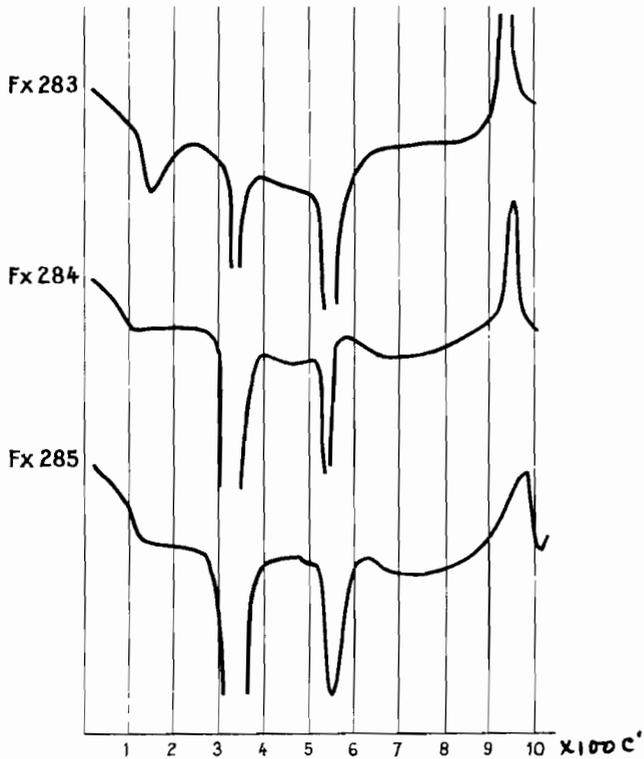
No.	Prof cm.	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	CaO %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	H ₂ O %	H ₂ O+ %	Total
Fx 283	45	26,9	33,4	9,6	1,2	0,4	0,25	0,50	0,15	0,55	5,2	21,0	99,5
284	60	26,7	44,1	3,9	0	0,37	0,25	0,50	0,20	1,15	2,5	21,7	100,4
285	85	23,1	45,9	2,8	0	0,39	0,25	0,75	0,15	2,35	3,5	23,1	100,3

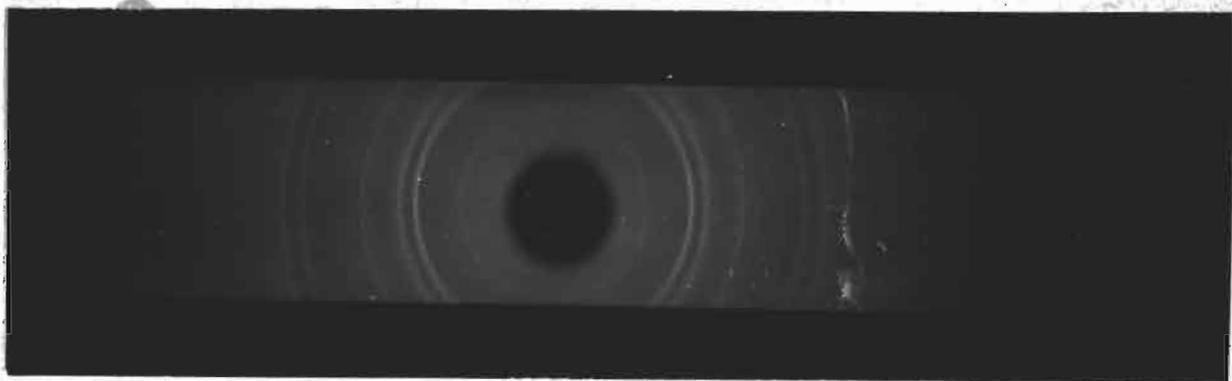
No.	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃	Cap. Ech.
Fx 283	1,37	1,16	0,18	34,5
284	1,03	0,97	0,03	16,8
285	0,85	0,82	0,03	15,5

.../...

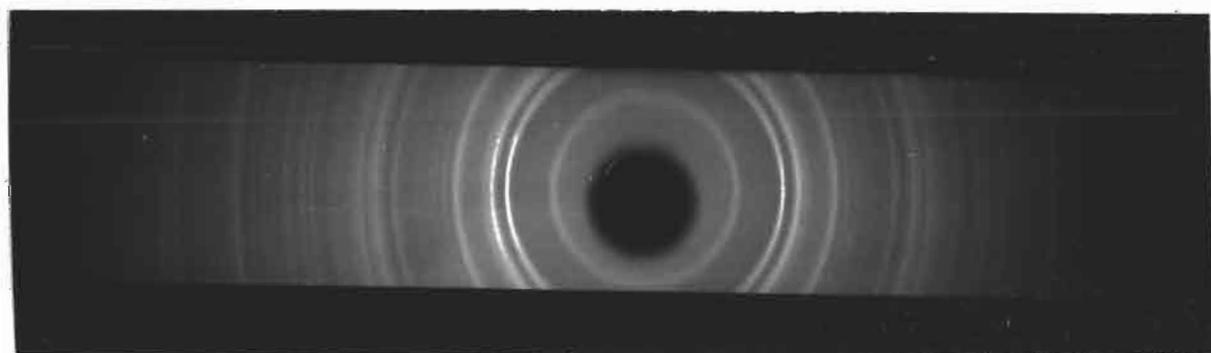


Courbes d'analyse thermique différentielle
 (sols Ferrallitiques (43, 44, 45), sols ferrugineux tropicaux (46))

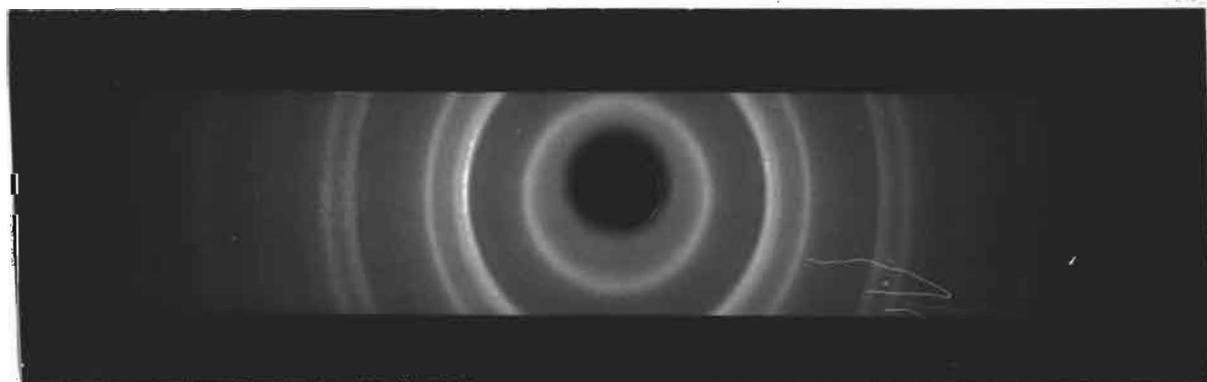




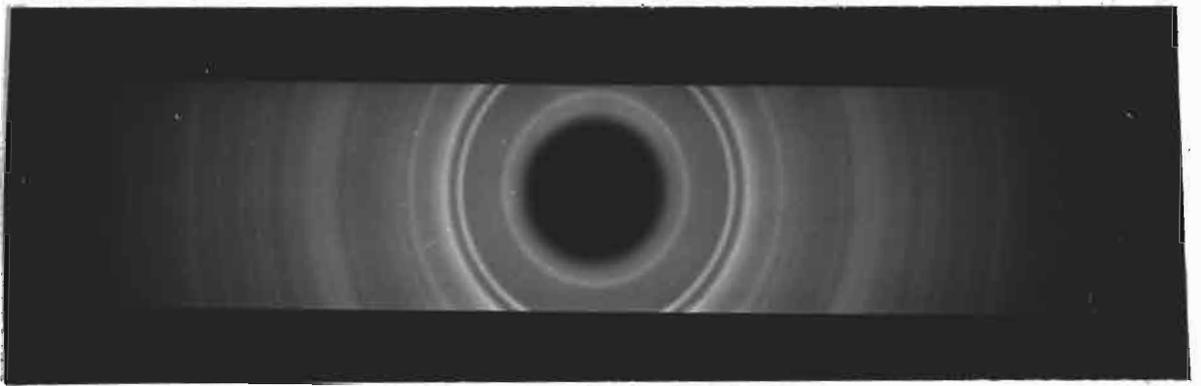
Fx 351 Spectre de poudre



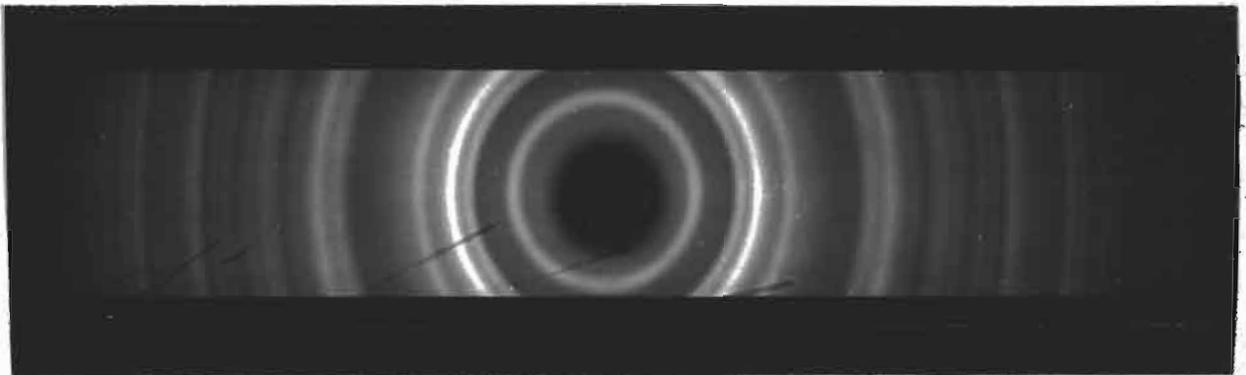
Fx 353 Spectre de Poudre



Fx 355 Spectre de Poudre



Fx 13 Spectre de Poudre



Fx 13 Spectre de Poudre de raffinée

b) Analyse thermo-pondérale. Les trois échantillons présentent des courbes de perte de poids analogues caractérisées par une perte importante entre 200 et 400°, suivie d'une autre entre 400 et 600°. seul l'échantillon Fx 283 présente une perte de poids notable avant 200°.

c) Analyse thermique différentielle. Les trois courbes présentent des crochets endothermiques importants entre 280 et 400°. Le crochet exothermique est nettement marqué vers 950°.

d) Examen aux rayons X. L'échantillon 283 présente les raies suivantes :

7,15 - 4,5 - 3,55 Å attribuées à la kaolinite.
4,8 Å attribuée à la gibbsite.

Etablissement de la formule minéralogique.

Toute l'eau doit être attribuée entre 200 et 400° aux hydroxydes cristallisés, entre 400° et 600° à la kaolinite. Les compositions sont rassemblées dans le tableau suivant :

	Fx 283	Fx 284	Fx 285
Kaolinite	58,5	56,5	48,3
Gibbsite	16,3	33,2	44,3
Goethite	10,6	4,3	3,3
TiO ₂ 2H ₂ O	1,7	-	-
Eau hygr.	5,5	2,7	3,5
Mat. Org, rest	6,1	-	-
T o t a l	99,7	96,7	99,4

.../...

II. LES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX.

Dans les sols ferrugineux tropicaux, les produits d'altération de la roche mère ne renferment pas de gibbsite, mais des produits de nature kaolinique associé à des oxydes ou hydroxydes de fer.

Un profil caractéristique 12-20 a été échantillonné sur le plateau de l'Antanimena à une cinquantaine de kilomètres à l'Ouest de Marovoay. L'étude des argiles a fourni les résultats suivants :

a) Composition chimique.

No	Prof. cm	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	CaO %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	H ₂ O- %	H ₂ O+ %	Total
12201	0-10	35,4	24,5	17,9	0,5	10,48	0,2	10,75	0,20	0,35	5,0	14,4	99,5
202	50	36,1	27,4	17,5	0,6	10,31	0,2	10,80	0,15	0,35	2,5	13,4	99,3
203	150	36,8	27,7	17,0	0,4	10,42	0,2	10,80	0,15	0,35	2,8	13,1	99,7
204	180	36,8	26,6	16,7	0,4	10,45	0,2	11,05	0,25	0,40	3,6	12,3	98,7
205	220	38,5	28,6	11,85	0,3	10,71	0,2	10,80	0,35	0,45	3,6	12,9	98,3

No.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	Cap. Ech.
12-201	2,49	1,69	0,46	27,6
202	2,24	1,59	0,40	13,7
203	2,26	1,62	0,39	20,6
204	2,32	1,65	0,40	31,0
205	2,28	1,81	0,26	34,4

Un caractère remarquable présenté par les argiles de ce profil est une certaine constance des compositions chimiques en particulier en ce qui concerne les teneurs en silice et alumine. Les rapports silice-alumine, silice-hydroxydes et

.../...

Fe_2O_3 - Al_2O_3 varient également peu dans le profil.

b) Analyse thermo-pondérale. Les courbes de perte en eau présentent toutes les cinq les mêmes caractéristiques générales suivantes :

- entre 0 et 200° : un départ assez important, atteignant 7 % pour 12-201 et voisin de 5 % pour les autres.
- entre 200 et 400° : un départ graduel de l'ordre de 2 % pour les échantillons 12-202 à 205, plus important pour 12-201 (5 %).
- entre 400 et 600° : un départ d'eau voisin de 9 % pour tous les échantillons.

c) Analyse thermique différentielle. Les 5 échantillons donnent lieu aux phénomènes suivants :

- réactions endothermiques nettes entre 100 et 200°, très faibles vers 330°, fortement accusées entre 500 et 630°.
- réaction exothermique nettement accusée vers 950°.

d) Examen aux rayons X.

L'échantillon 12-201 (spectre d'agrégat orienté) fournit les raies suivantes : 7,25 Å (nette), 4,35 Å (floue), 3,55 Å (nette), 2,65 Å (faible), 2,50 - 2,35 - 2,25 Å (faibles). Le même échantillon déferrifié donne (spectre de poudre) les raies suivantes : 7,25 Å. - 4,38 Å (bande un peu floue vers l'extérieur) 2,55 - 2,45 - 2,30 Å. L'essentiel de ces raies peut être attribué à un produit de type kaolinique. On remarquera la disparition de la raie à 2,65 Å que nous pourrions attribuer à la goethite.

L'échantillon 12-205 (spectre d'agrégat orienté) fournit les raies suivantes : 7,25 - 4,38 - 2,65 et 2,30 Å. Un produit kaolinique est encore associé à de la goethite.

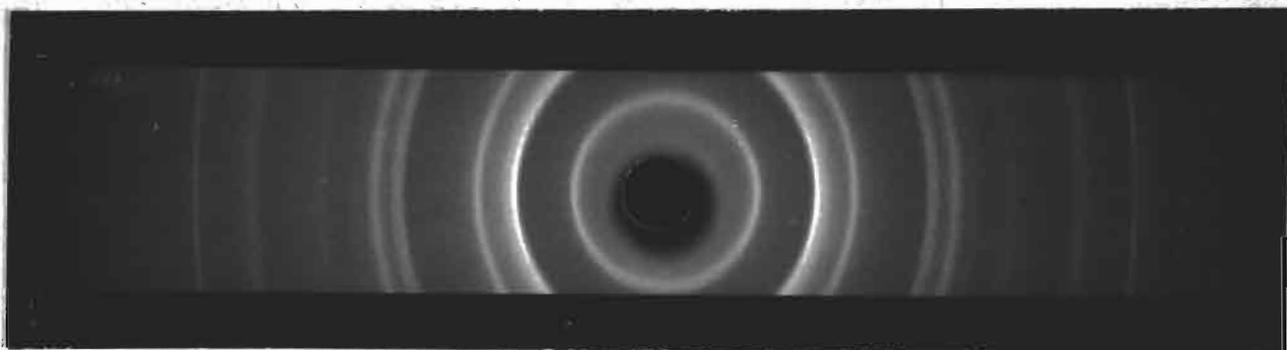
.../...

Cet ensemble de données permet de conclure à la présence simultanée d'un produit kaolinique et de goethite. Cependant deux remarques peuvent être faites :

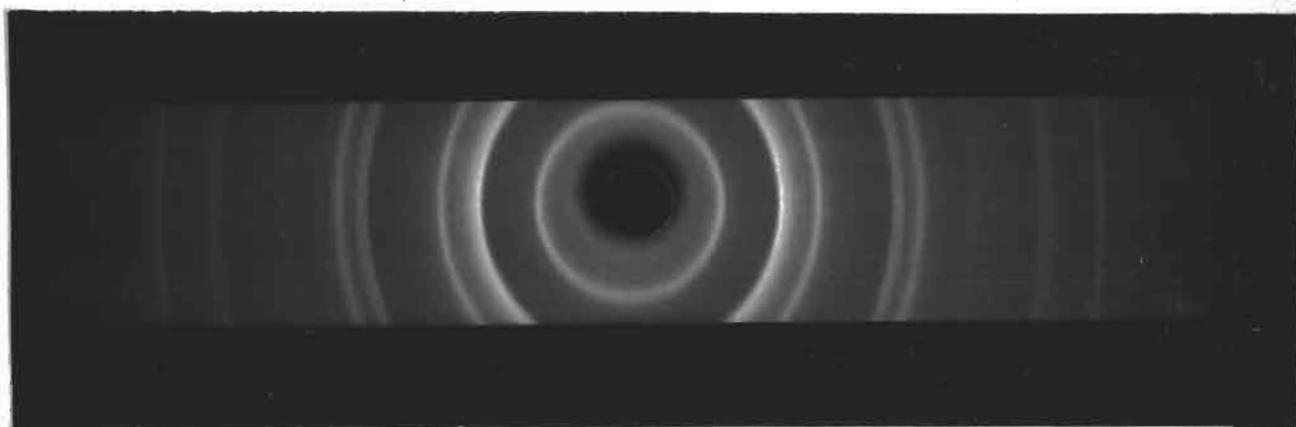
Bien que la présence d'un minéral de type kaolinique ne fasse pas de doute, le rapport silice-alumine est de façon constante supérieur à 2,0. De plus, la quantité d'eau qui part avant 200° à l'analyse thermo-pondérale (confirmée par un crochet exothermique entre 100 et 200° à l'analyse thermique différentielle) est assez importante.

