

TABLES DE MATIERES

PREMIERE PARTIE : RAPPELS ET GENERALITES DES LATERITES

CHAPITRE I : DEFINITIONS1-2

I. DEFINITION DES LATERITES2

I.1 TERMINOLOGIE DE BUCHANAN (1807) IN AUTRET. P. (1983).....2

I.2 LA LATERITE D'APRES LE LAROUSSE (1975).....2

I.3 LA LATERITE VUE PAR UN VOYAGEUR.....2

I.4 LA LATERITE VUE PAR DES INGENIEURS.....2

I.4.1 La Latérite en Génie Civil.....3

I.4.2 La Latérite pour les Chimistes.....3

I.4.3 La LATERITE pour les Géologues.....3

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES LATERITES.....3

II.1 SENS ET LIMITES DU TERME LATERITE.....3

II.1.1 Nature des matériaux latéritiques.....4

II.1.1.1 Les minéraux les plus fréquents.....4

II.1.1.2 Les substances amorphes.....4

II.1.2 Caractérisation des Latérites.....5

II.1.2.1 Le degré de latéritisation (Ki, S/R).....5

II.1.2.2 Caractéristiques de la formation du profil latéritique en climat tropical.....5

II.1.2.3 Profil latéritique d'après BOQUIER et al. En 1984 in Tardy Y.(1993).....6

II.1.2.4 Séquences d'altérations intraminérales dans les arènes et ordre d'altérabilité des minéraux.....6

II.1.2.5 Séquences des minéraux secondaires.....7

II.1.2.6 Altération différentielle des minéraux.....7

II.1.2.7 Bilan d'évacuation de la Silice.....7

II.1.2.8 Horizon tacheté, Nodulation et accumulation du fer.....8

II.1.2.9 Distribution de l'hématite et de la goethite.....8

II.2 APPARITION DE LA DEFINITION DES « SOLS FERRALITIQUES »..... 9-10

CHAPITRE II : GENESE DES SOLS FERRALITIQUES.....11

I. LES FACTEURS DE FORMATION.....11

I.1 LES ROCHES-MERES.....11

I.2 LES ROCHES-MERES ET LES SOLS FERRALITIQUES.....11

I.3 LA GEOMORPHOLOGIE.....12

I.4 LES CLIMATS.....13

II. LES ALTERATIONS.....15

II.1 DESTRUCTION MINERALE DES EAUX ALTERABLES.....15

II.2 ALTERATION DES MINERAUX CONTENANT DU FER ET DU MANGANESE.....15

II.2.1 Cas d'un feldspath potassique (orthose ou microcline)..... 15

II.2.2 Cas d'un plagioclase..... 16

II.2.3 Cas de l'enstatite..... 16

II.2.4 Cas d'un mica.....	17
II.3 ALTERATION DES MINERAUX CONTENANT DU FER ET DU MANGANESE.....	17
II.4 SOLUBILITE DE LA SILICE AMORPHE.....	18
II.5 SOLUBILITE DE L'ALUMINE.....	18
II.6 COMPARAISON DE LA SOLUBILITE DE LA SILICE ET DE L'ALUMINE.....	19
II.7 LE FER DANS LE SOL.....	19
II.7.1 Libération du fer.....	20
II.7.2 Mobilisation du fer.....	20
II.7.3 Migration du fer.....	20
II.7.4 Immobilisation du fer.....	20
II.7.5 Induration des cuirasses.....	21
III. LES AGENTS DE L'ALTERATION.....	21
 CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES PROFILS ET METHODE D'ANALYSE DES CONSTITUANTS MINERAUX DES SOLS FERRALITIQUES.....	 23
I. LES DIFFERENTS HORIZONS DES SOLS FERRALITIQUES.....	23
I.1 LA NOMENCLATURE A.B.C.....	23
I.1.1 L'Horizon Organique ou HORIZON O.....	23
I.1.2 L'Horizon Humifère ou HORIZON A.....	23
I.1.3 L'Horizon d'accumulation ou HORIZON B.....	23
I.1.4 Le matériau originel ou l'HORIZON C.....	24
I.2 RELATION ENTRE HORIZONS-SOLS FERRALITIQUES ET LES AUTRES SOLS.....	24
II. IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS MINERAUX (DE SEGALEN P.,1994).....	25
II.1 DETERMINATIONS DIRECTES.....	25
II.1.1 Analyse Thermique Différentielle ou ATD.....	25
II.1.2 La diffraction des rayons X.....	25
II.1.3 La microscopie électronique.....	25
II.2 DETERMINATIONS INDIRECTES.....	26
II.2.1 La détermination du rapport Ki (Silice / Alumine).....	26
II.2.2 La détermination de la Capacité d'Echange de Cation (CEC).....	26
II.2.3 Déterminations complémentaires.....	26
III. LA CONSTITUTION MINERALE DES SOLS FERRALITIQUES.....	27
III.1 LES MINERAUX ARGILEUX.....	27
III.2 LES OXYDES ET HYDROXYDES METALLIQUES (FER ET ALUMINIUM).....	29
IV. LES SOLS SE RAPROCHANT DES SOLS FERRALITIQUES.....	31
IV.1 LES ANDOSOLS.....	31
IV.2 LES SOLS BISIALITIQUES.....	32
IV.3 LES OXYDISOLS.....	32
V. QUELQUES SOLS FERRALITIQUES.....	33
V.1 LES SOLS FAIBLEMENTS FERRALITIQUES (MAIGNIEN, 1958).....	33
V.2 LES SOLS FERRALITIQUES ROUGES.....	33
V.3 LES SOLS FERRALITIQUES JAUNES SUR ROUGE.....	34

V.4 LES SOLS FERRALITIQUES JAUNES.....	34
V.5 LES SOLS FERRALITIQUES BRUNS.....	34
V.6 LES SOLS FERRALITIQUES LESSIVES OU APPAUVRIS.....	34
V.7 LES SOLS FERRALITIQUES REMANIES.....	34
V.8 LES SOLS FERRALITIQUES INDURES.....	34
V.9 LES SOLS FERRALITIQUES HUMIFERES.....	34
CONCLUSION.....	37
DEUXIEME PARTIE : ETUDES EXPERIMENTALE DES SOLS	
FERRALITIQUES DE MADAGASCAR	
CHAPITRE I : APERCU SUR LA GEOLOGIE DE MADAGASCAR... ..	38
I. GEOLOGIE DE MADAGASCAR.....	38
I.1 HISTOIRE PRECAMBRIENNE DE MADAGASCAR.....	40
I.2 LA COUVERTURE SEDIMENTAIRE.....	42
I.2.1 Le Karroo.....	42
I.2.2 Le Poste-Karroo.....	43
I.3 LE QUATERNAIRE MALAGASY = AEPIORNIEN.....	43
II. LE CLIMAT.....	45
II.1 LE CLIMAT ACTUEL.....	45
II.2 CLIMAT DU QUATERNAIRE.....	46
II.3 LES INDICES DE LA CHRONOLOGIE DE L' AEPIORNIEN.....	48
II.3.1 Les Dunes.....	48
II.3.2 Alluvions.....	48
II.3.3 Stone-line.....	48
II.3.4 Lavaka.....	48
III. LA GENESE DES SOLS FERRALITIQUES DE MADAGASCAR.....	48
III.1 1 ^{ERE} PHASE.....	48
III.2 2 ^{EME} PHASE.....	49
III.3 3 ^{EME} PHASE.....	49
III.4 4 ^{EME} PHASE.....	50
CHAPITRE II : METHODES GEOTECHNIQUES ET RESULTATS.....	54
I. GEOTECHNIQUE (L.N.T.P.B).....	54
II. LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUE DES MILIEUX NATURELS	
II.1 PHASE CONSTITUTIVE.....	54
II.2 NOTION DE COHESION.....	54
III. CARACTERISATION DES SOLS PAR DES ESSAIS EN LABORATOIRE (L.N.T.P.B).....	55
III.1 IDENTIFICATION.....	55
III.1.1 Teneur en eau naturelle W(%).....	55

TABLES DE MATIERES

	III.1.2 Degré de saturation $S_r(\%)$	55
55	III.1.3 Poids volumique du sol humide (ou apparent) $\gamma_d(Kn/m^3)$	
56	III.1.4 Poids volumique du sol sec $\gamma_s(Kn/m^3)$	
56	III.1.5 Poids des grains du sol $\gamma_s(Kn/m^3)$	
	III.1.6 Limites d'Atterberg.....	56
	III.1.7 Analyse granulométrique.....	56
	III.1.8 Equivalent de sable.....	58
	III.2 PARAMETRES D'ETAT.....	59
	III.2.1 Etudes Proctor-CBR.....	59
	III.2.2 Présentation des résultats.....	59
	III.2.3 Essais mécaniques.....	60
	III.2.4 Essais de compressibilité.....	61
	IV. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS.....	64
	IV.1 CLASSIFICATION TRIANGULAIRE.....	64
	IV.2 CLASSIFICATION L.P.C.....	65
	IV.3 CLASSIFICATION H.R.B (HIGH RESEARCH BOARD).....	65
	IV.4 CLASSIFICATION G.T.R (GUIDE DE TERRASSEMENT ROUTIER)...	66
	CHAPITRE III : METHODES D'ANALYSE CHIMIQUES ET CLASSIFICATION D'ANALYSES.....	68
	I. OBTENTION ET ETABLISSEMENT DES COURBES GRANULOMETRIQUES...	68
	II. METHODE DE DETERMINATIONS CHIMIQUES DES SOLS.....	69
	II. CLASSIFICATION CHIMIQUE SUIVANT LE POURCENTAGE DES ELEMENTS MAJEURS.....	70
	IV. METHODE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS.....	70
	IV.1 MATERIELS UTILISES.....	70
	IV.2 PRELEVEMENT PROPREMENT DIT.....	70
	IV.2.1 Echantillon intact pour les essais in-situ.....	70
	IV.2.2 Echantillon remanié.....	71
	CHAPITRE IV : PRESENTATION DES ECHANTILLONS TYPQUES DE LA REGION D'ANTANANARIVO ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	73
	I. ECHANTILLON N°01 D'IKIANJA.....	73
	I.1 LOCALISATION.....	73
	I.2 ROCHE-MERE.....	73
	I.3 TOPOGRAPHIE.....	73
	I.4 VEGETATIONS.....	73
	I.5 DRAINAGE ET PROFONDEUR DE PRELEVEMENT...	73
	I.6 HORIZON.....	73
	I.7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	73
	I.7.1 Appellation.....	73
	I.7.2 Géotechnique.....	74
	II. ECHANTILLON N°02 D'AMBANINTSENA.....	74
	II.1 LOCALISATION.....	74
	II.2 ROCHE-MERE.....	74

II.3 TOPOGRAPHIE.....	74
II.4 VEGETATIONS.....	74
II.5 DRAINAGE ET PROFONDEUR DE PRELEVEMENT.....	74
II.6 HORIZON.....	75
II.7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	75
II.7.1 Appellation.....	75
II.7.2 Géotechnique.....	75
III. ECHANTILLON N°03 D'AMBOHIMANJAKA.....	75
III.1 LOCALISATION.....	75
III.2 ROCHE-MERE.....	75
III.3 TOPOGRAPHIE.....	75
III.4 VEGETATIONS.....	76
III.5 DRAINAGE ET PROFONDEUR DE PRELEVEMENT.....	76
III.6 HORIZON.....	76
III.7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	76
III.7.1 Appellation.....	76
III.7.2 Géotechnique.....	76
IV. ECHANTILLON N°04 D'ILAFY.....	76
IV.1 LOCALISATION.....	76
IV.2 ROCHE-MERE.....	76
IV.3 TOPOGRAPHIE.....	77
IV.4 VEGETATIONS.....	77
IV.5 DRAINAGE ET PROFONDEUR DE PRELEVEMENT.....	77
IV.6 HORIZON.....	77
IV.7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	77
IV.7.1 Appellation.....	77
IV.7.2 Géotechnique.....	77
V. ECHANTILLON N°05 DE VONTOVORONA.....	77
V.1 LOCALISATION.....	77
V.2 ROCHE-MERE.....	78
V.3 TOPOGRAPHIE.....	78
V.4 VEGETATIONS.....	78
V.5 DRAINAGE ET PROFONDEUR DE PRELEVEMENT.....	78
V.6 HORIZON.....	78
V.7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	78
V.7.1 Appellation.....	78
V.7.2 Géotechnique.....	78
VI. ECHANTILLON N°06 D'AMPASAMPITO.....	79
VI.1 LOCALISATION.....	79
VI.2 ROCHE-MERE.....	79
VI.3 TOPOGRAPHIE.....	79
VI.4 VEGETATIONS.....	79
VI.5 DRAINAGE ET PROFONDEUR DE PRELEVEMENT.....	79
VI.6 HORIZON.....	79
VI.7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	79
VI.7.1 Appellation.....	79
VI.7.2 Géotechnique.....	79
VII. ECHANTILLON N°07 D'ANKATSO.....	80
VII.1 LOCALISATION.....	80
VII.2 ROCHE-MERE.....	80
VII.3 TOPOGRAPHIE.....	80
VII.4 VEGETATIONS.....	80
VII.5 DRAINAGE ET PROFONDEUR DE PRELEVEMENT.....	80
VII.6 HORIZON.....	80
VII.7 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	80
VII.7.1 Appellation.....	80
VII.7.2 Géotechnique.....	80
VIII. DISCUSSION ET INTERPRETATION.....	81

CONCLUSION.....83

CONCLUSION GENERALE.....91

LISTES DES TABLEAUX ET DES FIGURES

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

INTRODUCTION

Nos ancêtres avaient déjà utilisé la «terre rouge» comme matériaux de construction des maisons, des «tamboho», ... des le début du XX ème Siècle, la technologie et la science évoluent très rapidement. Les industries de pointe cherchent activement les meilleurs matériaux de construction pour améliorer leur production.

De nos jours, les industries exploitent «la terre rouge» pour extraire des substances utiles comme le fer, le manganèse, l'aluminium, le nickel, le cuivre, l'or, les terres rares,... Les entreprises de Génie Civil l'utilisent pour les constructions des chaussées, des digues, des remblais... C'est ainsi que nous avons choisi ce mémoire de fin d'études afin de connaître les caractéristiques minéralogiques, chimiques et géotechniques des sols ferrallitiques.

Ce travail a pour but d'étudier les sols ferrallitiques d'Antananarivo et de ses environs.

En premier lieu, nous commencerons à parler des généralités sur la connaissance des sols ferrallitiques. Ces généralités consistent à définir et à comprendre la Genèse des sols ferrallitiques.

Nous aborderons la méthodologie de l'identification et la classification suivant les critères minéralogiques, chimiques et génétiques des sols ferrallitiques. Dans cette partie, la description des horizons, l'identification et la méthode d'analyse des constituants minéraux font l'objet de définitions de ces sols.

En deuxième lieu, nous parlerons des méthodes expérimentales et nous rappellerons brièvement quelques généralités sur Madagascar. L'utilisation des sols ferrallitiques en Génie Civil sera mentionnée. Après avoir fait des brefs rappels sur la géotechnique et la classification géotechnique des sols, nous présenterons et interpréterons les résultats d'analyse des échantillons prélevés aux environs d'Antananarivo.

Signalons au passage que la région d'Antananarivo se trouve sur le socle granitogneissique malagasy. De ce fait, il n'y a pas d'études sur les roches sédimentaires en général. Nous tenons à souligner que c'est à partir des résultats chimiques des analyses de sols échantillonnés que nous avons pu sortir les pourcentages des éléments éliminés et accumulés. Enfin, quatre délimitations autour de la ville d'Antananarivo seront évoquées.

PREMIERE PARTIE

RAPPELS ET GENERALITES SUR LES LATERITES

Chapitre I – DEFINITIONS

I. DEFINITION DES LATERITES

I.1 Terminologie de BUCHANAN (1807) in AUTRET. P. (1983)

Le terme «LATERITE» vient du latin ‘later’, qui signifie ‘brique’. Selon DREYFUS (1952) il aurait été employé pour la première fois par le géologue BUCHANAN (1807) qui désigne ainsi un matériau ferrugineux utilisé en Inde pour confectionner des briques de terre destinées à la construction; c’est un des meilleurs matériaux de construction, rempli de cavités et de pores, possédant de grandes quantités de fer, de coloration rouge et jaune. L’intérieur du matériau, s’il est à l’abri de l’air, est si tendre que tout instrument métallique le coupe. Aussitôt taillée à la forme voulue, la masse devient aussi dure qu’une brique et résiste à l’eau et à l’air.

Depuis le XVI^e siècle, les Malgaches avaient déjà employé les latérites comme matériau de construction des tombeaux, des murs de protection et des maisons. On les trouve presque partout sur le socle cristallin de Madagascar.

I.2 La Latérite d’après le Larousse (1975)

La définition donnée par BUCHANAN (1807) n’a plus qu’une valeur historique: tout matériau susceptible de faire des briques n’est pas de la latérite et toutes les formes de latérite actuellement connues ne permettent pas de faire des briques.

Par contre, le Dictionnaire définit la Latérite (nom féminin qui vient du latin «lateris» qui signifie ‘brique’) comme un sol rouge brun, très riche en oxyde de fer et en alumine formé sous un climat chaud. Les latérites sont des sols très lessivés, riches en fer et contenant de l’alumine libre. Dans les forêts équatoriales humides, ce sont les argiles qui prédominent.

Cette définition de dictionnaire est empruntée au Larousse six volumes (1975) dans lequel on notera une affirmation contestable, qui donne le nom de roche à la carapace latéritique. La latérite par ailleurs n’a pas retenu l’attention des auteurs de l’encyclopédie Larousse en vingt-quatre volumes.

I.3 La Latérite vue par un voyageur

Tout un chacun peut découvrir la latérite par une définition d’un dictionnaire. Pour le voyageur, la latérite est avant tout le matériau rouge avec lequel on fait les routes; matériau peu sympathique du reste, glissant en saison des pluies, faisant tôle ondulée en saison sèche, poussiéreux au point de s’infiltrer dans les moindres recoins: cheveux, vêtements, valises... rendant la circulation dangereuse: le nuage de poussière soulevé par un camion est souvent tel que la visibilité est totalement nulle tant que le chauffeur qui le double n’a pas atteint la hauteur de l’essieu avant, ce qui est parfois tout de même.

I.4 La Latérite vue par des Ingénieurs

I.4.1 La Latérite en Génie Civil

Les ingénieurs en Génie Civil ont décrit la latérite de la manière suivante: matériau de structure vacuolaire, très souvent manié et de couleur variant du jaune au rouge plus ou

moins foncé et même noir, constitué par une croûte plus ou moins continue, d'épaisseur et de dureté variable, ayant beaucoup de vides et l'aspect d'une scorie, ou moins aussi de concrétions isolées oolitiques et pisolithiques, de plus ou moins grande résistance en mélange avec une fraction argileuse.

Autrement dit, la Latérite est molle quand elle n'est pas dur, et fine quand elle n'est pas grosse; c'est jaune ou rouge quand ce n'est pas noir.

Pour leur part, ils ont pris l'habitude de distinguer:

- . Sols fins latéritiques (ou latérites);
- . Graveleux latéritiques utilisable en technique routière, couche de forme, de fondation de base;
- . Carapace ou horizon latéritique très dur mais pouvant être détruit par un engin de terrassement ou par un pioche;
- . Cuirasse latéritique: couche très dure de matériau aggloméré ressemblant à des scories, parfois naturellement fragmenté et difficilement destructible par un engin à lame.

1.4.2 La Latérite pour les Chimistes

Les ingénieurs Chimistes adoptent la même définition que celle des Ingénieurs du Génie Civil. Mais pour eux la différence c'est que les chimistes s'orientent beaucoup plus vers la minéralogie et surtout vers la constitution chimique des éléments minéraux constitutifs des latérites.

Ils ont pensé à distinguer les éléments alumineux et les éléments ferriques, car latérite, pour eux c'est la combinaison d'alumines et de fer en général.

1.4.3 La Latérite pour les Géologues

En géologie, tous les éléments provenant de l'altération de la roche-mère sont définis de façon précise et connus en fonction de la nature de la roche-mère et de plus ils ont été déjà nommés chacun selon leur provenance.

Pour les géologues, la latérite est un produit d'une altération très poussée des minéraux de la roche sous-jacente; les constituants minéraux néoformés (kaolinite, oxydes et hydroxydes) furent identifiés et analysés sans difficulté.

La couverture latéritique, le siège de concentrations de substances utiles, normalement disséminées dans les roches-mères sous-jacentes, peut contenir ces nouveaux produits. L'aluminium dans les bauxites, le fer et le manganèse dans les cuirasses, le nickel et le cuivre dans les saprolites, l'or dans les argiles tachetées et les éléments peu mobiles, présents mais dispersés dans les socles, sont volontairement concentrés dans des gîtes métallifères latéritiques.

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES LATERITES

II.1 Sens et limites du terme LATERITE

En 1964, Millot désignait la latérite comme l'ensemble des produits d'altération de la zone intertropicale. Il s'agit de produits essentiellement constitués d'oxyde de fer généralement hydraté et cristallisé en goethite, parfois anhydre et cristallisé en hématite, d'oxyde d'aluminium hydraté et généralement cristallisé en gibbsite, (système monoclinique de formule $\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$) parfois en boehmite (orthorhombique $\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$) et de silicate d'alumine cristallisé en kaolinite (monoclinique, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$).

Pourtant, cette désignation est un peu trop large à la limite. Dans la zone intertropicale les vertisols ou les horizons vertiques, qui renferment très généralement des quantités notables de kaolinite mais qui recèlent surtout des smectites et des concrétions calcaires, ne sont pas des latérites. Il faut donc exclure du groupe des formations latéritiques les sols ou les horizons à smectite où le fer n'est pas libre mais associé au silicate.

Le rapport $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ comparé à celui de la roche-mère doit être tel que la formation latéritique ne contenant pas plus de silice que celle qui est retenue dans le quartz qui subsiste et celle qui est nécessaire à la formation de la Kaolinite.

Il reste cependant que le terme latérite désigne le plus souvent des formations indurées, des cuirasses ferrugineuses ou des cuirasses bauxitiques. Millot (1964) écrivait que «de nombreux profils latéritiques comportent un horizon cuirassé ou en voie de cuirassement...». Et aussi dans la zone des climats tropicaux à saison contrastée, le cuirassement, pour peu qu'on lui en laisse le temps, se développe intensément et de façon générale dans tous les sols développés sur des roches communes, siliceuses, alumineuses, et ferrières.

On distingue également des sols latéritiques soit très évolués, s'ils se développent sur des matériaux latéritiques anciens, soit plus jeunes ou peu évolués s'ils sont formés au contact de roches proches de l'affleurement: **sols ferralitiques ou sols ferrugineux tropicaux**, sols hydromorphes ou podzols, de la classification française; oxisols ainsi qu'une partie des ultisols et des alfisols de la classification brésilienne; ferra-sols, acrisols et une partie des nitosols de classification FAO. Ces termes englobent donc les sols tropicaux dont les horizons sont rouges, jaunes ou beiges, tachetés ou sans taches, à nodules ou sans nodules ferrugineux, meubles, indurés, carapacés ou cuirassés, à texture graveleuse, sableuse ou argileuse.

II.1.1 Nature des matériaux latéritiques

L'altération latéritique se traduit par un lessivage de tous les cations basiques (Na, K, Ca, Mg, Sr, Zn), par une élimination partielle du silicium (Si) et par une accumulation des éléments peu mobiles (généralement Al, Fe, Ti, V, Cr, Zr, et parfois Mn, Ba et Co). C'est pourquoi on peut citer ci-après les minéraux les plus fréquents et les substances amorphes dans les latérites.

II.1.1.1 Les minéraux les plus fréquents

Pour une accumulation de fer, il s'agit de la goethite et de l'hématite; pour l'aluminium, ce sont la gibbsite et la boehmite; pour l'aluminium et le silicium combiné, ce sont la kaolinite et l'hallouysite; pour le titane, c'est l'anatase; et enfin, pour le manganèse, ce sont la pyrolusite et la manganite.

II.1.1.2 Les substances amorphes

On a la limonite et la ferrihydrite pour une accumulation du fer; la clinochlore pour de l'aluminium et l'imogolite et l'allophane pour du silicium et de l'aluminium.

S'ajoutent à ces phases minérales pures des solutions solides obtenues à partir du mélange de certains pôles: goethite alumineuse: $(\text{Al}_x\text{Fe}_{1-x})\text{OOH}$, faite du mélange de goethite (FeOOH) et de diasprore (AlOOH), ou encore hématite alumineuse: $(\text{Al}_y\text{Fe}_{1-y})_2\text{O}_3$, faite du mélange d'hématite (Fe_2O_3) et de corindon (Al_2O_3) ou enfin kaolinite ferrière: $(\text{Fe}_z\text{Al}_{1-z})_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, faite du kaolinite et de ferrikaolinite. Dans ces solutions solides, x et y sont les fractions molaires des pôles alumineux et z est la fraction molaire du pôle ferrière. Par définition x, y, et z sont des nombres compris entre 0 et 1; dans la nature, x est généralement

inférieur à 0,30, y est inférieur à 0,02. Ces minéraux apparaissent avec des tailles et des cristallinités très variables: ici de grandes tailles et bien cristallisés et là de petites tailles et très mal ou mal cristallisés.

II.1.2 Caractérisation des latérites

II.1.2.1 Le degré de la latéritisation (Ki, S/R)

De très nombreux auteurs pendant de très longues années ont utilisé le rapport S/R pour caractériser les latérites, ainsi que le rapport Ki, et ils sont applicables surtout dans le domaine du Génie Civil:

$$S/R = \frac{\text{SiO}_2/60}{\text{Al}_2\text{O}_3/102 + \text{Fe}_2\text{O}_3/160} \quad \text{Ki} = \frac{\text{SiO}_2/60}{\text{Al}_2\text{O}_3/102}$$

La règle généralement admise étant la suivante:

$S/R < 1,33$	correspond à des latérites vraies;
$1,33 < S/R < 2$	correspond à des roches latéritiques;
$2 < S/R$	correspond à des minéraux non latéritiques.

Mais cette définition ne fait pas l'unanimité, la controverse venant en partie du fait que si ce rapport a le mérite de séparer les latérites des argiles telles les kaolinites, en revanche, le minerai de fer, la bauxite et de nombreux grès ferrugineux sont classés dans les latérites.

II.1.2.2 Caractéristiques de la formation du profil latéritique en climat tropical

Nous reprendrons les considérations dans *l'Encyclopedia britanica*, les conditions nécessaires à la formation des latérites:

- Un climat tropical sujet aux alternances de saisons sèches et humides ou de moussons;
- Un plateau ou une superficie topographique doucement inclinée, non sujette à une érosion mécanique appréciable;
- Une composition chimique et minéralogique de la roche exposée pouvant fournir les constituants latéritiques (alumine et fer);
- Une texture poreuse (ou le devenant rapidement sous l'action des agents atmosphériques) permettant l'entrée des eaux de percolation, de telle sorte que les conditions de l'action des agents chimiques soient les meilleures;
- L'eau d'infiltration doit demeurer dans les interstices de la roche pendant des longues périodes annuelles, c'est à dire durant la saison humide, plus, éventuellement, un drainage durant la saison sèche, réunissant ainsi les possibilités maximales d'érosion chimique;
- L'eau d'infiltration doit contenir un composé acide ou alcalin qui réagit avec les composés de la roche, de manière à donner un électrolyte et à permettre aux phénomènes électrodynamiques d'opérer;

- Ce processus annuel doit se poursuivre au moins pendant une époque géologique, approximativement un million d'années.

Si on se réfère aux œuvres de Yves Tardy en 1993, il y a une formation du profil latéritique en climat tropical à saisons contrastées quand la pluviosité moyenne annuelle est de $P = 1450$ mm/an, la température moyenne annuelle est de $T = 28$ °C, l'humidité relative moyenne de l'air ou $HR = 70\%$ et finalement quand la saison sèche est longue durant 6 mois par an.

II.1.2.3 Profil latéritique d'après BOQUIER et al. En 1984 in Tardy Y. (1993)

L'eau, la chaleur et l'acidité conduisent à une altération chimique et physique très poussée de la roche en place. Celle-ci se traduit par un profil A E B C qui comprend de bas en haut:

- L'horizon C, le plus souvent très épais, variable en fonction de la roche-mère, caractérisé par des minéraux altérés et friables, appelé **horizon d'altération** ou SAPROLITE, il peut contenir la saprolite grossière et la saprolite fine, c'est ce qu'on appelle «arène et litho-marge»;
- L'horizon B, le plus souvent épais, où les minéraux primaires autre que le quartz sont rares, on peut le nommer **horizon d'accumulation absolue**, c'est à dire, il y a accumulation des éléments solubles ou transportables;
- L'horizon E ou horizon de lessivage ou d'accumulation de matériaux insolubles ou non transportables. Il remplace l'horizon B en raison de lessivage sous cutané et qui occupe la place de l'horizon tacheté sous la cuirasse ou la carapace (horizon éluvial d'après Duchaufour), (1988);
- L'horizon A, où la matière organique a bien évolué et est liée à la matière minérale: on l'appelle horizon de la lixiviation; il peut contenir un horizon humifère de surface appelée horizon A1 et un horizon de lessivage proprement dit ou horizon A2.

II.1.2.4 Séquences d'altérations intraminérales dans les arènes et ordre d'altérabilité des minéraux

Les différents minéraux primaires ne s'altèrent pas à la même vitesse. Certains sont plus résistants, d'autres plus vulnérables. L'ordre décroissant de stabilité des minéraux dans les arènes granitiques est le suivant:

Quartz > Muscovite > Feldspath potassique > Biotite > Plagioclase

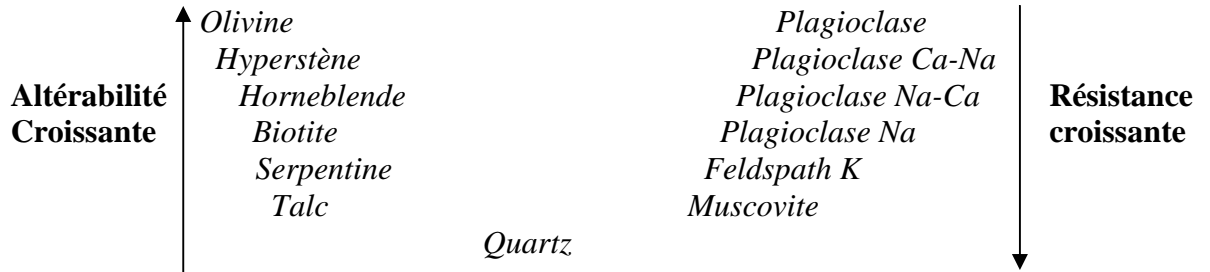
Le plagioclase est le plus vulnérable.

Dans la série des feldspaths calcosodiques, l'albite est plus résistante que l'anorthite:

Anorthite < Bytownite < Labrador < Andésine < Oligoclase < Albite

La muscovite est la séricite se maintiennent longtemps inaltérées dans les profils latéritiques surtout ferrallitiques. L'altération des biotites est freinée en présence de feldspath potassique (Millot 1964).

L'albite des microlithes est plus vulnérable que l'anorthite, alors que les macrocristaux d'albite sont plus stables que celle du plagioclase calcique.



«Ordre de stabilité des minéraux d'après GOLDICH (1938)». Cité dans Tardy Y. (1993)

II.1.2.5 Séquences des minéraux secondaires

Les minéraux secondaires s'altèrent en d'autres minéraux :

- Le feldspath s'altère en vermiculite, puis en beidellite, en montmorillonite, en montmorillonite Al, kaolinite et enfin en gibbsite;
- Les biotites ou amphiboles s'altèrent en vermiculite, saponite, nontronite, Kaolinite, gibbsite, et goethite;
- Le pyroxène s'altère en talc, smectite et goethite;
- Le périclase s'altère en chrysotile, magnétite, saponite, nontronite, silice amorphe, iddingsite et goethite.

II.1.2.6 Altération différentielle des minéraux

Dans les roches basiques, on observe fréquemment que les plagioclases sont altérés en kaolinite ou en gibbsite tandis que les pyroxènes, situés à proximité sont altérés en talc; les périclases voisins peuvent livrer de la serpentine ou de smectites et les amphiboles des chlorites ou des smectites.

Si on parle de phénomène dans les granites, les plagioclases peuvent être altérés en gibbsite ou en kaolinite, alors que les micas voisins sont transformés en vermiculite ou smectite. La biotite est transformée en vermiculite Al, le feldspath potassique en kaolinite et l'oligoclase en gibbsite. Les feldspaths sont altérés en halloysite et les biotites en kaolinite dans les vieilles altérations des pays chauds et humides.

II.1.2.7 Bilan d'évacuation de la silice

La première manière d'évaluer la nature des minéraux secondaires qui se forment dans l'ensemble du paysage est d'utiliser la méthode dite «rapport Re de Tardy». Le rapport molaire Re est calculé à partir de la molalité des ions, (dans les solutions qui drainent le paysage):

$Re = [SiO_2/Al_2O_3]$ dans les produits d'altération.

$Re = [3(Na^+) + 3(K^+) + 2(Ca^{2+}) - (H_4SiO_4)] / [(K^+) + (Na^+) + (Ca^{2+})]$ dans les eaux.

Les grandes voies géochimiques de l'altération sont représentées par trois minéraux que le calcul du rapport molaire Re permet de retrouver:

La gibbsite: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

La kaolinite: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

La smectite: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot 0,1\text{CaO}$

Re = 0 pour la gibbsite;

Re = 1 pour la kaolinite et;

Re = 2 reflète en bilan la formation de la smectite.

Le bilan de l'exportation de la silice calculé par le rapport Re montre bien que la gibbsite et la kaolinite se forment dans les paysages tropicaux humides (Madagascar) et que la kaolinite mais surtout la smectite se forme non seulement dans les sols de pays arides ou semi-arides, mais aussi dans les sols et les arènes épaisses des pays tempérés.

Lorsque le paysage est formé d'altérations matures, évoluées, les eaux des sources qui sourdent à l'aval des versants sont en équilibre avec les minéraux néoformés dans les pores de grande taille.

II.1.2.8 Horizon Tacheté, Nodulation et accumulation du fer

L'horizon tacheté présente par définition des taches claires de lessivage et des taches de rubéfaction où s'accumule le fer. Les taches se définissent par rapport au fond matriciel. Très souvent, les coalescentes forment un véritable réseau rubéfié. L'horizon tacheté est un horizon pédologique glébulaire où, par des mécanismes complexes, l'argile sous forme de kaolinite et le fer sous forme de goéthite ou d'hématite se lessivent et s'accumulent. L'horizon tacheté est généralement un horizon B d'accumulation qui montre cependant encore de nombreux domaines Be éluviaux. Il est parfois remplacé par un véritable horizon E d'éluviation qui montre encore des domaines illuviaux.

Le développement de l'horizon tacheté se fait au détriment de la lithomarge que, progressivement en descendant, il remplace.

La transition entre la lithomarge et l'argile tachetée n'est pas brutale mais progressive. Petit à petit en effet, en montant dans le profil, les taches se généralisent, alors que la structure de la roche primaire est oblitérée et ne se reconnaît plus. On assiste, en effet, à une redistribution du fer. Cet élément quitte les zones les plus riches en quartz qui blanchissent ou jaunissent (couleur jaune claire) et gagne les autres zones les plus riches en kaolinite qui prennent alors une couleur brun rouge. La couleur devient de plus en plus foncée vers le centre des taches et vers le haut du profil.