L'excès de silice ne peut être expliqué par la présence d'un minéral de type illite ou montmorillonite (absence de raies caractéristiques dans le spectre de rayons X, faibles teneurs en potasse). Comme les différents modes d'examen sont en faveur d'une structure kaolinique, nous sommes conduits à penser à la présence d'une certaine quantité d'un minéral hypsiliceux de type anauxite. La nature précise de ce minéral dont la formule est $3SiO_2, Al_2O_3, 2H_2O + nH_2O$, est encore assez mal connue, en particulier en ce qui concerne la place de la silice excédentaire. (G.W. BRINDLEY 75, S. CAILLIERE & S. HENIN 81, A. RIVIERE 183). Certains pensent que cette silice est logée entre les feuillets de kaolinite ; d'autres auteurs pensent qu'un certain nombre d'atomes d'Al sont remplacés par des atomes de Si dans la couche octaédrique. Des traitements à la soude diluée tiède ne nous ont pas permis d'extraire de silice. Par ailleurs, si le minéral argileux était entièrement de la kaolinite, les quantités de ce minéral calculées à partir des teneurs en eau et des teneurs en silice devraient être les mêmes. Or les deux modes de calcul donnent des résultats sensiblement différents. Ceci nous amène à penser que, sur la quantité totale de silice, une certaine quantité x est liée à de l'auxite & y à de la kaolinite. Ces deux quantités doivent être liées par les deux relations suivantes :

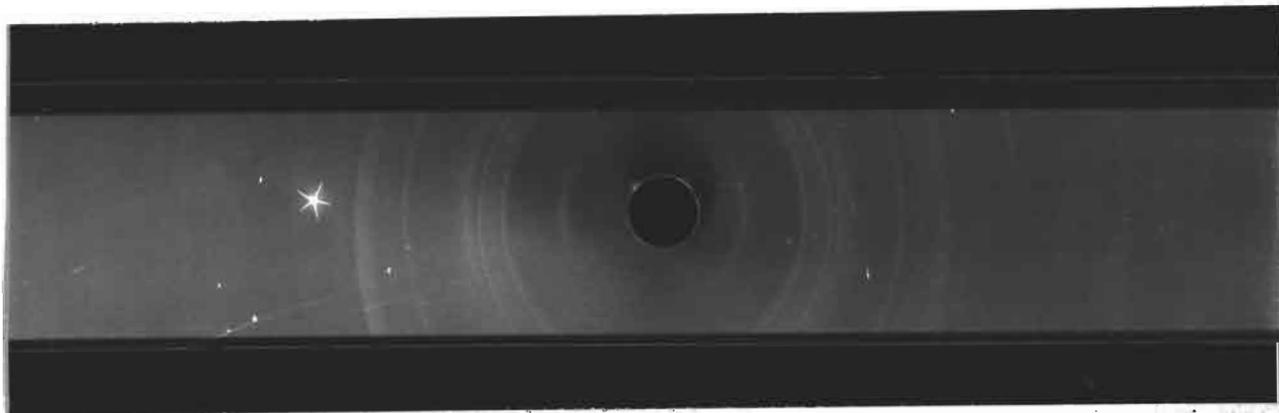
.../...



12-201 Spectre de poudre déferrifiée



12-202 Spectre de poudre déferrifiée



12-205 Spectre agrégat orienté

$$\begin{aligned}
 I \quad x + y &= \text{SiO}^2 \%. \\
 I \quad \frac{x + y}{60} &= \text{SiO}^2/\text{Al}^2\text{O}^3. \\
 \frac{\frac{102}{180}x + \frac{102}{120}y}{102} &
 \end{aligned}$$

On en tire les valeurs suivantes :

	12 - 201	12 - 202	12 - 203	12 - 204	12 - 205
X	20,7	11,7	11,9	15,1	15,9
Y	14,7	24,4	24,9	21,7	22,6

qui permettent de calculer les compositions minéralogiques :

	12 - 201	12 - 202	12 - 203	12 - 204	12 - 205
Anauxite	36,4	20,6	20,9	26,6	28,0
Kaolinite	31,6	52,5	53,5	46,6	48,6
Goethite	19,9	19,4	18,9	18,5	13,1
Div $\begin{pmatrix} \text{P}^2\text{O}^5 \\ \text{TiO}^2 \end{pmatrix}$	1,1	1,0	0,9	0,9	1,3
Eau Hygro.	7,2	4,6	4,7	5,0	5,0
Total	96,2	98,1	98,9	97,6	96,0

.../...

Ces compositions minéralogiques nous paraissent tenir compte à la fois des fortes teneurs en silice et en eau. Les échantillons contenant le plus d'anauxite sont également ceux où l'eau hygroscopique est la plus élevée.

III. LES SOLS HYDROMORPHES.

Le profil S9 étudié près de Betsioky à une centaine de kilomètres au Nord de Tuléar a été choisi pour représenter les sols hydromorphes regur. Ce sol occupe une zone plane à drainage difficile en saison des pluies. L'étude des argiles a donné les résultats suivants :

a). Composition chimique.

Prof cm	SiO ² %	Al ² O ³ %	Fe ² O ³ %	TiO ² %	P ⁵ O ⁵ %	CaO %	MgO %	K ² O %	Na ² O %	H ² O ⁻ %	H ² O ⁺ %	Total	
S 91	10-10	14,65	18,1	14,05	25	0,25	0,30	0,65	0,35	0,60	98	99	100,12
S 92	30	14,01	17,55	13,9	27	0,25	0,30	1,05	0,30	0,45	113	110	98,0
S 93	60	14,15	19,9	15,1	26	0,24	0,30	1,05	0,40	0,55	102	78	99,3

	SiO ² /Al ² O ³	SiO ² /R ² O ³	Fe ² O ³ /Al ² O ³	Cap. Ech.
S 91	4,10	2,74	0,49	76,2
S 92	3,88	2,59	0,50	90,6
S 93	3,51	2,37	0,48	68,7

b) Analyse thermo-pondérale. Les trois courbes sont caractérisées par les points communs suivants :

.../...

entre 0 et 200°, se produit un gros départ d'eau de l'ordre de 10 %.

entre 200 et 400°, a lieu un départ d'eau graduel de 2 à 3 %, entre 400 et 600°, se produit un départ d'eau de 4 à 5 %.

c) Analyse thermique différentielle. Les trois courbes présentent les traits suivants :

crochets endothermiques : très importants entre 95 et 250°, très peu marqués vers 330° ; moyens entre 500 et 650°.
crochet exothermique plus ou moins bien dessiné vers 900°.

d) Examen aux rayons X. Les spectres de rayons X manquent de netteté ; toutefois, on peut noter une raie large et intense à 12,5 Å et deux raies à 7,25 et 3,55 Å. Le chauffage à 500° fait passer la raie de 12,5 à 10,4 Å.

Cet ensemble de données permet de conclure à la présence d'une quantité appréciable de produits montmorillonitique et kaolinique associés à des hydroxydes de fer.

D'autres sols du même sous-groupe, en particulier dans la plaine de Tsivory, présentent des propriétés analogues, à savoir rapport silice-alumine élevé, courbes de perte en eau caractérisées par un fort départ d'eau entre 50 et 200° ; crochet endothermique important entre 90° et 200°. On peut en conclure que les argiles de ces différents sols sont proches les unes des autres.

Les argiles d'un profil de sol hydromorphe gris prélevé sur le plateau de l'Antanimena a été examiné par analyse thermo-pondérale thermique différentielle et aux rayons X. Les résultats fournis par l'ensemble des examens indiquent de fortes teneurs en montmorillonite.

Sur les hauts plateaux, les sols hydromorphes ne dérivent pas de matériaux volcaniques en place, mais de matériaux arrachés aux pentes environnantes et déposés dans les dépressions.

.../...

Les argiles des sols ainsi formés ont les mêmes constituants que les sols ferrallitiques qui leur servent en réalité de roche-mère (kaolinite et gibbsite).

IV. LES SOLS JEUNES.

Parmi les sols qui, par leurs caractères morphologiques, sont encore peu évolués, nous étudierons deux sols, l'un épais de 30 cm environ, le deuxième épais d'un mètre. Ces deux exemples ont été pris dans l'île de Nossi-Bé. Les argiles présentent les caractéristiques suivantes:

a) Composition chimique.

No.	Prof	SiO ²	Al ² O ³	Fe ² O ³	TiO ²	P ² O ⁵	CaO	MgO	K ² O	Na ² O	H ² O-	H ² O+
2-881	0-10	37,7	16,2	18,4	2,6	1,4	0,25	1,05	0,80	0,30	15,0	7,4
2-801	0-10	29,95	17,2	23,2	4,2	0,4					9,0	13,3
2-802	50	35,9	19,8	14,4	1,0	1,8					14,6	11,4

	SiO ² /Al ² O ³	SiO ² /R ² O ³	Fe ² O ³ /Al ² O ³	Cap. Ech.
2-881	3,96	2,29	0,72	54,3
2-801	2,91	1,60	0,86	65,0
2-802	3,08	2,10	0,46	89,0

b) Analyse thermo-pondérale. Les trois échantillons présentent un premier départ d'eau qui s'étend jusqu'à 250° et dont l'importance est de 10 à 16 % ; un deuxième départ, moins accentué, a lieu entre 400 et 600°. Seul l'échantillon 2-801 présente

.../...

un départ net entre 250 et 400°.

c) Analyse thermique différentielle.

Les échantillons 2-881 et 2-802 offrent beaucoup d'analogies : crochets endothermiques importants entre 100 et 250°, assez faibles vers 550° ; crochet exothermique assez mal dessiné vers 900°.

L'échantillon 2-801 présente au contraire deux crochets endothermiques peu profonds vers 150 et 550° ; vers 330° un crochet assez petit mais net. Le crochet exothermique à 950° est très aigu.

d) Examen aux rayons X. Comme dans les échantillons précédents, les spectres de rayons X manquent souvent de netteté. Cependant, on peut noter les raies suivantes :

2-881 raie assez large et intense vers 12,5 Å ; autres raies à 7,25 - 4,35 - 3,55 - 3,35 Å.

2-802 raie assez large allant de 12,5 à 10,25 Å ; d'autres raies à 7,15 - 3,55 - 3,35 - 2,35 Å.

2-801 raie à 12,5 Å, difficilement visible ; par contre on note des raies à 7,2 - 4,8 (faible) - 4,35 - 3,55 - 2,55 Å.

Cet ensemble de résultats permet de conclure à la présence des produits suivants : 2-881 et 2-802 montmorillonite et kaolinite avec prédominance nette du premier sur le second. Dans l'échantillon 2-801 apparaît un peu de gibbsite.

Ces exemples montrent que dans une région où existent des sols ferrallitiques, les sols jeunes, bien que normalement drainés, renferment un produit montmorillonitique, accompagné de kaolinite. Lorsque le sol s'approfondit, le produit montmorillonitique disparaît, tandis qu'un peu de gibbsite se forme.

Autres sols jeunes. Il n'a pas été trouvé de véritable sol jeune dans la zone des sols ferrugineux tropicaux. Toutefois,

.../...

dans la presqu'île du Bobaomby (Extrême Nord), les sols sont fortement rajeunis par l'érosion, en raison du déboisement total sur des pentes toujours fortes. Il a été choisi dans cette région, un échantillon de sol rouge 1-511, très mince sur une petite plate-forme où l'érosion ne paraissait pas avoir joué trop fortement. Un tel sol, tant par ses propriétés chimiques que par son comportement thermique est assez semblable aux échantillons 12-201 à 205 pris comme types.

Dans la région de Tsivory, il existe de vastes zones, où le sol est très mince et très souvent riche en carbonates de chaux. Ce sol évolue vers le type régur. L'échantillon S-172 représente un tel sol.

B. Résultats fournis par l'étude des minéraux sur la genèse des sols dérivés de roches volcaniques à Madagascar.

L'étude des minéraux des sols dérivés de roches volcaniques est susceptible de nous apporter quelques renseignements d'une part sur les minéraux qui se forment à partir d'une roche-mère volcanique basique, d'autre part sur les transformations qui se produisent à l'intérieur des sols.

A - Il est généralement admis que dans des conditions de pH acide, le minéral qui se forme à partir de roche silicatée alumineuse est la kaolinite, tandis que lorsque le pH est basique par suite de l'abondance d'ions calcium ou magnésium provenant de l'altération de la roche-mère et le minéral formé est la montmorillonite, en particulier si le drainage est insuffisant.

Or les roches volcaniques basiques sont particulièrement riches à la fois en chaux et en magnésie (8 à 15 % et 5 à 14 % respectivement). Lorsqu'une telle roche s'altère sous les effets combinés du climat et des produits de la décomposition de la matière végétale, ces bases sont les premières à être mises en liberté. Il se créera donc au voisinage de la roche-mère une zone

.../...

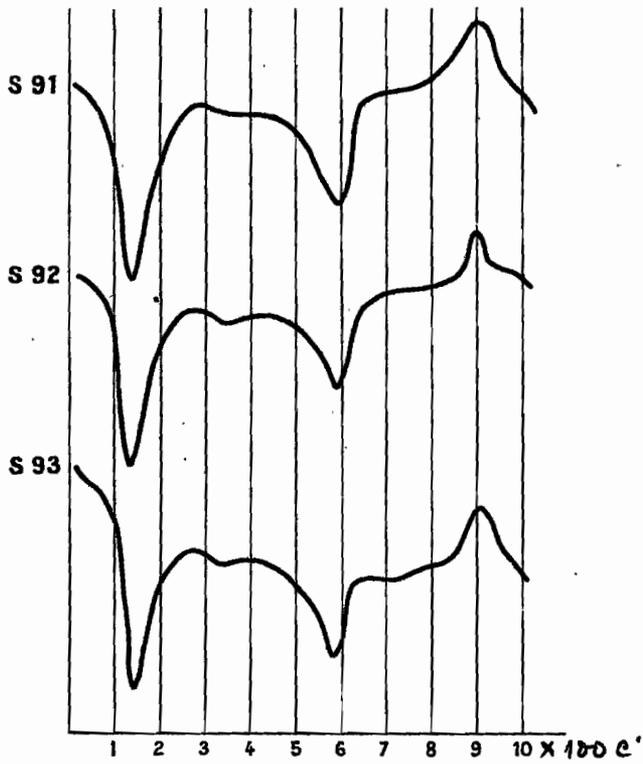


Fig. 47

courbes d'analyse thermique différentielle
Sols hydromorpha (Fig. 47 et 49); sols jeunes (Fig. 48 et 50)