II.1.2.9 Distribution de l'hématite et de la goéthite

La fabrique de l'horizon tacheté décrite à l'œil nu et analysé à différentes échelles microscopiques montre plusieurs traits essentiels:

- Les macrovides se créent et se développent dans les domaines lithosquelettiques à granulométrie plus grossière et au départ les plus riches en quartz.

- Les accumulations ferrugineuses sont initiées et se développent dans les domaines à granulométrie fine au départ, plus riche en kaolinite, lithoplasmiques (héritées de la lithomarge) ou pédoplasmiques formées par illuviation d'argile dans les vacuoles des domaines C ou B.
- Les accumulations ferrugineuses se produisent à proximité des vides, le plasma argilo-ferrugineux est orienté et constitué surtout de kaolinite mais aussi de goethite en quantité importante. La goethite reste, semble-t-il, domine la goethite.
- En revanche, lorsque l'accumulation ferrugineuse se produit à distance des vides du fond plasmique, le plasma argilo-ferrugineux n'est pas orienté et se trouve cette fois-ci constitué d'hématite qui rapidement, semble-t-il, domine la goethite.
- La formation, à proximité des vides, dans les taches et les nodules jaunes, d'un plasma argileux orienté, constitué de cristaux de kaolinite, de taille relativement grande, s'accompagne d'une accumulation ferrugineuse non indurée où le minéral dominant est la goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Hydraté). A l'opposé, la formation à l'écart des vides dans les taches et les nodules rouges, d'un plasma argileux non orienté, constitué de cristaux de kaolinite de taille relativement faible, s'accompagne d'une accumulation ferrugineuse indurée où le minéral dominant est l'hématite (Fe_2O_3 , anhydre).

II.2 Apparition de la définition des «sols ferrallitiques»

L'étude des sols de la zone intertropicale a précédé d'au moins un demi-siècle celle des sols des pays de la zone tempérée. La latérite, examinée pour la première fois par BUCHANAN en 1807, fait l'objet, d'abord aux Indes, puis dans d'autres pays, de nombreuses études, de diverses hypothèses pour en expliquer la formation. Elle donne lieu à cette idée simple que la latérite est le produit d'une altération très poussée des minéraux de la roche sous-jacente. Les constituants nouveaux (kaolinite, oxydes et hydroxydes) furent identifiés et quantifiés sans difficulté.

Les premières classifications des sols sont fortement influencées par celle issues des plaines russes et nord-américaines. La primauté est donnée à l'environnement climatique, végétal, au drainage, avant d'envisager le sol lui-même, qui se ramène à une texture ou à une couleur.

Vers le milieu du XX^e siècle, dans les décades qui suivent la fin de la deuxième guerre mondiale, une approche plus précise des sols ferrallitiques se dessine. Tous les observateurs sont d'accord pour reconnaître l'importance des constituants: kaolinite, oxydes et hydroxydes. Toutefois l'approche morphologique est malaisée. Les profils sont souvent d'une épaisseur démesurée, les horizons difficiles à délimiter, les structures à apprécier. De plus, une unité de vue est réalisée sur les principes essentiels: les sols envisagés sont le résultat d'une altération avancée, sous l'influence de conditions climatiques chaudes et humides, avec comme résultat d'accumulation relative de constituants minéraux déterminés, peu nombreux et relativement faciles à identifier et même à estimer.

A l'heure actuelle, les sols qui nous occupent sont ainsi répertoriés sous des noms divers dans les rapports, les articles et sur les cartes. A la suite de cet ouvrage, le nom de **ferrallitique** sera conservé, malgré les réserves que l'on peut faire sur le choix de ce terme. En effet, il est largement adopté par la communauté pédologique française et il est souhaitable que les volumes consacrés à la géographie de ses sols puissent s'intégrer sans difficulté majeure dans l'ensemble initié par **CHATELIN EN 1972**.

Dans le chapitre suivant, on s'attachera à préciser la définition des sols ferrallitiques, et les facteurs de formation. Dès maintenant, on tient à indiquer que les **kandites** en sont les constituants essentiels et qu'elles doivent représenter au moins 90% des minéraux argileux. Une teneur en minéraux argileux 2/1 ou 2/2 qui dépasse 10% de l'ensemble des minéraux argileux élimine les sols de la catégorie ferrallitique. Les oxydes et hydroxydes de fer sont toujours présents; les hydroxydes d'aluminium sont présents ou absents. Une très forte quantité d'oxydes libres modifie des propriétés importantes des sols et élimine les sols de la catégorie. On s'attachera également à préciser dans la deuxième partie la morphologie des sols ferrallitiques dont la variété est considérable, ainsi que certaines caractéristiques physico-chimiques.

Chapitre II – GENES DES SOLS FERRALLITIQUES

Nous synthétiserons ici les résultats des travaux de SEGALEN P. (1994, 1995) et de CHATELIN Y. (1972).

I. LES FACTEURS DE FORMATION

On observe une grande variété de sols, se traduisant par des représentations cartographiques et des nomenclatures diverses. Les influences des roches-mères, de la géomorphologie, du climat, de la végétation, et de la faune, sont importantes sur la formation des sols ferrallitiques que l'on observe aujourd'hui.

I.1 Les Roches-Mères

Le facteur roche-mère a été reconnu dès le début des études pédologiques, comme un des plus importants paramètres à considérer. On a estimé que si le temps était suffisamment long, l'effet de la roche-mère devrait s'effacer. Ceci est vrai, mais dans une longue période de formation des boucliers (constitués par des roches «granito-gneissiques», des roches «métamorphiques» et des roches «plutoniques» à Madagascar), la nature diverse de la roche-mère n'empêche pas les sols ferrallitiques d'être les sols largement dominants. Mais si le temps disponible est relativement faible, il est certain que l'effet roche-mère joue à plein, même au cœur de la zone tropicale humide et un grès ou quartzite, un calcaire, une marne, une cendre volcanique ne se traduisent pas par des sols identiques au départ. Il est vrai que certaines roches comme les sables, les grès ou les quartzites ne donnent que très rarement autre chose que des podzols ou des régosols (SEGALEN P. les explique dans son ouvrage en 1994). De même, les roches magnésiennes, à teneurs moyennes en fer et faible en aluminium, donneront lieu à la formation d'oxydisols et non de sols ferrallitiques. En effet, les sols ferrallitiques étant des sols à kaolinite dominante, il est essentiel que ce minéral puisse y exister en se formant à partir des éléments de la roche-mère.

Enfin, lorsqu'on examine les roches en tant que roches-mères des sols ferrallitiques, un des critères les plus importants est l'absence (ou la rareté) ou la présence d'aluminium susceptible de produire de la kaolinite. On examinera donc successivement:

a)- les roches où le quartz est le minéral quasi unique et les roches où le quartz et les minéraux alumineux sont rares, sinon absents, du moins très peu abondants.

b)- les roches où le quartz est abondant, mais où beaucoup de minéraux alumineux sont présents: il s'agit des roches éruptives ou métamorphiques que l'on qualifie généralement d'acides.

c)- les roches où le quartz est rare ou absent, où divers minéraux aluminosilicates sont abondantes.

d)- les roches sédimentaires et les formations superficielles, où à côté de minéraux primaires analogues à ceux des roches précédentes, existent des minéraux proches, ou identiques à ceux formés au cours de la pédogenèse.

I.2 Les roches-mères et les sols ferrallitiques

La formation de sols ferrallitiques implique la présence et/ou la formation de kaolinite et de quantités variables de sesquioxydes de fer et d'aluminium.

La très grande majorité des roches-mères et matériaux originels est suffisamment pourvue en Si et Al pour que le minéral voulu soit formé. Toutes les **roches plutoniques et métamorphiques acides** contiennent des feldspaths et un excès de quartz qui joue le rôle de régulateur empêchant la kaolinite à se transformer en gibbsite. C'est pourquoi les roches des socles granito-gneissiques portent des sols à faible teneur en gibbsite.

Les **roches neutres ou basiques**, dépourvues de quartz et pauvres en silice combinée, donnent le plus souvent naissance à des sols à kaolinite et gibbsite, en raison de leur teneur assez élevée en minéraux ferromagnésiens, les teneurs en oxydes de fer et titane pouvant atteindre 30%.

Certaines **roches sédimentaires** comme les calcaires sont également associées à des sols ferrallitiques à teneur élevée en kaolinite. Les sols se développent, après dissolution et évacuation du carbonate de calcium, à partir des résidus non carbonatés de la roche. Ceux-ci sont généralement un mélange de quartz, divers minéraux silicatés (feldspaths, ferromagnésiens, minéraux argileux) susceptibles par altération de fournir les éléments nécessaires à la formation de la kaolinite ; ces constituants sont répartis de manière irrégulière dans la roche-mère.

Les **grès et quartzites** ne présentent que des qualités réduites de minéraux contenant de l'aluminium. La synthèse de la kaolinite est rendue de ce fait très difficile. Les podzols seront abondants lorsque les roches-mères gréseuses seront les seules représentées.

Les **péridotites** sont riches en olivine et en hypersthène avec quelques minéraux accessoires comme la magnétite, le grenat, la chromite. L'altération de ces minéraux libère de fortes quantités de magnésium et d'acide silicique. S'il y a un peu d'aluminium dans les minéraux accessoires de la roche, il peut se former de petites quantités de kaolinite et de gibbsite aux pH usuels des sols des tropiques humides. Le fer des minéraux essentiels est libéré et oxydé; il s'accumule sous forme d'hématite ou de goethite. Les teneurs en oxydes (de fer, aluminium) mais aussi (de métaux moins fréquents comme le chrome, le nickel, le cobalt ou le vanadium), dépassent 50% et peuvent atteindre 80%. Ce sont des **oxydisols**.

Par conséquent, la très grande majorité des roches normalement fournies en aluminium, peuvent servir de point de départ aux sols ferrallitiques. Seules celles qui ne contiennent que des teneurs très faibles en aluminium (grès quartzites ou péridotites) ne peuvent fournir les matériaux nécessaires à la formation de la kaolinite.

I.3 La Géomorphologie

La **géomorphologie** est la science qui étudie les formes du relief et des éléments qui les composent. Elle est une des conditions de genèse des sols ferrallitiques. On peut parler des éléments essentiels qui relient les sols ferrallitiques et la géomorphologie.

Lorsque le climat est caractérisé par une alternance de périodes sèches et pluvieuses, avec développement d'une végétation plus basse et clairsemée, protégeant moins bien le sol, ou on observe des versants, la majeure partie est concave, occupée par des sols variés, tandis que la seule partie supérieure est formée de sols ferrallitiques; on est donc dans le domaine de la pédiphanation.

De plus, les sols ferrallitiques profonds occupent les plateaux, tandis que les sols ferrugineux tropicaux, vertisols, et sols bisiallitiques se partagent à des restes de ces toposéquences. Dès que les conditions climatiques changent vers la semi-aridité, ce sont les versants concaves qui se développent et la topographie évolue vers la pédiphanation. Les sols ferrallitiques se maintiennent sur les parties hautes des versants et tendent à disparaître avec le temps.

I.4 Les Climats

Les climats ont une grande importance pour la formation des sols ferrallitiques car l'altération des différentes roches-mères dépend de la température, de l'humidité, et de la pression atmosphérique à l'extérieur.

Les sols ferrallitiques sont des sols des «**tropiques humides**». En effet, c'est là qu'ils trouvent l'eau nécessaire pour effectuer l'altération des minéraux primaires, et éliminer les produits solubles (ions alcalins et alcalino-terreux et acide silicique) de manière à empêcher les combinaisons nouvelles (formation des minéraux argileux 2/1 et éventuellement 1/1). C'est également là qu'ils trouvent la chaleur nécessaire pour que ces réactions, s'effectuent rapidement, du moins dans le temps assez bref. C'est là également que la viscosité de l'eau sera la plus faible, facteur supplémentaire dans l'accélération des réactions.

Cependant, on observe que, partout où températures et précipitations sont élevées, les sols ferrallitiques se développent. On peut considérer que les régimes et les sous régimes les plus favorables sont les suivants: équatoriaux, tropicaux humides et moyens, subtropicaux chauds et moyens. Les plus vastes étendues des sols ferrallitiques s'observent sous ces régimes climatiques.

En effet, il est possible d'essayer de discerner si un type de climat est plus favorable qu'un autre à la ferrallitisation c'est à dire au développement d'un profil où les horizons minéraux seront constitués par des kandites associées à des quantités limitées de sesquioxides. Il faut pour cela prendre une roche-mère unique et voir ce qui peut lui arriver sous des climats variés, à condition bien entendu que les sols soient sensiblement du même âge, ce qui est forcément difficile à réaliser. C'est ce qu'avait tenté d'expliquer SEGALIN en 1994, avec les sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. Il avait constaté qu'entre les températures 20 et 26°, les minéraux argileux 2/1, puis 1/1, puis un mélange de kandites et gibbsites apparaissaient successivement à mesure que la pluviométrie augmentait. Une alternance de période de pluie et de sécheresse coïncidait avec les rapports K_i les plus faibles. Une meilleure évacuation des produits solubles (ion alcalins et alcalino-terreux et acide silicique) était obtenue en cas d'alternance saisonnière accentuée.

La figure suivante explique la variation des horizons en fonction de la température et de la pluviométrie.

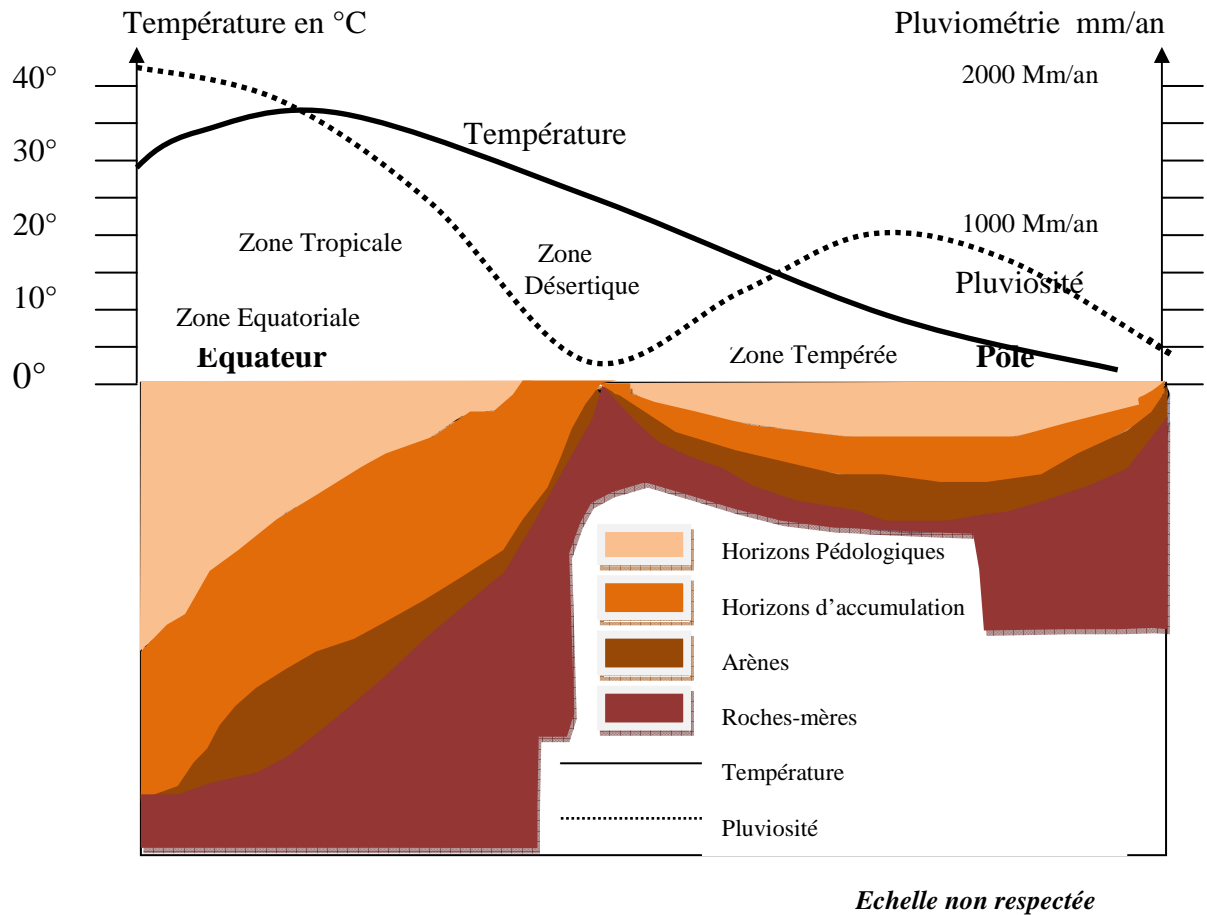


Figure 1 : Variation d'épaisseur des principaux horizons d'altération selon la latitude (Strakhov 1962 in Tardy Y 1993)

II. LES ALTERATIONS

II.1 Destruction minérale des eaux altérables

Tout commence par une destruction quasi complète des minéraux altérables des roches avec libération à l'état ionique des métaux alcalins et alcalino-terreux, de l'aluminium, de fer et de divers autres éléments présents dans les roches en quantités beaucoup plus faibles.

La silice passe en solution à l'état d'acide silicique monomère.

Les cations alcalins, sodium et potassium, et alcalino-terreux, calcium et magnésium sont à peu près complètement éliminés. La silice peut être complètement éliminée ou servir à la synthèse de la kaolinite. La silice réagit rapidement avec l'aluminium; la kaolinite est relativement stable dans les sols ferrallitiques dont elle constitue le minéral caractéristique.

L'aluminium peut être partiellement éliminé, ou bien réagir avec la silice et précipiter sous forme de kaolinite. Si la réaction n'a pas lieu, ou si la kaolinite est détruite, l'aluminium apparaît sous forme d'hydroxyde (gibbsite surtout, ou boehmite).

Un certain nombre d'éléments beaucoup moins abondants, comme le cuivre, le baryum, le strontium, sont en majeure partie éliminés. Par contre, d'autres comme le titane, le zirconium, le chrome sont conservés intégralement.

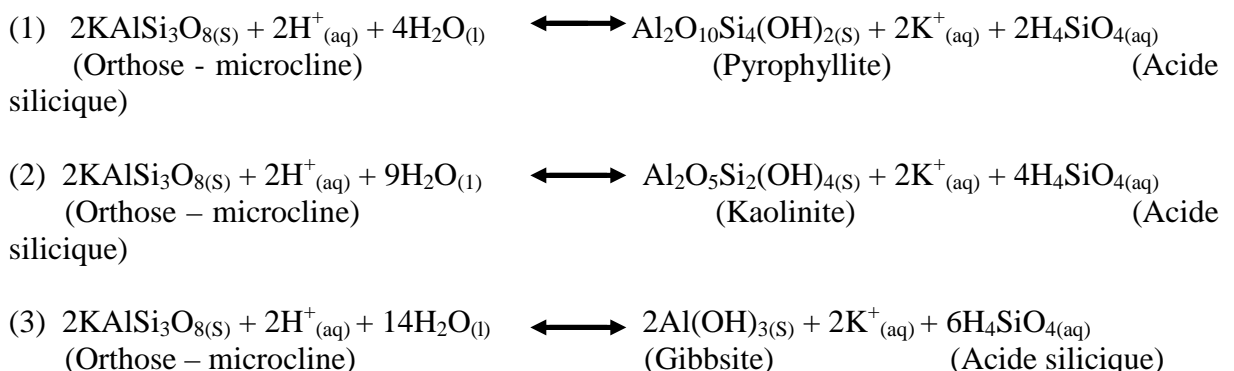
Quelques éléments, comme le fer, le manganèse, ainsi que le vanadium ou le molybdène, sont influencés par l'état d'oxydoréduction du milieu et peuvent subir un sort variable. Si le milieu est fortement oxydant, le fer s'accumule surtout sous forme d'oxyde (hématite) ou d'hydroxyde (goethite). Ces formes ferriques contribuent fortement à la coloration des sols. Si le milieu est réducteur, le fer peut être éliminé presque totalement ou partiellement. On peut expliquer les réactions (7) et (8) ci-dessous.

La formation d'horizons et de sol ferrallitique va s'organiser à partir du matériau nouveau contenant de la kaolinite, des oxydes, des hydroxydes. Ces éléments dont le plus fréquent et abondant est le quartz peuvent être ou non dilués par des minéraux primaires difficilement altérables.

II.2 Altération de minéraux contenant du fer et du manganèse

II.2.1 Cas d'un feldspath potassique (orthose ou microcline)

Trois cas peuvent être envisagés suivant la quantité d'eau disponible:



II.2.4 Cas d'un mica

Un mica a un comportement global analogue à celui des minéraux précédents. On peut obtenir des minéraux argileux 2/1 ou 1/1, de la gibbsite, et, lorsqu'ils contiennent du fer, celui-ci peu s'inclure dans les structures, ou précipiter sous forme d'oxydes ou hydroxydes. Souvent, on peut saisir des étapes intermédiaires qualifiées de transformation. La première est la vermiculitisation, par déplacement du potassium et son remplacement par des cations hydratés de calcium ou de magnésium. On peut obtenir ensuite des ions hydroxydes d'aluminium avec formation d'un chlorite ou de vermiculite Al, suivie de l'ouverture du feuillet avec formation d'une montmorillonite dite «de transformation». La montmorillonite Al peut se transformer, à son tour, en kaolinite.

II.3 Altération de minéraux contenant du fer et du manganèse

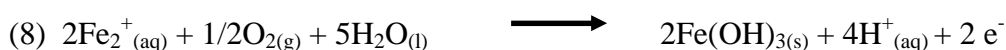
Beaucoup de minéraux primaires altérables contiennent du fer, sous forme ferreuse le plus souvent, dans leur structure. C'est le cas de certains micas (biotite, phlogopite), des amphiboles, pyroxènes, grenats, péridots.

L'altération des minéraux va produire du fer sous forme ionique. Plusieurs cas peuvent être envisagés:

- Lorsque l'acidité est très forte ($\text{pH} < 2,5$), cas très rare dans les sols ferrallitiques, les ions ferriques sont stables et peuvent être évacués.
- En cas de réaction modérément acide, et de bon drainage, l'ion ferrique est instable et précipite sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde et ne participe pas à des structures de silicates. C'est le cas de la majorité des sols ferrallitiques.
- En cas de réaction modérément acide ($\text{pH} < 6,5$) et de mauvais drainage, l'ion ferreux apparaît et remplace l'hydroxyde ferrique [Réaction (7) ci-dessous]. Cet ion est alors déplaçable; il peut contribuer à la formation d'accumulations localisées ou généralisées d'oxydes de fer qui apparaissent lorsque l'aération du sol le permet. Ces conditions peuvent prévaloir à la base de certains sols ferrallitiques à la drainage médiocre permanent ou intermittent.
- En cas de réaction neutre ou légèrement alcaline, le fer peut participer à la structure des minéraux argileux (illites, vermiculites, smectites) où il prend place dans les couches octaédriques; les oxydes et hydroxydes peuvent, dans certains cas, ne plus apparaître.

Le manganèse, présent dans les minéraux des roches en beaucoup plus faible quantité que le fer, est très sensible aux variations du potentiel d'oxydoréduction. On peut observer la solubilisation du Manganèse par passage à l'état d'ion Mn^{2+} , la migration de cet ion puis, après oxydation, la précipitation d'oxydes ou hydroxydes correspondant à Mn^{3+} , et surtout Mn_4^{+} , que confèrent aux accumulations une couleur brune foncée à noire. Les teneurs des sols en manganèse sont faibles sauf dans quelques cas particuliers et limités (sols dérivés de roches volcaniques par exemple).

Les conditions successives de réduction et d'oxydation du fer peuvent être résumées par les deux réactions suivantes:



La réaction (7) correspond à la phase réductrice; elle a lieu avec consommation de protons et d'électrons. Les hydroxydes ferriques sont convertis en ions ferreux susceptibles d'être déplacés et redéposés à faible ou à grande distance.

La réaction (8) correspond au retour des conditions oxydantes avec réformation des hydroxydes ferriques et production de protons susceptibles d'attaquer les minéraux argileux et les sesquioxydes.

Lorsque cette succession d'oxydation et de réduction se produit en surface, elle peut s'accompagner par la suite de l'évacuation oblique d'une partie des solutions, d'une perte de fer et d'argile; de plus, cette dernière peut être détruite par les protons fournis par la réaction (8). On assiste alors à un blanchiment de la partie supérieure des profils qui résulte de ce processus dit de ferrolyse. Il peut concerner les sols ferrallitiques et aussi bien d'autres.

II.4 Solubilité de la silice amorphe

Tant que la teneur totale en silice dans l'eau est $< 100-140$ ppm à 25°C , elle se trouve dispersée, à l'équilibre de mono-molécules d'acides mono-silicique $\text{Si}(\text{OH})_4$, il s'agit d'une solution vraie.

Cette solubilité de la silice dans l'eau est pratiquement indépendante du pH, tant que celui-ci reste $< \text{à pH} = 9$. Au delà de 9, l'acide monosilicique $\text{Si}(\text{OH})_4$ se dissocie et la solubilité vraie de la silice augmente (figure 2).

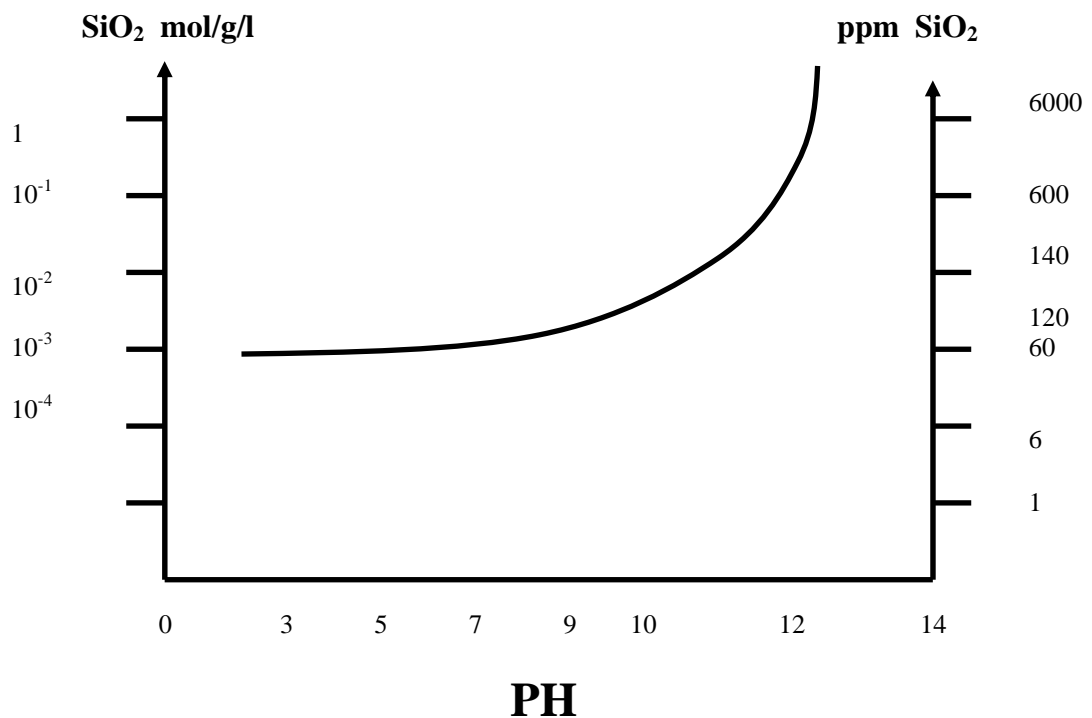


Figure 2 : Solubilité de la silice en fonction du pH
d'après Kranskopf, 1956, 1959 in Millot G. 1964

II.5 Solubilité de l'alumine

L'alumine hydratée $\text{Al}(\text{OH})_3$ est un hydroxyde amphotère. Elle est soluble en milieu acide, en donnant naissance à des cations Al_3^+ . Mais elle est soluble en milieu alcalin sous forme d'anion AlO_3H_2^- . Les valeurs de pH pour lesquelles coexistent Al_3^+ avec $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, d'une part et $\text{Al}(\text{OH})_3$ avec AlO_3H_2^- . D'autre part, peuvent être calculées, connaissant le produit de solubilité de l'alumine en équilibre, soit avec le cation soit avec l'anion [figure (3)].

II.6 Comparaison de solubilité de la silice et de l'alumine

- En milieu acide, l'alumine est plus soluble que la silice.
- En milieu neutre, l'alumine est insoluble tandis que la silice garde sa solubilité.
- En milieu alcalin, les deux solubilités se rejoignent et croisent ensemble.

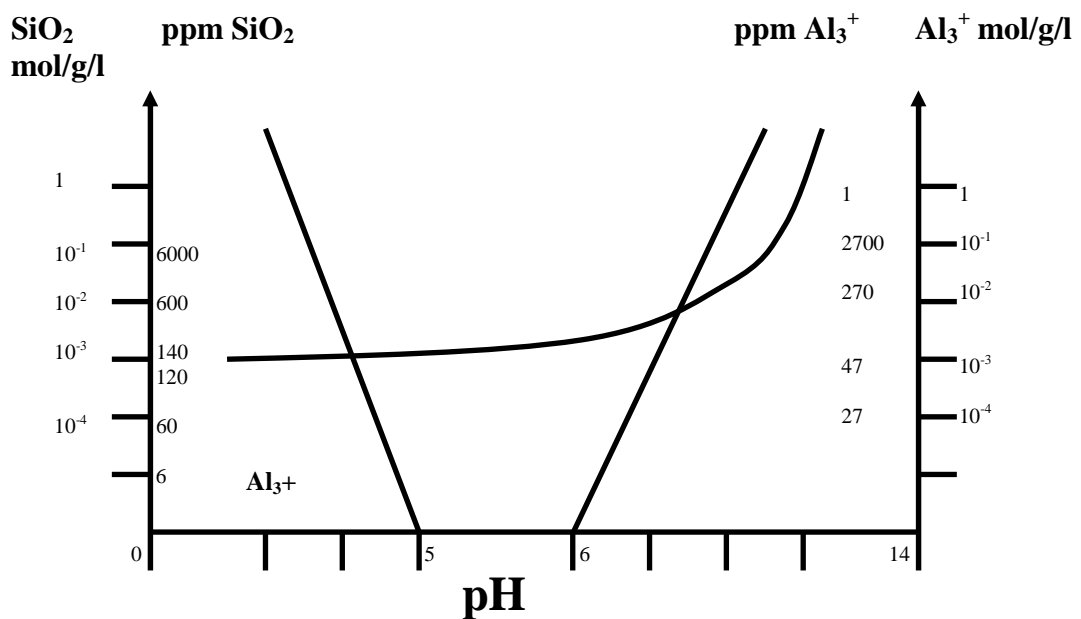


Figure 3 : Courbes superposées de la solubilité de la silice et de l'alumine en fonction du pH (d'après Hanskorpff, 1956 et Wey, 1962) in Millot G. 1964

II.7 Le fer dans le sol

II.7.1 Libération du fer

On a déjà vu l'aisance avec laquelle les minéraux ferromagnésiens libèrent leur fer, par oxydation et hydrolyse sous divers climats. En climat intertropical humide, le fer est totalement libéré à partir des silicates qui sont complètement hydrolysés.

II.7.2 Mobilisation du fer

C'est l'étude de la migration du fer dans les sols qui a fait l'objet de nombreuses recherches. On trouvera une documentation imposante dans les travaux de Millot G. (1964) Magnien (1969).

Les résultats principaux sont les suivants:

- L'ion ferrique est à peu près insoluble aux conditions de pH en milieu réducteur, c'est à dire tant que les matières organiques réductrices sont présentes;
- Les ions ferriques et ferreux peuvent donner avec la silice des complexes solubles dans l'eau; ce sont les complexes ferro et ferrisiliciques;
- Enfin, les phénomènes biologiques, qui participent à la décomposition de la matière organique, jouent le plus grand rôle dans la migration du fer; soit par les phénomènes de réduction liés à la vie des micro-organismes réducteurs des formes ferriques, soit par les résidus de la fermentation qui donnent les complexes pseudo-solubles.

II.7.3 Migration du fer

A partir du moment où le fer est en solution ou en pseudo-solution dans l'eau du sol, son destin coïncide avec les migrations de cette dernière. Or celle-ci est soumise à la pesanteur et de deux manières:

- D'abord par la percolation des eaux de pluies à travers le profil. Cette percolation est considérable; l'eau rejoint rapidement le niveau de la nappe qui oscille au sein du manteau d'altération;
- Ensuite, cette nappe s'écoule d'un mouvement lent ainsi que les cartes piézométriques le montrent. Les produits solubilisés migrent avec elle, tant que les conditions de leur stabilité en solution sont maintenues.

II.7.4 Immobilisation du fer

Le mécanisme principal qui provoque l'immobilisation du fer transporté par les nappes est l'oxydation. Ceci est évident pour les ions ferreux libres. Mais les complexes ferro-organiques sont également oxydés. Le fer n'est plus protégé, l'oxyde est précipité.

Ce mécanisme de l'oxydation se produit dans de nombreux cas: approche de la surface du sol quand les nappes souterraines affleurent; zone de battement du toit de la nappe; parcours de matériaux grossiers; parcours d'une cuirasse plus ancienne poreuse ou caverneuse; disparition de la forêt, ce qui tarit l'alimentation en matières organiques complexantes; augmentation du drainage naturel par aération accélérée de l'eau de percolation. Ces phénomènes sont saisonniers:

- à la saison humide, il y a mobilisation et lessivage;
- à la saison sèche, immobilisation brutale de la zone de battement des nappes.

Ceci rend compte en particulier de l'absence de cuirasses au sein des profils toujours humides, comme dans la zone tropicale à saison sèche marquée, de nombreuses occasions saisonnières provoquent l'immobilisation du fer transporté par les nappes et donc le cuirassement.

II.7.5 Induration des cuirasses

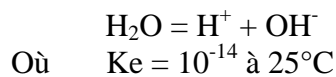
Si la cuirasse est menée au jour, soit par extraction, soit par érosion, elle a tendance à s'indurer.

L'induration est facile à observer actuellement sur les briques de cuirasse exposées à l'air, aussi bien que sur les tranchées de chemin de fer. L'induration n'a que quelques centimètres d'épaisseur. Le mécanisme est mal connu. Il y a dessiccation provoquant la formation de films ferrugineux qui cimentent l'ensemble. Au long des années, il y a alternance d'humectation et de dessiccation, qui entraîne une certaine dissolution, puis cristallisation de ciment jouer.

III. LES AGENTS DE L'ALTERATION

Dans toutes les réactions envisagées précédemment intervient l'eau fournie par les précipitations. Cette eau est évacuée hors des profils en entraînant les produits solubles, comme l'acide silicique monomère, ou bien les ions alcalins ou alcalino-terreux dont la stabilité est grande dans les conditions de pH où s'opère l'altération. Elle peut également participer au déplacement du fer et du manganèse à l'état ionique.

A cette eau moléculaire s'ajoutent les ions hydrogènes dont l'origine est variée. La première est la dissociation de l'eau elle-même :

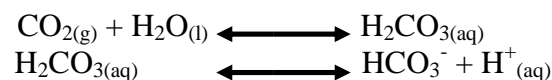


Le pH d'une eau pure (où les quantités d'ions H^+ et OH^- sont égales) est de 7,0 avec une concentration en ions H^+ par litre de 10^{-7} . Les réactions qui font intervenir l'eau seule, avec les ions H^+ qui lui sont associés, constituent une hydrolyse.

Dans la nature, l'eau contient des ions H^+ supplémentaires provenant d'autres sources. Dès que l'eau traverse l'atmosphère, elle se charge en gaz carbonique.