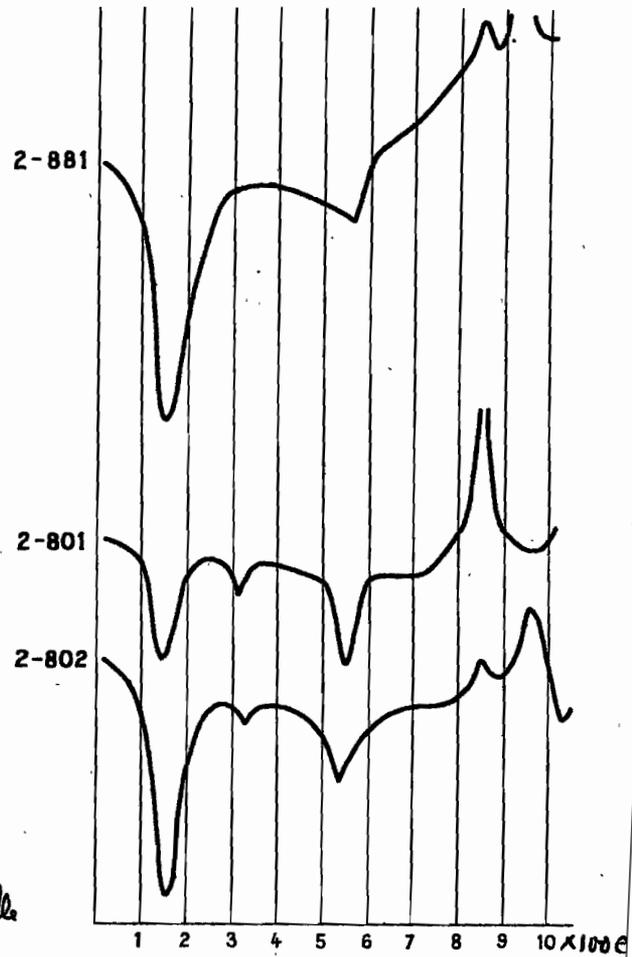


Fig. 48

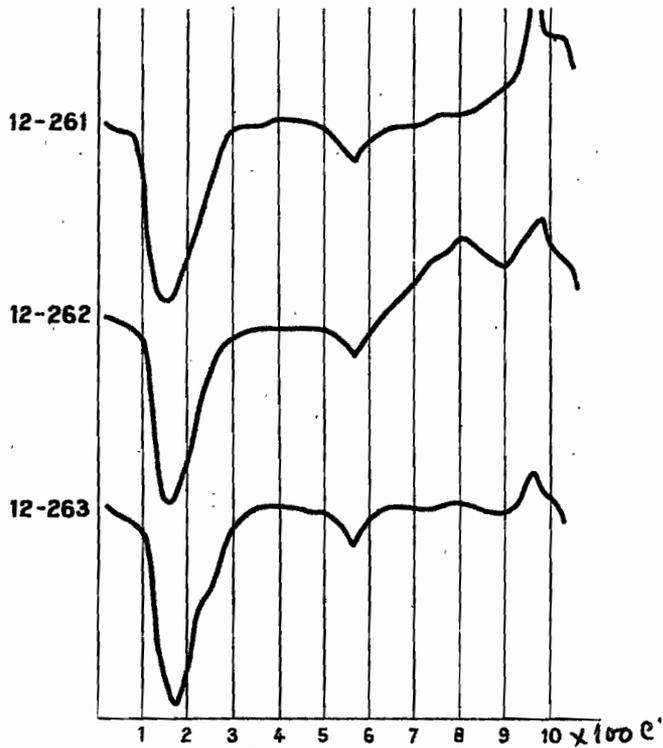


Fig. 49

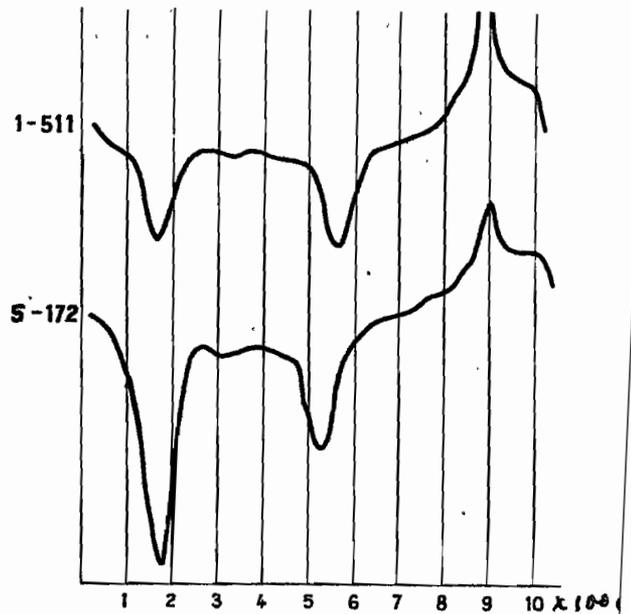
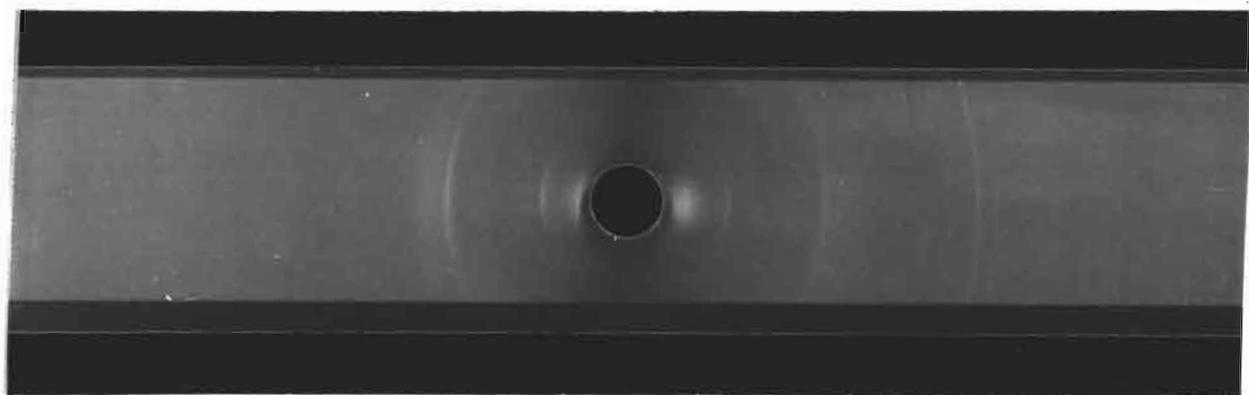
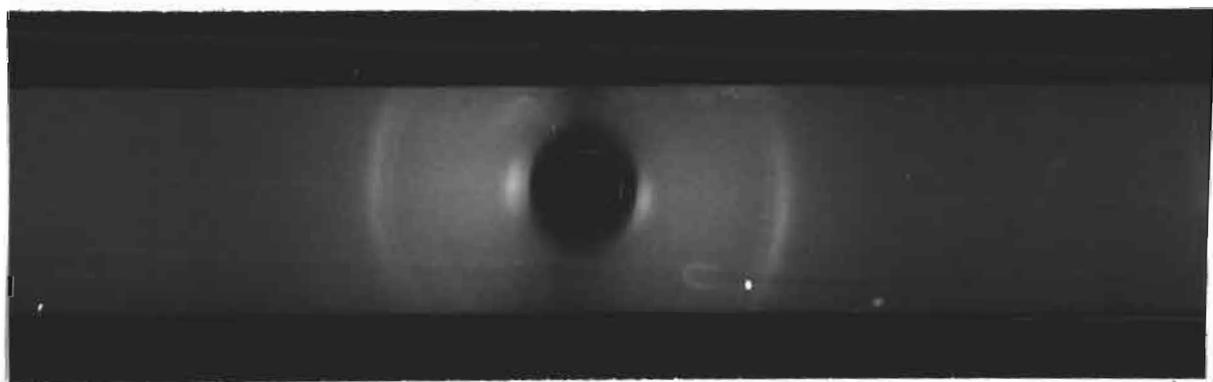


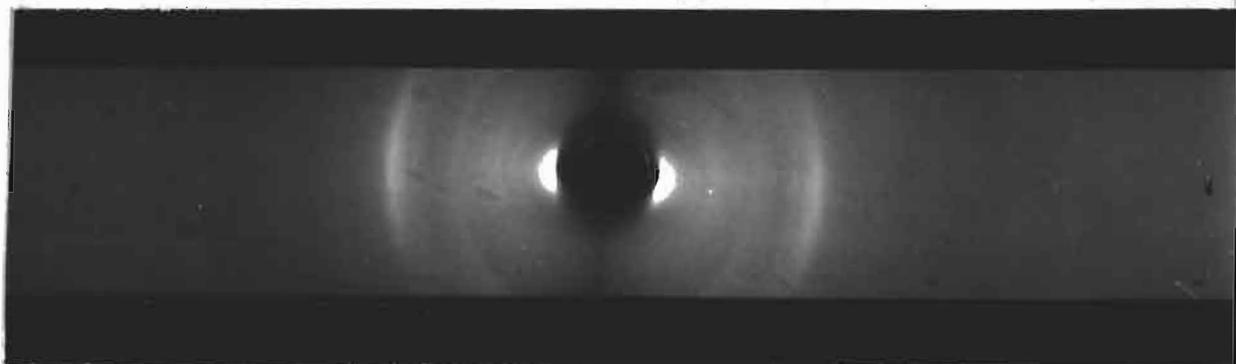
Fig. 50



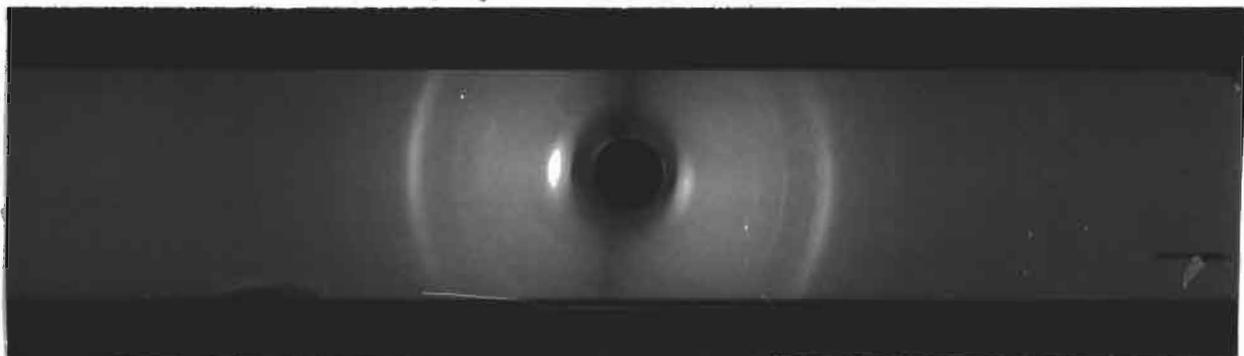
591 Spectre agrégat orienté



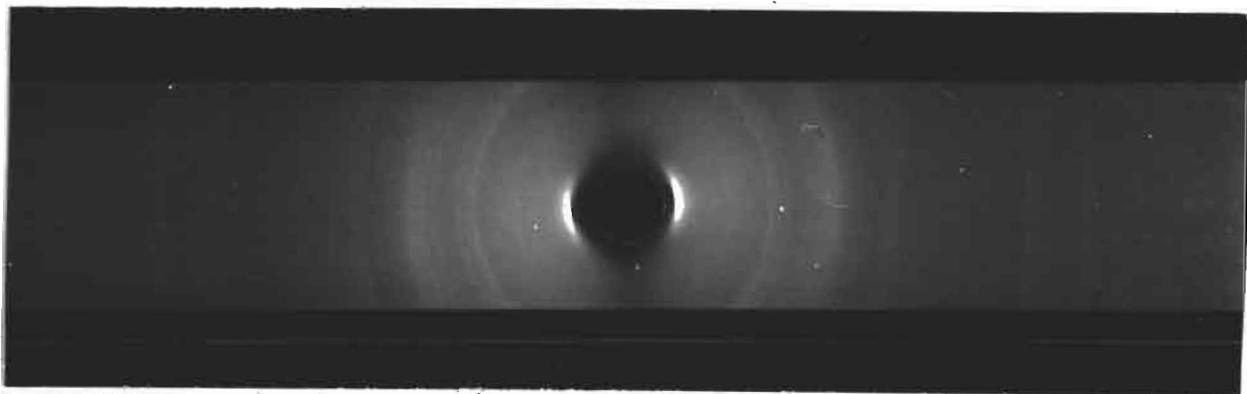
591 Spectre agrégat orienté chambre à 500'



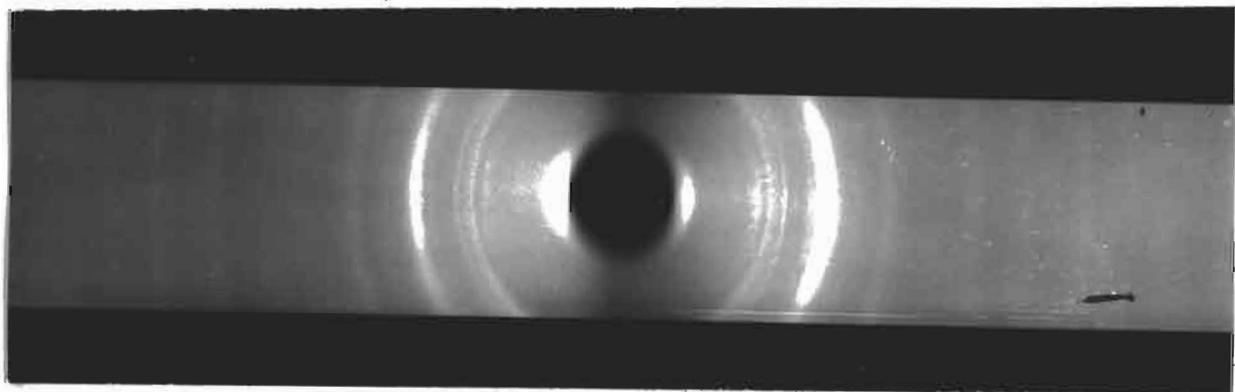
12-261 Spectre agrégat orienté



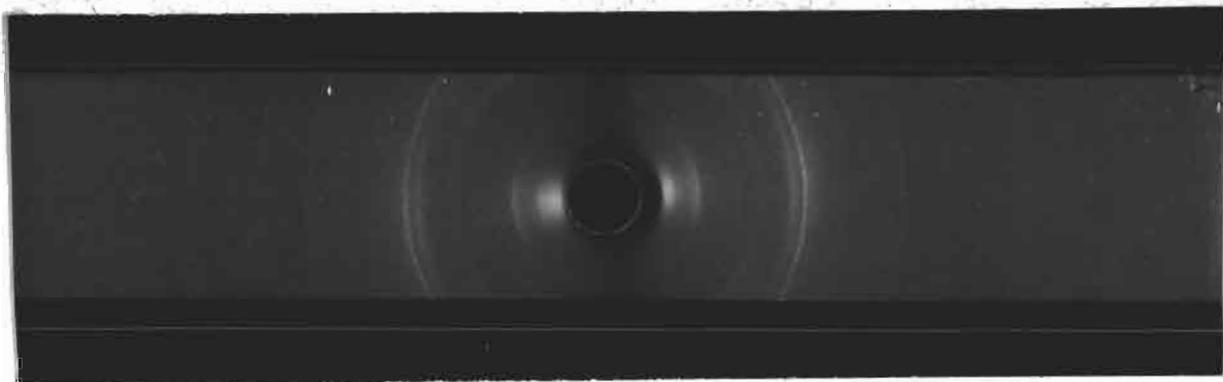
12-261 Spectre agrégat orienté chauffé à 500°



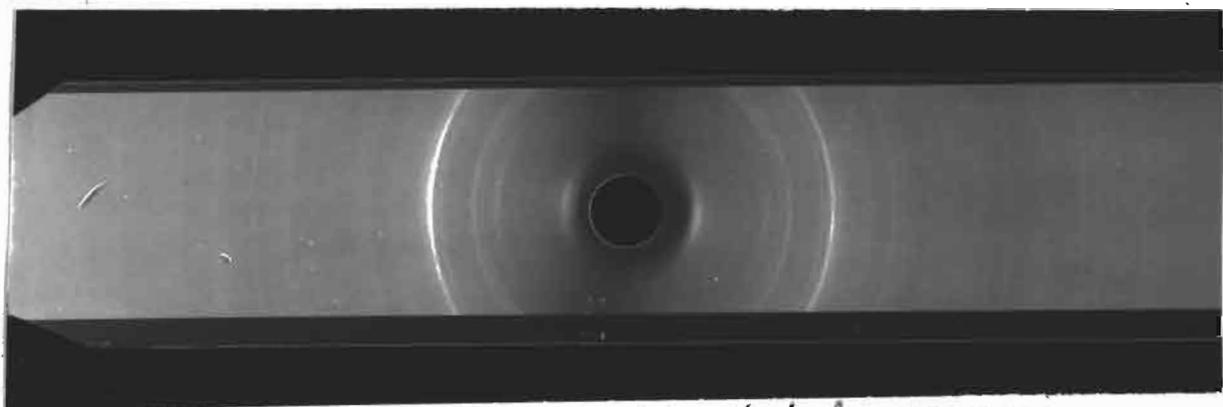
12-263 Spectre agrégat orienté.



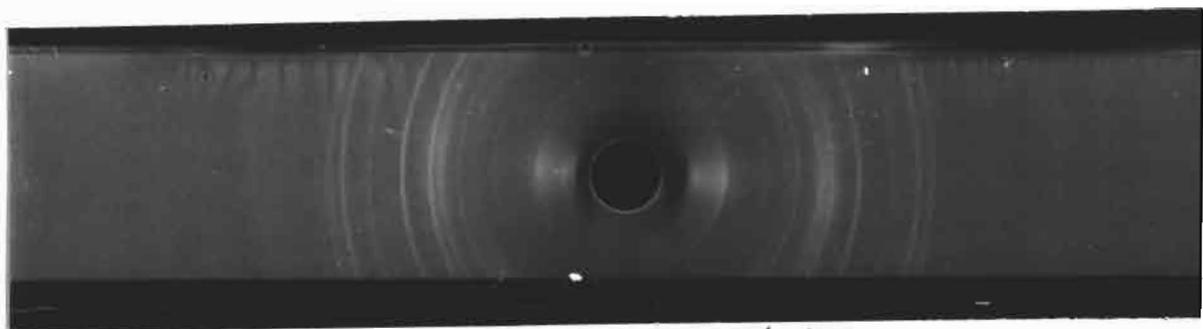
12-263 Spectre agrégat orienté chauffé à 500°



2.881 Spectre agregat orienté de ferrite



2.881 Spectre agregat orienté de ferrite chauffé à 500°



2.802 Spectre agregat orienté de ferrite



2.802 Spectre agregat orienté de ferrite chauffé à 500°

de pH basique qui permettra la formation d'un minéral de type montmorillonitique. Cette montmorillonite sera accompagnée d'une assez forte accumulation de matière organique. Or, nous avons noté que les sols jeunes étaient caractérisés par la montmorillonite et une certaine richesse en matière organique. Ceci est valable dans l'île de Nossi-Bé mais également en Montagne d'Ambre et dans l'Ankaratra où les argiles présentent toutes un rapport silice-alumine supérieur à 2 ; ainsi que de fortes teneurs en matière organique.

Si les conditions de drainage défectueuses du début se maintiennent : zones très plates où la pluviométrie est insuffisante pour évacuer la chaux et la magnésie (plaine de Tsivory) ou dépression sans exutoire permanent (petites zones de l'Analavelona), cette montmorillonite pourra se maintenir.

Par contre, lorsqu'un bon drainage s'établit, les bases sont éliminées, le pH devient acide et nous assistons à la formation de la kaolinite. Dans les sols évolués, la montmorillonite ne se retrouve plus dans le sol et il semble que l'on ait directement formation de kaolinite. Les conditions de drainage sont en effet telles que les bases sont éliminées très rapidement par les eaux qui percolent à travers le sol.

Dans les sols évolués, au drainage normalement assuré, le seul minéral argileux est la kaolinite. Le maintien de cette kaolinite se produit dans un certain nombre de cas, mais ceci n'est pas généralisable. Dans les sols ferrugineux tropicaux rouges, avons-nous vu, (profil 12-20), il n'y a pratiquement aucun changement du haut en bas du profil (constance des données analytiques et thermiques). Les minéraux argileux présents sont du type kaolinique. Dans le cas de sols ferrallitiques, la kaolinite est également présente mais elle s'associe de façon variable à la gibbsite et les oxydes et hydroxydes de fer.

.../...

B - Transformations de minéraux à l'intérieur d'un profil.

La montmorillonite, avons-nous vu, est le premier minéral argileux formé et elle disparaît à mesure que le sol évolue. Les sols jeunes de Nossi-Bé nous apportent des arguments dans ce sens. Alors qu'en profondeur, montmorillonite et kaolinite sont seuls présents, la montmorillonite diminue en surface tandis qu'apparaît la gibbsite. Il nous paraît logique d'admettre que la gibbsite se forme aux dépens de la montmorillonite qui perdrait une partie de sa silice pour donner à la fois kaolinite et gibbsite.

La kaolinite est susceptible de se décomposer à son tour en perdant une partie de sa silice et laissant un résidu d'alumine. L'étude des profils Fx 35 et Fx 1 nous apportent des arguments dans ce sens. Alors qu'à la base des profils, la gibbsite est totalement absente ou en très faible quantité, tandis que la kaolinite est très abondante, on voit la gibbsite augmenter très fortement à mesure qu'on approche de la surface en même temps que la kaolinite diminue corrélativement.