La pression partielle de celui-ci est de $10^{-3,5}$ atm; l'eau a alors un pH de 5,6. Lorsque l'activité biologique du sol est intense, la pression partielle en CO_2 de l'atmosphère du sol augmente et peut atteindre 10^{-2} atm.

La dissolution du CO_2 dans l'eau produit de l'acide carbonique qui se dissocie :

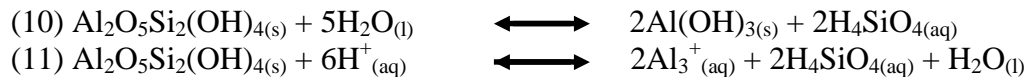


Les nouveaux protons fournis par ces réactions participent à la destruction des minéraux primaires altérables. La réaction (6) concernant l'enstatite (choisie en raison de sa simplicité) peut être modifiée de la manière suivante :



Le magnésium, qui ne réagit pas dans les conditions acides avec l'acide silicique, est évacué sous forme de bicarbonate. Si une partie de magnésium est remplacé, dans l'enstatite, par du fer ferreux, les ions Fe_2^+ libérés sont oxydés en Fe_3^+ qui précipite sous forme d'hydroxydes seuls résidus, dans le sol, de l'altération du minéral originel. Ce sera également le cas d'un autre minéral dépourvu d'aluminium, comme l'olivine « $(\text{Fe}, \text{Mg})_2 \text{SiO}_2$ ». La gibbsite, ou la boehmite, peut provenir directement de l'altération de minéraux primaires lorsque l'eau est très abondante et le soutirage durée [réaction (3) et (5)]. Elle est alors qualifiée de primaire et l'on peut l'observer à la base des profils.

Bien que la kaolinite puisse être considérée comme stable dans les sols ferrallitiques, elle subit, à son tour, une altération avec désilicification suivant les réactions (10) ou (11):



Les ions Al_3^+ peuvent aussi réagir avec l'eau pour donner de la gibbsite.

Un excellent drainage et une quantité d'eau abondante sont nécessaires pour la formation de cette gibbsite qualifiée alors de secondaire. Une eau chargée de silice venant au contact de la gibbsite peut provoquer la réaction inverse et entraîner la formation de kaolinite, ou assurer le maintien de celle ci dans les sols [Réaction (10)].

CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES PROFILS ET METHODE D'ANALYSE DES CONSTITUANTS MINERAUX DES SOLS FERRALLITIQUES

I. LES DIFFERENTS HORIZONS DES SOLS FERRALLITIQUES

I.1 La Nomenclature ABC

I.1.1 L'horizon Organique ou HORIZON O

On appelle «la litière» l'horizon O₁, (appellation ancienne A₀₀). La couche de débris organiques partiellement décomposés se trouve dans l'horizon O₂, (appellation ancienne A₀).

I.1.2 L'horizon Humifère ou Horizon A

En général l'horizon A peut se subdiviser en:

- A₁ : C'est l'horizon minéral de surface avec accumulation maximum de matière organique bien liée à la matière minérale; ayant une influence sur la structure; c'est le lieu de la plus grande activité biologique du profil.
- A₂ : Horizon d'éluviation avec départ de constituants minéraux et éclaircissement de la couleur.
- A₃ : Horizon de transition avec B; la matière dynamique colorant ou imprégnant encore la masse d'horizon.

AB est un Horizon de transition entre A et B avec les caractères de A dominants.

Cet horizon A peut contenir des éléments grossiers: graviers, cailloux, débris de cuirasse.

I.1.3 L'Horizon d'accumulation ou Horizon B

C'est un horizon dont la caractéristique principale est la concentration illuviale ou résiduelle de minéraux hydroxydes ou oxydes, telle que l'horizon diffère nettement de ceux situés au-dessus et au-dessous.

On appelle B₁ l'horizon de transition entre A et B, mais les caractères de B sont dominants: matière organique peu visible, structure moins bien développée qu'en B₂.

B₂ est l'ensemble des horizons marqués par: l'accumulation de minéraux argileux, hydroxydes et oxydes sous toutes leurs formes, et/ou, de maximum de développement de la couleur, de la texture et de la structure.

B₃ est l'horizon de transition entre B et C où les caractéristiques de B₂ sont dominantes sur celles de C.

BC est l'horizon de transition entre B et C où les caractéristiques de B et C sont peu près équivalentes.

1.1.4 Le Matériau Originel ou L'Horizon C

C'est un horizon ne présentant ni les caractéristiques de A ni celles de B et comprenant du matériel modifié par altération en dehors de la zone de plus grande activité biologique.

En Afrique, tous les types de sols de toutes les régions (désertiques à tropicales humides) sont présents (figure 4).

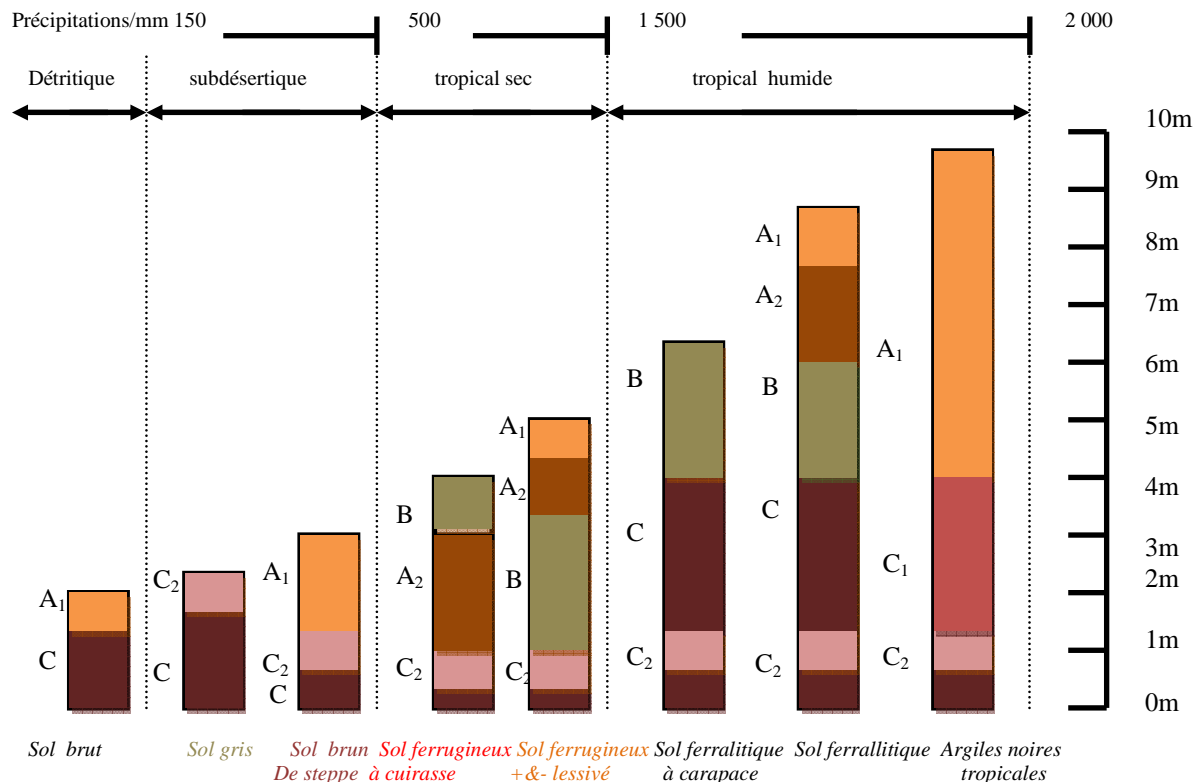


Figure 4 : Zonation des principaux sols d'Afrique

1.2 Relations entre horizons – sols ferrallitiques et les autres sols

On ne peut plus envisager de donner un nom à un sol sans effectuer, après examen morphologique approfondi, diverses analyses, les unes de routine, les autres nécessitant la détermination des caractéristiques particulières. Cependant des observations morphologiques auront permis d'éliminer certaines catégories de sols.

Ainsi qu'il a été vu précédemment, le sol ferrallitique présente un profil ABC où B peut être présenté par B₁, B₂, B₃ etc ... avec la possibilité de plusieurs variétés de B ensemble.

Profil sans horizon B: il est rare qu'il n'existe aucun horizon B; dans ce cas, une succession AC peut amener à ranger le sol dans les régosols ou dans les rankers^{*}. Les autres

cas d'absence d'horizon B permettent d'envisager des lithosols^{*}, fluvisols^{*}, ou rendzines. Mais des caractéristiques très précises doivent éliminer toute confusion avec les sols ferrallitiques.

Lorsque la matière organique est abondante et profonde on pourra envisager des organosols^{*} des mollisols^{*} ou des vertisols^{*}.

La présence en abondance de sols secondaires, permet de ranger les sols parmi les solsnchaks^{*}, gypsisols^{*}, calcisols^{*} ou sulfosols^{*}.

II. IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS MINÉRAUX (DE SEGALEN P., 1994)

Elle peut s'effectuer de manière directe, par interprétation de diagrammes fournis par différentes méthodes physiques, ou de manière indirecte, à la suite de déterminations chimiques.

II.1 Détermination directes

II.1.1 Analyse thermique Différentielle ou ATD

L'Analyse Thermique Différentielle donne des diagrammes caractérisés par des pics endothermiques ou exothermiques. La kaolinite présente des crochets endothermiques vers 500-550°C et exothermiques vers 850-900°C. L'halloysite perd, à basse température, l'eau interfoliaire avec un crochet endothermique entre 100 et 150°C. La métahalloysite perd également un peu d'eau dans cet intervalle de température. Les hydroxydes de fer (goethite) et d'aluminium (gibbsite) perdent de l'eau aussi entre 300 et 350°C et la goethite vers 550°C. La présence de petites quantités de minéraux argileux 2/1 modifie peu les diagrammes des échantillons (ce qui rend difficile leur identification) dominés par des kandites et hydroxydes.

II.1.2 La diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est la méthode la plus utilisée. Elle est effectuée de manière quasi routinière par la plupart des laboratoires des sols qui possèdent des diagrammes de référence, les appareils et les techniques permettant l'identification des minéraux argileux des hydroxydes et oxydes. La kaolinite présente un espacement basal de 4,1 – 7,2 Å, plus important que le pic à 4,4 Å plus fort que le précédent. L'halloysite présente un pic à 10 Å qui disparaissent par chauffage à 100 °C. De faibles quantités d'illite ou de smectite sont généralement identifiables, mais des mélanges de minéraux 2/1, d se traduisent par des épaulements entre 10 et 18 Å. Il est alors difficile de les identifier avec précision, à première observation. Des traitements préalables sont alors nécessaires (chauffage à différentes températures, traitement au glycérol, au potassium...).

II.1.3 La microscopie électronique

La microscopie électronique permet de reconnaître sur un écran ou sur clichés, les minéraux dont certains présentent des formes très reconnaissables (répertoriées dans des ouvrages spéciaux): les plaquettes hexagonales de la kaolinite, les tubes, les boules ou «oignons» de l'halloysite etc... qui rendent leur identification aisée. Mais cette technique ne

porte que sur des échantillons très petits et très localisés. L'extension des résultats à l'ensemble d'un horizon ou d'un profil doit donc être effectuée avec prudence.

II.2 Déterminations indirectes

II.2.1 La détermination du rapport K_i (Silice/alumine)

La détermination du rapport K_i résulte d'une analyse centésimale effectuée avec les précautions nécessaires. En cas de fusion avec un fondant, l'opération doit être effectuée sur une fraction argile dépourvue de quartz (le vérifier aux rayons X); en cas d'attaque acide, elle peut être effectuée sur la terre dure (fraction inférieure à 2mm) ou sur la fraction argile. Le laboratoire doit fournir, au minimum: le résidu non attaqué (par attaque acide) s'il y a lieu, SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , et la perte au feu (100°C).

Il est parfois souhaitable de connaître également les teneurs en oxydes de Ca, Mg, K, Na, Cu, Zn, Cr, Co, Ni, et éventuellement d'autres dont l'obtention par analyse par absorption atomique est maintenant aisée ; la teneur en phosphore est également à mesurer.

Le rapport K_i s'obtient également par le calcul: $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$. La valeur 2,2 est fixée comme la limite à ne pas dépasser pour les sols ferrallitiques. Elle correspond à un peu plus de 10% de minéraux argileux 2/1 détectables par diffraction X (CHATELIN, 1972). C'est la limite que l'on retient ici pour le passage des sols ferrallitiques aux sols bisiallitiques ou bisialsols: le rapport K_i est sans utilité pour séparer les sols ferrallitiques des andosols ou des oxydisols (pour lesquels le rapport K_i est la plupart du temps inférieur à 2,2, alors que certains andosols ont un K_i très supérieur à 2,0).

II.2.2 La détermination de la Capacité d'Echange de Cations CEC

C'est une détermination importante. Les sols ferrallitiques ont un complexe absorbant où les minéraux argileux kandiques sont prépondérants et où les minéraux argileux 2/1 ne sont admis qu'à moins de 10%. Il en résulte que la CEC de la fraction argile doit être inférieure à 30mé/100g, correspondant à la CEC la plus forte des minéraux kandiques (halloysite), et la plus faible des minéraux 2/1 (illite).

Par conséquent, il ne doit pas être fait référence à la CEC seule. Celle-ci doit être prise en compte en même temps que K_i : si la valeur de K_i est inférieure à 2,2 et celle de CEC à 16 mesure/100g d'argile, on peut assurer qu'il s'agit d'une argile purement kaolinique et d'un sol ferrallitique.

Si la valeur de K_i est inférieure à 2,2 et celle de la CEC comprise entre 30 et 16 mesure/100g d'argile, il peut s'agir d'un sol ferrallitique contenant des teneurs notables en halloysite, dont la présence devra être vérifiée par la diffraction des rayons X.

Si la valeur de K_i est supérieure à 2,2 et celle de la CEC à 16 mé/100g d'argile, on peut penser à un sol bissiallitique ou à un andosol.

II.2.3 Déterminations complémentaires

Des déterminations complémentaires peuvent être effectuées pour mieux préciser l'identification.

- La détermination du ΔpH donne des valeurs supérieures à $-0,3$ pour les oxydisols seulement, proches de $-1,0$ pour les sols ferrallitiques, ou bisiallitiques, de $-1,0$ à $-2,0$ pour les andosols;
- L'identification et l'estimation de minéraux altérables, dans la fraction sable fin, permet de qualifier le sol de «pénévolué», si ceux-ci sont supérieurs à 10% ou si des fragments de roche sont fréquents dans le profil.

III. LA CONSTITUTION MINERALE DES SOLS FERRALLITIQUES

III.1 Les minéraux argileux

- **KANDITES (kaolinite et halloysite) (figure 5)**

Les kandites rassemblent tous les minéraux argileux qui présentent un feuillet à deux couches, l'une constituée de tétraèdres (SiO_4), l'autre d'octaèdres (AlO_6). Certains sommets de cette dernière sont occupés par des OH au lieu d'O. Le feuillet alumineux est dioctaédrique, c'est-à-dire que deux sites sur trois sont occupés par des Al et le troisième est vide. C'est le cas également pour la gibbsite. Pendant longtemps, on a pensé que le feuillet octaédrique ne contient que de l'aluminium; les preuves s'accumulent maintenant pour montrer qu'une certaine quantité d' Al^{3+} peut être remplacée par Fe^{3+} (RENGAMASY *et al.*, 1975).

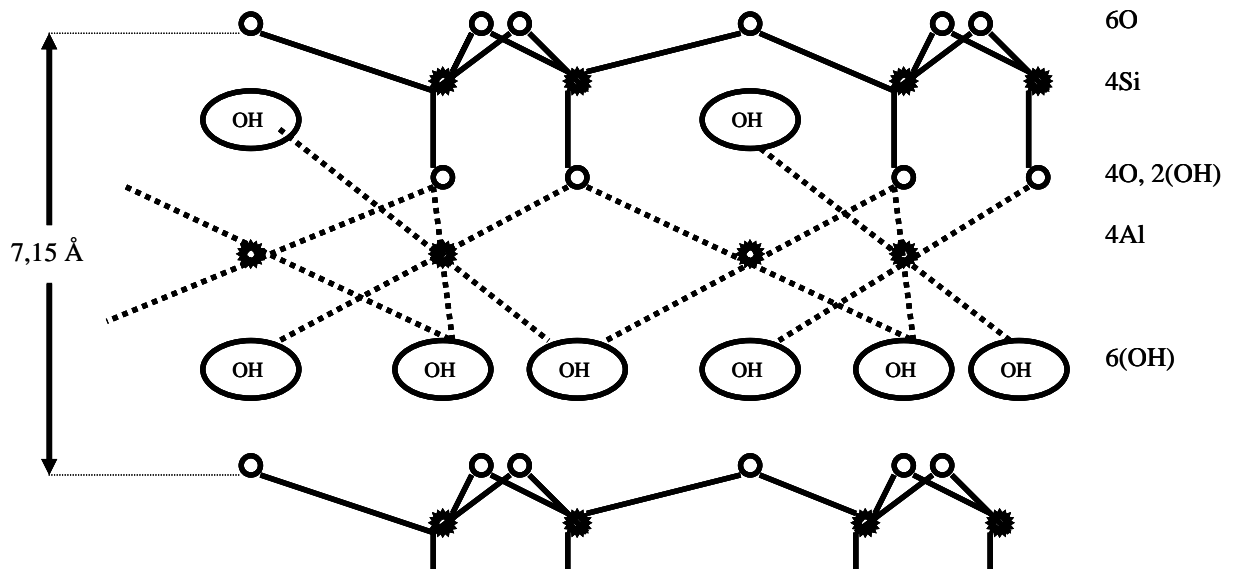


Figure 5 : Schéma structural de la kaolinite

Deux minéraux bien distincts peuvent être identifiés dans les sols: la kaolinite dont le feuillet a 7,1 à 7,2 Å d'épaisseur et n'est pas séparé du suivant par des couches de molécules d'eau; l'halloysite dont le feuillet présente une épaisseur de 10 Å due à l'intercalation de couches d'eau entre deux feuillets du type précédent. Une déshydratation partielle et irréversible amène à la formation de métahalloysite.

- **KAOLINITE** ($[Si_4O_{10}(OH)_2]Al_4(OH)_6$)

La kaolinite apparaît comme le silicate argileux le plus simple. Elle est formée de l'association d'une couche tétraédrique de silice et d'une couche octaédrique d'alumine dans lesquelles il n'y a théoriquement pas de substitutions. Il s'agit donc d'une argile à deux couches, Te-Oc ou 1/1 dioctaédrique. La forme de la demi maille peut s'écrire 2SiO_2 , Al_2O_3 , $2\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ si l'on préfère une formule plus proche du schéma structural. Le rapport moléculaire silice/alumine est égal à 2, c'est la plus petite valeur que l'on puisse trouver dans un phyllosilicate et elle est souvent utilisée comme repère géochimique.

Rappelons que la kaolinite est triclinique, qu'elle ne contient qu'un feuillet par maille et qu'elle est donc notée 1T. Les feuillets de kaolinite sont électriquement équilibrés, il n'y a donc pas de cations compensateurs de charge. Les feuillets superposés sont unis par les ponts hydrogènes établis entre les hydroxydes d'une couche octaédrique et les oxygènes tétraédriques du feuillet adjacent. Le type de liaison est régulier et particulièrement stable.

La présence de kaolinite dans les sols peut être reconnue par différentes techniques.

➤ Diffraction des rayons X :

- . Pic majeur de 7,15 à 7,20 Å
- . La largeur du demi-pic est 1,5 à 3,0 fois plus large dans les échantillons de sols que dans les sédiments.

➤ Microscopie électronique à transmission ou MET :

- . Formes et dispersions des plaquettes variables.
- . Formes bien cristallisées et désordonnées, parfois associées à la métahalloysite.

➤ Analyse Thermique Différentielle ou ATD :

- . Un pic endothermique à 550°C dû à la déshydroxylation.
- . Pic de 510 à 530°C en présence des oxydes qui accompagnent la kaolinite.
- . Pic exothermique dû à la réorganisation de la silice et de l'alumine restantes à 950°C.

➤ Analyse chimique :

- . $\text{Ki} = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ou $(\text{SiO}\% / \text{Al}_2\text{O}_3) \times 1,7$ est égal à 2,0.

➤ La mesure de la CEC permet également d'identifier la présence de kaolinite dont la capacité d'échange de cations est comprise entre 5 et 15 mé/100g.

- **L'HALLOYSITE ET LA METAHALLOYSITE**
 $([\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]\text{Al}_4(\text{OH})_6 2\text{nH}_2\text{O})$

Comme la kaolinite, l'halloysite possède un feuillet Te-Oc. Avec l'eau d'hydratation, la formule de sa demi-maille peut s'écrire $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4\text{nH}_2\text{O}$. Dans l'endellite, variété la plus hydratée, n est égal à 4 et l'écartement des feuillets est de 10 Å.

Ce minéral peut être identifié par une ou plusieurs des techniques utilisées pour la kaolinite:

- La diffraction des rayons X fournit un pic principal à 10 Å qui disparaissent par chauffage à 100°C; il passe alors à 7,3 – 7,4.

- La microscopie électronique à transmission permet de voir le minéral sous formes variées: plaquettes à bords, enroulées, tubes, boules ou masses en formes d'oignons.
- L'Analyse Thermique Différentielle : Pic endothermique important vers 100-200°C (départ de l'eau interfoliaire).
- L'Analyse Chimique : Mêmes types de renseignements que pour la kaolinite ($K_i = 2,0$), mais les teneurs en eau sont beaucoup plus fortes.
- La mesure de la CEC est légèrement inférieure à 30mé/100g.

Dans la métahalloysite, forme la plus déshydratée, l'écartement des feuillets devient presque le même que dans la kaolinite. On l'identifie par les techniques suivantes:

- La diffraction des rayons X : 7,3 – 7,5 Å.
- L'observation du MET montre la présence de tubes projetés sous forme de hâtelet.
- L'analyse chimique donne les mêmes types de renseignements que pour les minéraux précédents.
- **L'ILLITE (Mica et illite) [$K_2Al_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$] (Fig 6)**

La structure des argiles à trois couches, Te-Oc-Te ou 2/1 a été élucidée par comparaison avec les micas. Dans la couche tétraédrique d'un mica, le silicium est remplacé par l'aluminium dans un site sur quatre, le déficit de charge qui en résulte étant composé par des ions de potassium. La formule de la demi-maille d'un mica dioctaédrique, la muscovite, peut s'écrire $(Si_3Al)O_{10}(OH)_2K$.

L'illite se définit comme une argile du type mica, conservant un espacement stable à 10 Å, mais accusant des teneurs plus faibles en potasse et plus fortes en eau que celle des vrais micas. Le nombre de substitutions tétraédriques est le plus réduit que dans les micas. Pour une illite dioctaédrique la formule générale de la demi-maille s'écrit $(Si_4nAln)(Al_2)O_{10}(OH)_2Kn$, avec n généralement compris entre 0,5 et 0,75. Il faut noter que cette formule ne tient pas compte d'une eau de constitution plus abondante que dans un mica.

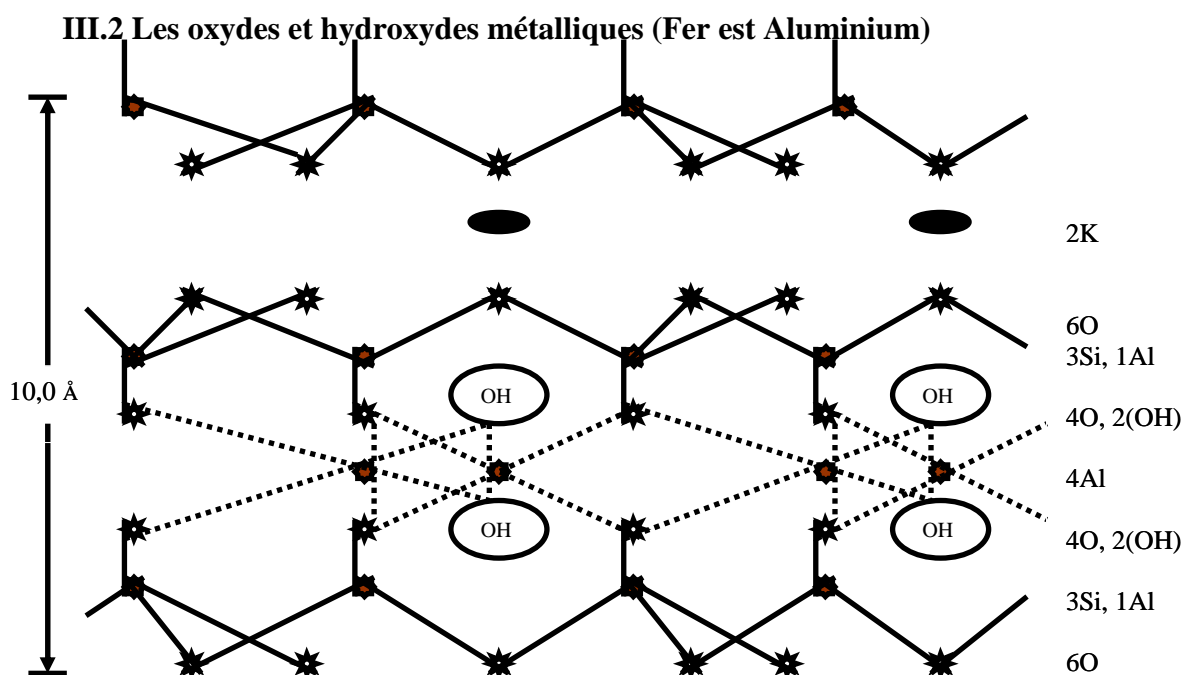


Figure 6 : Schéma structural d'un Mica

. LA GIBBSITE ($\text{Al}(\text{OH})_3$)

La gibbsite (ou la hydroargillite) de formule $\text{Al}(\text{OH})_3$, est la principale forme prise par l'alumine libre dans les sols. Elle est caractérisée par un feuillet épais de 4,85 Å, l'aluminium est au centre d'octaèdres $[\text{Al}(\text{OH})_6]$ dont tous les sommets sont occupés par des OH. Les octaèdres sont jointifs par les arêtes. Deux sites octaédriques sur trois sont occupés par des aluminiums.

Différentes techniques permettent leur identification:

- La diffraction des rayons X: pics principaux de 4,85 – 4,37 à 2,45 Å.
- La microscopie électronique à transmission donne des images de gibbsite sous forme de plaquettes hexagonales.
- L'analyse thermique différentielle donne une courbe présentant un crochet endothermique vers 330°C.
- L'analyse chimique: Ki inférieur à 2,0.

. LA BOEHMITE (AlOOH)

Elle est caractérisée par un feuillet dont la structure est plus compliquée que celle de la gibbsite. Elle présente une double couche d'octaèdres emboîtés, analogues à ceux de la lépidocrocite (FeOOH). Les sommets de certains octaèdres sont occupés par des OH, d'autres par des O. Les moyens d'identification sont les suivantes:

- La diffraction des rayons X: pic de 6,11 à 1,86 Å.
- La microscopie électronique à transmission permet de voir de petits amas de cristaux en croix.
- L'ATD montre un crochet endothermique vers 550 – 600°C.
- L'analyse chimique le même Ki que celle de la gibbsite.

. L'HEMATITE (Fe_2O_3)

L'hématite est reconnaissable à sa couleur rouge sang. Sa structure est phylliteuse avec des octaèdres $[\text{FeO}_6]$ jointifs par une face.

- La diffraction des rayons X : pic intense de 2,69 à 1,69 Å.
- L'ATD ne présente aucun pic endothermique ou exothermique.
- L'analyse chimique permet d'évaluer la quantité de sesquioxydes.

. LA MAGHEMITE (Fe_2O_3)

La maghémite est maghétique. Elle contient toujours un peu de fer ferreux. La présence de fer ferreux incite à penser que cet oxyde résulte de l'oxydation incomplète de produits réduits.

. LA GOETHITE (FeOOH)

Elle présente une couleur jaune à brunâtre. Le minéral est constitué par de doubles files d'octaèdres jointifs par les arêtes. Chaque double file est séparée de la suivante par un

vide au-dessus et au-dessous duquel se situent de nouvelles files orientées différemment de la première. La structure de la goethite est analogue à celle de la diaspore (AlOOH).

- La diffraction de rayons X : pic principal à 4,16 à 1,72 Å.
- A la microscopie électronique à transmission, la goethite des sols se présente sous forme de fuseaux associés de manière diverse.
- L'ATD se traduit par un crochet endothermique entre 300 et 350°C.

L'analyse chimique permet de connaître les teneurs en oxyde de fer. En la continuant avec la teneur en eau disponible, on peut calculer la teneur en goethite.

IV. LES SOLS SE RAPPROCHANT DES SOLS FERRALLITIQUES

Nous avons adopté la classification et les appellations de SEGALIN P. (1994).

IV.1 Les Andosols

Les Andosols sont formés par altération rapide, en allophanes ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$) et imogolites ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), des matériaux pyroclastiques déposés par les volcans en activité, récente ou actuelle et étroitement associés à des produits organiques.

L'identification directe de ces constituants se fait par des tests suivants dont plusieurs résultats concordants permettent d'indiquer la présence d'allophanes et/ou imogolites.

- Test de Fields et Perrott au fluorure de sodium: Virage rapide au violet de la phénolphthaléine, avec pH 9 atteint en moins de 2 minutes;
- Densité apparente faible, inférieure à 0,85 (à 1,0 pour certains);
- Fixation rapide des phosphates: rétention supérieure à 90%.

Cette identification est surtout morphologique. Les horizons pédologiques ne sont pas très épais et dépassent rarement 3 m ; le plus souvent cette épaisseur est voisine de 1m.

L'horizon humifère est le plus souvent foncé : noir , brun foncé, brun-jaunâtre, rarement rougeâtre.

Les horizons minéraux présentent:

- des couleurs brunes, brun foncé, brun rougeâtre; le rouge et le jaune sont possibles;
- de structure, la plus souvent limoneuse, parfois sableuse ; pas de revêtements argileux;
- la consistance à l'état sec est très faible: sous la pression des doigts, un éclat résiste faiblement et se pulvérise littéralement. A l'état humide, un fragment est friable, peu cohérent;
- la porosité totale est très forte 70 à 80% (d'où une densité apparente faible);
- les altérations vraies sont rares, en raison de l'altération rapide des roches. Le passage du solum au roche-mère est brutal;
- la roche-mère est, dans la très grande majorité des cas, une roche volcanique (acide à basique) très divisée.

L'âge maximum généralement reconnu pour les andosols est d'environ 8 à 10 000 ans, temps nécessaire pour que les produits amorphes se transforment en produits cristallisés où l'halloisite joue un rôle important. Peu à peu suivant les régions, et les conditions climatiques, les andosols se transforment en sols bisiallitiques ou en sols ferrallitiques.

IV.2 Les sols bisiallitiques

Les sols bisiallitiques sont définis par leur constituants minéraux, argileux (2/2, 2/1 dont le pourcentage des minéraux doit dépasser 10%) associés très souvent à des minéraux 1/1, des oxydes et hydroxydes de fer; les hydroxydes d'aluminium sont peu fréquents mais existent. Lorsque la teneur en minéraux argileux 1/1 atteint ou dépasse 90% du total des minéraux du total des minéraux argileux, le sol doit être considéré comme ferrallitique.

Dans le cas des sols bisiallitiques, le rapport Ki doit être supérieur à 2,2 et la CEC à 16 mé/100g d'argile. Les sols peuvent soit être acides, soit neutres ou même légèrement alcalines (pH 4,5 à 8,5). L'horizon humifère présente une épaisseur de quelques centimètres à 25 ou 30 cm; la couleur est brun-jaune, brun-rouge brun, parfois brun très foncé; la texture est variable de sableuse à argileuse; la structure est grumeleuse à polyédrique. Les horizons minéraux présentent une épaisseur qui peut s'exprimer en décimètres, et dépasse rarement 2m; la couleur est très variable, brune, brun-rouge, brun-jaune, rouge foncé; la texture est variable; la structure est fragmentaire.

L'altérite est généralement facilement accessible ainsi que la roche-mère. Son épaisseur est comprise entre quelques centimètres. La structure de la roche est généralement bien conservée.

Les roches-mères sont quelconques. Les calcaires et les péridotites ne présentent qu'une altérite très réduite. Lorsque le temps est suffisamment long, l'altération se poursuit par l'enlèvement de davantage de silice, de bases et, éventuellement, de sels; les minéraux argileux 2/1 diminuent graduellement au profit des kandites. Le sol s'approfondit ainsi que le front d'altération. On passe, peu à peu, à un sol ferrallitique.

IV.3 Les Oxydisols

Les oxydisols peuvent succéder aux précédents lorsque la majeure partie de la silice a été évacuée, ce qui ne se produit que dans des conditions particulières (drainage excessif prolongé, ou absence de feldspaths dans les roches-mères) et sur des étendues limitées. On peut obtenir des accumulations dominées soit par des hydroxydes d'aluminium, soit des sesquioxydes de fer.

Les sols contiennent plus de 50% (par rapport au sol séché à 105°C), métalliques libres, non engagés dans une combinaison silicatée. La gibbsite et l'hématite sont faibles, mais elles sont fortement dépendantes du pH. La CEC rapportée à 100 g d'argile, est inférieure à 16 mesures en raison de la très forte quantité d'oxydes, mais la valeur ne peut être considérée comme très significative.

Les horizons humifères sont rouges à rouge foncé. Les horizons minéraux doivent l'essentiel de leurs propriétés à la présence de fortes quantités d'oxydes métalliques. La couleur est le plus souvent rouge à rouge foncé, rouge brun, brun au jaune. La couleur sombre ou très sombre est due à l'abondance de la chromite ou de magnétite.

La structure est le plus souvent fragmentaire, polyédrique émoussée très fine, assez bien structurée. Les pseudo-particules de la taille des sables et les limons sont fréquents et abondants. La texture est fine avec une teneur en argile élevée (supérieure à 50%). La teneur en éléments grossiers est très variable. La consistance, en l'absence de cuirasse, est fragile à dure à l'état sec; faible à ferme, à l'état humide et la plasticité étant réduite. La porosité est élevée. Le pH est modérément acide (de 5,5 à 6,7). Les teneurs en cations échangeables sont faibles à très faibles, avec S souvent inférieur à 1,0 mé/100g de sol; l'aluminium échangeable est faible ou absent. L'altérite est d'épaisseur variable. Les roches-mères sont de roches ultrabasiques (diverses sortes de péridotites) ou bien des roches basiques comme des basaltes. On connaît des oxydisols dérivées de calcaires.

V. QUELQUES SOLS FERRALLITIQUES

V.1 Les sols faiblement ferrallitiques (MAIGNIEN, 1958)

Le climat est tropical humide à tropical moyen. La végétation est à la base de forêt primaire semi-caducue ou de savane. Le relief est plat à faiblement ondulé. Le profil comprend des horizons humifères A dont une caractéristique importante est de contenir moins d'argile que les B sous-jacents (15-18% et 35-40% respectivement). L'horizon B n'est pas considéré comme enrichi par illuviation tandis que A, privé d'argile et de fer, est considéré comme ce «appauvri». On observe toutefois quelques revêtements argileux au sommet du B. La couleur de celui-ci est rouge parfois jaune.

La CEC de l'horizon B est comprise entre 4 et 7 mé/100g; le degré de saturation (rapporté à l'argile) est de 40 à 60%; le pH de 6 à 7. Le rapport Ki est légèrement inférieur à 2,0 avec une quantité d'aluminium libre friable à très faible quantité de fer sous forme de goethite et hématite; les sesquioxides sont considérés comme «bien individualisés» et les liaisons fer-argile «stable»... Le seul critère qui permettra de séparer ces sols des autres sols ferrallitiques est le niveau élevé du Ki.

V.2 Les sols ferrallitiques rouges

Ils ont été reconnus dans divers pays comme Madagascar (HERVIEU, 1966). L'horizon A est brun, moyenne humifère, appauvri en argile, riche en éléments grossiers ferrugineux (débris de cuirasse).

L'horizon B est rouge homogène, bien structuré avec des éléments grossiers dont la qualité diminue vers la base de l'horizon.

L'horizon C est bariolé en taches nettes enchevêtrées ocre, blanches, violacées.

La teneur en argile passe de 15% en A à 49,8% en B pour redescendre à 3% à plus de 2m. Un tel sol est donc à la fois remanié et appauvri.

A Madagascar, sur le pourtour de la Montagne d'Ambre (extrémité nord de l'île), et en divers endroits du centre de l'île, SEGALIN P. (1995) décrit des sols rouges dérivés de roches volcaniques basiques, argileux, de structure uniforme en B, à CEC faible, modérée et moyennement à fortement désaturée. Le rapport Ki est toujours inférieur à 1,7; goethite, hématite et gibbsite sont abondantes. Les sols peuvent être considérés comme «typique» ou «ha pliques».

V.3 Les sols ferrallitiques jaunes sur rouge

Ils ont été décrits dans les travaux des pédologues français. Par contre à Madagascar, Ils les répertorient parmi les sols importants de l'île; ils abondent, un effet, sur le versant Est, très pluvieux. Aux Antilles, les sols sont dérivés de roches volcaniques où la couleur passe du jaune en rouge. Dans ces sols, il n'a pas été observé de sous horizon dans le B, ni de revêtements argileux.

V.4 Les sols ferrallitiques jaunes

Ces sols présentent une couleur jaune ou brun jaune, due à la présence de goethite. Ils sont le plus souvent très acides ($\text{pH}=5$), très désaturés ($V<20\%$). On observe généralement un gradient argileux net. Le rapport K_i est souvent proche de 1,0 avec des teneurs importantes en gibbsite. On observe également des fragments de cuirasse, ou des cailloux de quartz alignés.

V.5 Les sols ferrallitiques bruns

Ils ont été décrits à divers reprises à Madagascar par SEGALIN en 1995. Les sols dérivent des roches volcaniques basiques et doivent leur couleur à la matière organique (encore 2 à 3% à 1m de profondeur). Le climat est généralement humide (absence de saison sèche et s'applique dans des conditions de températures variées) de régime équatorial ou subtropical. Les minéraux abondant sont des hydroxydes de fer surtout sous forme de goethite. La gibbsite est presque toujours très abondante et le rapport K_i est inférieur à 1,0. La constitution minéralogique est compliquée par la présence d'allophanes et l'abondance relative d'halloisite; ceci se traduit par des CEC souvent élevées et de forte teneur en eau. Il s'agit souvent d'intergrades vers les andosols.

V.6 Les sols ferrallitiques lessivés ou appauvris

Il y a départ d'argile de la partie supérieure du sol, sans accumulation correspondante le B identifiable par la présence de revêtement argileux.

V.7 Les sols ferrallitiques remaniés

Ces sols représentent une solution de continuité dans le profil, marquée par un changement net de texture ou le plus souvent par une ligne de pierres (débris de cuirasse ou de quartz filonien).

V.8 Les sols ferrallitiques indurés

Ils présentent un horizon induré en cuirasses ou carapaces. Sur le plan cartographique, on ne prend en compte que celles qui sont situées entre 3cm et 200cm, tandis que les cuirasses affleurantes sont comptées lithosols, bien qu'on les considère comme de «vieux» sols ferrallitiques où la «ferrallitisation est forte».

V.9 Les sols ferrallitiques humifères

Ils sont ceux qui contiennent une quantité notable de matière organique (7% sur 20cm ou plus de 1% jusqu'au moins 1m de profondeur). Ces sols sont, le plus souvent, observés à altitude élevée, donc à des températures réduits, comme par exemple 8 à 15°C,

mais avec des précipitations encore fortes, ou avec une nébulosité permanente (rebord d'un escarpement, col, vallée encaissée...).

Nous allons résumer ces différents sols de couleur généralement rouge dans le tableau suivant avec leurs caractéristiques (tableau N°1).

IDENTIFICATIONS	EPAISSEUR PEDON	HORIZON HUMIFERE	HORIZON MINERAL	STRUCTURE	CONSISTANCE	ROCHE-MERE	Ki	EVACUATION DE LA SILICE
ANDOSOLS	1m-3m	Noir, brun-foncé, brun-jaunâtre	Brun, brun foncé, brun rougeâtre, rouge, jaune	Limoneuse, sableuse, revêtement argileux	Très friable	Roche volcanique acide à basique	>2	Peu
SOLS BISIALLITQUES	1cm-2m	Brun-jaune, brun rouge, brun très foncé	Brun-jaune, brun-rouge, rouge foncé	Sableuse à argileuse	-	-	>2,2	Peu
OXYDISOLS	1m-4m	Rouge à rouge foncé	Rouge à rouge foncé, rouge-brun, brun au jaune (sombre)	-	Fragile à dur, faible à ferme	Roche basique à ultrabasiq ue	>2,2	Majeure
SOLS FERRALLITIQUES Sols ferrallitiques jaunes sur rouges	3m-4m	Noir, jaune-brun	Jaune au rouge	Argilo-limoneuse	Peu cohérent	Roche acide, roche volcanique	#1 à 1,7	Peu
Sols ferrallitiques rouges bruns	3m-4m	Brun moyennement humifère appauvri	Rouge homogène bien structuré	Uniforme	Peu cohérent	Roche volcanique basique, roche acide	<1,7 ou <2,2	Majeure

Tableau 1 : Identification des sols ferrallitiques

Nous avons évoqué dans cette première partie les points suivants:

• L'évolution d'un profil est à la fois chimique et minéralogique. Les minéraux primaires au cours de l'altération subissent des modifications importantes au niveau de l'armature cristalline et au niveau de la formule chimique mais à vitesse différente (voir ordre de stabilité des minéraux d'après Goldich 1938, page 7).

- Pyrophyllite (monoclinique)
- Kaolinite (triclinique)
- Gibbsite (triclinique)

3/- L'enstatite, pyroxène orthorhombique donne directement de la solution silicique

4/- Mica ➡ Chlorite ➡ Vermiculite ➡ Montmorillonite ➡ Kaolinite (monoclinique).

- Pour le fer: . Formes amorphes; limonite et ferrihydrite
 . Formes cristallines; hématite et Goethite
- Pour l'aluminium: forme amorphe; cliachite
- Pour le silicium: forme amorphe; imogolite, allophane

Si le rapport K_i est supérieur à 2,2 on a soit de l'Andosol, de Bisialsol soit de l'Oxydisol.

- La qualité d'un sol considéré comme matériau de construction est basée sur la granulométrie, la teneur en eau, aux essais de compactage et aux essais de déformation.

DEUXIEME PARTIE

ETUDES EXPERIMENTALES DES SOLS FERRALITIQUES D'ANTANANARIVO ET DE SES ENVIRONS

CHAPITRE I : APERÇU SUR LA GÉOLOGIE DE MADAGASCAR ET GENESE DES SOLS FERRALITIQUES MALAGASY

I. GÉOLOGIE DE MADAGASCAR

Madagascar faisait partie du continent **Gondwana**. Il existe donc à Madagascar des roches héritées du Gondwana qui sont des roches cristallophylliennes datées du Katarchéen (3 000 MA) jusqu'au Protérozoïque moyen (environ 1 200 MA). Ces roches occupent le $\frac{3}{4}$ de la superficie de la Grande Ile. C'est le **Socle cristallin Malagasy**.

Une coupe synthétique à la latitude d'Antananarivo montre les principaux types de roches constitutives et leur position (figure 7).

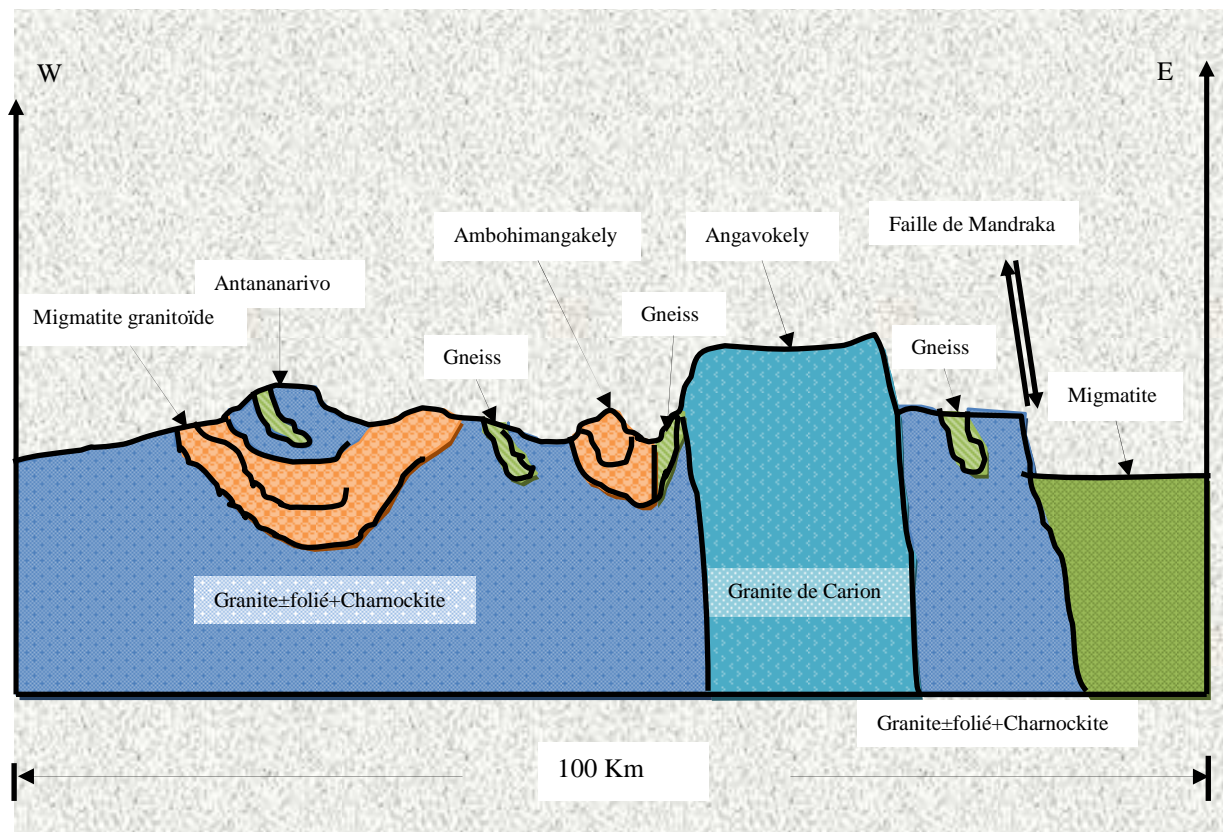


Figure 7: Coupe géologique synthétique à la latitude d'Antananarivo

Le protérozoïque supérieur n'existe pas à Madagascar. Puis, au Mésopremien (2600 MA) Madagascar se détache de l'Afrique avec dépôts de sédiments continentaux appelés Karroo. La séparation de Madagascar de l'Afrique est parfaite à la fin du Jurassique moyen (Callovien, 150 MA) avec un apport de sédiments marins jusqu'au crétacé supérieur. A cette époque il y a eu une surélévation du bassin de Majunga qui a entraîné une régression marine avec des sédiments continentaux caractérisés par des grès à stratification entrecroisées. Ces grès renferment des ossements des dinosaures. A la fin du tertiaire (Pliocène) une régression marine très importante a affecté tout Madagascar. Le niveau de la mer est abaissé à une centaine de mètres.

Au bassin de Morondava, le Karroo est complet :

La Sakoa est discordante sur le socle cristallin suivi par la Sakamena et l'Isalo puis allant à l'Ouest, le faciès devient marin (marne, calcaire) (figure n°8).

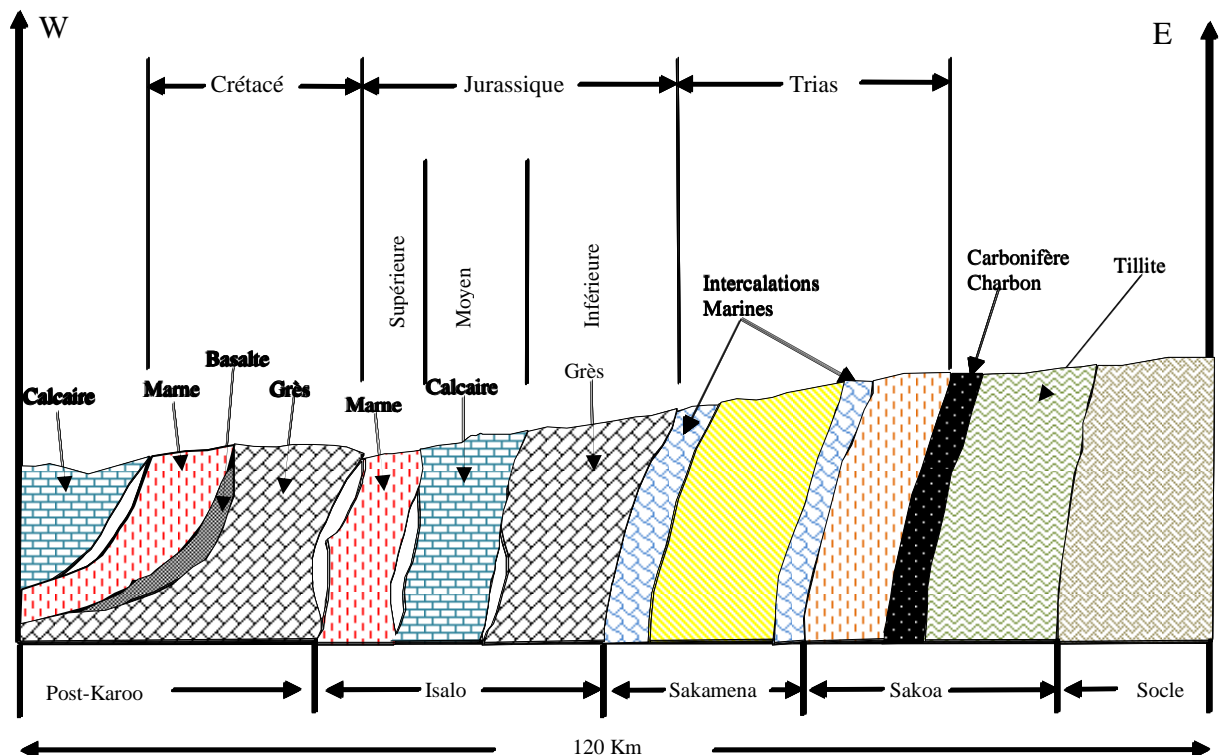


Figure 8: Coupe géologique synthétique du Bassin sédimentaire de Morondava

Au Quaternaire, il s'était produit des grandes transgressions marines. La mer s'est avancée à l'intérieur des terres par l'intermédiaire des estuaires des grandes vallées des fleuves. Dans la plaine de Marovoay à 20m d'altitude, par exemple, on trouve des coquilles marines à 100Km de la côte. Toutes les formations après le Karroo s'appellent le Post-Karroo.

Outre le socle cristallin et les roches sédimentaires il y a des roches éruptives, des roches volcaniques et les latérites. Pour ce dernier type de roche on va mettre en évidence le Quaternaire, période probable de leur formation.

I.1 Histoire précambrienne de Madagascar :

Pour BESAIRIE (1963), les roches précambriennes sont classées suivant l'intensité du métamorphisme classique: à la base le système Androyen, au dessus, le système du graphite et au sommet celui du Vohibory (tableau n°2). Pour lui, toutes les roches du socle sont issues d'une seule orogénèse du 2700 ou 2600 Millions d'années (Archéen).

SYSTEMES	GROUPES	Caractères Pétrographiques et Minéralogiques	Minéralisations
VOHIBORY	Mananjary	Gneiss, Micaschiste, Schiste vert	Or
	Daraina	Micaschiste, amphibolite, épidolite, gneiss	Cuivre
	Maevatanana	Schiste vert, amphibolite, gneiss	-
	Amborompotsy	Micaschiste, gneiss, cipolin	Or, chrome
	Beforona	Amphibolite, migmatite à amphibole	Plomb, chrome
	Vohibory	Gneiss amphibolitique, amphibolite, leptinite	Cuivre
GRAPHITE	Andriba	Partie supérieure sans graphite, micaschiste et gneiss	Or
	Ambatolampy	Micaschiste et gneiss à graphite	Or
	Manampotsy	Gneiss et migmatite à graphite, charnockite	
	Ampanihy	Leptynite, et gneiss à graphite, charnockite, anorthosite	Mn et Ti
ANDROYEN	Ampandrandava	Gneiss, leptynite, piroxénite, cipolin, charnockite	
	Tranomaro	Paragneiss calcique et magnésique, Wernoitite, piroxénite, cipolin, leptynite	Uranium, thorium
	Fort-Dauphin	Leptynite à cordiérite, charnockite	Thorium

Tableau 2 : Classification du socle cristallin de Madagascar H. BESAIRIE, 1963

Dans les années 70, les chercheurs ne se contentent pas des travaux de Besairie. Grâce au développement des technologies comme la découverte des éléments. HOTTIN et ses collègues ont évoqué une classification des roches à Madagascar selon leur âge isotopique (tableau n°3).

AGES	Stratigraphie africaine (T.N. Clifford)	MADAGASCAR
550 ± 100MA Paléozoïque Inférieure	Episode panafricains Katangian Mozambican belt	Episode de granitisation et de migmatisation, mais surtout semble-t-il remobilisation d'un matériel peut être déjà granitique Pegmatite. Granite de Carions 523MA à 680MA Migmatite de Brickaville 432MA
	Paléozoïque supérieur	Pas de dépôt connu.
1100+/-250MA Protérozoïque supérieure	Kibarides Episode Kibarien Réactivation des séries plus anciennes	Charnockites de Betafo Soavinandriana 950MA Granite d'Antananarivo 1100MA Granite de Vavavato 1060 MA Filons granites Ambatomainty 1050 MA
	Protérozoïque moyen	Dépôt du système Vohimena, série schisto- quartz-calcaire. Amborompotsy, Ikalamavony, Adrienproparte Dépôt des séries de NE (Ambohipato, Vohémar, Daraina, Milanoa)
1650±250 MA	Episode éburnéen	Filons de galène de la région de Tsaratanana , recoupant l'Andriaménien 1850 MA Pegmatite d'Ampanobe 1640 MA Leptynite de Maromby –Série Tranomaro 2057 MA Granite stratoïde de Vohimena 2161 MA
	Protérozoïque inférieur	Dépôts série schisto-quartz calcaire, Amborompotsy Ikalamavony et leurs équivalents androïens
2600±200 MA	Episode shamvaïen	Orogenèse majeure du Précambrien Malagasy Métamorphisme et plissement des séries Alaotra – Beforona – Andriamena et des séries graphiteuses de Manampotsy , Ambatolampy
3000 MA	Archéen	Dépôt des séries graphiteuses et calco- ferro-magnésiennes des sillons synclinaux d'Andriamena , Androna , Ambatolampy , Manampotsy , et leurs équivalents internes (ex : Migmatites rubanées de la falaise orientale du Mangoro , de Vondrozo) et modernes (ex :séries de Vavatenina , Sahantaha , Antenina)

		Migmatites oligoclasiques de la Masora (côte E) 3200 MA Granite de Behara (extrême S) 3020+/-50MA
	Katarchéen	Granite de l'Antongil et socle de la Masora (secteur oriental) Noyaux internes dans les axes granito-migmatitiques des hautes terres Ecailles ou noyaux réduits dans l'Androien ultramétamorphique de l'extrême S ex : granite de Behara)

Tableau 3: Classification du Socle Cristallin de Madagascar (G.Hottin)

I .2 La couverture sédimentaire

Les roches sédimentaires s'étendent surtout sur les bordures Ouest. Elles commencent au Carbonifère. Il manque donc à Madagascar une période si longue (Protérozoïque supérieur → Ordovicien). Ces roches sont réparties dans trois bassins principaux:

- Bassin de Diégo au Nord, limité par le massif de la montagne d'Ambre et la presqu'île d'Ampasindava;
- Bassin de Majunga entre la presqu'île d'Ampasindava et le Cap-Saint-André;
- Bassin de Morondava du Cap-Saint-André jusqu'à l'extrême Sud.

Ces roches sédimentaires sont formées par des couches faiblement inclinées vers l'Ouest. Le pendage varie entre 30° et 20° au contact du socle pour atteindre les valeurs -1° presque horizontale sur les côtes.

I-2.1 Le Karoo

Ce sont des dépôts continentaux datés du Carbonifère au Lias à dominance gréseuse avec quelques intercalations marines (tableau 4).

		Karoo Malagasy	
Système	Etage	Besairie (H)	Razafimbelo (E)
Jurassique moyen	Bathonien	Isalo III b a	Makay II
Jurassique inférieur	Lias Rhétien	Isalo II	
Trias	Trias	Isalo I	Makay I
Permien	Eotrias		
	Néopermien Mesopermien Permien inférieur	► Sakamena	Sakamena
	Eopermien	► Sakoa	Sakoa
Carbonifère	Carbonifère supérieur		

Tableau 4: Le Karoo malagasy d'après Besairie H. (1964) et Razaimbelo E. (1998)

I-2-2 Le Post-Karoo

Ce sont des formations marines à dominance calco-marneuse dans les trois bassins ci-dessous :

Epoques	Etages	Sous-étages
Néogène	Pliocène Miocène	Turtonien Burdigalien Aquitaniien
Orogenèse Alpien		
Paléogène	Oligocène Eocène Paleocène	Bartonien Luthétien Ypresien
Crétacé Supérieur	Maestrichtien Campanien Santonien Coniacien	
Crétacé Inférieur	Hautervien Valanginien	
Jurassique Supérieur	Tithonique Kimmeridgien Oxfordien	
Jurassique Moyen	Callovien	

Madagascar possède aussi d'autres bassins sédimentaires tels que:

- Le bassin lacustre de Moramanga
- Le bassin lacustre d'Antanifotsy
- Le bassin lacustre d'Antananarivo
- Le bassin lacustre de l'Onive
- Le bassin oriental
- Le bassin lacustre de Sambaina et celui de Vavatenina

I-3 Le Quaternaire Malagasy =Aepiornien

C'est une époque très importante quand on parle de la genèse des sols ferralitiques. Même leur genèse commence déjà au tertiaire. L'*Aepiornien* est représenté par des dunes de l'extrême Sud contenant des ossements et des œufs d'*Aepiornis*. Ces dunes se sont déposées au cours des transgressions marines.

On a trois systèmes dunaires bien distincts:

- dune tatsimienne
- dune karimbolienne I et II
- dune flandrienne

Ces dunes correspondent respectivement à des signes climatiques observés dans trois bassins lacustres (Moramanga , Sambaina , Vavatenina):

- Pluvial pré-moramangien
- Pluvial post-moramangien
- Pluvial post-sambainien
- Pluvial post-vavatenien

La période entre deux dunes d'âges différents est une période displuviale:

- Displuvial moramangien entre transgression tatsimienne et transgression karimbolienne;
- Displuvial sambaien entre transgression karimbolienne I et transgression karimbolienne II;
- Displuvial vavatenien entre transgression karimbolienne II et transgression flandrienne.

Ces dunes ont également une signification climatique car leur dépôt, leur décarbonations et leur rubéfaction ne peuvent être imputés à l'influence d'un seul et même climat.

On incline à considérer comme «plus sèche» la phase de mise en mouvement des sables, comme «plus humide» la phase de carbonations et à lier leur rubéfaction à un nouvel assèchement.

A Tuléar, les quatre systèmes dunaires sont (tableau 5):

- Système «roux-rouge» noté Q_1 assimilé au Tatsimien;
- Système «roux-foncé» noté Q_{21} assimilé au Karimbolien;
- Système «roux-claire» noté Q_{22} sans équivalent;
- Système «beige» noté Q_3 assimilé au Flandrien.

DATATION EN ANNEE BP	CLIMATS	HAUTES TERRES	SEQUENCE DUNNAIRES DU SUD OUEST
Période actuelle, jusqu'à 1000	Actuels	Déboisement intense Erosion en Lavaka Pédogenèse	Dépôts Q ₃
8000 à 25000	Pluvial post-Vavatenien Lavaka Dis pluvial Vavatenien	Pédogenèse Alluvion de basses terrasses	Rubéfaction roux-claire Dépôts Q ₂₂
40000 à 70000	Pluvial post-Samabainien Dis pluvial Samabainien	Pédogenèse Lavaka Alluvions des moyennes terrasses	Rubéfaction roux-foncé Dépôts Q ₂₁
500000 à 700000	Pluvial Dis pluvial Moramangien	Pédogenèse Hautes terrasses	Rubéfaction roux-rouge Dépôts Q ₁

Tableau 5: Variations climatiques et événements paléogéographiques à Madagascar (d'après BOURGEAT et RATSIMBAZAFY, 1975 et SOURDAT, 1977)

Sur les hautes terres, les formations contemporaines de ces dunes sont représentées par des terrasses. On a trois types de terrasses au Tampoketsa:

- Moyenne terrasse contemporaine au dépôt Q₂₂;
- Moyenne terrasse contemporaine au dépôt Q₂₁;
- Haute terrasse contemporaine au dépôt Q₁.

II. LE CLIMAT DE MADAGASCAR

II-1 Le climat actuel

Géographiquement, Madagascar se situe à l'Est de la côte africaine, c'est une île ayant une superficie de 590 000 km², une longueur Nord-Sud de 1600 km et une largeur Est-Ouest de 600 km, entre 12°5 et 25° latitude Sud et entre 43° et 50° longitude Est. Sa position confère, à la grande île, un climat tropical. Cependant, à cause de sa position proche de l'Afrique, de l'Océan Indien à l'Est, de son relief tourmenté avec une surélévation de la zone centrale jusqu'à 2800 m (point culminant), du passage du tropique du Capricorne à la hauteur de Tuléar, Madagascar présente des conditions climatiques variées. (Tableau 6)

De plus, les principaux facteurs météorologiques réagissant sur Madagascar sont:

- L'Anticyclone de Mascareignes entre 30° latitude Sud engendrant l'Alizé du Sud-Est;
- Les basses pressions équatoriales au Nord engendrant une intermittence en été;
- Une circulation d'Ouest en Est de l'Anticyclone mobile en provenance de l'Atlantique sud qui intéresse la région sud de l'île;

Les différents types de climats sont (figure 9):

- **Climat équatorial:** l'Est exposé à l'Alizé, connaît une humidité relativement forte avec plus de 3000 mm /an de précipitation. La saison sèche est presque inexistante;
- **Climat tropical humide:** l'Ouest abrité de l'Alizé par la zone des hautes terres mais subit l'influence de la Mousson du Nord-Ouest et est moins arrosé avec plus de 2000mm/an de précipitation. Il présente une saison sèche très marquée;
- **Climat tropical moyen** sur la zone des hautes terres située entre la limite de la zone d'influence de la Mousson et de l'Alizé. Cette zone connaît de saisons bien marquées: une saison sèche et une saison humide (précipitation 2000 mm/an).Elle est caractérisée par des températures nettement basses, plus basses que dans le reste du pays ; les minimas absolues peuvent descendre au dessous de 0°C.
- **Climat tropical sec ou semi-aride :** au Sud et au Sud-est avec une faible pluviosité (400mm/an) mais régulièrement répartie dans l'année.

Station		J	F	Mar	Av	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Année	Δ	Régime ou sous-régime
<i>TULEAR</i>	T P M	27,3 79 P	27,2 81 P	26,3 36 A	24,4 8 A	22,2 18 A	19,9 10 A	19,4 3 A	20,2 5 A	22,0 8 A	23,1 18 A	24,7 36 A	26,3 43 A	24,5 345	7,1	2P 10A Tropical sec
<i>AMBOVOMBE</i>	T P M	26,4 89 P	26,3 84 P	25,6 59 A	24,1 26 A	20,9 37 A	19,2 53 0	18,5 26 A	19,2 24 A	20,9 21 A	23,0 24 A	24,8 43 A	26,1 88 P	22,9 575	7,4	3P 0 8A Tropical sec
<i>FORT DAUPHIN</i>	T P M	25,1 160 P	24,9 244 P	24,1 203 P	23,1 175 P	21,2 168 P	19,6 145 P	18,8 107 0	19,1 99 0	20,0 89 0	21,4 66 0	22,9 76 P	24,1 122 P	23 1654	5,6	8P 40 Subtropical
<i>TANANARIVE</i>	T P M	19,8 300 P	19,9 279 P	19,1 178 P	18,2 53 0	16,4 18 A	14,0 8 A	13,3 8 A	13,8 10 A	15,6 18 A	17,8 61 0	19,3 135 P	19,8 287 P	18,5 1355	6,1	5P 2 0 5A Pluvioptimoaridique
<i>FIANARANTSOA</i>	T P M	21,4 269 P	20,9 226 P	20,2 170 P	19,3 51 0	17,0 30 0	14,8 20 A	14,0 20 A	14,6 18 A	16,5 23 A	19,2 38 0	20,7 135 P	21,0 231 P	18,5 1231	6,8	5P 3 0 4A Pluvioptimoaridique

T Température moyennes mensuelles en °C
P Précipitations moyennes mensuelles en mm
M Types de mois
Δ Amplitude annuelle en °C

Tableau 6 : Données climatiques de quelques stations de Madagascar (ORSTOM, 1994)

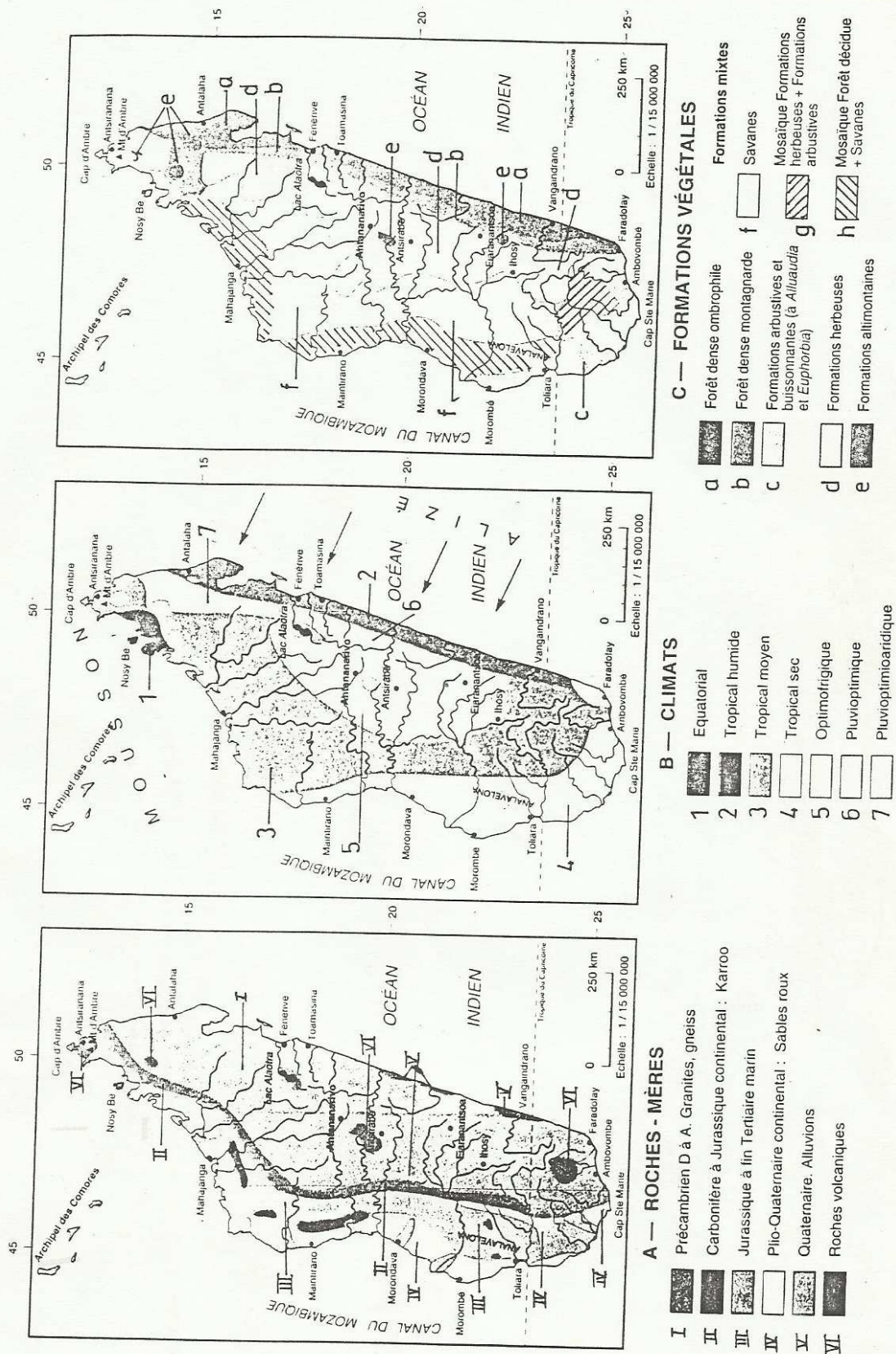


Figure 9 : Quelques facteurs des sols à Madagascar (ORSTOM, 1994)

II-2 Climat du Quaternaire

En plus d'un rajeunissement continu de certains profils situés sur des pentes accentuées, on doit envisager un décapage des sols au cours de certaines périodes favorables à l'érosion (phase de rhexistasie) et une reprise de la pédogenèse et de l'altération lorsque le climat devient plus humide (phase de biostasie de H. ERHART 1956).

Des études géomorphologiques et pédologiques conjointes faites sur des formations anciennes, dunes, alluvions, ou de processus de remaniement ou d'érosion (stone-line, lavaka) s'avèrent particulièrement intéressantes pour établir la succession des périodes climatiques.

II-3 Les indices de la chronologie de l'Aépiornien

II-3-1 Les dunes

Elles ont été distinguées par leur ampleur, l'usure de leur modelé, leur degré d'évolution pédologique. Chacune d'elle fossilise les poudingues et lumachelles de rivage correspondant, chacune est entaillée par le rivage ultérieur et fossilisée par le système suivant.

II-3-2 Les alluvions

Elles occupent les parties basses comme le talweg, la plaine, la rivière, le delta, le lac,...Elles se déposent en formant des terrasses. Les terrasses sont donc formées de succession de sédiments généralement sableux.

II-3-3 La stone-line

C'est un lit de cailloux d'épaisseur variable noyé dans la masse du sol. La stone-line sépare deux horizons au dessous l'Isaltérite à structure conservée et au dessus un horizon remanié appelé Allotérite. Les éléments de la stone-line sont anguleux et généralement quartzeux. Elle épouse assez facilement la forme du relief.

II-3-4 Les lavaka

Ce sont des excavations à parois verticale. Elles peuvent se manifester en n'importe quel endroit d'une colline latéritique. En outre elles peuvent aussi constituées de talus artificiels La lavakisation est donc un mouvement de terrain et de forme d'érosion très typique observée sur les sols latéritiques.

III. LA GENESE DES SOLS FERRALLITIQUES DE MADAGASCAR

J.Riquier et F.Bourgeat (1975) ont fait la recherche de l'histoire des sols ferrallitiques. Quatre phases se sont déroulées.