G. WAEGEMANS (212-213) en étudiant un profil de sol près de Matadi au Congo Belge, n'y trouve que de la kaolinite, sans gibbsite. Il en conclut que la kaolinite ne peut se décomposer en gibbsite et que lorsque ce minéral existe, il provient directement de la décomposition de la roche-mère. Nous pensons cependant que l'étude d'un seul profil ne peut suffire à tirer des conclusions définitives sur le sort de la kaolinite dans le sol. L'étude du profil 12-20 de l'Antanimena nous donne des résultats analogues ; mais il correspond à un climat et à une végétation et l'on ne saurait généraliser à partir de cet exemple pour tous les autres sols de l'île.

D'autre part, il ne nous paraît pas probable que le sol choisi par G. WAEGEMANS soit véritablement un sol ferrallitique.

.../...

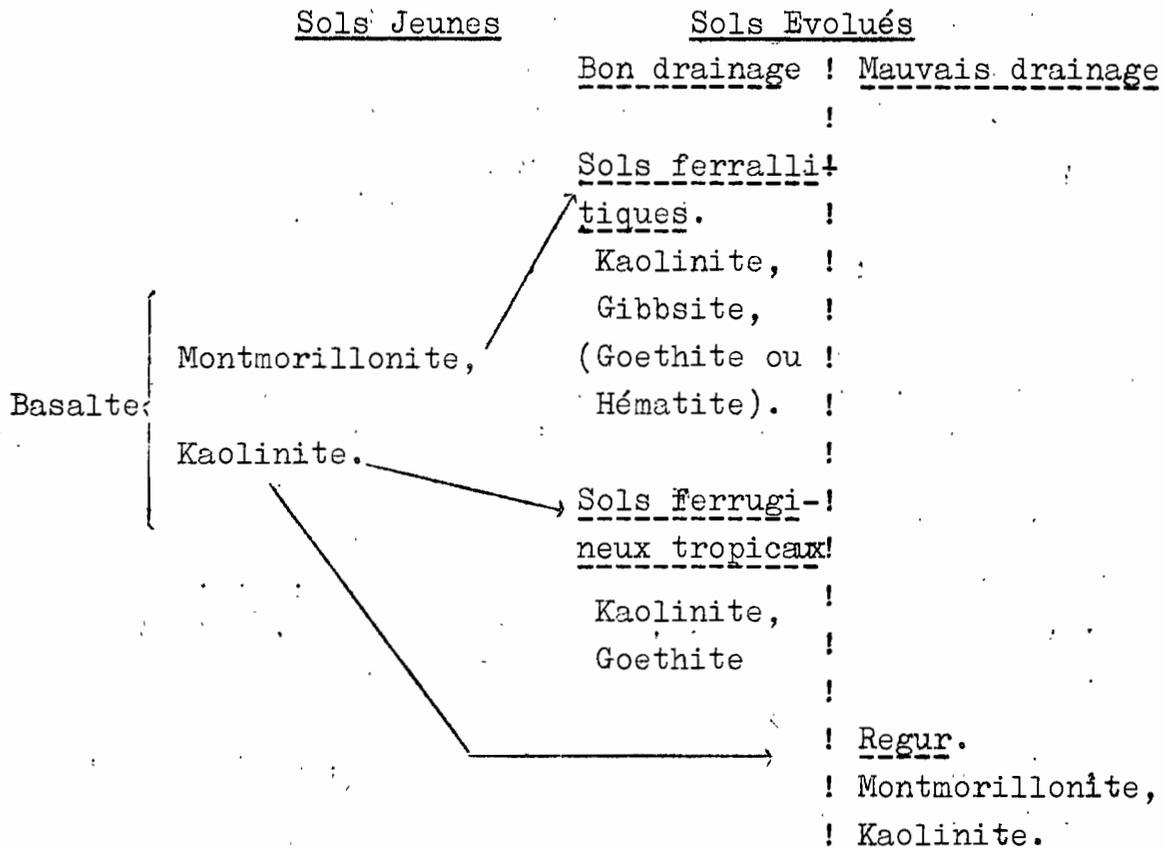
En effet, les valeurs climatiques ($P = 1,5$ m et $T = 26^\circ$) peuvent très bien correspondre à celles des sols ferrugineux tropicaux, précisément dépourvus de gibbsite et riches en kaolinite. A Madagascar, la région correspondant à un tel climat ne comporte que des sols ferrugineux tropicaux, quelle que soit la roche-mère.

De nombreux auteurs ont indiqué des cas de transformation de minéraux. S. CAILLERE & S. HENIN (82-83) ont montré, par des expériences de laboratoire, qu'on pouvait obtenir des transformations montmorillonite-chlorite et vermiculite-montmorillonite. Il s'agirait dans ces cas de véritables pseudomorphoses sans changement fondamental du réseau cristallin. J.A. FERGUSON (108), J.B. HARRISON (127), C.R. VAN DER MERWE et H. HEYSTEK (156), M. VAN DER VOORT (211) ont indiqué des cas de transformation de kaolinite en gibbsite ou de montmorillonite en kaolinite. J. D'HOORE (101) par des études au microscope électronique, montre que les cristaux de kaolinite sont rongés sur leur périphérie, ce qui est en faveur de l'attaque de ce minéral.

A Madagascar, l'étude de plusieurs profils en particulier Fx 1 et surtout Fx 35 est en faveur de la transformation de la kaolinite en gibbsite.

L'ordre d'apparition des minéraux dans les sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar peut donc se résumer par le tableau page suivante.

.../...



Nous rejoignons ici les idées de J.A. FERGUSON (108) pour lequel le stade montmorillonite est intermédiaire entre basalte et kaolinite. Le passage à un sous-ordre sera lié essentiellement aux conditions de climat et de drainage. Si le drainage est défectueux dès la formation du sol, le stade montmorillonite-kaolinite ne sera pas dépassé. Lorsque le drainage est bon, la température élevée et la pluviométrie moyenne (0,8 à 1,5 m) l'eau qui percole à travers le sol sera relativement peu importante, le stade kaolinique ne sera pas dépassé. Par contre, lorsque la pluviométrie est élevée (ou encore une pluviométrie moyenne associée à une température assez fraîche) l'eau qui percole à travers le sol sera plus abondante. L'altération des minéraux sera plus poussée et la kaolinite décomposée en gibbsite.

.../...

Quelques renseignements peuvent être fournis par cette étude sur la nature des oxydes et hydroxydes de fer. Dans le groupe des sols ferrallitiques typiques l'hématite a pu être identifiée. Les sols présentent alors des couleurs vives : par contre la goethite est présente dans les sols ferrallitiques humifères. Dans les sols ferrugineux tropicaux, seule la goethite a pu être caractérisée. La différence de couleur entre certains sols jaunes et rouges doit être attribuée, selon nous, à une division plus grande des hydroxydes et non à des composés différents.

L'étude des argiles des sols dérivés de roches volcaniques basiques, permet d'aboutir aux résultats suivants :

A - Les minéraux se répartissent dans les sols de la manière suivante :

1 - Les sols jeunes renferment de la montmorillonite et de la kaolinite; sous les climats, où normalement on observe des sols ferrallitiques, on voit apparaître un peu de gibbsite.

2 - Les sols ferrallitiques renferment de la kaolinite, de la gibbsite et un oxyde ou hydroxyde de fer (hématite dans le cas d'un sol ferrallitique typique, goethite, dans le cas d'un sol ferrallitique humifère).

3 - Les sols ferrugineux tropicaux contiennent un minéral kaolinique et de la goethite, quelle que soit la couleur du sol.

4 - Les sols hydromorphes formés directement en place contiennent de la montmorillonite et de la kaolinite.

B - Le premier minéral qui se forme par altération d'une roche volcanique basique est la montmorillonite, qui disparaît par la suite, à moins d'un mauvais drainage, qui permet le maintien d'une réaction alcaline. Si le drainage est bon, le pH

.../...

devient rapidement acide et le foncier minéral observable est la kaolinite.

C - La kaolinite se transforme, dans les sols ferrallitiques, en gibbsite. Elle est stable dans les sols ferrugineux tropicaux. Dans un cas la possibilité de résilification de la gibbsite en kaolinite est admise.

Q U A T R I E M E P A R T I E .

LES SOLS DERIVES DE ROCHES VOLCANIQUES
BASQUES DANS D'AUTRES REGIONS DU GLOBE.

Les sols dérivés de roches volcaniques basiques existent dans de nombreuses régions de la zone intertropicale, il nous a paru intéressant de les comparer avec ceux que l'on peut observer à Madagascar et de voir dans quelle mesure les processus **pédogénétiques** s'en rapprochent, ou, au contraire, s'en éloignent. De même, nous avons pensé que cela vaudrait la peine de les comparer avec les sols formés à partir de la même roche-mère dans des conditions climatiques si différentes des régions tempérées.

-- CHAPITRE 11. --

LES SOLS DE LA ZONE INTERTROPICALE.

Dans la zone intertropicale on peut distinguer géographiquement deux sortes de régions où s'observent des roches volcaniques basiques : des îles qu'elles ont contribué à former en partie ou en totalité ; des continents où seulement une partie plus ou moins importante est d'origine volcanique. Dans les îles nous pourrions observer sur une superficie restreinte des successions altitudinales analogues à celles de la montagne d'Ambre ou de l'Ankaratra. Sur les continents, les aires volcaniques dispersées obligeront à effectuer des raccords à distance.

A - Les îles volcaniques - Un certain nombre d'îles volcaniques ont fait l'objet d'études pédologiques. Ce sont, proches de Madagascar, les Comores, la Réunion et Maurice. Ailleurs, les Hawaï, l'Indonésie, les Fiji. Les sols des Antilles Françaises sont en ce moment en cours d'étude.

Les Comores ont été prospectées en 1951 par J. RIQUIER (47) qui a étudié spécialement les îles d'Anjouan et de Mayotte. Anjouan est une île au relief très tourmenté atteignant au mont Mtingui l'altitude de 1.578 m. La région centrale de l'île paraît la plus ancienne, tandis que cônes et cratères récents sont fréquents sur le pourtour. Du fait de son relief très tourmenté, la climatologie précise de l'île est difficile à connaître. Quelques postes météorologiques donnent les valeurs suivantes sur le pourtour 1800 à 2000 mm ; en altitude (450 m) 2500 mm. En raison de particularités locales du relief, des régions côtières peuvent avoir une pluviométrie plus faible que celle indiquée ci-dessus. Le sommet de l'île est certainement très arrosé.

.../...

L'auteur a distingué deux ensembles de sols qu'on peut qualifier d'évolués et jeunes.

Les sols évolués sont représentés par des sols ferrallitiques bruns et brun-rouge.

Les sols brun-rouge à rouge correspondent aux zones basses c'est-à-dire les plus sèches.

Le profil est le suivant :

- Un horizon brun-rouge, grumeleux, meuble.
- Un horizon rouge, argileux.
- Un horizon gris-bleu, argileux.

Le pH est voisin de 6,2 en surface ; la matière organique de 4 % ; la capacité d'échange est de 15 méq/100g ; les bases échangeables sont très faibles ; le rapport silice-alumine varie entre 1 et 2.

Les sols bruns correspondent aux zones de moyenne altitude.

Le profil est le suivant :

- Un horizon très humifère.
- Un horizon argileux, brun ou beige clair.
- Un horizon gris-bleu, argileux.

Le pH des de 6,3 ; la matière organique varie entre 2 et 10 % suivant le type de végétation ; la capacité d'échange est comprise entre 10 et 15 méq/100 g avec des teneurs en bases échangeables faibles. Le rapport silice-alumine est de l'ordre de 1,2 et descend à 0,6 en altitude.

Les sols jeunes dérivent de scories grossières et de cendres. Les profils sont peu épais et renferment en abondance des matériaux frais. Le pH est peu acide, presque neutre 6,6 à 7,0. La matière organique est assez élevée 7 à 9 %. Le

.../...

complexe absorbant présente des capacités d'échange élevées. Le rapport silice-alumine est élevé (2,0 à 3,2).

L'île de la Réunion a fait l'objet en 1953, d'une prospection d'ensemble de R. GUENNELON (118) qui a fait un premier compte-rendu de ses observations. L'île est constituée presque entièrement de roches volcaniques basiques dont certaines sont très récentes (Sud Est de l'île). La topographie est extrêmement tourmentée et la partie centrale dépasse 3000 m. L'alizé aborde l'île par le Sud-Est et l'arrose de façon très inégale 4 à 7 m à l'Est (sous le vent), 0,5 à 3 m à l'Ouest (auvent). L'auteur distingue les sols suivants :

- Des présols.
- Des sols juvéniles : bruns sur basalte et cendres
- Des sols adultes : bruns ou brun-rouge.
- Des sols séniles : rouges (climat à deux saisons).
- Des sols de montagne noirs à mauvais drainage.

Les sols de l'île Maurice sont beaucoup mieux connus grâce aux travaux de N. GRAIG & P. HALAIS (93). Cette île située au Nord de la Réunion présente un relief assez peu tourmenté, si l'on excepte la chaîne qui domine Port-Louis à l'Est. Le reste du territoire comporte deux systèmes basaltiques superposés qui donnent naissance à des sols qui diffèrent essentiellement par leur degré d'évolution. Les régions centrale et orientale de l'île exposées aux vents d'alizé sont plus arrosées et reçoivent entre 2 et 4 m de pluie. La bordure Ouest est moins arrosée avec 1 à 1,5 m. La température moyenne annuelle est comprise entre 21 et 24° au centre, elle approche de 26° à l'Ouest. N. GRAIG & P. HALAIS ont distingué les sols suivants :

A l'Ouest des sols brun-rouge ferrallitiques ; au centre des sols havane et havane clair ⁽¹⁾ ferrallitiques.

(1) D'après la terminologie adoptée par Y. HENRY in "Terres rouges et terres noires d'Indochine", 1931.

A mesure qu'on s'élève en altitude, on constate que la réaction du sol diminue de 6,8 à 5,3, que la capacité d'échange minérale diminue ainsi que le rapport silice-alumine qui passe de 1,7 à 0,35.

Les sols dérivés de basaltes récents présentent des rapports silice-alumine plus élevés que les précédents, ce qui indique qu'ils ne sont pas encore en équilibre avec le climat.

Les îles Hawaï ont fait l'objet de nombreuses études des pédologues américains HOUGH & BYERS, DEANE, CLINE. C'est à M. CLINE (139) que nous devons la terminologie actuellement adoptée pour les sols de ces îles. Des contributions importantes ont été apportées récemment par les travaux de T. TANADA (204), G.D. SHERMAN (190 à 194), T. TAMURA (202-203).

Les Hawaï présentent les formes grossièrement coniques des grands massifs volcaniques. La répartition des pluies est assez analogue à celle qu'on peut avoir en Montagne d'Ambre avec, toutefois, des amplitudes beaucoup plus grandes. Honolulu, au bord de la mer, reçoit 0,7 à 0,9 m tandis que certaines stations d'altitude reçoivent jusqu'à 41 m. Les températures décroissent de 26° à 12°.

CLINE a distingué les sols répartis en bandes plus ou moins horizontales suivant l'altitude.

1) "Low - humic latosol". Sols rouges, rouge-brun ou bruns correspondant à une pluviométrie inférieure à 1 m. Le rapport silice-alumine est compris entre 1,6 et 2,1. Les minéraux des argiles sont la kaolinite (abondante) et l'hématite, avec un peu de montmorillonite et de gibbsite.

2) "Humic Latosol". Sols rouges, brun-rougeâtre, brun-jaunâtre ou bruns correspondant à une pluviométrie comprise entre 1 et 2,5 m. La matière organique est élevée (jusqu'à 10 %).

.../...

Le rapport silice-alumine est voisin de 1,0. Les minéraux des argiles sont essentiellement kaolinite, gibbsite, goethite et hématite.

3°) "Ferruginous latosol". Ces sols correspondent à une zone climatique analogue à la précédente ; ils présentent un horizon B. riche en fer. Les minéraux des argiles sont essentiellement gibbsite et hématite ; l'allophane est assez abondante : goethite et kaolinite sont en assez faible quantité.

4°) Les "Hydré-humic latosol" correspondent à une pluviométrie comprise entre 3 et 8 m. Les teneurs en matière organique sont considérables sur une grande profondeur. Les minéraux des argiles sont surtout gibbsite, goethite, magnétite et allophane. Il n'y a plus de kaolinite ni d'hématite.

Par ailleurs T.TANADA (204) a étudié les variations du rapport silice-alumine avec la pluviométrie. Il a pu montrer que le rapport diminuait avec la pluviométrie.

Les principales îles d'Indonésie ont fait l'objet de travaux des pédologues hollandais avec E.C.J. MOHR, A. VAN BAREN, C.H. EDELMAN, T.W.G. DAMES, H.J. HARDON, M. VAN DER VOORT.

Ces différents auteurs reconnaissent les subdivisions suivantes :

1°) "Volcanic ash soils". Sols jeunes ou très jeunes dérivant de produits volcaniques récents.

2°) "Latéritic soils". Sols rouges ou rouge-brun dérivant de produits volcaniques divers dont le basalte. Les déterminations du rapport silice-alumine portant sur des sols bien évolués ont fourni des valeurs allant de 2,2 à 2,9. Les rayons X n'ont pas permis d'identifier d'autres produits que la kaolinite. Ces résultats sont à première vue assez surprenants mais il serait très utile de connaître les valeurs climatiques

.../...

exactes des lieux de prélèvements.

3°) "Mountain soils" sols riches en matière organique correspondant à une pluviométrie élevée et une température modérée.

4°) "Margalitic soils". A la base de certains volcans se développent des sols noirs riches en montmorillonite qu'on peut rapprocher des sols régur.

Aux îles Fiji, W.J. BLACKIE (71) signale dans la zone de pluie ininterrompue (à plus de 1000 m des sols bruns à brun-clair, tandis qu'au-dessous les sols sont rouges. L'auteur signale des rapports silice-alumine compris entre 1,6 et 1,8.

L.I. GRANGE (116) signale que dans certaines îles du Pacifique, où la pluviométrie varie de 2,7 à 4,5 m et où la température moyenne est voisine de 25°, le rapport silice-hydroxydes est compris entre 0,1 et 0,4 (le rapport silice-alumine doit être de 0,2 à 0,7).

L'étude des sols des îles volcaniques de la zone intertropicale fait apparaître un certain nombre de faits qui, en dépit parfois d'un certain manque de précision, nous paraissent importants.