III. 1 : 1^{ère} phase

Altération de la roche en climat très humide chaud (Miocène, Pliocène). Mais il y a eu au début du Tertiaire (Paléocène et Oligocène) un décapage de sol précédent sauf dans le cas des sols

déjà cuirassés, des sols bien évolués recouverts par des coulées pliocènes de l'Ankaratra ou par des alluvions.

Exemple: Alluvion de Mangoro datant du pliocène.

Il y a deux types d'altération:

- . Formation directe de Gibbsite à partir des Feldspaths dans les roches bien drainés difficilement altérables par leur texture et se trouvant en position haute dans le relief.
- . Formation de Kaolinite à partir des Feldspaths dans les roches très altérables, mal drainées, en possession de dépression par rapport aux roches environnantes. Cette période a été la plus propice à la pénéplanation.

III. 2 : 2^{ème} phase

Formation des horizons rouges superficiels en climat à saison alternante plus sèche (Pliocène supérieur ou plutôt Pléistocène). Cette phase commence par un décapage des zones d'altération qui provoque l'épandage des filons de quartz en stone-line sur la surface du sol par érosion différentielle. Cette érosion intense a entraîné la formation des terrasses alluviales (de 10 m environ) donc pratiquement contemporaines de la stone-line.

L'âge relatif de ces terrasses et celui de la stone-line est fini-tertiaire car on a trouvé des stones-line ayant subi un retroussement par une coulée basaltique pliocène. Les terrasses alluviales sont naturellement recouvertes par hydromorphie.

Cette phase à tendance semi-aride a continué par une rubéfaction générale de la surface des zones de départ; quelque fois même en-dessous de la stone-line, et par épandage d'éléments rouges fins colluvionnés sur la stone-line. C'est une phase de rhexistasie. Il semble que cette période est plus propice à la formation de pédiplaine.

III.3 : 3^{ème} phase

Phase de ferrallitisation plus intense due à une période plus humide (Quaternaire moyen) et évolution des horizons supérieurs sous l'influence de la végétation.

La forêt recouvre le sol précédemment dénudé, c'est la phase de Biostasie pendant laquelle l'érosion s'atténue. Le sol s'altère chimiquement très profondément. La couche supérieure précédemment rubéfiée se ferrallitise au maximum. C'est à dire que le kaolin se décompose en alumine et silice uniquement dans les horizons supérieurs, soumis à une dessiccation annuelle. L'argilisation se produit aussi et les limons abondants dans les zones d'altération se transforment en argile dans la partie supérieure du profil au-dessus de la stone-line. Ce profil continue à s'accroître par le bas par altération de la roche.

Sous l'horizon humifère forestier se forme:

- Un horizon brun rouge sur une roche basique, car les oxydes de fer très abondants et des hydrates dans la phase précédente sont très stables;
- Un horizon beige à jaunâtre sur roche acide par hydratation est complexité avec la matière organique car le matériau est souvent plus sableux donc plus apte au lessivage de fer. Sur quartzite très pauvre en fer et très perméable, le lessivage ira jusqu'à créer des pseudo-podzols: sable bleu lessivé en humus et en fer. Cependant le lessivage en fer et en argile est souvent faible ou n'a pas lieu: la couche jaune de l'horizon, immédiatement sous-jacent à l'horizon

humifère assez riche en matière organique (exemple: la Goethite) est simplement due une forme différente des oxydes de fer.

Ces horizons dus à la végétation forestière peuvent se former soit sur l'horizon rouge de la phase précédente, soit sur l'horizon blanchâtre qui est une zone de départ décapée par la période érosive du début de cette deuxième phase.

III.4 : 4^{ème} phase

Phase de dégradation due à une désilicification lente et à l'apparition de l'Homme (Quaternaire récent).

L'Homme en coupant et en brûlant la forêt, accélère la dégradation qui tend à devenir irréversible. Celle-ci est sans doute favorisée par un climat plus sec dû à des causes géophysiques. Cela entraîne le développement d'une végétation secondaire «savoka».

Les espèces de la savoka à *Philippia*, fougère ont en général un humus très acide, très riche en acide fulvique qui accentue l'évolution superficielle du sol sous-forêt. Il y a formation d'un horizon jaune (fer et argile lessivés de fer).

L'évolution de la dégradation peut détruire le savoka qui a son tour peut devenir une steppe herbacée. Mais la suppression de la végétation a provoqué une érosion intense d'où une deuxième phase de colluvionnement et de formation de stone-line. Ce sont bien souvent d'ailleurs les premières stone-line reprises par l'érosion, remaniées et réparties à nouveau sur une nouvelle surface d'érosion.

Les collines de cette quatrième phase résultant surtout de «creep» sont très importantes en épaisseur, mais les stones-line qui leur correspondent sont moins nettes sous forme de caillou en général.

Les colluvions recouvrent les alluvions anciennes de la phase 2. Elles paraissent successives sur la même pente tandis que sur les pentes très fortes de véritables coulées boueuses, transportant des blocs de roches se sont produites peut-être au cours de période pluviale du Quaternaire.

Presque partout, cette deuxième phase érosive décape les horizons forestiers et le Savoka pour faire réapparaître en surface les horizons rouges compacts de la phase 2. C'est la prairie qui s'installe sur l'Horizon rouge décapé provoquant une véritable steppisation. Les horizons rouges deviennent brun-rouges sur une certaine profondeur, coloration due à l'humus provenant de la composition des racines. Les zones d'altération voient la formation d'un horizon beige à brunâtre par action de ces mêmes graminées.

L'érosion en LAVAKA commence à cette époque de la 4^{ème} phase. Cependant, cette phase actuelle à saison sèche relativement longue et à végétations herbacées peut aussi provoquer la rubéfaction et la ferrallitisation des horizons blanchâtres d'altération décapés dans la phase 2 ou 4.

En somme, il y a deux phases érosives et deux phases d'évolution superficielle du sol (cercle de Buther). Chaque période de formation des horizons superficiels agit sur un sol plus ou moins décapé par la période d'érosion précédente, contribuant ainsi à la formation d'un sol complexe.

Certains sols des hautes terres malagasy sont déjà en phase 4 (sols de prairies et de Savoka) d'autres sont restés en phase 3 (sols forestiers). Mais les phases 3 et 4 ont pu agir sur les phases 1 et 2. Donc, à Madagascar peut être observé un grand nombre de combinaisons possibles de types de sol (figure 10). SEGALÉN P. en 1994 a évoqué la correspondance entre les appellations des divers sols de Madagascar dans différents systèmes (tableau 7).

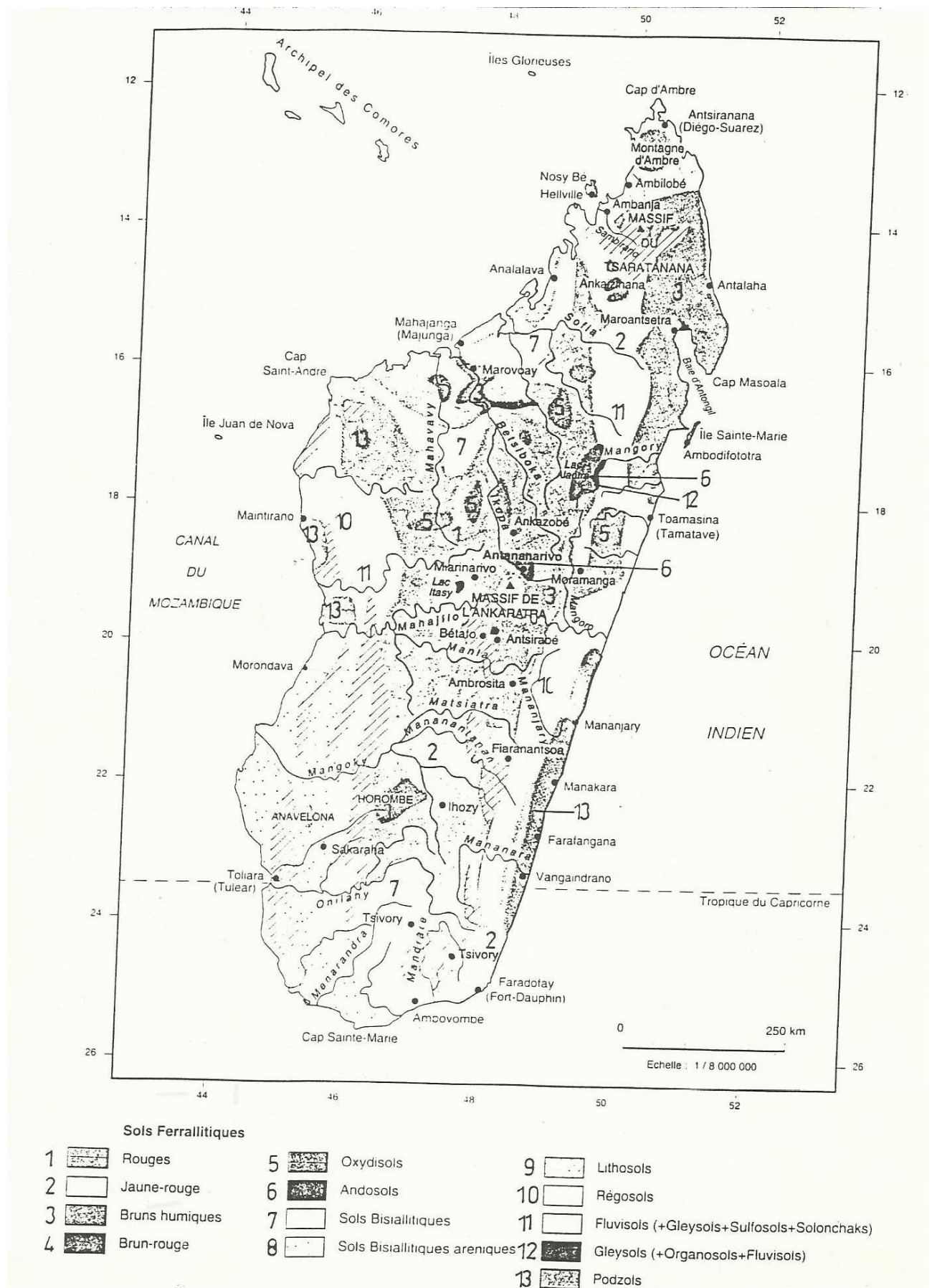


Figure 10 : Les sols de Madagascar (d'après les cartes de pédologues de l'ORSTOM), 1994

Appellations proposées par divers CPCS	Soil Taxonomie	Légende FAO/UNESCO	Appellation proposée
Sol ferralitique, moyennement dessaturé, remanié, jaune SOUBIES, 1974	Typic haplorthox	Ferralsol xanthique	Sol ferralitique, jaune/rouge, remanié-caillouteux, dystrique
Sol ferralitiques, ancien, enrichi en minéraux peu altérables, à horizon pulvérulent BOURGEAT, 1972	Typic haplorthox	Ferralsol orthique	Sol ferralitique, rouge, haplique, oxydique, dystrique
Sol ferralitique, rouge SOURDAT, Isalo, 1977	Typic haplorthox	Ferralsol orthique	Sol ferralitique, rouge, remanié, tacheté, dystrique
Sable roux rouge, ou, sol monosiallitique sur sable d'épandage SOURDAT, S.W., 1977	Oxic quartzipsamment	Arénosol ferralitique	Sol ferralitique, arénique, rouge, dystrique
Sol ferrugineux tropical rouge SEGALEN, 1953-1957	Haplorthox ou Eustrtox	Ferralsol orthique	Sol ferralitique, arénique, rouge, eutrique ou dystrique
Sol ferralitique typique, rouge SEGALEN, 1957	Typic a crorthox	Ferralsol acrique	Oxydisol, ferri-allitique, haplique, dystrique
Sol ferralitique humifère SEGALEN, 1957	Typic haplohumox	Ferralsol humique	Sol ferralitique, brun, humique, dystrique

Tableau 7 : Correspondances entre les appellations des divers sols de Madagascar dans différents systèmes. SEGALEN P. (1994)

CHAPITRE II: METHODES GEOTECHNIQUES ET RESULTATS

I- GEOTECHNIQUE (L.N.T.P.B)

- DEFINITIONS**

La géotechnique recouvre l'ensemble des applications de la géologie de l'Ingénieur, de la mécanique des sols et de la mécanique des roches dans les domaines des bâtiments et des travaux publics.

- ETUDE GEOTECHNIQUE**

Une étude géotechnique se rapporte aux sols et aux eaux souterraines en tant qu'éléments intervenant dans la stabilité et le bon comportement des contraintes provisoires ou définitives. Elle est destinée à fournir aux maîtres d'œuvre les données relatives au comportement des sols et qui lui sont nécessaires pour la conception et la construction des ouvrages et celles relative à leur incidence sur l'environnement.

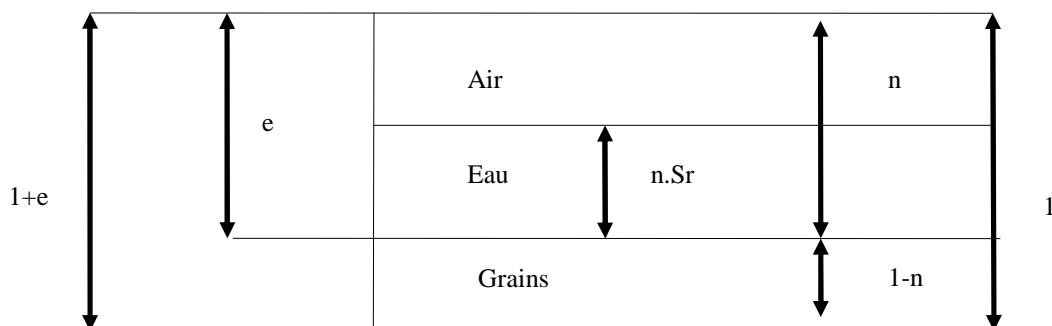
- RECONNAISSANCE DES SOLS**

La reconnaissance des sols est une opération qui a pour objet la mise en œuvre des moyens nécessaires à une connaissance suffisante des divers éléments et formations composant le volume des sols concernés par le projet.

II- LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANQUES DES MILIEUX NATURELS (Rabenatoandro)

II-1 Phase constitutive

Un sol en place est constitué de grains solides baignant dans de l'eau et de l'air. C'est donc dans le cas le plus général un complexe de trois phases: solide, liquide et gaz.



Constituants d'un sol

On peut écrire les deux relations entre porosité n et l'indice des vides e :

$$e = n / (1-n) \quad \text{et} \quad n = e / (1+e)$$

II-2 Notion de cohésion

Dans les études géotechniques, il est d'usage de désigner simplement par le terme «sol» tous les matériaux existant à la surface terrestre qu'il s'agisse de roches ou de matériaux friables comme les sables ou cohérents comme les argiles ou les tourbes.

Les roches en place sont des matériaux plus ou moins stables. Au cours des temps, les moins stables sont subis une altération physico-chimique et ce sont transformés en une masse de petites particules friables qui ont, le plus souvent, une structure en forme de lamelle ou de paille. Les agrégats qui en résultent peuvent rester en place et constituer le sol résiduel ou être transportés par l'eau ou le vent. Les sols résiduels ont, dans une certaine mesure, la stabilité des roches d'origine; alors que les transportés sont meubles et souvent de portance.

Dans la langue géotechnique, on entend par «roches» une formation géologique dure, c'est à dire dont les éléments sont très fortement soudés entre eux, au moins au niveau de l'échantillon isolé (on parle aussi de «pierre», de «rocher», ...), et qui présentent, de ce fait, des caractéristiques mécaniques élevées.

En effet, les sols sont des formations meubles, c'est à dire de la consolidation faible, voire nulle et dont les caractéristiques mécaniques sont, de ce fait, plus faibles, voire médiocres. Sans être pour autant inadéquates pour l'implantation des ouvrages, les sols posent des problèmes de fondation (tassement, rupture), en raison de leurs caractéristiques physiques, mécaniques ou hydrogéologiques, lesquelles résultent soit de leur genèse soit des avatars qu'ils ont subis au cours de leur histoire.

III- CARACTERISATION DES SOLS PAR DES ESSAIS EN LABORATOIRE(L.N.T.P.B)

III-1 Identification

III-1-1 Teneur en eau naturelle $w(\%)$

C'est le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105°C.

$$W = \frac{\text{Poids d'eau}}{\text{poids du sol sec}} \times 100$$

La connaissance de la teneur en eau du sol est très importante car elle permet avec d'autres caractéristiques d'apprécier l'état dans lequel se trouve le sol.

III-1-2 Degré de saturation $S_r (\%)$

C'est le rapport du volume d'eau au volume des vides d'un sol.

$$S_r = V_e / V_v$$

Si $S_r = 1$, le sol est saturé

III-1-3 Poids volumique du sol humide (ou apparent) γ (KN/m³)

C'est le rapport du poids total d'une certaine quantité de sol à son volume.

$$\gamma = P / V$$

III-1-4 Poids volumique du sol sec γ_d (KN/m³)

C'est le rapport du poids de matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume de ce même sol.

$$\gamma_d = P_d / V_d$$

Le poids volumique sec définit l'état dans lequel se trouve le matériau: suivant la valeur de γ_d , un matériau sera très dense, lâche ou très lâche.

III-1-5 Poids des grains du sol γ_s (KN/m³)

C'est le rapport du poids du matériau sec contenu dans une certaine quantité de sol au volume des grains des sols.

$$\gamma_s = P_d / V_s$$

Remarque : γ_s , γ , γ_d et W sont trouvés par essais.

III-1-6 Limite d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau qui déterminent l'état de consistance d'un sol. Pour les obtenir, les essais sont effectués sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,42 mm de diamètre.

III-1-6-1 Limite de liquidité W_L (%)

Elle se situe entre l'état liquide et l'état plastique. Elle se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande.

III-1-6-2 Limite de plasticité W_p (%)

C'est l'état qui se situe entre l'état plastique et l'état solide.

III-1-6-3 Indice de plasticité I_p (%)

C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, il donne l'étendue, en teneur en eau, de la plage de plasticité du sol.

$$I_p = W_L - W_p$$

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol (tableau 8).

INDICE DE PLASTICITE I_p	DEGRE DE PLASTICITE
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Peu plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p < 40$	Très plastique

Tableau 8: Degré de plasticité en fonction de I_p

Remarque : Plus I_p est grand, plus le sol est argileux.

Bien que leur définition soit arbitraire, les limites d'Atterberg ont une importance essentielle en mécanique des sols. Elles permettent en particulier de classer les sols suivant un diagramme de plasticité (figure 17, page 65: classification de laboratoire des sols fins).

III-1-6-4 Indice de consistance I_c

L'indice de consistance I_c (tableau 9) est défini par la relation suivante qui situe le sol à l'intérieur de la plage de plasticité.

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$$

Il permet d'apprécier la consistance des sols plastiques:

I_c	< 0	0 à 0,25	0,25 à 0,50	0,50 à 0,75	0,75 à 1	1
Consistance	Liquide	Très molle ou pâteuse	Molle ou maigre	Ferme	Très ferme ou mi-dense	Dure ou solide

Tableau 9: Consistance en fonction de I_c

III-1-7 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau.

Elle se traduit du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés. Elle est notamment utilisée pour la classification des sols grenus, qui nécessite le calcul de deux coefficients de forme.

III-1-7-1 Le coefficient d'uniformité:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- Si $C_u < 2$ le sol étudié a une granulométrie aérée.
- Si $C_u > 2$ le sol a une granulométrie étalée.

III-1-7-2 Le coefficient de courbure:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

On désigne par D_n la dimension à laquelle sont inférieurs à n% des grains, en poids.

III-1-7-3 Dimensions des grains:

Selon ces dimensions:

- Enrochement	$d > 200 \text{ mm}$
- Caillou	$20 < d < 200 \text{ mm}$
- Gravier	$2 < d < 20 \text{ mm}$
- Sable grossier	$0,2 < d < 2 \text{ mm}$
- Sable fin	$20 \mu < d < 0,2 \text{ mm}$
- Limon	$2 \mu < d < 20 \mu$
- Argile	$0,2 \mu < d < 2 \mu$
- Ultra-argile ou colloïde	$d < 0,2 \mu$

d est la dimension des grains.

III-1-8 Equivalent de sable (Tableau 10)

L'essai d'équivalent de sable permet de déterminer le degré de pollution d'un sable.

L'équivalent de sable est:

$$\text{Piston: } E_s = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

$$\text{Visuel: } E_s = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$$

On a toujours $E_{sp} < E_{sv}$

Avec h_1 : hauteur du niveau supérieur du floculat par rapport à la base (mm)
 h'_2 : hauteur de la partie sédimentée sans usage du piston par rapport à la base (mm)
 h_2 : hauteur de la partie sédimentée avec usage du piston par rapport à la base (mm)

TYPES DE MATERIAUX	<i>Es</i>	
Sable pur	100	Trop pulvérulent, difficile à compacter
Sable propre pour béton	> 80	
Sable propre pour béton	> 35 à 40	Facile à compacter
Sable pour couche de fondation	> 30 à 35	
Sable argileux	< 35	Sol trop cohérent, difficile à compacter
Argile	0	

Tableau 10: Valeurs courantes de l'équivalent de sable

III-2 Paramètres d'état

III-2-1 Etude PROCTOR – CBR (Californian Bearing Ration)

Elle a pour but d'étudier les relations expérimentales existant, dans le cas des sols sensibles à l'eau, entre les paramètres suivants:

- La teneur en eau,
- La densité sèche,
- La résistance au poinçonnement,
- L'énergie de compactage.

Connaissant ces relations, il est donc possible de préjuger de l'aptitude du sol à se compacter et peut être appréhendée par l'étude Proctor seule. En particulier, c'est à partir de cette étude que sont déterminées les caractéristiques «Proctor» (**densité maximale sèche et teneur en eau optimale**). Ces valeurs peuvent notamment servir de référence pour caractériser la qualité de compactage réalisé sur chantier. Mais d'une manière générale, on peut dire que les caractéristiques Proctor constituent avant tout, des critères d'identification d'un sol permettant de situer son état naturel par rapport à son état optimal de mise en œuvre.

III-2-2 Présentation des résultats (Figure 11)

En règle générale, les résultats de l'étude Proctor - CBR sont reportés sur deux graphes disposés en correspondance. Le premier est un graphe γ -W (%) sur lequel sont portés les cinq points expérimentaux de l'étude Proctor, ainsi que les courbes correspondant aux degrés de saturation: 100%; 90%; 80%. Les points expérimentaux déterminent la courbe Proctor du matériau à partir de laquelle on extrait les valeurs de la densité sèche maximale Proctor maximal W (%) OPN.

Le second est un graphe ICBR – W (%) sur lesquelles sont reportés les points expérimentaux de l'étude CBR qui déterminent les courbes de variation de l'indice portant CBR (ICBR) immédiat ou après immersion du matériau. En particulier, la courbe de l'ICBR immédiat caractérise directement la sensibilité à l'eau du sol considéré (figure 12).

Sur ces deux graphes, il est intéressant de faire apparaître également la plage des teneurs en eau du sol susceptibles d'être trouvées à l'exécution.

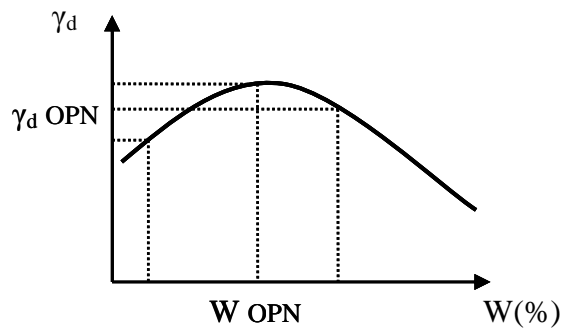


Figure 11: Courbe de compactage

On peut distinguer 2 types d'essai Proctor:

- **L'essai Proctor normal:** il est appliqué pour les travaux de remblai des routes à faible trafic et pour les constructions des digues. Ces caractéristiques sont de 3,5kg de masse en hauteur et de 30cm de hauteur de chute.
- **L'essai Proctor modifié:** Cet essai est recommandé pour la construction des routes à trafic élevé ou aéroport.

Ces caractéristiques sont de 4,5kg de masse et de 40cm de hauteur de chute.

Pour l'Essai CBR (Californian Bearing Ratio), on peut classer suivant les valeurs trouvées les caractéristiques des sols pour la construction:

Si $CBR = 100$; C'est le sol de tout venant de concassage (TVC)

Si $CBR \geq 80$; C'est la couche de base

Si $CBR \geq 30$; on a la couche de fondation

Si $CBR \geq 20$; sol utilisable comme la couche de plate forme de terrassement

Un sol ayant un $CBR < 10$ est un sol non recommandable pour une construction.

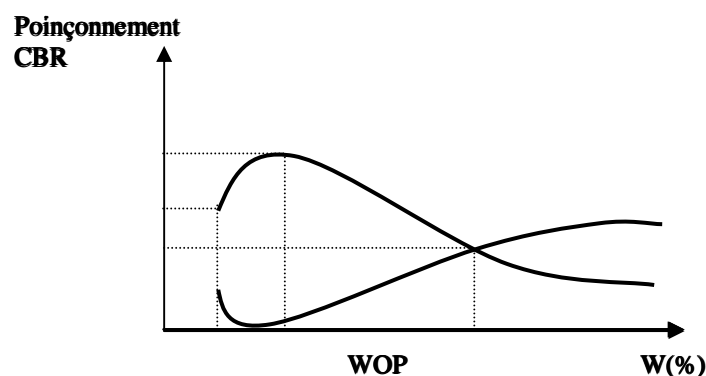


Figure 12: Résultats de l'étude Proctor-CBR

III-2-3 Essais mécaniques

Le but est en général de déterminer la cohésion C et l'angle de frottement interne φ des sols, en vue d'en déduire les sollicitations maximales auxquelles ces derniers peuvent être soumis.

La résistance des sols mesurée expérimentalement et les théories de rupture permettent d'étudier la stabilité des fondations superficielles ou profondes, des ouvrages de soutènement, des remblais, des talus naturels ou des déblais, des barrages en terre,...

Il existe plusieurs essais, plus ou moins complexes, pour déterminer la résistance au cisaillement des sols: compression simple, cisaillement à la boîte, compression triaxiale,...

- Essais de cisaillement non consolidés non drainés UU (Unconsolidated Undrained): Essais pendant lesquels aucun drainage de l'eau n'est possible durant les deux phases. La première constitue alors ce que l'on pourrait appeler «la remise sous contrainte»;
- Essais de cisaillement consolidés non drainés CU (Consolidated Undrained): Essais dans lesquels il n'y a drainage que pendant la première phase: l'application des contraintes normales destinées à assurer la consolidation primaire totale de l'échantillon. Aucun drainage ne se produit pendant la phase de cisaillement;
- Essais de cisaillement consolidés drainés CD (Consolidated Drained): Essais dans lesquels il y a drainage, aussi bien pendant l'application de la contrainte normale que pendant l'application de la contrainte de cisaillement. La pression interstitielle doit être toujours nulle du cisaillement.

Il est à noter que lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement qui entraînent des déformations du sol. Celles-ci peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle surfaces de glissement ou surfaces de rupture.

Dans certains cas particuliers (étude de la stabilité des pentes instables, notamment), on utilise, aussi la résistance du sol après de grandes déformations, appelée résistance résiduelle.

III-2-3-1 Essai de cisaillement à la boîte (figures 13 et 14)

Cet essai permet de déterminer la cohésion C et l'angle de frottement φ du sol.

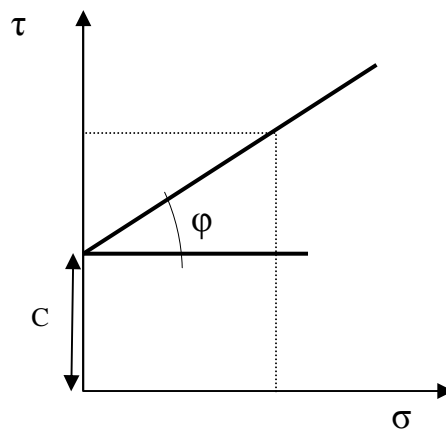


Figure 13: Détermination de la cohésion C et l'angle de frottement φ

Pour les sols cohérents, les valeurs de C et de φ obtenues dépendent essentiellement de la vitesse de l'essai de la perméabilité du sol, car l'un des paramètres est la pression interstitielle de l'eau qui, commandant la résistance de cisaillement du sol, est elle-même directement liée aux conditions de drainage de l'eau.

III-2-3-2 Essai triaxial

L'essai triaxial, comme l'essai de cisaillement à la boîte permet de déterminer la résistance au cisaillement du sol.

Trois types d'essais sont effectués à l'appareil triaxial:

- Essai non consolidé non drainé (UU): cet essai correspond au comportement à court terme du sol. La résistance au cisaillement du sol est généralement constante ($\phi=0$). Elle est appelée «cohésion non drainée» et notée C_u . Elle traduit la résistance au sol dans son état actuel et permet de déterminer la capacité portante immédiate d'une fondation, d'étudier la stabilité immédiate d'un talus, d'un mur de soutènement,...
- Essai consolidé non drainé (CU): L'essai permet d'étudier la variation de la résistance au cisaillement non drainé du sol, en fonction de la pression de consolidation, à partir des caractéristiques C_u et ϕ_u . En outre, en mesurant la pression interstitielle, on détermine en cours de cisaillement les caractéristiques intergranulaires ou effectives C' et ϕ' des sols saturés, sans avoir recours à l'essai CD ci-après, toujours très long lorsque le sol est peu perméable.
- Essai consolidé drainé (CD): L'essai donne les caractéristiques intergranulaires du sol. Les paramètres C' et ϕ' permettent d'effectuer des études à long terme (talus, mur de soutènement, barrage en terre,...)

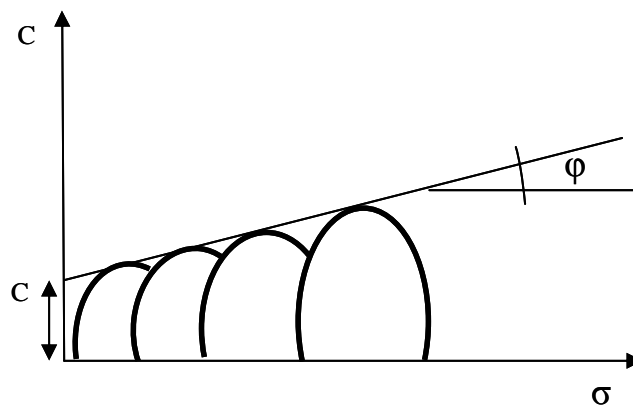


Figure 14: Détermination de C et ϕ à l'aide des cercles de Mohr

III-2-3-3 Essai de compression simple

Cet essai permet de mesurer la résistance à la rupture en compression simple R_c du sol. C'est une forme particulière de l'essai triaxial non consolidé non drainé UU.

La relation $R_c = 4P / \pi D_2$ donne, en fonction de la charge appliquée à la rupture, la valeur de la résistance à la compression simple R_c . La cohésion non drainée des argiles saturées s'en déduit immédiatement, ϕ étant nul. $C_u = R_c / 2$

III-2-4 Essai de compressibilité

Pour évaluer les tassements d'un sol sous le poids d'une charge (fondation, remblais,...), il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques du sol qui sont déterminées à l'aide de l'essai de compressibilité à l'odomètre. Les sols sont soumis à des charges verticales uniformes.

Pour chaque charge, l'indice des vides e en fin de consolidation est calculé.

$$e = \frac{\text{Volume des vides } V_v}{\text{Volume des grains solides } V_s}$$

Et on trace la courbe $(e-\text{Log}\sigma')$ appelée odométrique. De cette courbe (figure 15), on déduit les valeurs de:

- l'indice de gonflement C_g et l'indice de compression C_c du sol, qui sont les pentes des parties AB et BC de la courbe;
- la pression de préconsolidation σ'_c qui est donnée par une construction géométrique et qui correspond à la plus grande pression verticale supportée par le sol en place au cours de son «histoire».
- Par ailleurs, on mesure l'indice des vides initial e_0 .
- La connaissance des 4 grandeurs C_g , C_c , σ'_c et e_0 permet de calculer le tassement ΔH à long terme (ou drainé) d'une couche d'épaisseur H sous une charge déterminée $\Delta\sigma$:

$$\Delta H = H \frac{C_g}{1 + l_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \quad \text{si } \sigma'_0 + \Delta\sigma < \sigma'_c$$

$$\Delta H = H \frac{C_g}{1 + l_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + H \frac{C_c}{1 + l_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \quad \text{si } \sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_c$$

σ'_0 = contrainte initiale

De plus, on trace pour chaque valeur de la charge les courbes donnant la déformation verticale en fonction de la racine carrée du temps. De ces courbes, on déduit le coefficient de consolidation C_v du sol, qui servira à déterminer l'évolution des tassements en fonction du temps.

L'essai de fluage, dans lequel les charges sont appliquées par paliers de 7 jours, permet d'évaluer la vitesse de tassement secondaire du sol (après dissipation des surpressions interstitielles).

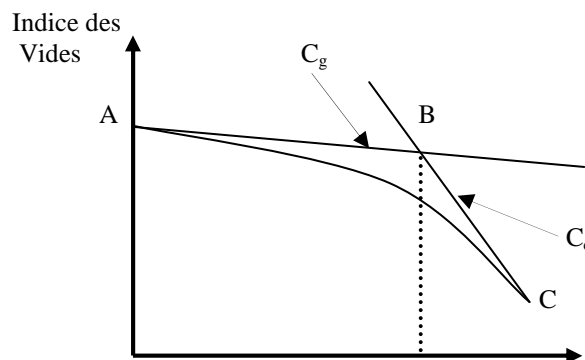


Figure 15: Courbe odométrique, détermination des indices de gonflement C_g et de compression C_c et de la pression de préconsolidation σ'_c .

IV- CLASSIFICATION GEOTHECHNIQUE DES SOLS

IV-1 Classification triangulaire

Elle utilise uniquement le résultat de l'analyse granulométrique. On a un triangle équilatéral dont les côtés orientés dans le sens trigonométrique forment les coordonnées en % (figure 16).