La répartition des sols en fonction de l'altitude n'est pas sans présenter des analogies avec celle observée dans les massifs d'Ambre et de l'Ankaratra. Dans toutes ces îles soumises aux vents alizés on enregistre une diminution de la température et une augmentation de la pluviométrie avec l'altitude. D'une façon générale, à mesure qu'on s'élève la couleur passe du rouge, brun-rouge, brun-jaune des zones périphériques au brun, puis au noir des régions élevées. Les teneurs en matière organique augmentent : le pH et le rapport silice-alumine diminuent.

.../...

Les sols à drainage contrarié donnent (à Java) des sols à montmorillonite. Les sols jeunes présentent de bonnes teneurs en matière organique, en chaux échangeable ; un rapport silice-alumine élevé.

Tous ces faits ont leurs équivalents à Madagascar. Il y a bien les objections formulées par DAMES & VAN DER VOORT, qui trouvent dans les sols qualifiés de "latéritic" des rapports silice-alumine supérieurs à 2,0. Peu de précisions sont fournies sur la nature de la roche-mère, sur les conditions climatiques précises des lieux de prélèvements. Aussi on peut se demander si les sols cités par ces auteurs ne sont pas en réalité des sols ferrugineux tropicaux.

B. - Zones volcaniques des régions continentales.

En Asie, Afrique centrale et méridionale, Australie, Amérique du Sud, les roches volcaniques basiques occupent souvent des superficies considérables. Des données souvent très précises mais la plupart du temps assez fragmentaires nous parviennent sur les sols de ces régions. En raison de la grande dispersion des zones étudiées, nous croyons préférable d'examiner les sols par sous-ordres ; l'étude des séquences **altitudinales** n'étant pas possible comme dans les territoires précédents.

Sols ferrallitiques : a) typiques. Des sols ferrallitiques appartenant à ce groupe ont été décrits au Congo Belge par C.E. KELLOG & F.D. DAVOL (141), au Cameroun par A. LAPLANTE (143), au Vietnam par E.M. CASTAGNOL (88), M. SCHMID, P. DE LA SOUCHERE et D. GODARD (187), en Malaisie par G. OWEN (171).

C.E. KELLOG & F.D. DAVOL décrivent dans la partie orientale du Congo belge des sols brun-rouge dérivant de basalte et situés à plus de 1500 m d'altitude. Ces sols sont caractérisés par une couleur uniforme sur tout le profil, des teneurs en

... ..

.../...

argile élevées, un pH compris entre 4,9 et 5,5. La kaolinite y a été identifiée.

A. LAPLANTE, au Cameroun, décrit deux sols rouges formés à partir de basalte sous un climat tropical caractérisé par une pluviométrie de 2,5 à 1,3 m, sous une température de 20 à 23°. Ce sont des sols très pauvres, rouges sur une grande profondeur. En surface, leur rapport silice-alumine est de 0,52 sous 2,5 m de pluie et 1,3 sous 1,3 m de pluie.

G. OWEN décrit deux séries de sols brun-rougeâtre, argileux, dont les teneurs en carbone organique varient entre 2 et 3 %, le pH est très acide 4,8 à 5,1 et le rapport silice-sesquioxydes 0,21 et 1,39.

b) Sols ferrallitiques typiques bruns.

H. JENNY (135) dans son étude sur les groupes de sols de la Colombie (Amérique du Sud) décrit des "humic yellow-brown soils" formés à partir de cendres volcaniques sous une pluviométrie de 2,4 et une température de 22°, à une altitude de 1500 m.

A. FRANCO-URRIBE (113) signale de son côté des sols brun-jaunâtre dérivant de tufs volcaniques entre 1700 et 2000 m (température 19°6), riches en matière organique, acides.

Bien qu'aucune donnée ne soit fournie quant à la nature minérale de ces sols, nous pensons qu'on peut les ranger parmi les sols ferrallitiques bruns.

Les sols Ando. - G. MILNE (162) signale dans la notice de la carte provisoire des sols de l'Afrique orientale, qu'à des altitudes supérieures à 2000 m et à une température inférieure à 10°, les sols rouges latériques passent à des sols gris-brun ou brun-jaune qui ont un horizon caractérisé par une accumulation considérable de matière organique et dont

.../...

le rapport silice-alumine est inférieur à 2,0, parfois 1,0. H. JENNY (135) décrit en Colombie des "cold humus soils" à 3.200 m d'altitude sous une pluviométrie de 2000 mm et une température de 11°. L'accumulation de la matière organique serait due à la fraîcheur persistante de la température plutôt qu'à une humidité excessive. En Afrique Centrale, J.L. BURNOTTE (79) signale, parmi les "sols de cendrées" du Kivu, des sols remarquablement riches en matière organique. Dans le rapport du C.A.R.L.D.S. cité par E.C.J. MOHR & F.A. VAN BAREN (165), des sols analogues sont signalés. Tous ces sols nous paraissent présenter de grandes analogies avec les sols Ando de J. THORP & G.D. SMITH (208) et avec ceux que nous décrivons sous ce vocable dans le haut Ankaratra.

Sols ferrugineux tropicaux. Les auteurs australiens (C.G. STEPHENS, 199) proposent pour ce sous-ordre les noms de "Ferrimorphic" ou "Haemomorphic". D'autres, comme J.A. PRESCOTT (177) utilisent volontiers le terme de "Red Loam" pour désigner les sols rouges dérivés de basalte. H.L. SHANTZ & C.F. MARBUT (189) utilisent ce terme dans leur étude sur les sols d'Afrique Centrale ; dans leur esprit un tel sol est caractérisé par une absence d'alumine, des hydroxydes de fer et un minéral argileux de type kaolinique. B.S. ELLIS (105) a décrit en Rhodésie un sol rouge formé à partir de diabase. Le rapport silice-alumine est très voisin de 2 dans la majeure partie du profil. Le pH est assez peu acide 6,2 à 6,5. Les analogies sont frappantes entre ces sols et ceux du plateau de l'Antanimena.

Sols Hydromorphes. Les sols Régur des Indes sont les représentants les plus importants de sous-ordres. De très nombreux auteurs, en particulier D.V. BAL (64), J.S. HOSKING (130), R.W. SIMONSON (195-196), C.R. VAN DER MERWE (153) les ont étudiés. Un essai de synthèse a été proposé par H. OAKES et J. THORP (170) dont nous retiendrons les éléments essentiels suivants :

.../...

Le sol est de couleur sombre, très argileux, de texture grumeleuse en surface, massive, grossièrement prismatique en profondeur. Le pH est légèrement alcalin, les teneurs en matière organique peu élevées (1 à 1,3). Le complexe est presque entièrement saturé par la chaux et la magnésie. L'argile est du type montmorillonitique ainsi que l'on montré G.

NAGELSCHMIDT, D. DESAI & A. MUIR (169), C.R. VAN DER MERWE & H. HEYSTEK (156). Les premiers auteurs ont particulièrement insisté sur le fait que les sols bien drainés sont rouges et renferment surtout de la kaolinite avec une faible proportion de montmorillonite, tandis que les sols regur correspondent essentiellement aux zones mal drainées et présentent une argile montmorillonitique.

Sols Jeunes. A. LAPLANTE (144) décrit au Cameroun occidental des sols peu épais dérivant de produits volcaniques frais. Leur couleur va du brun foncé au noir, leur épaisseur est assez faible. Ils sont riches en matière organique et en éléments fertilisants ; leur rapport silice-alumine est souvent élevé, mais leur tendance ferrallitique est très nettement accusée.

--CHAPITRE 12--

LES SOLS DE LA ZONE TEMPÉREE.

La zone tempérée comprend, en principe, tout le territoire situé entre un des tropiques et le cercle polaire correspondant. Les types de climats y sont très variables et nettement moins tranchés que dans la zone des tropiques. Dans l'hémisphère Sud, au voisinage du tropique du Capricorne, le climat se rapproche beaucoup de celui de la zone intertropicale, en particulier en Australie méridionale (Queensland et Nouvelles Galles du Sud) et en Afrique du Sud. Deux autres régions, aux climats différents sont représentées par la zone méditerranéenne et l'Europe (à laquelle nous adjoindrons l'Amérique du Nord).

L'Australie méridionale est située au Sud du Tropic du Capricorne. Cependant sa côte Est, orientée Nord-Sud, est encore chaude et pluvieuse. A mesure qu'on pénètre vers l'intérieur, la pluviométrie devient plus faible et la température reste élevée jusqu'au désert qui occupe une grande partie du centre du pays.

Cette région orientale a fait, du point de vue pédologique, l'objet de travaux de J.A.PRESCOTT & J.S. HOSKING (177) et C.G. STEPHENS (198 - 199), plus récemment de E.G. HALLSWORTH et Al. (121 - 122) & L. J. H. TEAKLE (205) qui ont traité plus spécialement des sols dérivés de basalte. Ces auteurs distinguent de la côte vers l'intérieur la succession de sols suivants :

Les "Krasnozems" sont des sols rouges, riches en argile, friables, présentant une bonne structure en surface comme en profondeur ; leur pH est acide et ils sont bien fournis en matière organique. Les hydroxydes de fer et alumine y sont
.../...

abondants.

Les "chocolate soils" sont des sols noirs, de couleur plus foncée que les précédents ; ils sont acides en surface, mais neutres en profondeur. L'argile est montmorillonitique.

Les "prairie soils" sont des sols noirs légèrement acides en surface, neutres en profondeur, mais sans accumulation de carbonates de chaux.

Les "chernozems" ou "Blacks soils" sont noirs, argileux, riches en matière organique (4 à 8 %), très légèrement acides en surface et calcaires en profondeur.

Des explications assez contradictoires ont été proposées pour ces sols par les divers auteurs australiens en particulier E.G. HALLSWORTH (121) et L.J.H. TEAKLE (205). Pour le premier, les conditions climatiques actuelles suffisent à les expliquer ; il a proposé un "acidity index" pour rendre compte des variations observées. Pour le second, les sols rouges et noirs qu'on observe actuellement sont le reflet de conditions climatiques du passé. Le sol correspondant aux conditions climatiques actuelles serait un sol brun-rouge, acide en surface, mais alcalin et très argileux et calcaire en profondeur.

Il nous est naturellement difficile de trancher le problème.

Toutefois, on peut noter que les conditions climatiques qui règnent sur la zone côtière (pluviométrie voisine de 1,5 m et température moyenne annuelle de 19°) sont assez semblables à celles des hauts-plateaux malgaches caractérisés par des sols ferrallitiques rouges. La région intérieure où dominent les sols noirs (P = 1,1 m et T = 20°) n'a pas d'équivalent exact à Madagascar. Toutefois, il semble que rien ne s'oppose à la formation des sols noirs, si le drainage est déficient.

.../...

En Afrique du Sud, la connaissance des sols est due essentiellement aux travaux de C.R. VAN DER MERWE (151 à 154) qui a donné dès 1940, une présentation d'ensemble des sols de cette vaste région. Le basalte est particulièrement abondant au Transvaal à une altitude voisine de 1200 m. La pluviométrie est voisine de 600 mm et la température de 16 à 18°. La topographie est plane avec de légères ondulations. La végétation est à base de graminées avec quelques arbres et arbustes. Les sols sont qualifiés de "subtropical black clays" ; l'argile est essentiellement montmorillonitique.

Dans les régions précédentes, le climat est proche de celui de la zone intertropicale où les pluies tombent en saison chaude et où la saison fraîche est sèche. Dans les régions suivantes, les pluies tombent surtout en automne et en hiver avec un été plus sec.

Dans la région méditerranéenne où la pluviométrie est comprise entre 400 et 800 mm et la température varie de 15 à 19°), des sols dérivés de basalte ont été étudiés par A. REIFENBERG (en Palestine, à Chypre) et par A. MUIR en Syrie).

A. REIFENBERG (180 - 181) décrit des sols de couleur brun-chocolat dont le rapport silice-alumine est voisin de 3,0. Voici quelques données fournies par cet auteur :

<u>Région</u>	<u>Pluies en mm</u>	<u>Température</u>	<u>S/A</u>
Palestine	882	18° 5	3,12
Chypre	635	15° 4	2,33
Chypre	557	17° 8	3,16

Il note également que des "terra rossa" dérivées de calcaire ; ont une composition très voisine.

A. MUIR (167) en Syrie a examiné deux profils et il a trouvé que dans un cas les minéraux présents sont : kaolinite,
.../...

goethite et produits colloïdaux dant l'autre montmorillonite et goethite.

Au Portugal, dans les environs immédiats de Lisbonne (où la pluviométrie est de 602 mm et la température annuelle 15°9) un complexe basaltique intercalé entre le Turonien et l'oligocène (137) affleure assez largement. Les sols qui dérivent de cette roche sont assez argileux et présentent un pH faiblement acide 6,5. Le profil suivant a été noté à l'Ouest de Queluz :

0 - 30 cm Brun légèrement rougeâtre ; argileux avec des sables grossiers et fins ; nuciforme grossier à tendance polyédrique ; fragments de 2 - 3 cm avec d'autres plus petits 0,2 - 0,3 cm ; racines de graminées ; poreux, tubulaire ; cohésion assez forte.

30 - 120 cm Brun un peu rougeâtre ; argileux avec sables grossiers et fins ; grossièrement prismatique donnant gros fragments polyédriques ; quelques racines et fragments de basalte.

120 cm Basalte altéré avec nombreuses petites taches noires et blanches.

La fraction argile est constituée des minéraux suivants :

L. BRAMA0 et al. (73) dans sa carte pédologique du Portugal qualifie ces sols de "reddish-chestnut".

Sous les climats plus frais, des affleurements de basalte de quelque étendue sont connus dans le Massif Central français, dans la région d'Antrim en Irlande du Nord ; aux U.S.A., dans le Colorado et en Tasmanie.

.../...

Dans le Massif Central français, divers profils ont été examinés :

1) Plateau des Coirons, à l'Ouest de Montélimar à une altitude voisine de 600 m. Le sol est généralement peu épais, et est laissé en pâturâges ou châtaigneraies.

Voici un profil noté sous genêt et ronce, pente vers le Sud, près de Taverne.

0 - 20 cm. Brun ; limoneux avec de nombreux fragments de basalte, dense lacis de racines ; grumeleux ; très poreux ; cohésion faible.

à 20 cm Basalte frais, fortement diaclasé.

2) Le Velay - Près du carrefour Lafayette (altitude 1100 m) sous une lande à Calluna vulgaris et quelques pins - pente vers le Nord.

0 - 7 cm. Entrelacs de racines très serrées.

7 - 15 cm. Brun à brun foncé ; racines encore très nombreuses ; limoneux ; grumeleux très fin.

15 - 25 cm. Brun légèrement rougeâtre ; limoneux-sableux ; quelques fragments de scories

25 cm. Scories rougeâtres.

3) Route du Puy à Langogne - Végétation : pins et épicéas.

0 - 20 cm Brun ; limoneux avec graviers basaltiques nombreux ; grumeleux fin ; racines très nombreuses ; poreux ; peu cohérent.

à 20 cm Passage rapide à basalte intact en gros blocs anguleux.

.../...

4) Plateau de l'Aubrac entre Laguiole et Aubrac -
Hêtraie - 1300 m d'altitude.--.

- 0 - 15 cm Entrelacs de racines ; brun ; limoneux ;
grumeleux assez fin.
- 15 - 50 cm Brun ; limoneux ; grumeleux plus grossier ;
nombreux petits fragments de basalte devenant
de plus en plus nombreux vers le bas.
- à 50 cm Basalte.

Cheire d'Aydat près de Clermont-Ferrand - à 950 m d'al-
titude - coulée récente à surface très tourmentée, plus ou
moins scoriacée; végétation assez dense : bouleaux, noisetiers,
fougères.

- 0 - 4 cm Noir ; lamellaire à grumeleux très fin.
- 4 - 20 cm Brun ; grumeleux ; limoneux avec graviers
basaltiques.
- à 20 cm Basalte.

En Irlande du Nord-Est (région d'Antrim) ca ractérisée
par une pluviométrie de 900 mm et une température de 8°3,
W.O. BROWN (77) décrit des sols bruns dérivés de basalte où
aucune trace de podzolisation ne peut être mise en évidence.
Ces sols, en dépit d'une teneur en argile faible, présentent
des capacités d'échange assez élevées (30 à 40 méq/100 g),
même en profondeur. Les teneurs en matière organique sont
élevées en surface 11 % en moyenne. Les argiles extraites

.../...

de ces sols présentent un rapport silice-alumine compris entre 1,6 et 2,5. L'examen aux rayons X permet d'identifier la kaolinite et un produit de type vermiculite.

Au Colorado, J.L. RETZER (182) décrit des sols formés de basalte ; ils sont caractérisés par un lessivage très prononcé de l'argile. Malheureusement aucune valeur climatique précise n'est fournie.

En Tasmanie du Nord, C.G. STEPHENS (197) cite des sols formés sous un climat frais et humide (pluviométrie de 975 mm à 1550 mm et température de 10°1 à 12°6). Ces sols présentent une gamme de couleurs allant du noir au brun-rouge en passant par toutes les teintes intermédiaires ; brun-noir, brun-chocolat, etc ... Ils ont tous un pH acide (5,0 à 6,0) avec des teneurs en matière organiques voisines de 10 %. Aucun de ces sols ne montre accumulation d'argile en profondeur.

Dans la zone tempérée, à la limite des tropiques, les sols qui se développent offrent des analogies avec ceux de la zone intertropicale. Dans la zone méditerranéenne, les sols prennent des teintes foncées, ont une réaction faiblement acide à neutre ; la matière organique y est peu abondante, le minéral argileux prépondérant est la montmorillonite. Dans la zone tempérée fraîche, les sols qui se développent sont bruns, acides (5,0 à 6,0) bien fournis en matière organique. Le minéral commun à ces sols est la kaolinite (avec de la montmorillonite, de la vermiculite ou de l'illite).

Appellations synonymes : low-humic latosol, lateritic loam, red lateritic, sols latéritiques rouges, krasnozem.

2. Sols ferrallitiques humifères bruns.

Ces sols sont caractérisés par un solum brun surmonté d'un horizon humifère déjà appréciable. La texture est limono-argileuse, la structure grumeleuse à grumeleuse fine.

Les teneurs en matière organique sont fortes 7 à 15 %. La réaction est acide (pH 5 à 6). Le complexe absorbant peut être riche en bases, mais il est toujours désaturé. Le rapport silice-alumine est nettement inférieur à 2 (0,5 à 1,2). Les minéraux caractéristiques sont encore la gibbsite, des hydroxydes de fer et la kaolinite.

Ces sols sont connus aux Comores, à Maurice, aux Hawaï, etc.

Appellations synonymes : humic latosol.

3. Les sols ferrallitiques Ando..

Le solum est noir ou d'un brun très foncé, la structure est grumeleuse fine.

Les teneurs en matière organique sont élevées (jusqu'à 30 %). La réaction est acide (5 à 6,0). Le complexe absorbant est pauvre en bases et est encore fortement désaturé. Le rapport silice-alumine est encore inférieur à 2.

Les minéraux caractéristiques sont la gibbsite associée à la kaolinite et à de la goethite.

Ces sols sont connus aux îles Hawaï, au Congo Belge, en Indonésie, au Japon, En Colombie.

Appellations synonymes : hydrol-humic latosol, mountain soils, cold-humus soils.

.../...

4. Sols ferrallitiques cuirassés.

Le solum est voisin de celui des sols ferrallitiques typiques avec, en plus, à une certaine profondeur un horizon durci ou cuirassé, riche en hydroxydes et oxydes métalliques.

Cette cuirasse est d'aspect variable, massive, scoriacée, pisolitique, mais on peut presque toujours la relier à une nappe phréatique assez proche de la surface.

Lieux où ces sols sont connus : Australie, Afrique Tropicale.

Appellations synonymes : latérite, ground-water laterite.

5. Sols ferrugineux tropicaux.

Le processus fondamental est la mise en liberté d'oxydes ou hydroxydes de fer.

Le solum est de couleur vive, rouge ou jaune. La texture est argileuse ou argilo-limoneuse ; la structure nuciforme ou faiblement polyédrique. Il n'y a ni lessivage du fer ou de l'argile, ni accumulation de calcaire en profondeur.

La réaction est faiblement acide (pH 6,3 à 6,9) ; la matière organique assez variable (entre 2 et 8 %) et dépend du type de végétation.

Le complexe absorbant est assez bien fourni en bases ; son degré de saturation est assez élevé. Le rapport silice-alumine est égal ou légèrement supérieur à 2,0.

Les minéraux présents dans ces sols sont du type kaolinique, avec, en outre, de la goéthite.

Les lieux où ces sols sont connus sont : l'Australie, l'Afrique du Sud et peut-être l'Indonésie.

.../...

Appellations synonymes : red loams, tropical red soils, latosol.

6. Sols Hydromorphes Regur.

Le solum est de couleur sombre, grise à noire, la texture est franchement argileuse ; la structure est grumeleuse ou nuciforme en surface, massive à prismatique en profondeur. Des nodules calcaires sont fréquents, surtout à la base du profil.

La réaction est neutre ou très faiblement acide en surface (6,6 à 7,1), franchement alcaline en profondeur (7,5 à 8,3). La matière organique est peu élevée (2 à 5 %). Le complexe absorbant est riche en chaux et magnésie, le degré de saturation est élevé. Le rapport silice-alumine est supérieur à 3,0. Les minéraux présents sont la montmorillonite et la kaolinite.

Ces sols sont connus en Asie (Indes), Afrique Centrale et Méridionale, Australie.

Appellations synonymes : black cotton soils, tropical, subtropical black clays, argiles noires tropicales.

7. Les sols jeunes.

Le solum est peu épais, de couleur sombre (brun ou noir), les matériaux frais sont abondants. La texture sablo-limoneuse ou sablo-argileuse, la texture nuciforme.

La réaction est faiblement acide ou neutre. La matière organique est assez abondante (2 à 10 %). Le complexe absorbant est assez fourni en bases et moyennement saturé. Le rapport silice-alumine est variable (entre 1,5 et 3,0). Les minéraux présents sont la montmorillonite, la kaolinite, des hydroxydes de fer et parfois la gibbsite.

.../...

Lieux où ces sols sont connus : Comores, Réunion, Indonésie, Cameroun.

Appellations synonymes : volcanic-ash soils, sols juvéniles, etc ...

Dans les pays tempérés, les processus de ferrallitisation, ferruginisation, calcification cessent de se manifester ; sous ces climats plus doux et une végétation complètement différente, **certain**s processus deviennent prépondérants, comme l'accumulation de la matière organique ou le lessivage. Certaines propriétés physiques et chimiques telles que réaction, teneur en matière organique peuvent rappeler celles de sols de la zone intertropicale ; toutefois certains minéraux qui n'apparaissent que dans des cas spéciaux sont présents dans ces sols : montmorillonite ou illite.

C O N C L U S I O N S

Genèse d'un sol dérivé de roche volcanique basique
en zone intertropicale.

En guise de conclusion, nous présentons quelques modes de genèse des sols tels qu'on peut les déduire de l'ensemble des observations présentées précédemment.

Une éruption vient de se produire ; une nappe de basalte s'est épanchée. La surface est inégale, avec des mamelons, des dépressions et aussi des zones planes. Aucune vie n'y existe ; les vents amènent des poussières qui se déposent sur la roche nue, les premières pluies tombent. Peu à peu, des bactéries, des champignons, des algues se fixent sur le matériau et vont aussitôt en commencer l'attaque. Petit à petit, des végétaux supérieurs s'installent : des graminées, des fougères, des essences arborées. Celles-ci introduisent leurs racines dans les fentes et contribuent à les élargir permettant la pénétration de l'eau en profondeur. Cette eau échappe ainsi en grande partie aux végétaux. La première formation arborée a donc un caractère xérophile accusé, même si la pluviométrie est forte. Les Adansonia, Pachypodium, Aloe, Kalanchoe, etc, trouvent là un terrain favorable. C'est ce que l'on voit sur les coulées récentes de l'Ankaizinana et de la Montagne d'Ambre.

Peu à peu, l'attaque de la roche va s'effectuer. Les bases, la chaux et magnésie, sont libérées et contribuent à donner aux solutions du sol proches de la roche-mère un pH alcalin. La silice, l'alumine le fer sont également libérés. L'abondance de la chaux et de la magnésie fait que le premier minéral qui s'organise est la montmorillonite qui peut être mise en évidence dans les sols jeunes ou faiblement évolués. Par ailleurs ces sols, peu épais sont de couleur sombre, riches en matière organique, en bases échangea-

bles, en acide phosphorique ; leur capacité d'échange est élevée, leur rapport silice/alumine supérieur à 2. Les fragments de roche-mère existent en proportion importante et fournissent peu à peu aux végétaux des éléments nutritifs facilement exportables. Ceci explique pourquoi la plupart des sols jeunes présentent un haut degré de fertilité et sont recherchés par les agriculteurs qui en tirent de substantielles récoltes, que ce soit dans l'Itasy ou à Nossi-Bé. Toutefois, leur utilisation présente certaines limites. En raison de leur faible épaisseur, et de la perméabilité du sous-sol, ils n'offrent qu'une réserve d'eau limitée. Si la saison sèche dure assez longtemps les plantes peuvent souffrir de la sécheresse. Leur richesse en cailloux est un obstacle à l'emploi d'engins mécaniques. Enfin, ils sont sensibles à l'érosion.

Un tel sol jeune ne reste pas indéfiniment dans cet état. Peu à peu, il s'approfondit et ses constituants se modifient. Son évolution se produit différemment suivant les conditions du milieu en particulier suivant le climat et le drainage. Les cas possibles sont évidemment assez nombreux et nous ne pouvons les envisager tous. Nous en passerons en revue un certain nombre :

I. Drainage normal : pluviométrie importante (supérieure à 1,5 m) et température élevée (23 à 25°).

Dès que le sol s'approfondit, le type de végétation change et passe peu à peu à une forêt ombrophile où les éléments xéro-philés ont complètement disparu. Le sol s'acidifie par suite du lessivage des bases et leur entraînement en profondeur par les eaux de percolation. Les ions H^+ deviennent de plus en plus nombreux. Le milieu acide devient peu favorable au maintien de la montmorillonite qui perd une partie de sa silice par enlèvement d'une ou deux couches tétraédriques. Le minéral

.../...

argileux le plus stable dans ce milieu est la kaolinite. La gibbsite apparaît également (échantillon 2-801 de Nossi-Bé). Le sol continuant à s'approfondir, la montmorillonite disparaît complètement : la kaolinite est le seul minéral argileux formé et on le trouve au contact de la roche-mère. A son tour, il sera soumis à l'hydrolyse et des quantités appréciables de gibbsite apparaissent. A un certain moment, s'établit un équilibre entre la kaolinite et la gibbsite et la valeur du rapport silice/alumine se stabilise dans le profil. A la base du profil, l'élimination de l'eau peut parfois devenir difficile : le fer s'élimine en partie. On voit apparaître des horizons gris, gris-bleuté, ou bariolés. A la partie supérieure du profil le fer est mis complètement en liberté et donne au sol des couleurs rouges ou jaunes. Les racines des végétaux arborés peuvent atteindre encore les éléments libérés par la décomposition de la roche et les remonter en surface. La chaux est particulièrement abondante dans l'horizon humifère. Elle protège l'humus en formant des composés stables et difficilement entraînés par les eaux de percolation. Un tel sol présente, dès son défrichement, un degré de fertilité intéressant. Les teneurs en matière organique, azote, bases échangeables sont bonnes ; l'acide phosphorique, toutefois, forme avec le fer et l'alumine des composés insolubles. La structure grumeleuse ou nuciforme permet une bonne pénétration de l'air et de l'eau. Cependant cette fertilité est fragile ; le remplacement de la forêt par une végétation herbacée se traduit (dans le cas où l'érosion ne joue pas, ce qui est rare) par une diminution très rapide de la matière organique, des bases échangeables ; le sol devient plus acide. Il n'y a plus d'arbres pour ramener de la profondeur les éléments nutritifs. Le sol doit être cultivé avec ménagement et la lutte contre l'érosion menée avec efficacité.

.../...

2. Drainage normal ; pluviométrie importante (supérieure à 2 m) température assez fraîche (16 à 20°).

Le mécanisme de formation du sol est assez analogue au précédent. Par suite de la forte pluviométrie, le milieu est rapidement acide. Les minéraux essentiels sont la kaolinite et la gibbsite. La remontée en surface des bases s'effectue encore de façon très efficace. La fraîcheur de la température et la forte humidité favorisent l'accumulation de la matière organique ; l'abondance de la chaux donne encore au sol une structure grumeleuse ou grumeleuse fine assez stable. Le sol prend une teinte uniformément brune.

Le degré de fertilité d'un tel sol est encore élevé, très élevé même, si la roche-mère est une cendre facilement pénétrée par les racines des arbres. Toutefois, la fertilité est encore très fragile ; comme il s'agit de sols d'altitude aux pentes souvent très fortes, le défrichement est rapidement suivi d'érosion. Seules les plantations arborées, ou toute autre qui maintient bien le sol, pourront être assurées d'un avenir durable.

Si l'on se place en très haute altitude, la température s'abaisse notablement (inférieure à 10°) et la pluviométrie est encore plus élevée que précédemment (environ 3 m). L'individualisation de l'alumine continue à se poursuivre. Ceci amène à placer la limite de la ferrallitisation beaucoup plus loin que l'on ne l'admettait jusqu'à présent. L'effet de la pluie est donc, dans ce cas, prépondérant. Un autre caractère de ces sols est l'extrême abondance de la matière organique qui s'accumule sur une forte épaisseur (jusqu'à 80 cm) et présente une humidification poussée. La très forte pluviométrie fait que pratiquement toutes les bases sont éliminées par lessivage.

.../...

La disparition du couvert végétal arboré n'est pas un danger aussi grand pour ces sols que pour les précédents. L'horizon organique fonctionne comme une véritable éponge qui retient bien l'eau, aussi les effets de l'érosion y sont peu marqués. Leur mise en valeur suppose que le drainage est effectué simultanément.

3. Drainage normal : pluviométrie moyenne (0,8 à 1,5 m) température forte (26° environ).

Un sol formé dans de telles conditions climatiques évolue de façon sensiblement différente de celles des régions précédentes. Lorsque le sol s'approfondit, la végétation qui s'y installe est une forêt tropophile caractérisée par des essences à feuilles caduques où les légumineuses (Acacia, Dalbergia, Albizzia) sont particulièrement abondantes. Pendant le longue saison sèche, les processus de formation du sol sont peu actifs, faute d'eau. Pendant la saison des pluies, tous les processus jouent de façon efficace, mais pendant un temps relativement court. D'autre part en raison de la forte température, seulement une fraction réduite de l'eau de pluie pénètre dans le sol (environ le tiers). La transformation des minéraux y est moins poussée et en particulier le stade kaolinite ne sera pas dépassé. On a pu montrer qu'un peu d'anauxite est présente dans le sol. Le fer se trouve sous forme de goethite.

Cependant, les racines des arbres continuent d'explorer profondément le sol et à ramener en surface des quantités souvent notables de chaux, magnésie et potasse. La matière organique est beaucoup moins abondante que dans les sols précédents en raison des quantités moindres de débris végétaux qui tombent à la surface du sol. Le complexe absorbant est presque saturé et le pH peu acide.

La disparition de la végétation arborée se traduit ici encore par l'élimination de la matière organique et des bases de l'horizon de surface. La prairie ou la savane clairsemée qui succèdent à la forêt sont incapables d'assurer la remontée en surface des éléments nutritifs.

A la lumière de tous les exemples précédents, on peut constater que la forêt assure, grâce à son système racinaire puissant, un degré de fertilité intéressant à ces sols. Il n'est donc pas exagéré de dire que leur vocation est essentiellement forestière. Leur utilisation agricole peut cependant être effectuée à condition de remplacer la forêt par une plantation d'arbres susceptibles d'agir dans le même sens qu'elle (cacaoyers, caféiers, quinquinas, aleurites ou encore théiers suivant les conditions climatiques locales). Une mention spéciale doit être faite pour la canne à sucre qui est un conservateur très efficace de la matière organique, lorsque les feuilles sont coupées et non brûlées au moment de la récolte. C'est le cas de l'Ile Maurice où malgré deux siècles de culture ininterrompue, les teneurs en matière organique demeurent élevées. La culture de plantes vivrières devra se faire avec beaucoup de précautions de manière à limiter au maximum les effets de l'érosion. Une association étroite entre sylviculture, élevage et agriculture devra être assurée pour maintenir le niveau de fertilité du sol.

4. Drainage insuffisant : pluviométrie réduite (0,7 à 0,9 m).

Le sol va évoluer dans des conditions sensiblement différentes des précédentes. Les bases libérées par la roche-mère ne seront pas complètement éliminées et elles s'accumuleront sur place après carbonatation. A la base des pro-

.../...

fils, des nodules de carbonate de chaux sont fréquents ; parfois même, de véritables filonnets de calcaire existent entre les fragments de roche. Le pH demeure alcalin et la montmorillonite se maintient dans tout le profil. Les teneurs en bases échangeables sont élevées, ainsi que le degré de saturation. En raison des pluies, le niveau de la nappe phréatique est élevé et l'argile "gonfle". En saison sèche, d'importantes fentes de dessiccation se dessinent. Un peu de matière organique descend par ces fentes et la couleur du profil tend à s'homogénéiser. La végétation, qui est d'un type xérophile, ne pourra pas fournir au sol des quantités de matière organique appréciables.

La disparition de la couverture arborée a des effets moindres sur ces sols que sur les précédents. Le niveau de fertilité peut se conserver plus longtemps. Les sols à pente faible seront toutefois soumis à l'érosion en nappe et en ravins. La culture du coton devrait y être possible.

Ainsi, les sols dérivés de roches volcaniques basiques représentent par leur structure et texture favorables, leur richesse initiale en éléments fertilisants, et en matière organique un capital intéressant. La richesse de tels sols est sans commune mesure avec celle de sols dérivés d'autres roches-mères, les alluvions exceptées. Cette richesse est partiellement utilisée à Nossi Bé, en Montagne d'Ambre ou dans l'Itasy. Mais c'est un capital extrêmement fragile dont une grande partie est déjà fortement compromise, par suite de l'érosion. Une révision des méthodes agricoles et surtout pastorales est indispensable si l'on veut lui conserver sa valeur.

B I B L I O G R A P H I E .

La liste des articles et ouvrages auxquels nous nous sommes référé au cours de cette étude a été divisée en trois parties. La première concerne uniquement Madagascar et se rapporte plus spécialement à la première partie du texte. La deuxième a trait à la pédologie générale ; la troisième concerne uniquement les méthodes analytiques que nous avons utilisées.

- 1 BARRABÉ (J.), 1929.- Contribution à l'étude pétrographique et stratigraphique de la partie médiane du pays sakalava (Madagascar). Mem. Soc. Geol. France n° 12.
- 2 BARON (Rev.), 1896 - Geological notes of a trip to Ankaratra Vavavato and Antsirabe. Antananarivo Annual 20
- 3 BARON (Rev.), 1883.- Volcanoes in Eastern Imerina. Antananarivo Annual, 7, 56-61.
- 4 BASSE (E.), 1949.- Histoire géologique de Madagascar. Mem. Inst. Sci. Madag. D-1-2, 53-68.
- 5 BÉSAIRIE (H.), 1932 à 1939.- Cartes géologiques au 1/200.000 avec notices. Feuilles de Ambanja, Ampombilava, Marovoay, Nossi-Bé, Bealanana, Majunga, Tsivory. Imp. Off. Tananarive-Madagascar.
- 6 BÉSAIRIE (H.), 1936.- Recherches géologiques à Madagascar. La géologie du Nord-Ouest, Mem. Acad. Malg. 21, 259 pp.
- 7 BÉSAIRIE (H.), 1939.- L'altération des roches et la formation des sols à Madagascar. Pub. Bur. Et. Geol. Min. Col. n° 12 ; 112 pp.
- 8 BÉSAIRIE (H.), 1946.- Essai d'une carte des sols de Madagascar Bur. Geol. Serv. Mines. Tananarive.
- 9 BÉSAIRIE (H.), 1946.- La géologie de Madagascar en 1946. Ann. Geol. Serv. Mines. Tananarive.
- 10 BÉSAIRIE (H.), HOLMES (A.) 1954.- Premières mesures de géochronologie à Madagascar. Mem. I.R.S.M. D-VI, 191-9
- 11 CARLE (G.), 1916-7.- Notes sur les coulées de l'Antsifitra et du Iavoka et sur les vallées de comblement qu'elles ont provoquées. Bull. Acad. Malg. 167-72.