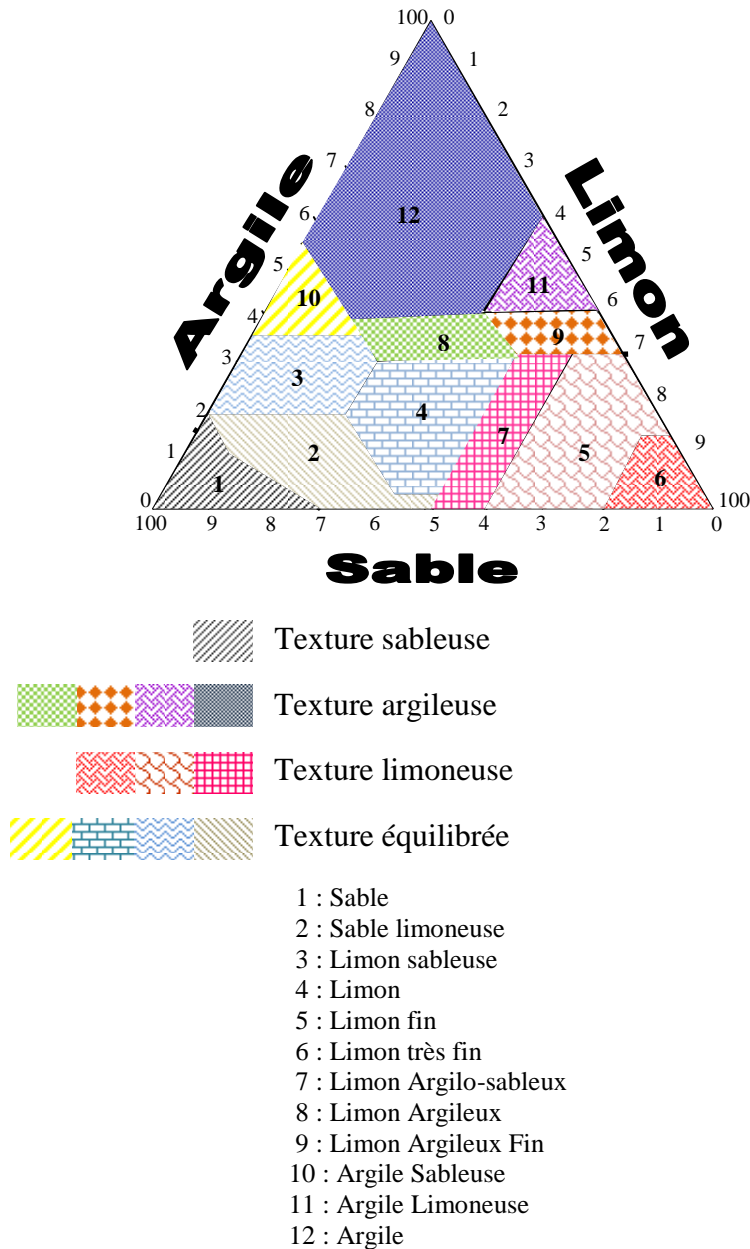


Figure 16: Classification triangulaire, PRA (Public Road Administread)

IV-2 Classification L.P.C. (figure 17 et tableau 11)

Cette classification retient 15 types fondamentaux de sol tenant compte de certaines propriétés géotechniques. Elle est assez sommaire et exige une description complémentaire pour faire ressortir certaines particularités et permettre de différencier un sol parmi d'autres dans un groupe désigné par un même nom et même symbole.

Donc, pour la classification du sol, on se reportera au graphe et au tableau ci-après:

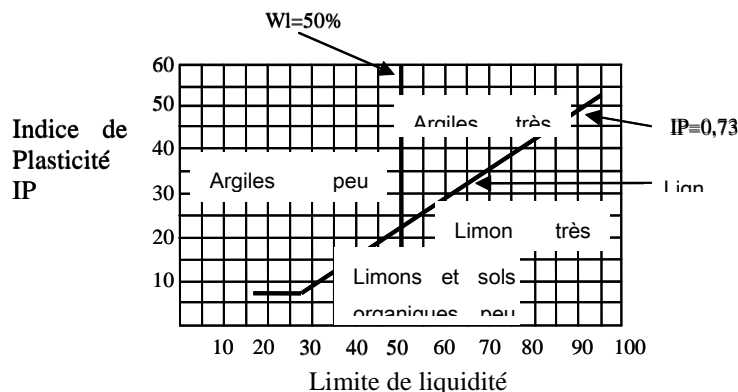


Figure 17: Classification de laboratoire des sols fins. Diagramme de plasticité (LPTPB)

CLASSIFICATION DES SOLS GREUS (plus de 50% des éléments > 0,08mm)					
Définitions			Symboles	Conditions	Appellations
GRAVES	Plus de 50% des éléments > 0,08mm ont un diamètre de > 2mm	Moins de 5% d'éléments < 0,08mm	Gb	$C_x = \frac{D_{60}}{D_{10}} - 1 > 4$ $(D_{30})^2$ Et $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Compris entre 1 et 3	Grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée
		Plus de 0,20% des éléments < 0,08mm	GL	Limite d'Atterberg au-dessous de A	Grave limoneuse
			GA	Limite d'Atterberg au-dessus de A	Grave argileuse
SABLES	Plus de 50% des éléments > 0,08mm ont un diamètre de < 2mm	Moins de 5% des éléments < 0,08mm	Sb	$C_x = \frac{D_{60}}{D_{10}} - 1 > 6$ $(D_{30})^2$ Et $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Compris entre 1 et 3	Sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
		Plus de 12% des éléments < 0,08mm	SL	Limite d'Atterberg au-dessous de A	Sable limoneux
			SA	Limite d'Atterberg au-dessus de A	Sable argileux

Lorsque $5\% < \% \text{ inférieur à } 0,008\text{mm} < 12\% \rightarrow$ on utilise un double symbole

Tableau 11: Classification L.P.C.

IV-3 Classification H.R.B. (High Way Research Board) (tableau 12 et figure 18)

Une classification basée à la fois sur la granulométrie et la plasticité pourrait paraître, a priori, plus intéressante. En fait, de telles classifications, si elles ont pris une grande importance dans la technique routière, semblent qu'une portée limitée dans les autres domaines de la mécanique des sols.

La classification H.B.R. utilise une analyse granulométrique simplifiée (tamis de 2mm; 0,42mm et 80µm) ainsi que la limite de liquidité et l'indice de plasticité. Le tamisage au tamis de

80µm permet de distinguer les sols fins (Catégories A4 à A7), des sols grenus (Catégories A1, A2, A3) suivant que le tamisage est supérieur ou inférieur à 35%.

Pour les sols fins, la valeur de l'indice de plasticité permet de distinguer les sols limoneux ($I_p < 11$, groupes A6 et A7). La valeur de la limite de liquidité permet de séparer le groupe A4 du groupe A5 et le groupe A6 du groupe A6 du groupe A7.

Dans les sols grenus, on distingue le groupe A1 (Cailloux, gravier et sable) et A3 (sable fin), qui sont dépourvus de plasticité, ou presque du groupe A2 qui comprend des mélanges de graviers et de sables limoneux ou argileux. Le groupe A2 est d'ailleurs divisé en quatre sous-groupes (de A2-4 à A2-7) suivant les mêmes critères que les sols fins.

Pour chaque sol identifié, on indiquera, après son symbole de groupe, son indice de groupe entre parenthèses. Par exemple: A2-6(3) ou A7-5(17).

L'indice de groupe (I_g) est obtenu à partir de l'abaque (figure 18) avec $g =$ valeur de(A) + valeur de(B).

L' I_g est une classification récente pour les constructions des routes et digues.

Classification générale	Sols grenus (35% au maximum passant au tamis de 80µ)							Sols fins (plus de 35% passant au tamis de 80µ)				
Groupe ou sous-groupe de classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Analyse granulométrique % passant au tamis : 2mm..... 0,50mm..... 80µ.....	Max,50 Max,30 Max,15	Max,50 Max,25	Max,50 Max,10	Max,35	Max,35	Max,35	Max,35	Min,35	Min,35	Min,35	Min,35	Min,35
Caractéristique du mortier : (fraction passant au tamis de 0,50mm) Limite de liquidité..... Indice de plasticité.....	Max, 6	Max, 6		Max,40 Max,10	Min,40 Max,10	Max,40 Min,10	Min,40 Min,10	Max,40 Max,10	Max,40 Max,10	Max,40 Min,10	Min,40 Min,10 I _p <W _L -30	Min,40 Min,10 I _p >W _L -30
Indice de groupe (I _g)....	0	0	0	0	0	Max. 4	Max. 4	Max. 8	Max.12	Max.16	Max.20	Max.20
Type de matériaux habituels significatif	Pierres, graviers et sable		Sable fin	Graviers et sables limoneux ou argileux				Sols limoneux		Sols Argileux		
Estimation générale comme sous-sol de chaussée.....	Excellent à bon						Passable à mauvais					
Nota : Pour chaque sol identifié, on indiquera, après son symbole de groupe, son indice de groupe entre parenthèses. Par exemple : A-2-6(3) ou A-7-5(17).												

Tableau 12: Classification américaine des sols (Highway Research Board) transposée en unités et tamis français.

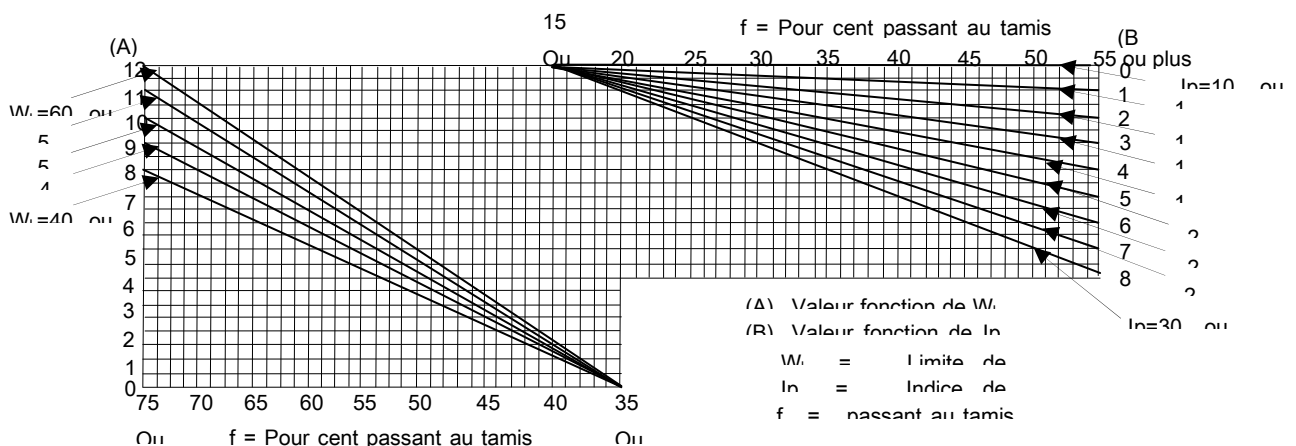


Figure 18: Abaque de détermination de l'indice de groupe (I_g)

Ig = valeur de (A) + valeur de (B)

IV-4 Classification G.T.R. (Guide de Tassement Routier) (tableau 13)

Dans cette classification, les sols fins se classifient en utilisant quelques paramètres comme l'indique le tableau suivant:

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature. Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature. Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe
D _{max} ≤ 50mm et tamisât 80µm > 35%	A sols fins	VBS ≤ 205 ou IP ≤ 12	A1 Limon peu plastiques, loess, silts, alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques, ...	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur W ₀ est proche de w _{opn} . Le temps de réactions aux variations hydriques et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols peu plastiques il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'IP.	IP ≤ 3 ou W ₀ ≥ 1,25 W _{opn} 3 < IP ≤ 8 ou 1.10 W _{opn} ≤ W ₀ < 1.25 W _{opn} 8 < IP ≤ 25 ou 0.9 W _{opn} ≤ W ₀ < 1.10 W _{opn} 0.7 W _{opn} ≤ W ₀ < 0.9 W _{opn} W ₀ < 0.7 W _{opn}	A1th A1h A1m A1s A1ts
		12 < IP ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A2 Sables fins argileux, limons argiles et marnes peu plastiques, arènes	Le caractère moyen des sols de cette sous-classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur n'est pas trop élevée). Dès que l'IP atteint des valeurs supérieures ou égales à 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	IP ≤ 2 ou IC ≤ 0.9 ou W ₀ ≥ 1.3 W _{opn} 2 ≤ IP ≤ 5 ou 0.9 < IC ≤ 1.05 ou 1.1 W _{opn} ≤ W ₀ < 1.3 W _{opn} 5 < IP ≤ 15 ou 1.05 < IC ≤ 1.2 ou 0.9 W _{opn} ≤ W ₀ < 1.1 W _{opn} 1.2 < IC ≤ 1.4 ou 0.7 W _{opn} ≤ W ₀ < 0.9 W _{opn} IC > 1.4 ou W ₀ < 0.7 W _{opn}	A2th A2h A2m A2s A2ts
		25 < ou ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A3 Argiles et argiles marneuses, limon très plastiques ...	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible et collants ou glissants à l'état humide, d'où de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leur variation de teneur en eau très lentes en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	IP ≤ 1 ou IC ≤ 0.8 ou W ₀ ≥ 1.4 W _{opn} 1 < IP ≤ 3 ou 0.8 < IC ≤ 1 ou 1.2 W _{opn} ≤ W ₀ < 1.4 W _{opn} 3 < IP ≤ 10 ou 1 < IC ≤ 1.15 ou 0.9 W _{opn} ≤ W ₀ < 1.2 W _{opn} 1.15 < IC ≤ 1.3 ou 0.7 W _{opn} ≤ W ₀ < 0.9 W _{opn} IC > 1.3 ou W ₀ < 0.7 W _{opn}	A3th A3h A3m A3s A3ts
		IP > 40 ou VBS > 8	A4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques, ...	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.	A4th A4h A4m A4s

Tableau 13: Classification G.T.R. (Guide de Tassement Routier)

CHAPITRE III : METHODE D'ANALYSES CHIMIQUES

I. OBTENTION ET ETABLISSEMENT DES COURBES GRANULOMETRIQUES :

Le but de cet établissement des courbes granulométriques est de pouvoir identifier à l'œil nu ou au microscope les éléments grossiers et de les mettre en pourcentage.

Les échantillons des sols étudiés sont soumis au tamisage à Ø 2mm puis séchés à l'étuve. Il faut détruire les humâtes et la matière organique par l'eau oxygénée (H_2O_2) pour qu'on puisse obtenir les éléments essentiels existant. Après la destruction des matières organiques, on passe à l'élimination des chlorures (essai à $AgNO_3$ 1/10). Après l'agitation mécanique de l'échantillon, le tamisage de la suspension sur tamis AFNOR de maille 35µm est mentionné. On obtient alors des résidus de 35µm et des suspensions moins de 35µm. D'après un séchage à l'étuve et un autre tamisage, on peut finalement élaborer des courbes granulométriques.

La figure 19 nous montre l'hierarchisation des analyses granulométriques cumulatives.

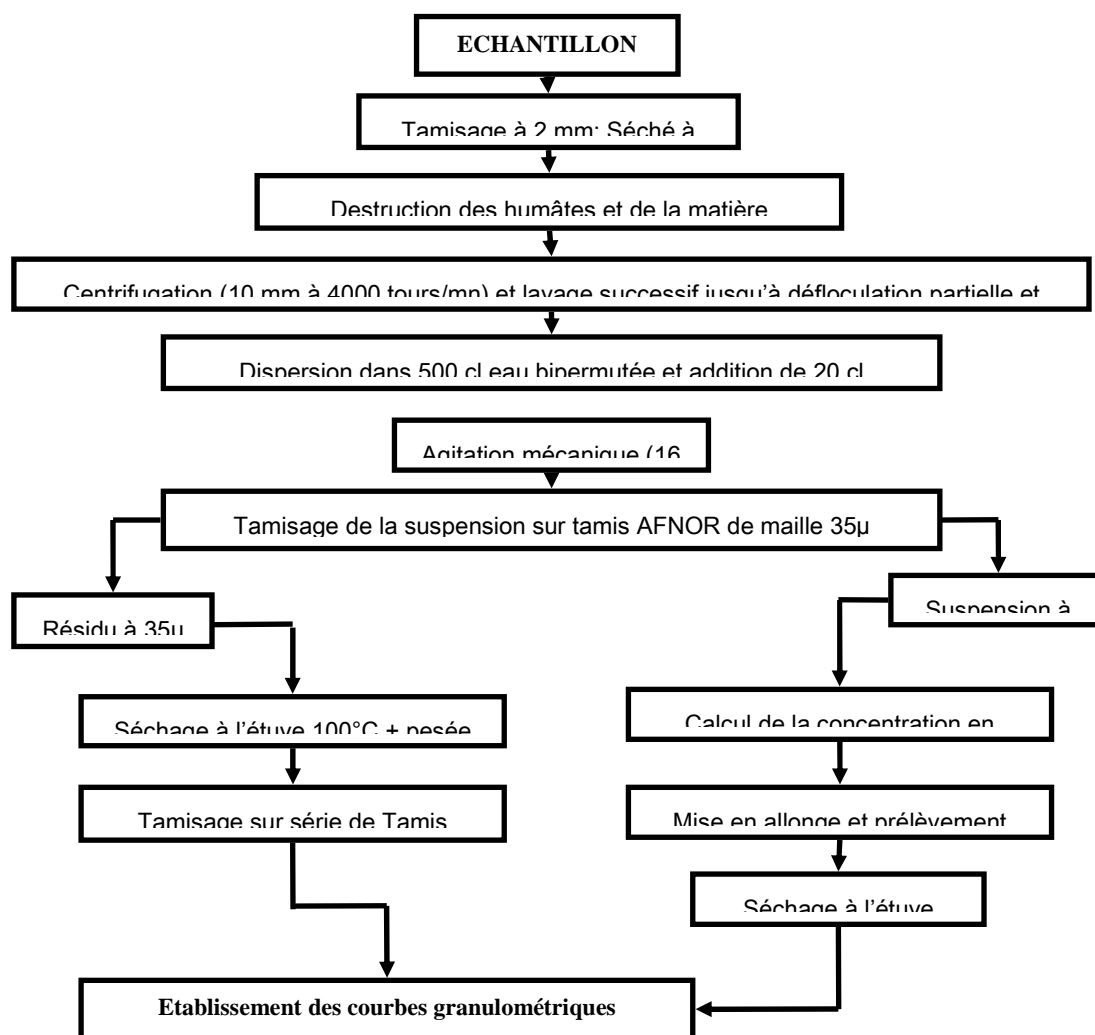


Figure 19: Organigramme du fractionnement par décantations successives
(Laboratoire des Mines)

II. METHODE DE DETERMINATIONS CHIMIQUES DES SOLS

Le but de cette détermination chimique est de connaître les pourcentages des éléments majeurs et des éléments à l'état de trace dans un échantillon de sol donné.

Les figures suivantes (20 et 21) montrent les organigrammes des déterminations chimiques.

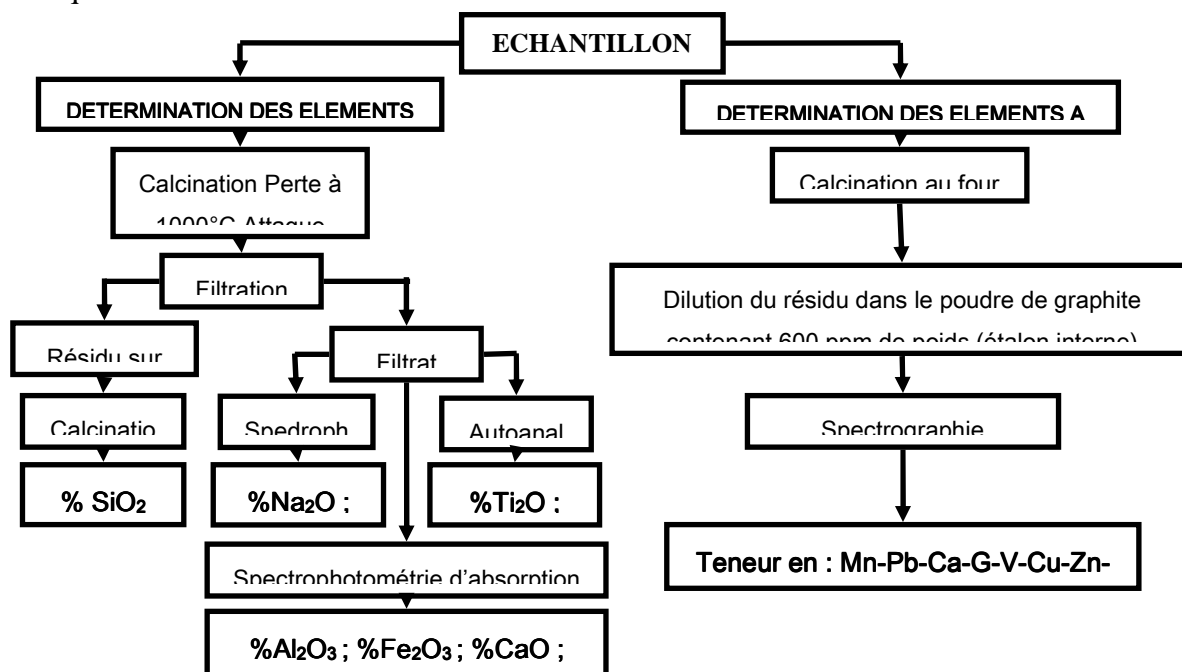


Figure 20: Organigramme général des déterminations chimiques (Laboratoire des Mines)

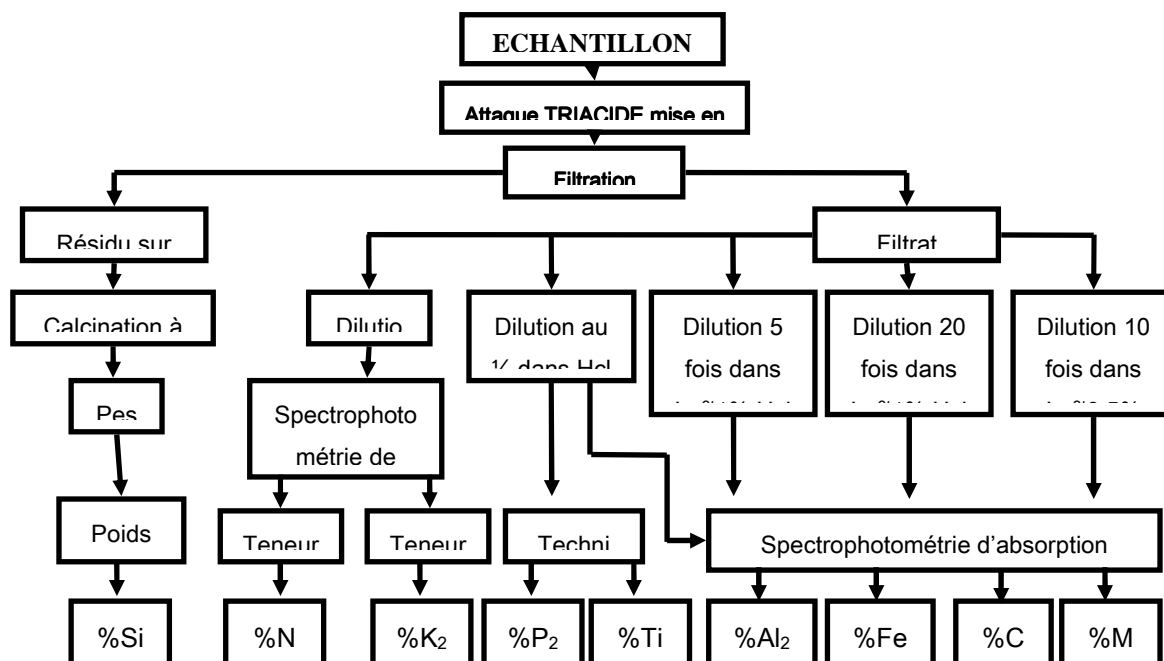


Figure 21: Organigramme des déterminations chimiques en fractions fines (Laboratoire des Mines)

III. CLASSIFICATION CHIMIQUE SUIVANT LE POURCENTAGE DES ELEMENTS MAJEURS

La formation des sols latéritiques se traduit par un lessivage de tous les cations basiques (Na, K, Ca, Mg, Sr, Zn), par une élimination partielle du silicium (Si) et par une accumulation des éléments peu mobiles (généralement Al, Fe, V, Cr, Zn, et parfois Un, Ba et Co).

La valeur du rapport Ki (Silice/Alumine) permet de classer et de comparer les sols ferrallitiques aux différents sols comme l'andosol, le bisialsol et l'oxydisol.

Le rapport Ki est légèrement supérieur à 2,2 pour les andosols, oxydisols et les sols bisiallitiques. Par contre, il est inférieur à 2,2 pour les sols ferrallitiques.

IV. METHODE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS

Nous avons choisi les sols de couleur rouge (avec ses nuances) sur une altitude de 1300m à 1450m, sur des roches typiques aux alentours de la capitale (Gneiss, Migmatite, Granite, Charnockite, Basalte). Nous avons fait deux types de prélèvements dans l'horizon B (intacte et remanié). (Carte géologique d'Antananarivo à 1/200 000, annexe IV)

Nous avons fait d'abord une tranchée de 1m². Après avoir noté le type de végétations et leurs constituants, on enlève l'horizon humifère.

A la préférence, nous avons fait l'échantillonnage sur des talus pour que les horizons soient visibles, bien visibles et qu'on puisse enlever facilement le tuyau métallique après enfoncement.

IV-1 Matériels utilisés

- . 7 sacs plastiques de 50kg,
- . Une bêche,
- . Une pelle,
- . 7 morceaux de tubes métalliques de 50cm de long, 9cm de diamètre et 3,5mm d'épaisseur,
- . Masse de 2kg,
- . Sachets plastiques et cordes
- . Bois carré de 30cm, de face 5x5cm,
- . Carnets de notes et crayon,
- . G.P.S et appareil photographique,
- . Cartons, stylo feutre et scotch
- . Moyen de transport: automobile et bicyclette.

IV-2 PRELEVEMENT PROPREMENT DIT

IV-2-1 Echantillon intact pour les essais in-situ

On enfonce le tube métallique par la masse. On intercale par le bois carré pour éviter la déformation de la section du tube. Lors de l'enfoncement, une colonne cylindrique va remplir le tube. Après le remplissage, on enlève délicatement le tube, on recouvre les deux

bouts par des sachets plastiques pour que l'échantillon ne bouge pas et conserve sa présente humidité.

On déplace l'échantillon avec précaution.

IV-2-2 Echantillon remanié

On effectue le prélèvement dans le même horizon ou on fait l'échantillonnage intact. On enlève la terre par une bêche, et on la met dans le sac: 60kg d'échantillon pour l'analyse Proctor-CBR, 2kg pour l'analyse chimique. On les ferme bien et on écrit le numéro et le lieu sur un carton collé contre le sac.

REMARQUE:

Nous avons fait les échantillonnages du 29 Avril au 3 Mai 2000. C'est donc de la saison sèche dont la pluviométrie n'accède à peine les 20mm, et la température moyenne de 16°C.

Le climat des hautes terres est caractérisé par une saison sèche bien marquée. On peut qualifier comme le climat du type humide mésothermique (pluviosité dépassant les 1200mm, température moyenne annuelle 18°C).

La pseudosteppe couvre la partie centrale de Madagascar. Elle est composée essentiellement de graminées comme l'Aristida, l'Hypparhenia rufa (ou «Vero» en Malagasy) et de fougères (Ptéris) surtout sur les affleurements rocheux. La forêt ombrophile domine la partie Est de la région.

La topographie de la région est dissymétrique et souvent accidentée.

En général, les précipitations et l'évaporation annuelle de la région d'Antananarivo sont représentées sur la figure 22 ci-dessous (Colloque international de l'ORSTOM EN 1970).

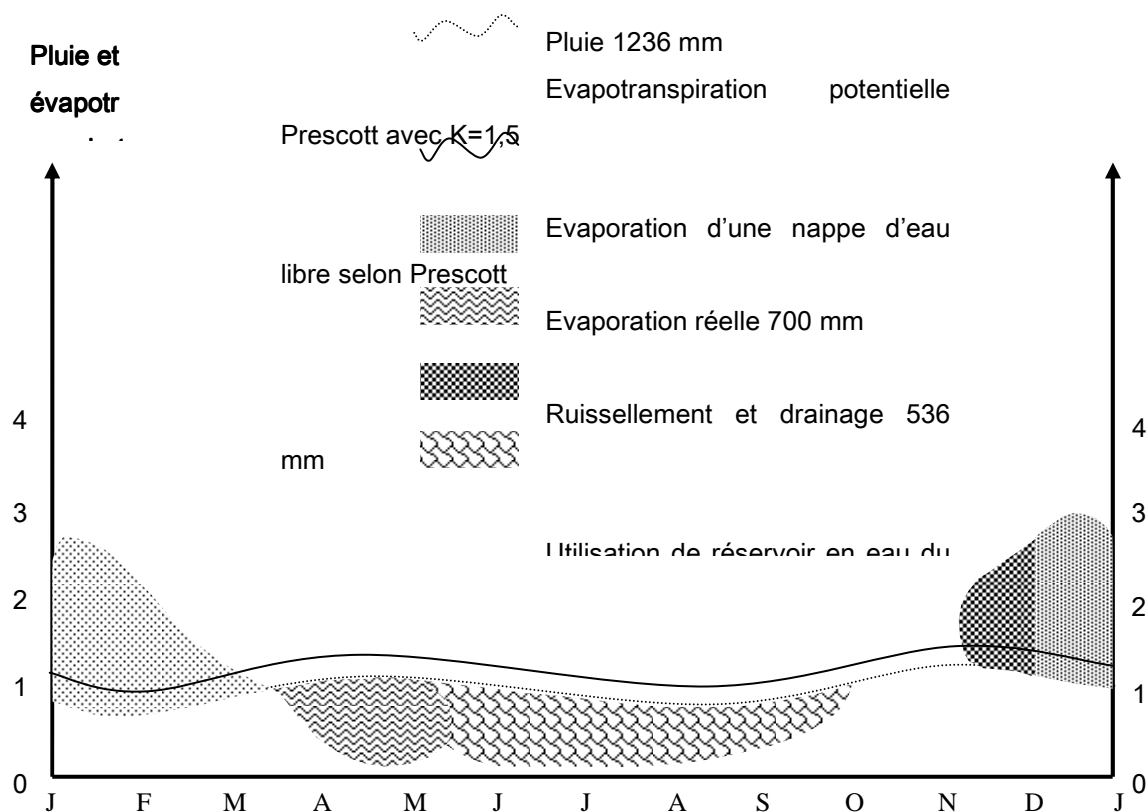


Figure 22: Précipitations et évapotranspirations de la région d'Antananarivo. Colloque, 1970

CHAPITRE IV: PRESENTATION DES ECHANTILLONS TYPQUES DE LA REGION D'ANTANANARIVO ET INTERPRETATION DES RESULTATS

I. ECHANTILLON N° 1 D'IKIANJA

I-1 Localisation

Ikianja se situe au Sud de la carrière d'Ambohimahitsy. Le site d'échantillonnage se trouve dans le versant Ouest et à gauche de la route nationale N°2 au PK7. Les coordonnées localisées par le GPS sont:

X = 19°59'16S
Y = 047°00'00^E
Altitude Z = 1400 m

I-2 Roche-MERE

Les roches originelles sont appelées migmatites granitoïdes et granites. Ces roches sont classées dans le système du Graphite. Les migmatites granitoïdes sont des roches le plus souvent leucocrates, les ferromagnésiens migmatitiques d'Ambohimahintsy sont des roches encore plus leucocrates. Elles montrent au microscope des; Quartz, Microcline, Oligoclase, Biotite, Hornblende verte, Grenat, Apatite, et Zircon. Nous n'avons vu que quelques Charnockites au sud de la carrière d'Ambohimahintsy (Cliché N°1 et N°2).

I-3 Topographie

La colline est peu accidentée dans le versant Sud à pente faible.

I-4 Végétations

Ces végétations sont des Savanes arborées : Eucalyptus et graminées.

I-5 Drainage et profondeur de prélèvement

Le drainage est bon. Nous avons à partir de 0,5m à 1m au dessous de la surface.

I-6 Horizon

L'horizon de prélèvement est dans B limoneux avec une cohésion forte de couleur rose à rouge brun (cf: cliché N°2). L'épaisseur de l'altération va jusqu'à 10m.

I-7 Interprétations des résultats

I-7-1 Appellation

Cet échantillon peut être appelé «sol ferralitique rouge brun» selon SEGALIN P. (1994) et les critères d'identification dans le tableau N°1. Le rapport Ki est de l'ordre de 1,5 à 2,2 (Ki<2,2).

L'évacuation de la silice est majeure. L'horizon A est moyennement humifère.

I-7-2 Caractéristique Géotechnique (Tableaux N°17 et 18)

- Nature apparente: limon argilo- sableux rouge
- Classification: HRB: A₇₋₃
LPC: L_t

On peut utiliser ce sol pour la construction des remblais ordinaires et des couches de base. Les caractéristiques WL=60, ICBR>10, γ_{DOPN} >16,5 et CBR>30 correspondent bien à la qualité sollicitée (cf: **Annexe: Matériaux pour remblais et couche de base**).

II. ECHANTILLON N°2 D'AMBANITSENA

II-1 Localisation

Le lieu de prélèvement se situe au PK 25 sur RN2 à l'Est du village d'Ambanitsena, sur le dôme granitique de Carion.

Les coordonnées sont :

X= 18°52'49S

Y= 047°52'32^E

Altitude Z= 1450m

II-2 Roche-MERE

Nous avons été sur le Granite porphyroïde de Carion. C'est une roche éruptive, datée de 680 à 700MA. Nous avons prélevé des échantillons à la périphérie du massif caractérisée par des grains fins plus ou moins foliés par rapport au centre (à gros cristaux).

Une altération gibbsitique ou les constituants de la roche, voire la Kaolinite, sont transformés en Gibbsite. Cette forme d'altération se remarque surtout sur le granite calco-alcalin à gros grains de Carion. On note dans la zone d'altération la présence de masses poreuses en «pain d'épice» présentant une structure cloisonnée (lamelle d'hydrargilite).

II-3 Topographie

Le versant Ouest est à pente forte (30 à 35°). L'érosion est en terrassettes. Au sommet de la colline, on trouve des dalles en voie de dénudation.

II-4 Végétations

Les végétations sont formées par des savanes arbustives: Acacia, Eucalyptus et graminées (Cliché N° 3).

II-5 Drainage et profondeur de prélèvement

Le drainage est bon, prélèvement à la profondeur de 50 à 70cm.

II-6 Horizon

On observe des :

- . Horizon B argileux ;
- . Enracinement faible, de couleur rouge claire à rouge jaune, peu humifère, tassé et durci, de structure massive, secondairement polyédrique fine;
- . Quelques taches d'humus sur le trajet de racines, cohésion moyenne. L'épaisseur de l'altération est de 0 à 20m.

II-7 Interprétation des résultats

II-7-1 Appellation

«Sol ferralitique rouge jaune» selon les critères d'identification dans le tableau N°1 et suivant la classification de SEGALIN P.(1994). Le rapport K_i est de l'ordre de 2,11 (tableau N°15) ($K_i < 2,2$). L'horizon minéral est de couleur rouge au jaune. La consistance est peu cohérente.

II-7-2 Caractéristique Géotechnique (Tableaux N°17 et 18)

- Nature apparente : Limon argilo-sableux rougeâtre
- Classification: HBR: A₇₋₅
LPC: L_t

On peut utiliser ce sol pour la construction des remblais, des remblais ordinaires et des couches de base. Les caractéristiques géotechniques sont: $W_L=57$, $G\%=1,68$; $\gamma_{DOPN}>16,5$ et $CBR>30$ (cf: matériau pour remblais à l'Annexe).

III. ECHANTILLON N°3 D'AMBOHIMANJAKA

III-1 Localisation

La région d'Ambohimanjaka est située au Sud, dans la cuvette d'Ilafy. Le site d'échantillonnage se trouve sur le talus de terrassement au pied de la route vers l'ONG FIKRIFAMA. Il a une altitude de 1290m.

III-2 Roche-MERE

Nous avons bien vu le changement de faciès entre la Migmatite et la Charnockite. Le site est placé sur la Migmatite en contact avec la Charnockite. Cette Migmatite est un prolongement vers le Nord du groupe de Manampotsy. Elle montre des lits parallèles plus ou moins fins continus: zone ferromagnésienne et zone quartzo-feldspathique de composition granitique (cliché N°4 d'Ambohimanjaka).

III-3 Topographie

Dans la cuvette entre deux collines à pente faible, le site est placé sur le versant Ouest en face du terrassement.

III-4 Végétation

Elle forme des savanes et des graminées.

III-5 Drainage et profondeur de prélèvement

Le drainage est bon à très bon. Le prélèvement s'est effectué à une profondeur de 50 à 80cm.

III-6 Horizon

Nous avons prélevé les échantillons dans l'horizon B qui est constitué de limon et argile, présentant des lithomarges kaoliniques blanchâtres, passage d'une faille à remplissage pegmatitique, présence de «tany haboka» ou ocre jaune (cliché N°4), horizon de couleur rouge saumon, enracinement faible, cohésion moyenne.