- 12 CARRIER (A.), 1914.- Le Massif de l'Ankaratra et ses abords. Ann. Geogr. Paris 23, 60-71.
- 13 GOLIN (R.P.), 1916-7.- La pression atmosphérique sur le mont Tsiafajavona. La température sur le mont Tsiafajavona, 2630 m. Bull. Acad. Malg. 191-207.
- 14 DECARY (R.), 1922-3.- Les dernières éruptions du Massif d'Ambre. Bull. Acad. Malg. 6, 67-8.
- 15 DECARY (R.), 1923.- Le district de Maromandia. Bull. Econ. Mad. 2, 1-18.
- 16 ERHART (H.), 1926.- L'influence de l'origine géologique et des facteurs extérieurs sur la formation et la valeur culturale des terres latéritiques de l'Est de Madagascar. Larose Paris 112 pp.
- 17 ERHART (H.), 1930.- Sur la nature et l'origine des sols à Madagascar. C.R. Ac. Sc. 10,6.
- 18 ERHART (H.), 1933.- Traité de pédologie (spécialement tome 2) Strasbourg.
- 19 FRANCOIS (E.), 1933.- L'Ankaizinana. Revue de Madagascar n° 4.
- 20 FURON (R.), 1949.- Notes sur la paléogéographie de Madagascar. Mém. Inst. Sci. Mad. D, 1-2, 69-80.
- 21 GALTIE (L.), 1928.- Le Vakinankaratra agricole. Bull. Econ. Mad. 89-99.
- 22 HOURCQ (V.), 1937.- Carte géologique au 1/200.000 avec notice. feuille de Soalala. Imp. Off. Tananarive.
- 23 HUMBERT (H.), 1927.- Principaux aspects de la végétation à Madagascar. Mem. Acad. Malg. 5,79, pp. XLI pl.
- 24 LACROIX (A.), 1912.- Le massif de l'Ankaratra. C.R. Ac. Sc. 156, 476-81.
- 25 LACROIX (A.), 1912.- Les volcans du centre de Madagascar. Le massif de l'Itasy. C.R. Ac. Sc. 154, 5 fev.

- 26 LACROIX (A.), 1913.- Sur la constitution minéralogique et chimique des laves des volcans du centre de Madagascar. C.R.Ac. Sc. 156, 175-7.
- 27 LACROIX (A.), 1926.- La minéralogie de Madagascar. Challamel Paris. 3 vol. (en particulier le Tome 3).
- 28 LANDAIS (A.), 1909.- Le massif d'Ambre. La géographie 19, 227-75
- 29 LEMOINE (P.), 1906.- Etudes géologiques dans le Nord de Madagascar. Contribution à l'étude de l'Océan Indien.
- 30 LENOBLE (A.), 1938.- Sur la chronologie des éruptions volcaniques du massif de l'Ankaratra. C.R. Ac. Sc. 206.
- 31 LENOBLE (A.), 1938.- Carte géologique au 1/200.000 avec notice. feuille d'Antsirabé. Imp. Off. Tananarive.
- 32 LENOBLE (A.), 1940.- Le massif volcanique de l'Itasy. Mem. Acad. Malg. 32, 43-77, XVI pl.
- 33 MOUREAUX (C.), 1955.- Notice sur la carte pédologique au 1/200.000 feuille de Maevatanana. Mem. Inst. Sci. Madag. D,7 (sous presse).
- 34 MOUREAUX (C.), 1955.- Les sols de marais d'Ambila-Manakara. Mem. Inst. Sci. Madag. D,7 (sous presse).
- 35 MOUREAUX (C.), TERCINIER (G.), 1953.- Carte des valeurs du coefficient de Meyer. Mém. Inst. Sci. Madg. D,5 197-201.
- 36 MUTHUON (R.P.), 1916-7.- Compte-rendu d'un voyage géologique en bordure Sud et Ouest de l'Ankaratra. Bull. Acad. Malg. 167-72.
- 37 MUTHUON (R.P.), 1916-7.- L'ancien volcan d'Ambatolampy (Ankaratra). bull. Acad. Malg. 163-4.

- 38 MUTHUON (R.P.), 1911.- Quelques remarques sur le massif volcanique de l'Itasy. Bull. Acad. Malg. (anc. Sér.) 9, 185-7.
- 39 NICOLAS, 1908.- La culture des céréales dans le Vakinankaratra. Bull. Econ. Madag. 51-3.
- 40 PERNET (R.), 1954.- Evolution des sols de Madagascar sous l'influence de la végétation. Mém. Inst. Sci. Madag. D,6, 201-419.
- 41 PERRIER de la BATHIE (H.), 1921.- La végétation malgache. Challamel Paris.
- 42 PERRIER de la BATHIE (H.), 1927.- Le Tsaratanana, l'Ankaratra, l'Andringitra. Mém. Acad. Malg. 3.
- 43 PERRIER de la BATHIE (H.), 1918-9.- Les terrains postérieurs au Crétacé moyen de la région de Majunga. Bull. Acad. Malg. 4, 205-19.
- 44 POISSON (H.), 1916-7.- Principaux faciès biologiques de Diégo-Suarez. Bull. Acad. Malg. 3, 227.
- 45 RAVET (J.), 1952.- Notice sur la climatologie de Madagascar. Mém. Inst. Sci. Madagascar. D, 4-1, 1-36.
- 47 RIQUIER (J.), 1952.- Notice sur la carte pédologique d'Anjouan et Mayotte. Mém. Inst. Sci. Madg. D,4.
- 48 ROCHE (P.), VELLY (J.), 1953.- Etude des sols utilisés pour la culture de la canne à sucre à Madagascar. Agron. Trop. 8, 374-92.
- 49 SAINT OURS de (J.), 1951.- Carte géologique au 1/200.000 avec notice. Feuilles de Namakia et Mitsinjo. Trav. Bur. Géol. Serv. Mines. Tananarive. N° 34. 73 pp.
- 50 SAINT OURS de (J.), 1952.- Cartes géologiques au 1/200.000 avec notices. Feuilles de Diégo-Suarez et Andranofanjava. Trav. Bur. Géol. Serv. Mines. Tananarive. N° 37.
- 46 RIQUIER (J.), 1951.- Notice sur la carte pédologique au 1/200.000 de la basse vallée du Mandrare. Mém. Inst. Sci. Madg. D,3, 43-85. .../...

- 51 SEGALEN (P.), 1949.- Etude des sols de la station des quinquinas (Montagne d'Ambre). Mém. Inst. Sci. Mad. D, 3 165-79.
- 52 SEGALEN (P.), 1955.- Notice sur les cartes pédologiques au 1/200.000 feuilles de Marovoay, Mitsinjo et Diégo-Suarez. Mém. Inst. Sci. Madag. D, 7 (sous presse).
- 53 SEGALEN (P.), TERCINIER (G.), 1951.- Notice sur la carte pédologique de l'Ankaizina. Mém. Inst. Sci. Madag. D, 3 181-283.
- 54 TERCINIER (G.), 1951.- Prospection pédologique de la région de Diégo-Suarez Ambavahibé. Mém. Inst. Sci. Mad. D, 4 37-70.
- 55 ANONYME, 1932 - Latérite and lateritic soils. Techn. Com. 24, Imp. Bur. Soil. Sci. Harpenden.
- 56 ARSANDAUX (M.), 1913.- Contribution à l'étude de l'altération des roches silicatées alumineuses dans les régions intertropicales. Bull. Soc. Fr. Minér. 36, 70-110.
- 57 AUBERT (G.), 1945-1954.- Cours de pédologie profes é à l'O.R.S.T.O.M.
- 58 AUBERT (G.), Les sols de la France d'Outre-Mer.
- 59 AUBERT (G.), 1954.- La classification des sols utilisés dans les territoires tropicaux de l'Union française. C.R. 5° Conf. Interaf. Sols. Léopoldville 705-708.
- 60 AUBERT (G.), 1954.- Les sols latéritiques. C.R. 5° Cong. Inter-Sci. Sol. Léopoldville. 1, 103-108.
- 61 AUBERT (G.), 1954.- Les sols hydromorphes d'Afrique Occidentale Française. C.R. 5° Cong. Intern. Sci. Sol. Léopoldville, 4, 447-450.
- 62 AUBERT (G.), HENIN (S.), 1945.- Relation entre le drainage, la température et l'évolution des sols. C.R. Acad. So. 220, 230-2. .../...

- 63 BACHELIER (G.), LAPLANTE (A.), 1953.- Sur l'origine et la formation des cuirasses dites latéritiques dans l'Adamaoua (Nord-Cameroun). C.R. Acad. Sci. 237, 1277-9.
- 64 BAL (D.V.), 1935.- Some aspects of the Black Cotton Soils of Central Provinces, India. Emp. J. Exp. Agric. 3, 261-8.
- 65 BAUER (M.), 1898.- Beitrag zur Geologie der Seychellen, in besondere zur Kenntnis des Laterits. Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. 2, 163-194.
- 66 BAUER (M.), 1907.- Beitrag zur Kenntnis des Laterits in besondere dessen von Madagascar. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Festband des 100 jährigen Bestehens. Stuttgart. 38-90.
67. BAYENS (J.), 1938.- Les sols d'Afrique Centrale. Pub. I.N.E.A.C. Bruxelles, Belgique, 375 pp.
- 68 BAVER (L.D.), SCARSETH (S.D.), 1930.- Subtropical weathern in Alabama as evidenced in the Susquehanna fine sandy loam profile. Soil Res. 2, 288-307.
- 69 BEMMELN VAN (J.M.), 1904.- Beitrag zur Kenntnis des Verwitterung Produkte des Silikate in Ton-vulkanischen und Laterit Boden. Zeitsch. Anorg. und ag. Chemie 42, 265-314.
- 70 BEMMELN VAN (J.M.), 1900.- The various kinds of weathering of the silikate rocks of earth's crust. Zeitsch. Anorg. und allg. Chemie. 56, 322-357.
- 71 BLACKIE (W.J.), 1949.- Soils of Fiji. Proc. 1^o Commonwealth conf. Trop. Subtrop. Soils. Harpenden 54-8.
- 72 BOTELHO DA COSTA (J.V.), AZEVEDO (A.L.), 1953.- Solos de Angola. Minist. Ultramar. Lisboa, Portugal. 364 pp.

.../...

- 73 BRAMAQ (L.), GARCIA (S.), MARQUES (F.S.), TEIXEIRA (A.), 1951.-
The soil Map of Portugal. C.R. 4° Cong. Inter. Sci. Sol. Amsterdam, 1, 290-6.
- 74 BRINDLEY (G.W.), 1950. - The structure of clay minerals. C.R. 4° Conf. Intern. Sc. Sol. Amsterdam, 1, 82-5,
- 75 BRINDLEY (G.W.), 1951. - X-Ray identification and cristal structures of clay minerals. London. 355 pp.
- 76 BROWN (W.O.), 1951.- The cation exchange properties of the basaltic drift soils of North-Eastern Ireland. Emp. J. Exp. Agric. 29, 134-8.
- 77 BROWN (W.O.), 1954.- Some soil formations of the basaltic regions of Northern Ireland. Irish. natur. J. 11, 5
- 78 BUCHANAN (F.), 1807.- A Journal from Madras through Mysore, Canara and Malabar. 3 vol. London.
- 79 BURNOTTE (J.L.), 1952.- Les sols du Kivu ; les sols de cendrées volcaniques. Com. Nat. Kivu. Nlle. Sér. 3, 69 pp.
- 80 BYERS (H.G.), ALEXANDER (T.), HOLMES (R.S.), 1935. - La composition et la constitution des colloïdes de certains grands groupes de sol U.S.D.A. Techn. Bull. 484, 38 pp.
- 81 CAILLERE (S.), HENIN (S.), 1947.- Application de l'analyse thermique différentielle à l'étude des argiles du sol. Ann. Agron. 23-72.
- 82 CAILLERE (S.), HENIN (S.), 1950.- Quelques remarques sur la synthèse des minéraux argileux. C.R. 4° Conf. Inter. Sci. Sol. 1, 86-8.
- 83 CAILLERE (S.), HENIN (S.), 1950.- Mécanisme d'évolution des minéraux phylliteux. C.R. 4° Conf. Inter. Sci. Sol. 1, 96-8.
- 84 CAILLERE (S.), HENIN (S.), 1951.- Etude de l'altération de quelques roches en Guyane. Ann. Agron. 4, 414-24.
- 85 CAILLERE (S.), HENIN (S.), ESQUEVIN (J.), 1955.- Synthèse à basse température de quelques minéraux ferrifères

- (silicates et oxydes). Bull. Soc. Franc. Miner. Crist. 58, 227-41.
- 86 CAMPBELL (J.M.), 1917.- Latérite ; its origin, structure and minerals. The Mining Magazine. 17, 67-77, 120-128, 171-179, 220-229.
- 87 CARROLL (D.), WOOLF (M.), 1951.- Laterite developed on basalt at Inverell, New South Wales. Soil Sci. 72, 87, 99.
- 88 CASTAGNOL (C.E.), 1952.- Contribution à l'étude des terres rouges balsamiques et dacitiques des hauts plateaux du Sud de l'Indochine. Arc. Rech. Agron. au Cambodge, Laos et Vietnam N° 12, 123 pp.
- 89 CHAUTARD (J.), LEMOINE (P.), 1908.- Sur le phénomène de latéritisation. Bull. Soc. Géol. France. 4-8, 35-38.
- 90 COLLIER (D.), 1949.- Contribution à l'étude des terres noires de la limagne d'Auvergne. Constitution et genèse. Ann. Agron. 1-77.
- 91 COSTIN (A.B.), HALLSWORTH (E.G.), WOOLF (M.), 1952.- Studies in Pedogenesis in New South Wales. III. The alpine humus soils. J. Soil Sci. 3,2, 190-218.
- 92 COSTIN (A.B.), 1955.- A note on basalt soils in Britain and Australia. J. Soil Sci. 6, 268-9.
- 93 CRAIG (N.), 1934.- Quelques propriétés des sols de Maurice cultivés en canne à sucre. Sta. Rech. sur canne à sucre. (Ile Maurice). Bull. N° 4.
- 94 CRAIG (N.), HALAIS (P.), 1934.- The influence of maturity and rainfall on the properties of lateritic soils in Mauritius. Emp. J. Exp. Agric. 2, 349-58.
- 95 GRAIG (N.), 1935.- L'échange de bases dans les sols de l'île Maurice. Dept. Agric. Mauritius Sugar cane Research Station Pub. N° 9.
- 96 CROWTHER (E.M.), 1930.- The relationship of climatic and geological factors to the composition of soil clay and the distribution of soil types. Proc. Rev. Soc. B. 107, 1-3. .../...

- 96 DAMES (T.W.G.), 1949.- Some notes on the soil survey of Java. Proc. Ist Commonwealth Conf. Trop. Sub-trop. Soils, 115-120.
- 97 DEMOLON (A.), 1954.- La dynamique du sol, Dunod, Paris.
- 98 DEMOLON (A.), 1949.- La génétique des sols. Pr. univ, France . Paris. 135 pp.
- 99 DEMOLON (A.), AUBERT (G.), HENIN (S.), 1948.- Tendances actuelles de la pédologie dans les régions tropicales et subtropicales. C.R. Ac. Sc. 227, 5-8.
- 100 D'HOORE (J.), 1952.- Essai de classification des zones d'accumulation des sesquioxydes libres sur des bases génétiques. C mité Régional de l'Afrique Centrale pour l'utilisation et la conservation des sols. Yangambi. Congo-Belge.
- 101 D'HOORE (J.), 1954. - 15 pp. *Clay minerals as clues to the mode of formation of ancient sesquioxide accumulation zones. C.R. 5 Cong Intern. Sci. Sol. Leopoldville 4, 45-47.*
- 102 EDELMAN (C.H.), 1946.- Les principaux sols de Java. Rev. Bot. Appl. 26, 505-511.
- 103 EDELMAN (C.H.), 1950.- The iso-electric formation of lateritic soils. C.R. 4^o Cong. Intern. Sci. Sol. 1, 308-10.
- 104 EDELMAN (C.H.), SCHUFFELEN (A.C.), 1947.- On the origin of some clay minerals in soils. C.R. Conf. Pedol. Médit. Montpellier. 109-114.
- 105 ELLIS (B.S.), 1952.- Genesis of a tropical soil. J. Soil Sci. 3, 52-62.
- 106 ERHART (H.), 1933.- Traité de pédologie. Strasbourg. 2 vol.

- 107 ERHART (H.), 1939. - Alteration des roches et mode de formation des principaux types de sols. Etude des alterations superficielles. Bur. Et. Géol. Min. colon. Pub. n° 12 1-16.
- 108 FERGUSON (J.A.), 1954. - Transformations of clay minerals in black earths and red loams of basaltic origin. Austra Journ. Agric. Res. 98-107.
- 109 FERMOR (L.), 1911. - What is laterite ? Geol. Mag. 5, V,8, 454-462.
- 110 FIELDS (M.), SWINDALE (L.D.), RICHARDSON (J.P.), 1952. - Relation of colloidal hydrous oxides to the high cation-exchange capacity of some of the Cook islands. Soil. Sci. 73, 197-206.
- 111 FOX (C.S.), 1936. - Buchanan's laterite of Malabar and Canara. Records Geol. Surv. India. 69, 389-422.
- 112 FRANC DE FERRIERE (J.J.), 1951. - Microstructure des argiles et problèmes potassiques. Soc. Com. Pot. Alsace Mulhouse.
- 113 FRANCO-URIBE (A.), 1946. - Characteristics and relationships of soils from tuffaceous materials in Columbia (S.A.). Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. 11, 431-437.
- 114 FRIPIAT (J.J.), G STUCHE (M.C.), COUVREUR (J.), 1955. - Nature de la fraction argileuse des sols du Congo-Belge et du Ruanda-Urundi. C.R. 5° Cong. Sci. Sol. Léopoldville, 2, 430-8.
- 115 GLANGEAUD (L.), 1942. - Etude statistique de l'action du bioclimat sur les caractères chimico-minéralogiques des sols de la Côte d'Ivoire. C.R. Ac. Sc. 215, 360-2.