III-7 Interprétation des résultats

III-7-1 Appellation

C'est un Andosol rouge saumon, sol peu évolué de couleur claire. L'humidité est de l'ordre de 1,3 avec un drainage moyen. Classification de SEGALIN P.(1994) (tableau N°1). Le rapport Ki est de 2,37.

III-7-2 Caractéristique Géotechnique (Tableaux N°17 et18)

Nature apparente : limon argileux rougeâtre

Classification: -HBR: A₇₋₅

-LPC :L_p/L_t

Les résultats sur l'essai géotechnique routier et sur l'essai géotechnique triaxial sont mauvais. Ils ne sont pas adaptables à la qualité sollicitée (cf: Annexe: qualité des matériaux). On ne peut l'utiliser que dans la construction des remblais ordinaires. Les résultats sont W_L=50; G%=2,40; γ_{DOPN} >16,6.

IV. ECHANTILLON N°4 D'ILAFY

IV-1 Localisation

Nous avons prélevé les échantillons sur le versant Ouest d'un talus au pied de la colline du Rova d'Ilafy. Les coordonnées sont:

X=18°51'22S

Y=042°33'82^E

Altitude Z=1350m

IV-2 Roche-MERE

La roche-mère est une Charnockite. La charnockite est classée dans le système de graphite et dans le groupe de Manampotsy. Nous avons trouvé sur le versant Ouest d'altitude

très haute un affleurement bien exposé. Nous avons trouvé la roche-mère dans une carrière abandonnée au Sud du Rova d'Ilafy (cliché N°5).

IV-3 Topographie

Colline à pente forte: traversée par une route secondaire qui amène au Rova d'Ilafy.

IV-4 Végétation

La végétation est une végétation secondaire «la savoka»: Eucalyptus, fougères, Ficus (aviavy).

IV-5 Drainage et profondeur de prélèvement

Le drainage est moyen. L'humidité n'est que de 2,1 (tableau N°15). On a prélevé des sols de 50 à 70cm de profondeur.

IV-6 Horizon

C'est un horizon rouge à concrétion centimétrique, horizon très dur et limoneux avec une très grande épaisseur de l'altération de 20 à 30m. Il présente quelque part des lithomarges kaoliniques blanchâtres, peu humifères d'enracinement faible.

IV-7 Interprétation des résultats

IV-7-1 Appellation

L'échantillon est classé comme sol bisialitique rouge foncé. C'est un sol en voie d'évolution. Le rapport Ki est de l'ordre de 2,78 (tableau N°15)

IV-7-2 Caractéristique Géotechnique (tableaux N°17 et 18)

Nature apparente : limon argileux rouge

Classification: - HBR : A₆

- LPC : L_P

Nous avons les résultats suivants: $W_L=39$; $G\%=0,12$; $\gamma_{DOPN}>17,5$ et $ICBR=20$. Cet échantillon peut s'utiliser dans la construction des remblais et des remblais ordinaires. On peut l'utiliser aussi dans la construction des routes en terre et piste en raison de la valeur de l'ICBR, de la densité sèche γ_{DOPN} (tableau N°25: route et terre en piste, tableau N°26: matériaux pour constitutions des remblais).

V. ECHANTILLON N°5 DE VONTOVORONA

V-1 Localisation

Le site se trouve sur le versant Sud de la colline volcanique de Vontovorona, à droite de la route qui va vers la cité de la nouvelle ville.

Les coordonnées sont les suivantes:

X=18°58'91S

Y=047°25'60^E

Altitude Z=1350m

V-2 Roche-MERE

La roche-mère est de l'Ankaratrite (Basalte), roche volcanique datée de Pléistocéogène (comme le massif de l'Ankaratra), de couleur noire très compacte. Au microscope, on distingue des phénocristaux d'Augite, de Microlithe. C'est une roche présentant des phénocristaux d'Olivine.

V-3 Topographie

On a effectué l'échantillonnage sur une colline à pente forte (30 à 35°) avec présence d'un relief en plateau pourvu d'agrégats.

V-4 Végétation

Elle est constituée par des arbres (pin et Eucalyptus), des graminées et le terrain est en voie de reboisement.

V-5 Drainage et profondeur de prélèvement

Le drainage est mauvais à cause de la granulométrie très fine. L'humidité est de 2,6% (tableau N°15). On a prélevé des échantillons à partir de 50cm de profondeur.

V-6 Horizon

On voit un passage brusque de l'horizon A à l'horizon B; cohésion forte. L'horizon B est hydromorphe. Il y a des blocs à structure vacuolaire, un enracinement fort et un peu d'humus.

V-7 Interprétation des résultats

V-7-1 Appellation

C'est un sol ferralitique rouge sang de bœuf, très évolué. Le rapport Ki est de 1,14 qui est une bonne indication des sols ferralitiques (cf: tableau N°10).

V-7-2 Caractéristique Géotechnique (tableaux N°17 et 18)

Nature apparente: limon argileux marron

Classification: - HRB: A₇₋₅

- LPC :L_t

Ce type de sol n'est pas recommandé à la construction de Génie Civil. Les valeurs de Ip=26, ICBR=8, G_w=2,35 ne satisfont pas aux valeurs limites pour les matériaux de remblais. Pour les matériaux de couche de chaussée, l'indice de plasticité sera inférieure ou égale à douze (≤12) ; l'ICBR sera supérieur à trente (>30). Dans la construction des routes en terre et

piste, les fuseaux de spécification ne coïncident pas au résultat d'analyse granulométrique des sols (Annexe : Qualité des matériaux) (Tableau N°19 à 24).

VI. ECHANTILLON N°6 D'AMPASAMPITO

VI-1 Localisation

Au sommet de la colline où se trouve l'antenne météorologique d'Ampasampito, le sommet se trouve à une altitude de 1340m.

VI-2 Roche-MERE

Les roches sont des gneiss à graphite avec de lits de sillimanite et de grenat intercalés de Quartzite. Elles appartiennent aux groupes d'Ambatolampy de l'Archéen.

VI-3 Topographie

Colline formant une butte et présentant des talus et des abrupts au versant Sud.

VI-4 Végétation

Elle est constituée par des arbres (pin et Eucalyptus) et des graminées.

VI-5 Drainage et profondeur de prélèvement

L'horizon est bien drainé. L'humidité est de l'ordre de 1,8% (tableau N°15). Nous avons prélevé des sols de 50 à 80cm de profondeur.

VI-6 Horizon

L'épaisseur de l'altération est de 50m à plus de 50m, et il y a un passage brusque de l'horizon B1 en B2. En bas de l'horizon B, l'horizon tacheté affleure avec présence des graves quartzeux. L'enracinement est faible avec un horizon peu humifère.

VI-7 Interprétation des résultats

VI-7-1 Appellation

Sol bisiallitique brun rouge, suivant la classification de SEGALIN P.(1994). Le rapport K_i est de 2,54 ($K_i < 3$).

VI-7-2 Caractéristique géotechnique (tableau 17 et 18)

Nature apparente:

Classification: - HRB: A_{7.5}
- LPC: L_p

Les caractéristiques géotechniques sont : $W_1=48$; $ICBR=12$; $G\%=0,36$; $\gamma_{DOPN}=18,6$; $IP=14$. D'après les données concernant la qualité des matériaux (Annexe), ces résultats sont fiables en tant que matériaux de construction des remblais, des remblais ordinaires, des couches de chaussées et des routes en terre.

VII. ECHANTILLON N°7 D'ANKATSO

VII-1 Localisation

Sur le talus d'AnkatsoII à gauche de la route vers Ambolonkandrina, l'altitude de prélèvement est de $Z=1300m$.

VII-2 Roche-MERE

Les roches-mères sont des gneiss à grenat et cordiérite avec alternance de quartzite. Les roches métamorphiques acides sont dans le groupe d'Ambatolampy.

VII-3 Topographie

La topographie se forme en talus sur un versant Est de pente faible. On trouve une forme d'érosion en nappe.

VII-4 Végétation

Elle n'y a que des graminées.

VII-5 Drainage et profondeur de prélèvement

On a un bon drainage sur le versant Est et passe de bon à très bon en bas du profil. L'humidité est de 1,5. Le prélèvement se fait de 50 à 80m de profondeur.

VII-6 Horizon

On est dans un horizon B avec passage d'un horizon violacé et un horizon rouge-rose, horizon hydromorphe en présence d'un lit quartzitique. L'épaisseur de l'altération est de 10m à plus de 20m ; horizon humifère et enracinement bon.

VII-7 Interprétation des résultats

VII-7-1 Appellation

Cet échantillon de sol s'appelle Andosols rouge claire. C'est un sol peu évolué. Le rapport K_i est de 3,9.

VII-7-2 Caractéristique Géotechnique (Tableau 17 et 18)

- . Nature apparente : Limon argileux rouge
- . Classification : - HRB : A_{7-6}
: - LPC : A_p

Les caractéristiques d'après l'analyse sont les suivants : $W_I=43$; $ICBR=21$; $G\%=0,7$; $\gamma_{DOPN}=17,1$ et $IP=19$. Ces résultats montrent, en se référant à la qualité de matériaux (Annexe), que ce type de sol est applicable à la construction des remblais, des remblais ordinaires, des couches de chaussée et des routes en terre.

VIII. DISCUSSION ET INTERPRETATION

Les échantillons étudiés ont également été prélevés dans les différentes roches autour de la ville d'Antananarivo et viennent d'être montrés dans les paragraphes précédents. Les roches mères des sols étudiés sont les suivantes :

- Migmatites granitoïdes et Granites d'Ambohimahintsy
- Granite porphyroïde d'Ambanintsena (Carion)
- Migmatites en contact avec la Charnockite d'Ambohimanjaka
- Charnockite d'Ilafy
- Ankaratrite de Vontovorona
- Gneiss à graphite d'Ampasampito
- Gneiss à Quartzite d'Ankatso

Les renseignements concernant les horizons et les pourcentages des éléments majeurs ont été groupés dans le tableau N°15 et l'annexe I.

Fautes de matériels de laboratoire, nous n'avons pas pu faire des analyses des éléments à l'état de trace, le pH et la mesure des cations échangeables. Malgré cela, nous avons pu nous référer à des résultats d'analyse de sols et des roches déjà faites par les pédologues travaillant à Antananarivo. (Colloque internationale ORSTOM 1970).

Evolution par rapport à la Roche-Mère :

La mobilisation des éléments (Si, Alumine, Fer) est obtenue en fonction de la température, la pluviométrie, la morphologie (topographie), le drainage, la végétation et la Roche-Mère. On peut calculer la variation des ΔSiO_2 , ΔAl_2O_3 , et de ΔFe_2O_3 à partir de la soustraction des résultats en $SiO_2\%$, $Al_2O_3\%$, $Fe_2O_3\%$ de la roche-mère et ceux des sols étudiés.

Les résultats d'analyse chimique des roches correspondants ont été présentés dans le tableau N°35.

La figure 21 montre les écarts enregistrés entre la cheminée de la roche-mère et celle de son produit d'altération.

D'après le calcul des variations en pourcentage des éléments majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) entre la roche-mère et celui de son produit d'altération. Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau N°14.

Echantillon Roches- mère	N°1 Migmatite Granitoïde	N°2 Granite	N°3 Migmatite et Charnockite	N°4 Charnockite	N°5 Ankaratrite	N°6 Gneiss à Graphite	N°7 Gneiss à Quartzite
$\Delta\text{SiO}_2\%$	-20 à -22%	-7 à -36%	-10 à -30%	-9,4 à -32%	-12 à -35%	0,2 à -17%	-0,8 à -20%
$\Delta\text{Al}_2\text{O}_3\%$	+13 à +22%	+1 à +8,5%	+7 à +10%	+4 à 12%	+17 à 20%	+4 à 16%	+2,1 à +16%
$\Delta\text{Fe}_2\text{O}_3\%$	+4 à +12%	+1 à +38%	+4,9 à +10%	+2 à 7%	-5 à +19%	-1,80 à +1%	-1,8 à 2,98%
Ki %	1,07 à 1,52	0,50 à 2,11	1,50 à 2,37	2,10 à 2,70	0,10 à 1,40	1,30 à 2,54	1,40 à 3,29

Tableau N°14 : Accumulations et éliminations des éléments dans les sols ferralitiques

Le signe (-) indique qu'il y a élimination des éléments au cours de la formation du sol.

Le signe (+) montre une accumulation des éléments dans un horizon.

On peut distinguer 4 délimitations de la région d'Antananarivo. A partir de ces résultats d'analyses chimiques, on déduit :

- 1- Dans la partie Est de la ville (échantillons 1 et 2), la solubilité de la silice est très intense, en raison de la morphologie accidentée, de la pluviométrie très élevée, de la végétation abondante (forêt) et des bonnes conditions de drainage. Par contre, les teneurs en alumine et en fer augmentent. Les valeurs de Ki montrent bien qu'il s'agit d'un sol ferralitique. Donc la ferrallitisation est très avancée dans cette partie orientale.
- 2- Dans la partie Nord de la ville pour les échantillons 3 et 4, les écarts respectifs de 20% et 30% indiquent que la variation de lessivage de la silice augmente du centre au Nord. Les horizons sont peu lessivés et la morphologie n'est pas trop accidentée. La roche-mère contient beaucoup de silice (quartz) et cela empêche l'accumulation d'alumine. Le niveau piézométrique de la nappe aquifère atteint l'horizon B d'accumulation, entraînant ainsi de l'accumulation intense de fer ferreux. L'horizon est très rouge et présente une cohésion forte. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ monte jusqu'à 2,70 au niveau des charnockites.
- 3- Au Sud-ouest d'Antananarivo (échantillons 5 et 6), la formation volcanique de Vontovorona recouvre les roches migmatitiques et gneissiques. La silice est très mobile, le lessivage atteint jusqu'au 33% de la silice. C'est un sol très riche en magnésium du fait de la nature basique de la roche sous-jacente (basalte). Dans certains horizons, le fer est éliminé mais dans d'autres, il est accumulé jusqu'à 19%. Cette accumulation dépend de la morphologie et du drainage de la région. Le rapport Ki indique bien la présence des sols ferralitiques dans les horizons.
- 4- Au centre de la ville (échantillons 6 et 7), colline d'Ampasampito à Ankatso, l'horizon B quartzeux présente une grande quantité de quartz, et une très faible mobilité et lessivage de la silice. L'accumulation de l'alumine ne varie que de 2% à 16%. Le fer, en général, n'est pas accumulé mais lessivé. Ces résultats montrent que le drainage est bon à très bon. Malgré la solubilité du fer dans les horizons, il reste encore des quantités suffisantes pour prendre le sol ferralitique.

CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons effectué une « étude interdisciplinaire sur des échantillons de sols autour de la région d'Antananarivo ». Ces échantillons ont été prélevés dans des zones situées sur divers roches typiques de la région ; sur migmatites granitoïdes et granites, sur granite porphyroïde, sur migmatite en contact avec la charnockite, sur charnockite, sur l'Ankaratrite (basalte), sur gneiss à graphite avec des lits de sillimanite et de grenat, sur gneiss à grenat et cordiérite avec alternance de quartzite.

Nous avons d'abord effectué une étude bibliographique systématique sur les sols tropicaux et pour dégager les notions et définition récentes dans ce domaine, notamment les sols ferralitiques, leur caractérisation, leur définition et leur classification. Nous avons également étudié bibliographiquement les méthodes d'analyse géotechniques des sols et leurs méthodes d'analyse chimique.

Les échantillons récoltés ont été soumis aux diverses méthodes d'analyse et de caractérisation des sols utilisés dans le domaine des Travaux Publics (analyse granulométrique, analyse mécanique et essai triaxial). Les échantillons ont été soumis à une analyse chimique globale.

A partir de ces données et des connaissances sur la composition des roches-mères, nous avons donné des appellations à ces sols selon la nomenclature proposée par SEGALEN P. (1994) sur les sols ferralitiques. Nous les avons également classés selon la classification géotechnique (LPC, HRB) et rassembler les indications de domaine d'utilisation correspondante.

Nous avons pu localiser cartographiquement les échantillons et présenter des profils typiques englobant le domaine ferralitique avec description et illustration à l'aide de photographies.

La comparaison des résultats chimiques entre les sols et les roches-mères permet de classer en quatre délimitations de la région d'Antananarivo (partie Est, partie Nord, partie Sud-ouest et au centre de la ville). Grâce à la diversité des roches-mères, de la végétation, de la morphologie, nous pouvons trouver certains types de sols rouges comme les andosols, les bisalsols (sols bisiallitiques), l'oxydisol et les sols ferralitiques. Ils sont vérifiés par les valeurs du rapport K_i ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) et par l'accumulation en alumine et en oxyde de fer.

La synthèse bibliographique nous donne des idées qui permettent d'interpréter les échantillons prélevés. L'évolution des sols est conditionnée par les facteurs respectifs suivants : la roche-mère, le climat, le drainage, la végétation et la morphologie. Ces facteurs jouent des rôles de corrélation entre les différentes disciplines tels la géologie, la pédologie, la chimie et le génie-civil.

N°Echantillon	N°01	N°02	N°03	N°04	N°05	N°06	N°07
Localisation	IKIANJA	AMBANIN TSENA	AMBOHIM ANJAKA	ILAFY	VONTOVORON A	AMPAS AMPITO	ANKATSO
Humidité %	2,5	2,5	1,3	2,1	2,6	1,8	1,5
Perte en Feu %	9,7	8,7	9,0	7,0	10,5	8,4	7,4
SiO ₂ %	42,8	53,6	55,9	56,6	37,6	56,3	65,2
Al ₂ O ₃ %	28,0	24,4	23,5	20,1	33,0	22,1	19,8
Fe ₂ O ₃ %	15,1	9,2	8,1	11,5	9,1	7,7	3,7
TiO ₂ %	1,1	0,4	0,5	0,8	3,2	1,1	0,8
CaO %	0,8	1,1	1,0	1,5	0,6	0,9	1,0
MgO %	Traces	Traces	Traces	Traces	1,4	Traces	0,4
Na ₂ O %	Traces	Traces	0,1	Traces	Traces	0,1	0,1
K ₂ O %	Traces	Traces	0,1	0,1	Traces	Traces	Traces
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ %	1,52	2,11	2,37	2,78	1,14	2,54	3,29

Tableau N°15 : Résultats d'analyses chimiques aux attaques triacides dans les 7 sites échantillonnés.

Quelques résultats d'analyse des sols rapprochant les sols ferralitiques aux environs d'Antananarivo.

N°Echantillon	N°08	N°09	N°10	N°11	N°12	N°13
Localisation	FORT DU CHENS	AMBOHIMANJAKA	MAVOLOHA	MANJAKANDRIANA	-	-
Type des sols	Rouge-jaune	Marron	Marron	Cuirasse ferrugineuse sur granite	Cuirasse manganésifère	Argile tachetée
SiO₂ %	45,59	39,49	38,84	24,70	17,30	58,10
Al₂O₃ %	33,77	35,78	37,32	15,90	15,90	20,60
Fe₂O₃ %	4,75	7,09	6,25	46,30	46,30	5,00
TiO₂ %	1,26	0,82	0,77	0,63	0,63	0,55
CaO %	0,11	0,22	0,14	0,20	0,20	0,20
MgO %	0,09	0,18	0,02	0,20	0,20	0,20
Na₂O %	0,12	0,15	0,08	0,38	0,38	0,10
K₂O %	0,28	0,23	0,22	0,17	0,17	0,10
SiO₂/Al₂O₃ %	-	-	-	0,04	12,40	0,02
Roches-Mères	Gneiss à graphite et quartzite	Migmatite et Gneiss	Gneiss et migmatite	Granite	-	-

Tableau N°16 : Analyse chimique des sols d'Antananarivo (Source : Résultats bibliographiques), (Razafiniparany 1969, colloque 1970, Hervieu 1966)

N°Echantillon	N°14	N°15	N°16	N°17	N°18	N°19	N°20	N°21	N°22	N°23	N°24	N°25
Localisation	Ambatovy	Imerintsiatosika	Vohibory	Vohibory	Système Ambatolampy	-	Complexe d'Ambatofinandrahana	Tananarive	Ambatomiranty	Côte Est	Ilafy	Ambohimahintsy
SiO ₂ %	36,3	48,48	46,8	56,8	70,6	67	61,02	69,54	60,72	49,2	62,60	75,40
Al ₂ O ₃ %	3,5	15,03	14,25	17,63	11,2	16,35	17,02	14,91	15,92	13,8	18,20	10,70
Fe ₂ O ₃ %	10,9	11,60	12,62	6,68	5,4	2,90	5,66	3,26	8,01	14,7	18,20	1,10
TiO ₂ %	-	4,74	2,40	0,78	1,00	0,40	0,09	0,08	1,2	3,33	0,40	0,20
CaO %	0,5	8,14	12,54	6,06	6,50	0,40	0,68	2,17	3,28	10,6	4,00	1,30
MgO %	42,4	4,54	7,22	3,22	2,0	3,85	0,75	1,35	0,91	6,3	1,80	0,40
Na ₂ O %	0,35	3,51	0,55	4,08	0,20	1,45	5,29	4,18	2,12	2,38	3,60	3,90
K ₂ O %	0,25	2,03	0,60	3,74	1,40	5,25	7,06	3,97	5,34	0,53	2,50	4,40
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ %	0,05	0,11	0,09	0,09	-	0,08	-	-	-	0,23	-	-
Roches-Mères	Péridotite	Gabbros micacé à Px	Amphibolite à Hornblende	Gneiss à Augite	Gneiss à Hornblende de Biotite	Micaschiste à Biotite et à Px	Syénite	Migmatite Granitoïde à hornblende Biotite	Granite leucocrate	Basalte doléritique	Charnockite	Granite alcalin

Tableau N°17 : Quelques résultats d'analyses chimiques des roches à Madagascar (Sources bibliographiques) Razafinimparany, 1969, Colloque ORSTOM 1970, Hervieu, 1966.

ESSAI GEOTECHNIQUE ROUTIER

N° et localisation des échantillons			N°01 IKIANJA	N°02 AMBANIN TSENA	N°03 AMBOHIMA NJAKA	N°04 ILAFY	N°05 VONTOV ORONA	N°06 AMPAS AMPITO	N°07 ANKATSO
NATURE APPARENTE DES SOLS ECHANTILLONNES			Limon argilo-sableu rouge	Limon argilo-sableu rougeâtre	Limon argileux rougeâtre	Limon argileux rouge	Limon argileux marron	Limon argilo-sableu marron	Limon argileux rouge
TENEUR EN EAU W(%)			21,0	18,6	17,7	13,1	11,8	20,2	12,0
IDENTIFICATIONS	GRANULO- SEDIMENTO % de passant à	Ø max min	5	5	5	2	2	8	1
		2mm	99	99	100	100	95	100	98
		0,40mm	84	65	75	65	66	91	61
		80µ	84	65	75	65	66	91	61
	L'Atterb eg	Wl(%)	60	57	50	39	62	48	43
		Wp(%)	35	31	31	27	36	34	24
		IP(%)	23	22	19	12	26	14	19
CLASSIFICATION	H.R.B		A ₇₋₅	A ₇₋₅	A ₇₋₅	A ₆	A ₇₋₅	A ₇₋₅	A ₇₋₆
	L.P.C		L _t	L _t	L _p /L _t	L _p	L _t	L _p	A _p
C.B.R SANS IMMERSION	W moulage		23,3	17,5	19	16	22,2	15,3	19,3
	IC (%)	55c	95	95,7	95	95	95	95	95
		25c							
10c									
ICBR	55c	51	39	33	48	29	36	44	
	25c								
	10c								
C.B.R APRES IMMERSION	ICBR	55c	12	7	10	20	8	12	29
		25c							
		10c							
Wp(%)	55c	29	22,7	25,6	21,6	27,1	21,1	24,6	
	25c								
	10c								
G(%)	55c	1,81	1,68	2,4	0,12	2,35	0,36	0,07	
	25c								
	10c								
I.C.B.R A...		0J	50	39	33	48	32	36	41
		4J	12	7	10	20	8	12	21
PROCTOR N°	d max KN/m³		16,3	17,7	16,6	17,6	15,9	18,6	17,1
	W opt (%)		23,5	17,2	19,1	16	22	15,2	19,6

Tableau N°18 : Résultats des essais géotechniques routiers (L.N.T.P.B)

ESSAI GEOTECHNIQUE TRIAXIAL

N° et localisation des échantillons			N°01 IKIANJA	N°02 AMBANINTSENA	N°03 AMBOHIMANJAKA	N°04 ILAFY	N°05 VONTOVORONA	N°06 AMPASAMPITO	N°07 ANKAT SO
IDENTIFICATI ON	L'Atterbeg	Wl(%)	60	57	50	39	62	34	43
		W _p (%)	37	35	31	27	36	34	24
		IP(%)	23	22	19	12	26	14	19
CLASSIFICATION L.P.C			L _t	L _t	L _p /L _t	L _p	L _t	L _p	A _p
COMPR ESSI ON	G _c (Kla)		80	50	96	60	100	74	40
	Cc		0,09	0,258	0,22	0,168	0,17	0,22	0,166
	Cg		-	0,022	0,043	0,032	-	-	0,166
CISAILLEM ENT	C _{uu} (Kla)		-	36	-	12	32	-	0 ,016
	φ _{uu} (°)		-	13°	-	12°	7°	-	17°
	C' (Kla)		16	-	14	-	-	10	-
	φ' (°)		27°	-	23°	-	-	26°	-

Tableau N°19 : Tableau des résultats des essais de laboratoire (L.N.T.P.B)

ILLUSTRATIONS

Photo 01

- Lieu d'observation** : Carrière d'Ambohimahintsy, PK7 RN2
Roche-Mère : Migmatite Granitoïde, Granite et Charnockite
Topographie : Pente exposée à l'ouest
Végétation : Pseudo-steppe, graminées
Observations : Cette photo présente la partie ferralitique du sol rouge et la succession entre roche-mère et sols.
Paysage typique de la région Est d'Antananarivo.
Cliché : Madame Léa RAHARIJAONA
Appellation proposées : Sol ferralitique rouge brun.

Photo 02

- Lieu d'observation** : carrière Ambohimahintsy au nord d'Ikianja
Roche-Mère : Migmatite Granitoïde et Charnockite
Topographie : Pente exposée à l'ouest, talus sur la bordure de la RN2
Observations : Affleurement bien individualisé de la roche-mère.
 Passage brusque de l'horizon C à B.
Horizon B très épais avec des tâches de kaolin.
Cliché : Madame Léa RAHARIJAONA
Appellation proposées : Sol ferralitique rouge-brun

Photo 03

- Lieu d'observation** : Région d'Ambanintsena à la périphérie du granite de Carion
Roche-Mère : Granite porphyroïde à grain fin de Carion
Topographie : Pente exposée à l'Ouest, relief accidenté
Végétation : Intense, arbuste, pseudo-steppe, graminées secondaires
Observations : Différentiation des horizons humifères
Cliché : Madame Léa RAHARIJAONA
Appellation proposées : Sol ferralitique rouge-brun

Photo 04

- Lieu d'observation** : Ambohimanjaka au près du terrassement
Roche-Mère : Migmatite en contact avec la charnockite
Topographie : Pente douce, exposée vers l'Ouest, talus exposé vers le Nord
Végétation : Graminées
Observations : Sols très épais, passage d'une microfaille de direction N25E, remplissage des quartzites, horizon tacheté, lithomarge kaolinique
Cliché : Madame Léa RAHARIJAONA
Appellation proposées : Sols bisiallitiques rouge saumon

Photo 05

- Lieu d'observation** : Bordure de l'étang au versant sud de la colline Ilafy
Roche-Mère : Charnockite d'Ilafy
Topographie : Pente exposée au Sud
Observations : Profil sans horizon C, 1 à 2m d'épaisseur de l'horizon B, affleurement de la charnockite, avec des végétations intenses.
Cliché : Madame Léa RAHARIJAONA

Photo 01 et photo 02



Ambohimahintsy

Photo 03



Ambanintsena Carion

Photo 04



Ambohimanjaka

Photo 05



Ilafy

CONCLUSION GENERALE

A partir de nos résultats d'étude, un certain nombre d'éléments méritent d'être signalés. Les données nouvelles apportées dans le cadre de ce travail sont :

- Sur le plan de la terminologie des sols, les andosols ne sont pas toujours dérivés des roches volcaniques comme l'hypothèse de SEGALEN P. en 1994 (figure N°21, annexe). En effet les andosols étudiés ici peuvent être des produits d'altérations des gneiss de faciès catazone à ultrazone des migmatites au contact de charnockite. Comme dans le cas des andosols d'Ambohimanjaka sur migmatite et ceux d'Ankatso sur gneiss à grenat et à cordiérite avec alternance de quartzite.
- Sur le plan morphologique, ce ne sont pas toujours des sols ferralitiques le sol de couleur rouge sur le socle cristallin. Il peut y avoir des sols bisiallitiques sur la charnockite et sur gneiss comme le cas d'Ilafy et d'Ampasampito sur gneiss à graphite et sillimanite et grenat.
- Sur le plan cartographique, quatre zones bien distinctes ont été délimitées. Les critères de classification de ces zones sont basés sur la diversité des roches mères, de la morphologie, de la végétation, sur le rapport Ki et sur l'accumulation relative en alumine et en fer ainsi que le lessivage de la silice.
- Sur le plan de la géotechnique routière, l'utilisation de ces sols étudiés nous a permis de démontrer à partir de leur propriété chimique et géotechnique s'il s'agit de bons ou de mauvais matériaux géotechniques.
 - ✓ Les sols ferralitiques rouge-brun d'Ikianja sont des bons matériaux utilisables pour les remblais, remblais ordinaires et couche de base.
 - ✓ Les sols ferralitiques rouge-jaune d'Ambanintsena sont des bons matériaux utilisables que pour les remblais ordinaires.
 - ✓ Les sols bisiallitiques rouge-foncés d'Ilafy sont des bons matériaux utilisables pour les remblais, remblais ordinaires, les routes en terre et piste.
 - ✓ Les sols bisiallitiques brun-rouge d'Ampasampito, les andosols rouge-clair d'Ankatso sont des bons matériaux utilisables pour les remblais, remblais ordinaires, les couches de chaussée et les routes en terre.
 - ✓ Les sols ferralitiques rouge sang de bœuf de Vontovorona sont classés comme étant de mauvais matériaux géotechniques mais nécessitent un certain nombre de traitement.

Mais l'utilisation géotechnique d'un sol ne dépend pas de son appellation, autrement dit, deux sols de même utilisation comme le cas des sols ferralitiques d'Ikianja et celui de Vontovorona, les andosols d'Ambohimanjaka et ceux d'Ankatso.
- Sur le plan scientifique et technique, les connaissances acquises sont très enrichissantes et nous permettrons de les approfondir dans notre future carrière professionnelle.



TABLEAUX

1.	Identifications des sols ferralitiques.....	36
2.	Classifications du socle cristallin de Madagascar (Besairie H).....	40
3.	Classification du socle cristallin de Madagascar (Hottin G).....	42
4.	La Karoo Malagasy d'après Besairie H. (1964) et Razafimbelo E. (1998).....	43
5.	Variations climatiques et événements paléogéographiques à Madagascar.....	45
6.	Données climatiques de quelques stations de Madagascar.....	46
7.	Correspondance entre les appellations des divers sols de Madagascar dans divers systèmes.....	53
8.	Degré de plasticité en fonction de IP.....	57
9.	Consistance en fonction de IC.....	57
10.	Valeurs courantes de l'équivalent de sable.....	59
11.	Classification L.P.C.....	65
12.	Classification Américaine des sols (H.R.B).....	66
13.	Classification G.T.R.....	67
14.	Accumulations et éliminations des éléments dans les sols ferralitiques.....	82
15.	Résultats d'analyses chimiques aux attaques triaxiales.....	84
16.	Analyses chimiques des sols d'Antananarivo.....	84
17.	Résultats des essais géotechniques des sols.....	85
18.	Tableau des résultats des essais de laboratoire.....	86
19.	Tableau des résultats des essais de laboratoire.....	87
20.	Fuseau de spécification..... Annexe	05
21.	Fuseau de spécification..... Annexe.....	06
22.	Fuseau de spécification..... Annexe.....	07
23.	-24 Analyses granulométriques des 7 sites échantillonnées ...Annexe.....	08..09..10
25.	Route en terre et piste..... Annexe.....	11
26.	Matériaux pour constructions des remblais	Annexe.....11
27.	-34 Matériau pour construction des remblais.....	Annexe

FIGURES

1-	Variations d'épaisseur des principaux horizons d'altération selon la latitude.....	14
2-	Solubilité de la silice en fonction du pH.....	18
3-	Courbes superposées de la solubilité de la silice et de l'alumine en fonction du pH..	19
4-	Zonation des principaux sols d'Afrique.....	24
5-	Schéma structural de la kaolinite.....	27
6-	Schéma structural d'un mica.....	29
7-	Coupe géologique synthétique à la latitude d'Antananarivo.....	38
8-	Coupe géologique synthétique du bassin sédimentaire de Morondava.....	39
9-	Quelques facteurs de formation des sols à Madagascar.....	47
10-	Les sols de Madagascar (carte de Madagascar).....	52
11-	Courbe de compactage.....	60
12-	Résultats de l'étude Proctor CBR.....	60
13-	Détermination de la cohésion C et de l'angle ϕ	61
14-	Détermination de C et de ϕ à l'aide de ces cercles de Mohr.....	62
15-	Courbe odométrique : détermination des indices de gonflement C_g et de compression C_c	63
16-	Classification triangulaire	64
17-	Classification de laboratoire des sols fins	65
18-	Abaque de détermination de l'indice de groupe (I_g)	66
19-	Organigramme du fractionnement par décantations	68
20-	Organigramme générale des déterminations chimiques	69
21-	Organigramme des déterminations chimiques en fractions fines	69
22-	Précipitation et évapotranspiration annuelle de la région d'Antananarivo	72
23-	Evolution pédogénétique de diverses roches sous les tropiques humides.....	AnnexIV

CLICHES

1- Carrière Ambohimahintsy PK 7 RN 2	89
2- Carrière Ambohimahintsy au Nord d'Ikianja	89
3- Région d'Ambanintsena	89
4- Ambohimanjaka	90
5- Ilafy	90

ANNEXES

I- Présentations des sept (07) échantillons	01-02
II- Qualité des matériaux	03-04
III- Quelques résultats d'analyse des sols aux environs d'Antananarivo	14-20
IV- Evolution pédogénétique de diverses roches sous les tropiques humides.....	21

ANNEXE I : PRESENTATIONS DES ECHANTILLONS**1- Echantillon N°01 d'IKIANJA :**

Appellation : Sol ferralitique rouge brun
Localisation : PK7 sur RN2, carrière d'Ambohimahintsy
Topographie : Versant sud à pente faible
Altitude : 1400m
Roche-Mère : Migmatite granitoïde et Granite
Végétations : Savane, arborée : eucalyptus et graminées
Drainage : Bon
Profondeur de prélèvement : 1m au dessous de la surface
Horizon : Horizon B limoneux, cohésion forte

2- Echantillon N°02 d'AMBANINTSENA :

Appellation : Sol ferralitique rouge jaune
Localisation : PK25 sur RN2, sur le dôme granitique de Carion
Topographie : Versant Ouest à pente forte
Altitude : 1450m
Roche-Mère : Granite porphyroïde
Végétations : Savane arbustive, Acacia sp, eucalyptus et graminées
Drainage : Bon
Profondeur : 70cm
Horizon : Horizon B argileux, enracinement faible.