- 116 GRANGE (L.I.), 149.- Soils of some south Pacific islands. Proc. Commonwealth conf. Trop. Subtrop. Soils. Harpenden 45-8.
- 117 GREENE (H.), 1945.- Classification and Use of Tropical Soils. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. 10, 392.
- 118 GUENNELON (R.), 1954.- Erosion des sols et pédogénèse dans une île volcanique de la zone intertropicale : la Réunion. Bull. A.F.E.S. 51, 12-19.
- 119 HAL LIS (P.), 1946.- Données essentielles sur les sols de l'île Maurice. Rev. Agric. Ile Maurice. 25, 192-7.
- 121 HALLSWORTH (E.G.), 1951.- An interpretation of the soil formations found in the Richmond-Tweed region of New South Wales, Austr. J. Agric. Res. 2, 411-428.
- 122 HALLSWORTH (E.G.), COSTIN (A.B.), GIBSONS (F.R.), 1952.- Studies on pedogenesis in New South Wales. II The Chocolate Soils. J. Soil Sc. 3, 103-24.
- 123 HARDON (H.J.), PAVEGEE (J.C.L.), 1939. - Analyse par les rayons X des principaux types de sols de Java. Pub. Ec. Sup. Agric. Wageningen. 43,6, 55-9.
- 124 HARDY (F.), RODRIGUES, 1939. - Place of the term "Laterite" in the classification of soils. Soil Sci. 48, 37-8.
- 125 HARDY (F.), 1949.- Soil classification in the caribbean region Proc. Commonwealth Conf. Trop. Subtrop. Soils Harpenden. 64-75.
- 126 HARRASSOWITZ (H.), 1926.- Laterit. Forschritte des Geologie und paläontologie. 4, 253-566.
- 127 HARRISON (J.B.), The Katamorphism of igneous rocks. Harpenden England.
- 128 HENIN (S.), TERNISIEN (J.), 1944.- Sur une relation entre la pluviosité, le drainage et l'évaporation. C.R. Ac. Sc. 219, 80-2.

- 129 HENIN (S.), GODARD (M.), 1944.- Relation entre évaporation, la température et l'indice d'aridité. CR. Ac. Sc. 219, 559-60.
- 130 HOSKING (J.S.), 1935.- A comparative study of the Black earths of Australia and the Regur of India. Trans. Proc. Roy. Soc. South Australia, 59, 168-200.
- 131 HOUGH (G.J.), BYERS (H.G.), 1937.- Chemical and physical studies of certain Hawaiian soil profiles. U.S.D.A. Techn. Bull. N° 584, 26 pp.
- 132 HOUGH (G.J.), GILE (P.L.), FOSTER (Z.C.), 1941.- Rock weathering and soil profile development in the Hawaiian soils. U.S.D.A. Techn. Bull. N° 548.
- 133 JACKSON (M.L.), TYLER (S.A.), WILLES (A.L.), 1948.- Weathering sequence of clay-size minerals. J. Phys. Coll. Chem. 52, 1237-60.
- 134 JENNY (H.), 1941.- The factors of soil formation. Mc Graw Hill New-York 281 pp.
- 135 JENNY (H.), 1948.- Great soil in the equatorial regions of Columbia, South America. Soil. Sci. 66, 5-28.
- 136 JENNY (H.), LEONARD (C.H.), 1934.- Relationships between soil properties and rainfall. Soil Sci. 38, 363.
- 137 JESUS de (A.), ZBYSZEWSKI (G.), 1952.- Contribution à l'étude du "complexe basaltique" de Lisbonne. Dir. Gale. Minas Serv. Geol. Lisbonne. 40 pp. XIV pl.
- 138 JOFFE (J.S.), 1949.- Pedology. Pedol. Publ. New Brunswick N.J. 662 pp.
- 139 KELLOGG (C.E.), 1949.- Preliminary suggestions for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. Proc. Com-

- monwealth Conf. Trop. Subtrop. Soils. Harpenden
76-84.
- 140 KELLOGG (C.E.), 1950.- Tropical soils. C.R. 4° Cong. Intern.
Sc. Sol. Amsterdam. 1, 266-76.
- 141 KELLOGG (C.E.), DAVOL (F.D.), 1949.- An exploratory survey of
the soils of the Belgian Congo. Pub. I.N.E.A.C.
Bruxelles, n° 46, 73 pp.
- 142 LACROIX (A.), 1913.- Les latérites de Guinée et les produits
d'altération qui leur sont associés. Nlles.
arch. Mus. Hist. Nat. 5,5, 255-358.
- 143 LAPLANTE (A.C.), 1954.- Les sols rouges latéritiques formés
sur basaltes anciens au Cameroun. C. R. 5° Conf.
Inter. Sci. Sol. Léopoldville. 140-3.
- 144 LAPLANTE (A.C.), 1954.- Les sols foncés d'origine basaltiques
au Cameroun. C.R. 5° Conf. Inter. Sci. Sol.
144-8.
- 146 LAPPARENT de (J.), 1936.- Les milieux générateurs de la montmo-
rillonite et de la sépiolite. C.R. Ac. Sci.
203, 553-5.
- 145 LAPLENTE (A.C.), BACHELIER (G.), 1954.- Les principaux sols
formés sur roches volcaniques au Cameroun.
Observations sur leur fertilité et leur ex-
ploitation agricole. C.R. 5° Conf. Sci. Sol.
Léopoldville 441-51.
- 147 MAIGNIEN (R.), 1954.- Différents processus de cuirassement en
A.O.F., C.R. 5° Conf. Inter. Sci. Sol. Léopol-
dville.
- 148 MARBUT (C.F.), 1927.- A Scheme for soil classification. Proc.
1° Int. Cong. Soil. Sci., Washington. 1-32.
- 149 MARTIN (F.J.), 1930.- Position of soil surveys in various parts
of the empire overseas. Emp. Bur. Soil. Sci.
Techn. Comm. N° 7, 28-31. .../...

- 150 MARTIN (F.J.), DOYNE (H.C.), 1927.- Laterite and lateritic soils in Sierra Leone. J. Agric. Sci. 20, 135-43.
- 151 MERWE, VAN DER (C.R.), 1940.- Soil groups and sub-groups of South Africa. Un. South Afr. Dept. Agr. For. Bull. 231
- 152 MERWE, VAN DER (C.R.), 1949.- South African soil types. Proc. 1° Commonwealth Conf. Trop. Subtrop. Soils. Harpenden. 8-15.
- 153 MERWE, VAN DER (C.R.), 1949.- The subtropical black caly soils. Proc. 1° Commonwealth Conf. Trop. Subtrop. Soils. Harpenden. 43-45.
- 154 MERWE, VAN DER (C.R.), 1949.- A few notes with regard to misconceptions concerning soils of the tropics and subtropics. Proc. 1° Commonwealth Conf. Subtrop. Soils. 128-130.
- 155 MERWE, VAN DER (C.R.), HEYSTEK (H.), 1952.- Clay minerals of South African soil groupe. I Laterites and related soils. Soil Sci. 74, 383-401.
- 156 MERWE, VAN DER (C.R.), HEYSTEK (H.), 1955.- Clay minerals of South African soil groups. II Subtropical Black clays and related soils. Soil Sci. 79 147-158.
- 157 MERWE, VAN DER (C.R.), HEYSTEK (H.), 1955.- Clay mineral of South African soil groups. III Soils of desert and adjoining semiarid regions. Soil Sci. 80, 479-94.
- 158 MIDDLEBURG (H.A.), 1950.- Tentative scheme for classification of tropical and subtropical soils. C.R. 4° cong. Intern. Sci. Sol. Amsterdam. 4, 139-42.
- 159 MILLOT (G.), 1949.- Relations entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses. Géol. Appl. Prosp. Min. II, 2-3-4, 352 pp.

- 160 MILLOT (G.), 1950.- Comparaison entre les indications de la pédologie et de la géologie au sujet de la génèse des minéraux argileux. C.R. 4^o Cong. Inter. Sci. Sol. Amsterdam. 3,37-40.
- 162 MILNE (G.), 1936.- A provisional soil map of East Africa. Amani, Tanganyika.
- 163 MILNE (G.), 1935.- A short geographical account on the soils of East Africa. Trans. 3^o Intern. Cong. Soil Sci. I, 270-4.
- 164 MOHR (E.C.J.), 1944.- Soils of equatorial regions. Trad. R. Pendleton. Ann. Arbor Mich. U.S.A.
- 165 MOHR (E.C.J.), VAN BAREN (F.A.), 1954.- Soils of equatorial regions. Interscience Publishers London, New York;
- 166 MONTARLOT (G.), FABRE (S.), 1952.- Observations sur les roches et les sols des C vennes et du Massif Central. Dehan, Montpellier 46 pp.
- 167 MUIR (A.), 1951.- Notes on the soils of Syria. J. Soil Sci. 2, 163-82.
- 168 NAGELSCHMIT (G.), 1939.- Identification of minerals in soil colloids. J. Agric. Sci. 4, 477-99.
- 169 NAGELSCHMIT (G.), DESAI (D.), MUIR (A.), 1940.- The minerals in the clay fractions of a black cotton soil and a red earth from Hyderabad, Dekkan state, India. J. Agric. Sc. 30, 639-53.
- 170 OAKES (H.), THORP (J.), 1950.- Dark clay soils from warm regions, variously called Rendzina, Black Cotton soils, Regur and Tirs. Proc. Soil. Sci. Amer. 347-54.
- 171 OWEN (G.), 1951.- A provisional classification of Malayan soils. J. Soils Sci. 2, 20-42.

- 172 PENDLETON (R.L.), 1941.- Laterite, or "Sila Laeng", a peculiar formation. Thai Sc. Bull. 3, 61-77.
- 173 PENDLETON (R.L.), 1936.- On the use of the term "Laterite". Amer. Soil Surv. Ass. 17, 102-108.
- 174 PENDLETON (R.L.), SHARASUVANA (S.), 1942.- Analyses and profile notes of some laterite soils and soils with iron concretions of Thailand Soil. Sci. 54, 1-26.
- 175 PENDLETON (R.L.), SHARASUVANA (S.), 1946.- Analyses of some siamese laterites. Soil Sci. 62, 423-440.
- 176 PREEZ, du (J.W.), 1949.- Laterite ; a general discussion with a description of Nigerian occurrences. Bull. Agric. Congo-Belge. 40, 1, 53-66.
- 177 PRESCOTT (J.A.), HOSKING (J.S.), 1936.- Some red basaltic soils from Eastern Australia. Trans. Roy. Soc. South Australia. 60, 35-45.
- 178 PRESCOTT (J.A.), 1949.- A climatic index for the leaching factor in soil formation. J. Soil Sci. 1, 9-19.
- 179 PRESCOTT (J.A.), PENDLETON (R.L.), 1952.- Laterite and lateritic soils. Commonwealth Agric. Bur. Techn. Pub.n° 47.
- 180 REIFENBERG (A.), 1942.- The soils of Palestine. Th. Murby and sons. London. 179 pp.
- 181 REIFENBERG (A.), 1952.- The soils of Syria and Lebanon. J. Soil Sci. 3, 68-78.
- 182 RETZER (J.L.), 1948.- Soils developed from basalt in Western Colorado. Soil Sci. 66, 365-75.
- 183 RIVIERE (A.), 1951.- Les progrès récents dans la connaissance des minéraux argileux. Signification céramique et géologique. Bull. Soc. Fr. Céram. 10, 11-19, 13, 2-19.

- 184 ROBINSON (G.W.), 1949.- Soils ; their origin, constitution and classification. Th. Murby and sons. London.
- 185 ROBINSON (G.W.), 1949.- Some considerations on soil classification. J. Soil Sci. 1, 150-5.
- 186 ROBINSON (W.O.), HOLMES (R.S.), 1924.- The chemical composition of soil colloids. U.S. Dept. Agric. Bull. 1311.
- 187 SCHMID (M.), SOUCHERE, de la (P.), GODARD (D.), 1951.- Les sols et la végétation au Darlac et sur le plateau des Trois Frontières. Arch. Rech. Agron. Cambodge, Laos et Vietnam. N° 8.
- 188 SEELYE (F.T.), GRANGE (L.I.), DAVIS (L.H.), 1938.- Les laterites dans la zone occidentale des îles Samoa. Soil Sci. 46, 23-31.
- 189 SHANTZ (H.L.), MARBUT (C.F.), 1923.- The vegetation and soils of Africa. New York. 263 pp.
- 190 SHERMAN (G.D.), 1949.- Some factors influencing the development of lateritic and laterite soils in the Hawaiian islands. Pacific Sci., 3, 307-14.
- 191 SHERMAN (G.D.), FOSTER (Z.C.), FUJIMOTO (C.K.), 1948.- Some of the properties of the ferruginous humic latosols of the Hawaiian Islands. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. 13, 471-6.
- 192 SHERMAN (G.D.), 1950.- Hawaiian ferruginous laterite crusts. Pacific Sci. 4, 315-22.
- 193 SHERMAN (G.D.), 1952.- The titanium content of Hawaiian soils and its significance. Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 16, 15-8.
- 194 SHERMAN (G.D.), KANEHIRO (Y.), MATSUSAKA (Y.), 1953.- The role of deshydration in the development of laterite. Pacific Sci. 7, 438-46.

- 195 SIMONSON (R.W.), 1954.- Morphology and classification of the Regur soils of India, J. Soil. Sci. 5, 275-88.
- 196 SIMONSON (R.W.), 1954.- The regur soils of India and their utilisation. Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. 18, 199-203.
- 197 STEPHENS (C.G.), 1937.- The basaltic soils of Northern Tasmania. C.S.I.R. Australia, n° 108.
- 198 STEPHENS (C.G.), 1950.- Comparative morphology and genetic relationships of certain Australian, North American, and European soils, J. Soil Sci. I, 124-48.
- 199 STEPHENS (C.G.), 1953.- A manual of Australian soils. C.S.I.R. Melbourne. Australia.
- 200 STEPHENS (C.G.), 1955.- The classification of Australian soils. C.R. 5° Cong. Inter. Sci. Sol. Léopoldville 4, 155-60.
- 201 TAMHANE, 1950.- Regur soils of India. C.R. 4° Cong. Inter. Sci. Sol. Amsterdam. 3, 131-4.
- 202 TAMURA (T.), JACKSON (M.L.), SHERMAN (G.D.), 1953.- Mineral content of low-humic, humic and hydrol humic latosol of Hawaii. Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 17 - 343-7.
- 203 TAMURA (T.), JACKSON (M.L.), SHERMAN (G.D.), 1955.- Mineral contents of a latosolic brown forest soil and a humic ferruginous latosol of Hawaii. Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 19, 435-9.
- 204 TANADA (T.), 1951.- Certain properties of the inorganic colloidal fractions of Hawaiian soils. J. Soil Sci. 2, 83-96.

.../...

- 205 TEAKLE (L.J.H.), 1952.- An interpretation for the occurrence of diverse types of soils on basalt in Northern. New South Wales and Queensland. Austr. J. Agr. Res. 3, 391-408
- 206 THORP (J.), BALDWIN (M.), 1940.- Laterite in relation to the soils of the tropics. Ann. Ass. Amer. Geogr. 30, 163-194.
- 207 THORPS (J.), BALDWIN (M.), 1948.- New nomenclature in the higher categories of soil classification as used in the U.S.D.A. Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 3, 260-8.
- 208 THORP (J.), SMITH (G.D.), 1949.- Higher categories of soil classification ; order, sub-order, and great soil group. Soil Sci. 67, 117-26.
- 209 THORP (J.), SMITH (G.D.), 1949.- Some considerations on soil classification. J. Soil Sci. 1, 150-5.
- 210 VINE (H.), 1949.- Nigerian soils in relation to parent materials. Proc. 1^o Commonwealth Conf. Trop. Subtrop. Soils. Harpenden. 22-9.
- 211 VOORT, VAN DER (M.), 1950.- The lateritic soils of Indonesia. C.R. 4^o Cong. Inter. Sc. Sol. 1, 277-81.
- 212 WAEAGEMANS (G.), 1951.- Introduction à l'étude de la latérisation et des latérites du Centre Africain Bull. Agric. Congo Belge 42, 13-56.
- 213 WAEAGEMANS (G.), 1951.- Latérites et Bauxites. Bull. Agric. Congo Belge. 42, 567-74.
- 214 WILLIAMS (R.), 1932.- The contribution of clay and organic matter to the base exchange capacity of soils. J. Agric. Sc. 22, 845-51.

- 215 ANNE (P.), 1945.- Sur le dosage de la matière organique des sols. Ann. Agron. 161.-
- 216 BAEYENS (J.), 1936.- Les sols du Bas-Congo. Bruxelles 181-2.
- 217 BASTISSE (E.M.), 1947.- Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Ann. Agron. 3; 398-454.
- 218 CHAMINADE (R.), 1946.- Sur une méthode de dosage de l'humus dans les sols. Ann. Agron. 119-132.
- 219 DEMOLON (A.), LEROUX (D.), 1952.- Guide pour l'étude expérimentale du sol. Gauthier-Villars. Paris.
- 220 GRAHAM (E.R.), 1948.- Determination of Soil organic matter by means of a photoelectric colorimeter. Soil Sci. 65, 181-4.
- 221 MACKENZIE (R.C.), 1952.- A micromethod for determination of cation exchange capacity of clay. Clay Min. Bull. 1; 203-5.
- 222 PEECH (M.), 1945.- Determination of exchangeable cations and exchange capacity of soils. Soil Sci. 59, 25-8.
- 223 SEGALIN (P.), 1954.- Détermination des rapports silice/alumine et silice/hydroxydes des sols. Mém. Inst. Sci. Madag. D,6, 87-103.
- =====

(suite).

	pages
Chapitre 10 - La Fraction argile.	186
Quatrième Partie. Les sols dérivés de roches volcaniques basiques dans d'autres régions du globe.	216
Chapitre 11 - Les sols de la zone intertropicale.	218
Chapitre 12 - Les sols de la zone tempérée.	228
Conclusions.	240
Bibliographie.	247