3- Echantillon N°03 d'AMBOHIMANJAKA :

Appellation : Andosols rouge saumon
Localisation : Route vers l'ONG FIKRIFAMA sur le talus de terrassement
Topographie : Versant Ouest à pente faible
Altitude : 1290m
Roche-Mère : Migmatite en contact avec la charnockite
Végétations : Savanes, graminées
Drainage : Moyen
Profondeur : 80cm
Horizon : B, à limon et argile, présentant des lithomarges kaoliniques blanchâtres, passage d'une faille à remplissage pegmatitique, présence de Tany haboka (ocre jaune).

4- Echantillon N°04 d'ILAFY :

Appellation : Sols bisiallitique rouge foncé
Localisation : Sur le versant Ouest d'un talus au pied du Rova Ilafy
Topographie : Colline à pente forte
Altitude : 1350m
Roche-Mère : Charnockite

Végétations : Eucalyptus, fougères, ficus (aviavy)
Drainage : Moyen
Profondeur : 70cm
Horizon : Rouge à concrétion centimétrique, horizon très dure et limoneux

5- Echantillon N°05 de VONTOVORONA :

Appellation : Sols ferralitique rouge sang de bœuf
Localisation : Versant Sud de la colline volcanique du Vontovorona
Topographie : Colline à pente forte, présence d'un relief en plateau avec des agrégats
Altitude : 1350m
Roche-Mère : Ankaratrite (Basalte)
Végétations : Pins, graminées
Drainage : Mauvais, reboisement
Profondeur : 70cm
Horizon : Horizon B, on voit un passage brusque en horizon B, cohésion forte, horizon hydromorphe, existence des blocs à structure vaculaire dans l'horizon B.

6- Echantillon N°06 d'AMPASAMPITO :

Appellation : Sols bisiallitique rouge à brun rouge
Localisation : Au sommet de la colline où se trouve l'antenne météorologique d'Ampasampito
Topographie : Colline formant une butte et présentant des talus et des arbustes au versant Sud
Altitude : 1340m
Roche-Mère : Gneiss à graphite avec de lits de sillimanite et de grenat intercalés de quartzite
Végétation : Pins, eucalyptus et graminées, reboisement
Drainage : Très bon
Profondeur : 80cm
Horizon : Passage brusque de l'horizon B1 en B2, en bas de l'horizon B, l'horizon tacheté affleure avec présence des graves quartzeux

7- Echantillon N°07 d'ANKATSO :

Appellation : Andosols rouge claire
Localisation : talus d'Ankatso II à gauche de la route vers Ambolonkandrina
Topographie : talus sur un versant Est de pente faible
Altitude : 1300m
Roche-Mère : Gneiss à grenat et cordiérite avec alternance de quartzite
Végétations : Graminées
Drainage : Bon
Profondeur : 80cm
Horizon : dans un horizon B avec passage d'un horizon violacé et un horizon rouge-rose, horizon hydromorphe en présence d'un lit quartzitique

ANNEXE II : QUALITE DES MATERIAUX**1- Matériaux pour remblais**

Ils devront satisfaire aux spécifications du CPC et posséder en outre les qualités suivantes :

- Indice de plasticité (IP) inférieur ou égale à VINGT (20) $IP \leq 20$;
- Indice portant CBR supérieur à dix (10) à Quatre vingt seize (96) heures d'imbibition (teneur en eau OPM) et à Quatre vingt quinze (95%) de l'OPM=ICBR $4j > 10$;
- Gonflement linéaire au moule CBR inférieur ou égale à Deux (2) pour cent = $G < 2\%$

Le remblaiement des calots et bases en béton sera réalisé à l'aide de matériaux possédant les mêmes caractéristiques que ceux utilisés pour l'exécution des couches de matériaux sélectionnées. De plus, ils ne devront pas contenir des éléments dont la plus grande dimension est supérieure à SIX (6) centimètres.

Le titulaire aura à sa charge les essais correspondants.

ESSAI :

- Limite de liquidité
- Indice de plasticité
- Densité sèche à l'OPN
- Gonflement

FREQUENCE :

- Tous les Cinq Cent (500) mètre cubes exploités d'une même source

Remarques : Pour illustrer ces qualités de matériaux pour remblais, le tableau suivant montre quelques exemples des caractéristiques exigées pour constitution des remblais compactés pour canaux et digues.

2- Matériaux pour couche de chaussée en matériaux sélectionnés :

La couche de matériaux sélectionnés sera réalisée au moyen de matériaux issus de gisements agréés par l'Ingénieur et satisfaisants aux conditions suivantes :

- Etre exempts de matières organiques et détritiques divers ;
- L'indice de plasticité sera inférieur ou égale à douze (12).

Les matériaux devront être bien gradués et conformes aux spécifications suivantes :

- Après la mise en œuvre, aucun élément devra avoir sa plus grande dimension supérieure à 65mm. Il appartiendra au Titulaire de prendre toutes les dispositions techniques pour obtenir ce résultat dans le cas où les matériaux de base ne correspondent pas à ces spécifications ;
- Pourcentage de fines (éléments $< 80\mu$) entre dix (10) et trente cinq (35) : $10\% < F < 35\%$;
- L'indice CBR sur la fraction 0/20 à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Modifié, compacté à 95% de l'OPM et à 4 jours d'imbibition sera supérieur à trente (30).

Pour chaque gisement le Titulaire aura sa charge la série d'essais suivante :

ESSAI	FREQUENCE
Granulométrie Limites d'Atterberg	Tous les Cent (100) mètres cubes
Proctor modifié CBR	Tous les deux cents 200 m ³

3- Matériaux pour couche de base :

- Indice de plasticité (mortier) < 5
- Equivalent de sable (mortier) > 60
- Coefficient de Los Angeles (LA) ≤ 35
- CBR > 30

4- Matériaux pour les routes en terre et piste :

Les tableaux N°25 et 26 montre trois (3) fuseaux de spécification pour les routes en terre. Ces trois figures présentent les fourchettes exigées des routes en terre.

Il faut atteindre 95% de ϕ OPM pour rendre fiable la durée de vie de la chaussée. Les derniers centimètres (30 à 50 cm) exigent une limite de liquidité $W_L < 65$ pour les routes digues.

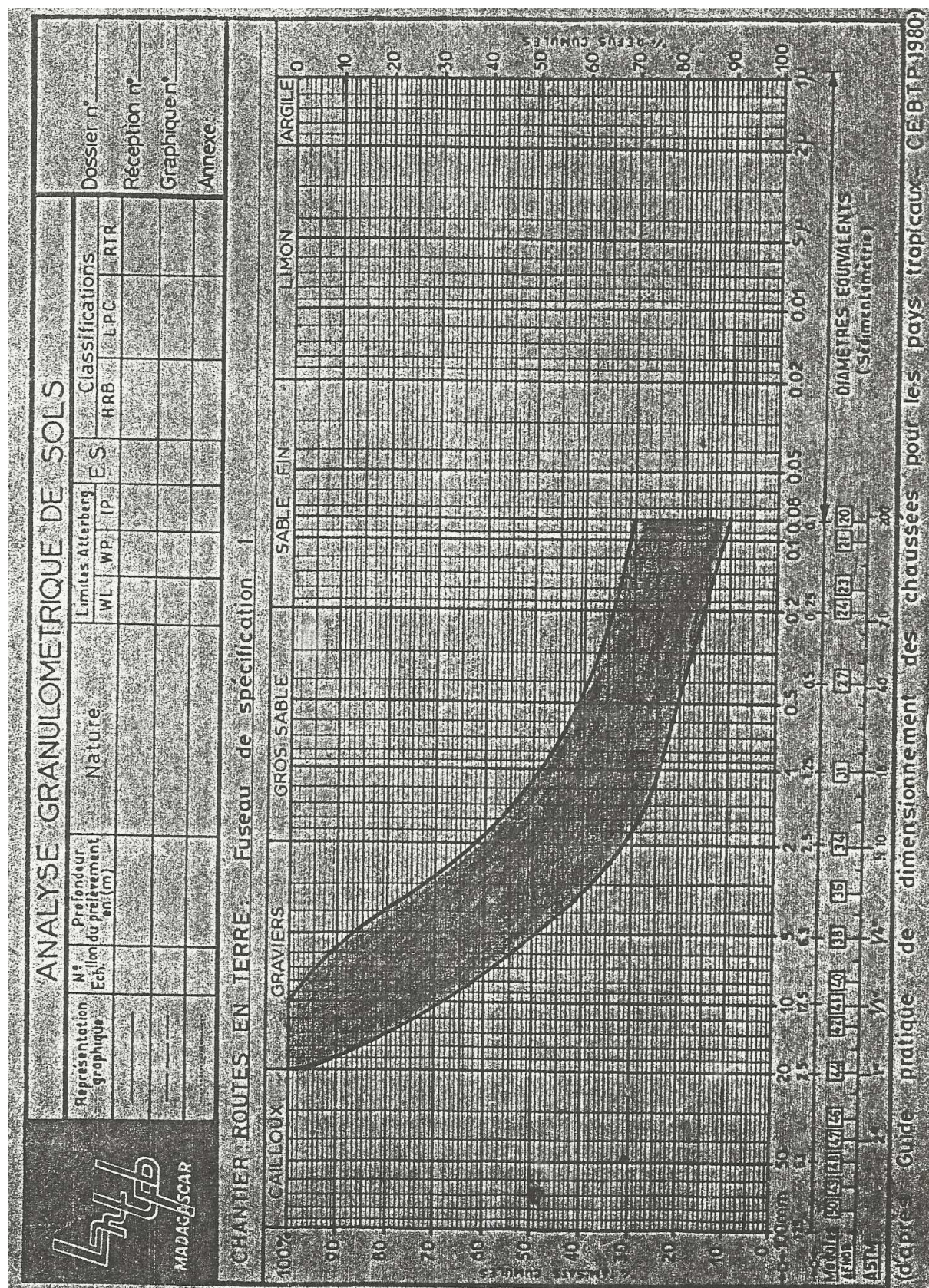


Tableau N°20 : Tableau d'analyse granulométrique de sols (Fuseau de spécification 1)

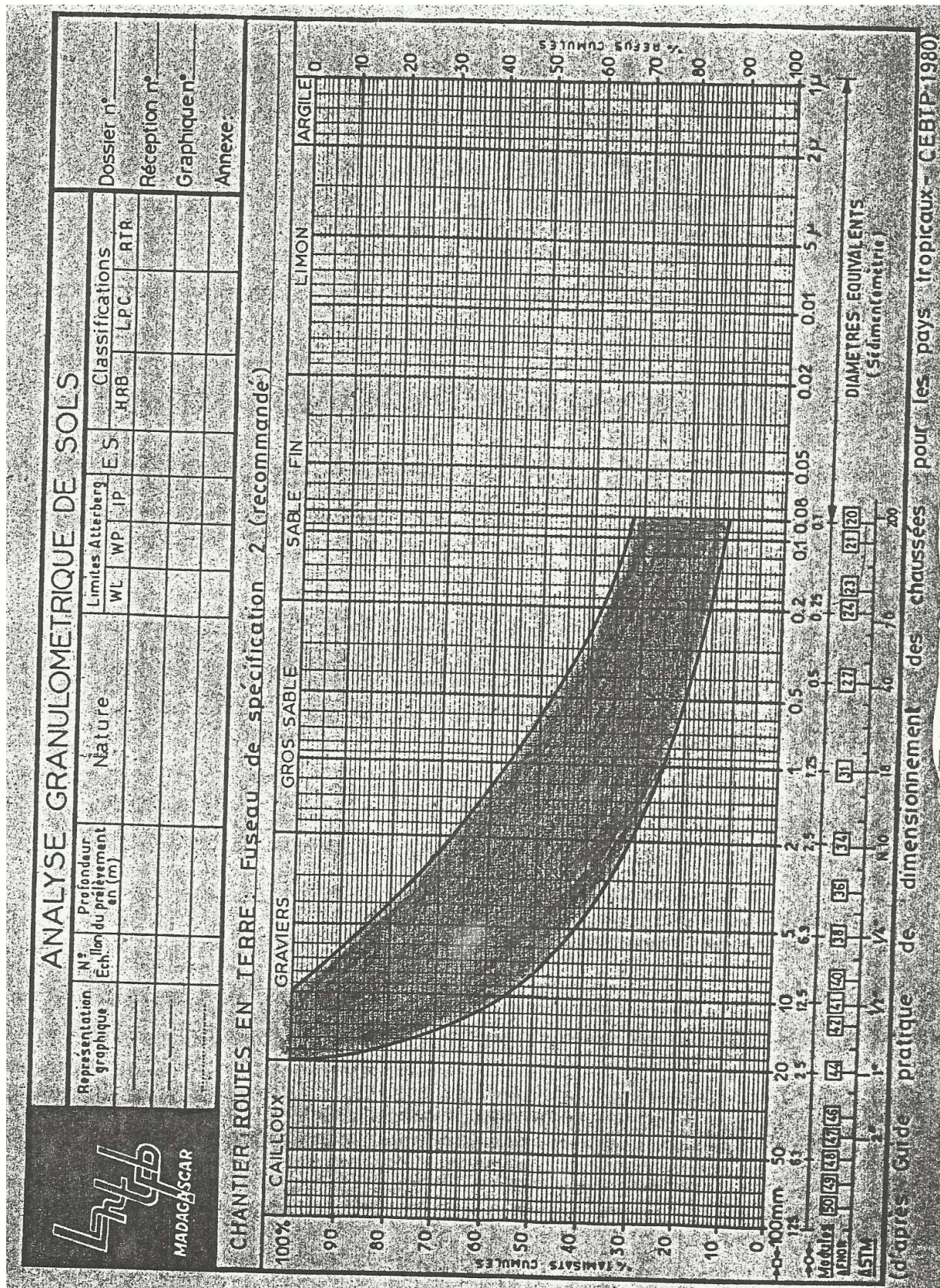


Tableau N°21 : Tableau d'analyse granulométrique de sols (Fuseau de spécification 2 « recommandé »)

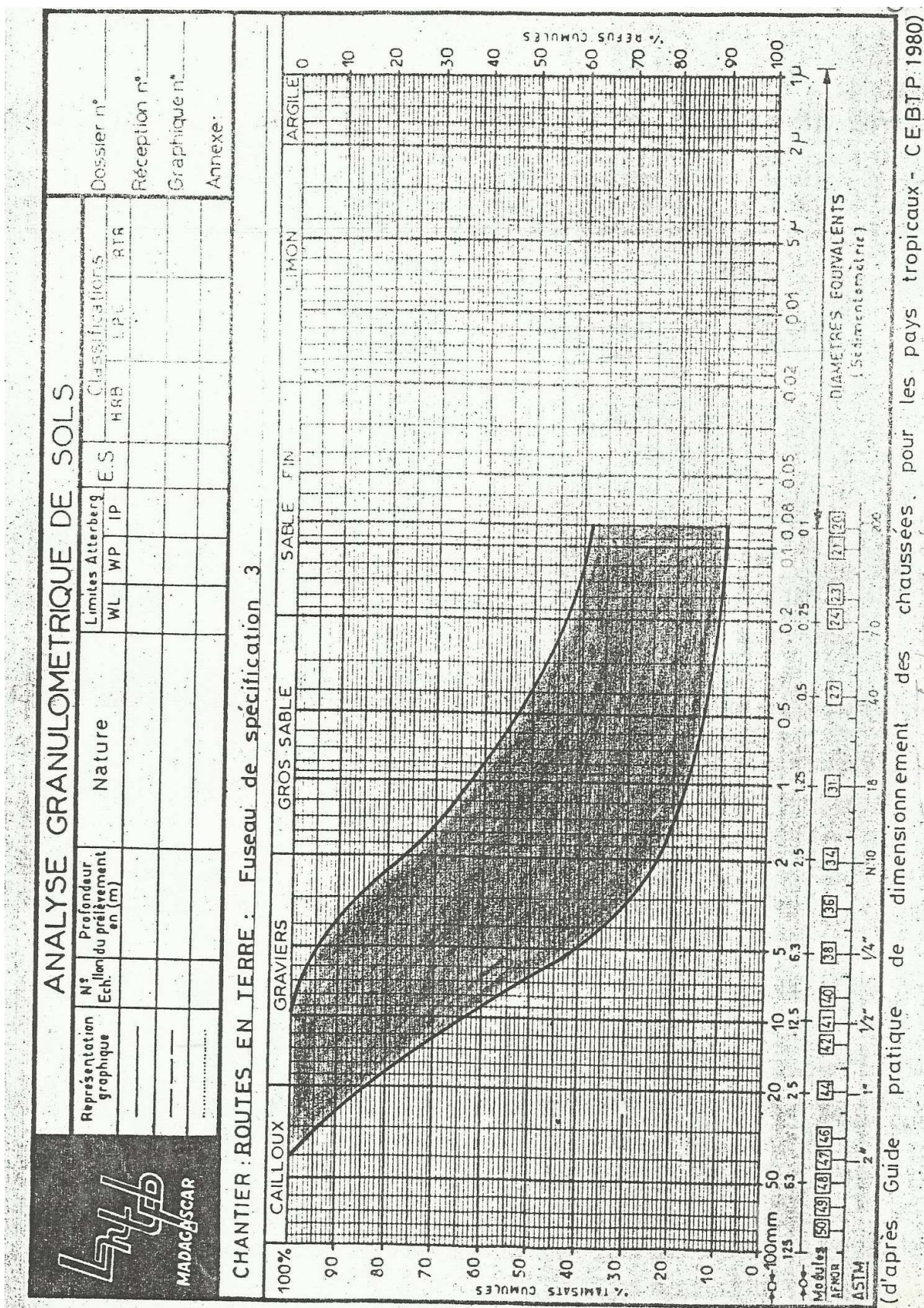


Tableau N°22 : Tableau d'analyse granulométrique de sols (Fuseau de spécification 3)

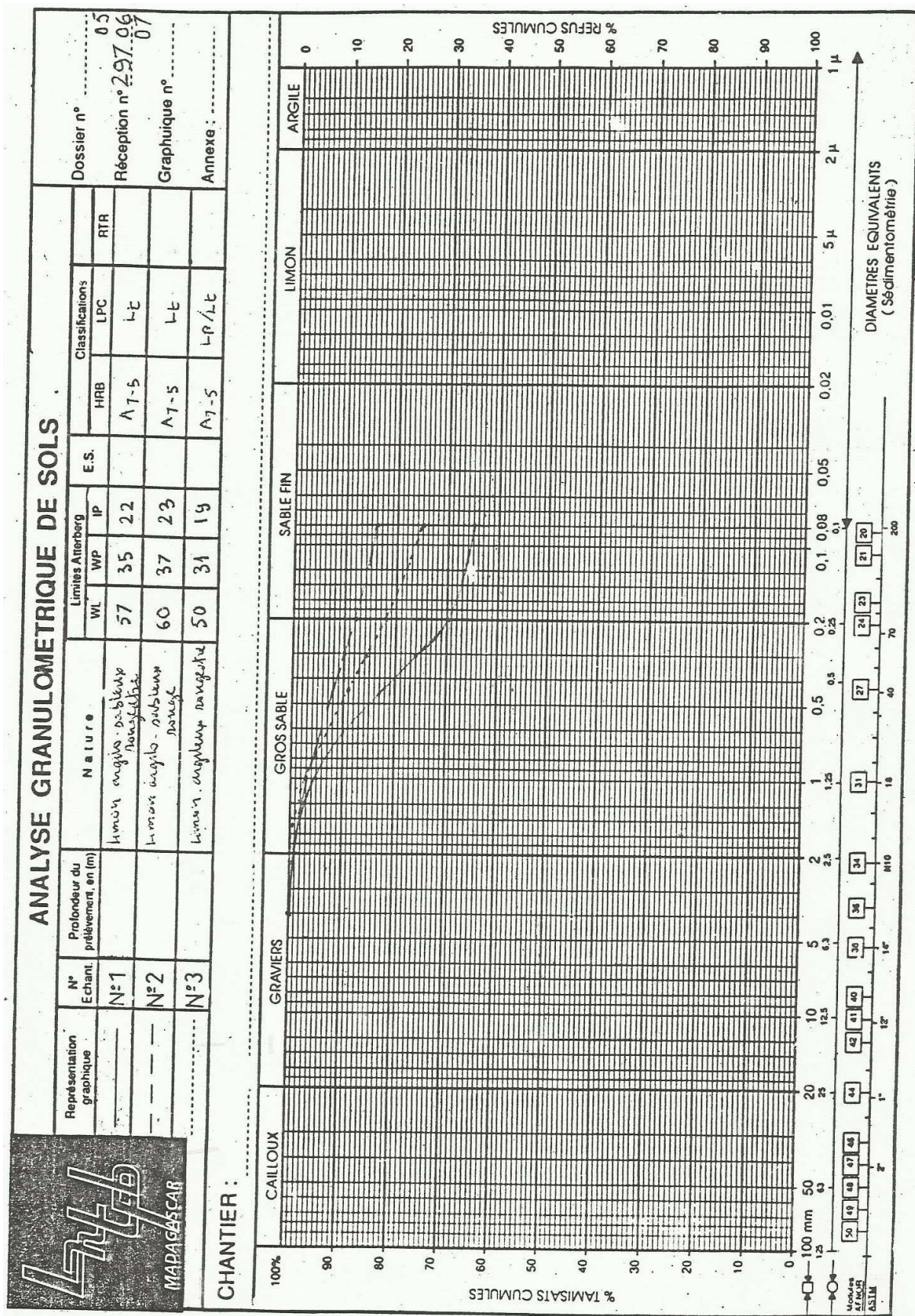


Tableau N°23 : Analyse Granulométrique des échantillons de sols N°01, N°02 et N°03

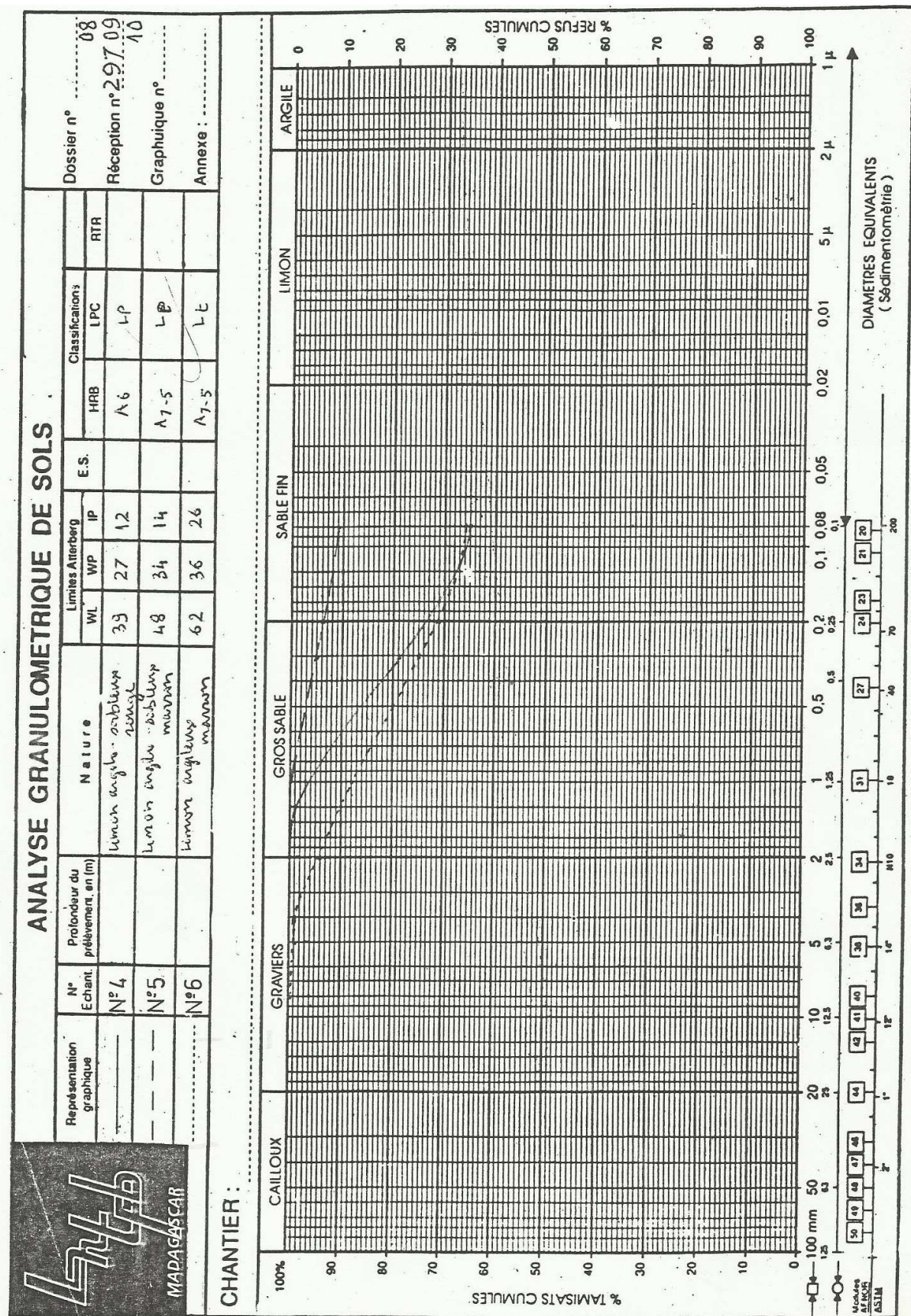


Tableau N°24 : Analyse Granulométrique des échantillons de sols N°04, N°05 et N°06

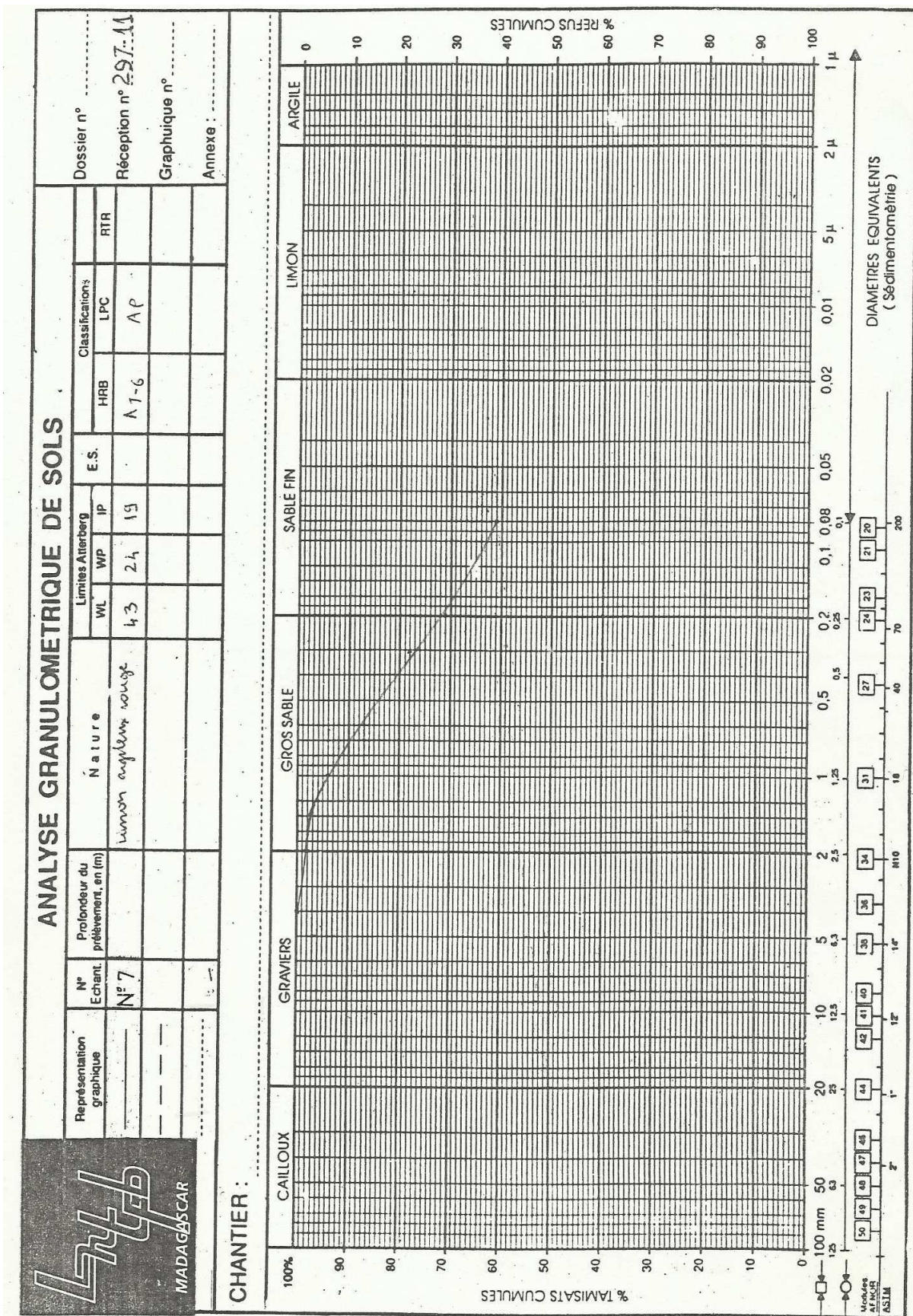


Tableau N°24 : Analyse Granulométrique de l'échantillon de sols N°07

MATERIAUX POUR REMBLAIS EN COUCHE DE FORME (y compris remblais de base)

Contrôle	Nature des essais	Résultats exigés	Nombre d'essais à réaliser
Remblais et plateforme 30 cm supérieurs des remblais et déblais	Teneur en matières organiques	Teneur < 0%	1 essai par type de matériaux
	Granulométrie	Dmax < 10 cm	1 essai par type de matériaux
	Limites d'Atterberg	Limite de liquidité : $WL > 65$	1 essai par type de matériaux
	Densité sèche	Φ_d à l'OPM > 1,65	1 essai par type de matériaux
	Gonflement linéaire	Gonflement à 95% de l'OPM < 2%	1 essai par type de matériaux
	Indice CBR	Remblais ordinaires : CBR > 5, Pour les 30 cm supérieurs CBR > 15 après 4 jours d'imbibition à 95% de l'OPM	1 essai par type de matériaux plateforme : Un essai tous les 200 m

Tableau N°26 : Route en terre et piste (source dossier LNTPB)

SPECIFICATIONS

Chantier	D max	Limite de liquidité (WL)	Indice de plasticité (IP)	% Fine	dOPN	Teneur en matière organique	Gonflement G%	K Perméabilité
Canal C3 Andriantany Marché N°176/MINATV/BBA	< 5	35<WL<60	15<IP<25	40 à 80	>1,50	< 3%	-	< 5.10-7m/s
Canal GR BPPA	-	< 65	-	-	>1,40	Sans MO	-	< 5.10-7m/s
Plaine Sud Tana BPPA	-	35<WL<60	15<IP<25	40 à 80	>1,50	3%	-	< 5.10-7m/s
Tête Morte BPPA Marché N°204/MINATV/BBA	< 10	35<WL<60	15<IP<25	41 à 80	>1,51	103%	-	< 5.10-7m/s
Manaingazipo sur la RN3A Ambatondrazaka	-	< 65	>10	-	>1,52	-	< 2%	< 5.10-7m/s
Amboromalandy Karambo basse-Ankarara Barrage Ambilivily	< 6	< 65	-	-	>1,60	Sans MO	< 2%	< 5.10-7m/s
Travaux d'urgence Lac Alaotra	< 6	< 65	>10	-	>1,60 (OPM)	Sans MO	< 2%	-
Barrage Dabara	-	< 65	15<IP<25	40 à 80	>1,65	< 2%	< 2%	-
DPI Farafangana	-	< 65	15<IP<25	41 à 80	>1,65	< 3%	< 2%	-

*Proposition du LNTPB pour $\delta dOPN > 1,56 \text{ T/m}^3$

$\delta dOPN$: Densité sèche à l'optimum Proctor Standard

Tableau N°27 : Matériaux pour constructions des remblais compactés pour canaux et digues (source dossier LNTPB)

ETUDE DE LA PLATEFORME

SOL DE PLATEFORME :

Ce sont les 30 derniers cm supérieurs du terrassement, i.e la surface supérieure qui supporte la chaussée. Il s'agit du terrassement du déblai, la couche supérieure du remblai du terrain naturel ou de la couche de forme.

CRITERES GEOTECHNIQUES MINIMUM EXIGES POUR UNE PLATEFORME :

WL 70: CBR > 10 (A Madagascar CBR=15)

$I_p < 40$

% de gonflement mesuré au CBR < 2%

% de matières organiques < 3%

SOLUTIONS DANS QUELQUES CAS :

- Si CBR < 5, prévoir une couche de forme admissible CBR > 15
- Si $W \approx W_{sat}$ → traitement du sol de plateforme à la chaux
- Si sol très mauvais → curage sur une épaisseur de 30 à 40 cm
- Ou rehausser la ligne rouge.

PRECAUTIONS A PRENDRE :

- Eviter de prendre les matériaux > 150 mm (tassements différentiels)
- Pour le fond des déblais rocheux, il faut régler suivant le nivellement avec grave 0/40 ou grave 0/60.

Dimensionnement économique → en fonction de la variation de la portance du sol → zones homogènes.

CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX POUR CHAUSSEES NON-REJETUES

COUCHE DE ROULEMENT :

Elle exige une certaine cohésion : compromis de % de fines pour résister en saison sèche et en saison humide.

. Granularité

. Critère de plasticité

CBR corrigé de 30 gd trafic > 30 véhicule / jours

CBR corrigé de 20 gd trafic > 20 véhicule / jours

CRITERE DE PLASTICITE :

Sol limoneux ; WL : maniabilité sur le terrain

Valeurs indicatives :

Climat	WL	Ip
Chaud et humide	35	10 à 15
Tropical avec saison sèche	40	15 à 25
Sec et aride	55	10 à 30

Cas de la Côte d'Ivoire:

Chaud et humide	$Ip \leq 14$
Zone de savane	$18 < Ip < 25$

Les matériaux ne doivent pas être trop plastiques.

Cu (KPa)	ϕ_u
250	0
120	10
100	20
90	30
80	40

ANNEXE III : QUELQUES RESULTATS D'ANALYSE DES SOLS AUX ENVIRONS D'ANTANANARIVO (Colloque ORSTOM 1970)

PROFIL RM2 : Sol brun-rouge, ferralitique sur basalte.

Prospecteurs	: MAIGNIEN, RIQUIER, BOURGEAT
Pluviométrie	: 1900 mm
Roche-Mère	: Cendres basaltiques
Région	: Massif d'Ankaratra
Altitude	: 1500 m
Végétation	: dégradée, prairie et peuplements de Mimoza
Horizon ferralitique	: brun rouge, argilo-limoneux, quelques fins débris de basalte ± altéré, structure uniforme angulaire, grosse, peu développée, quelques recouvrements bruns sur les petits agrégats à tendance polyédrique, porosité moyenne.

PROFIL ANR6 : Sol ferralitique brun départ blanche.

Prospecteurs	: RIQUIER
Topographie	: Pente modérée, relief de colline
Drainage	: Bon
Erosion	: Modérée
Roche-Mère	: Migmatite granitoïde
Région	: Colline à la sortie d'Ambatolampy vers Antananarivo
Altitude	: 1200 à 1300 m
Pluviométrie	: 1350 mm
Horizon ferralitique	: Horizon beige, horizon d'infiltration, structure Argilo-sableux, porosité bonne, enracinement moyen à faible.

PROFIL PH2 :

Type du sol	: Sol jaune ferralitique sur alluvions anciennes
Topographie	: Pente faible, ancienne terrasse lacustre
Pluviométrie	: 1420 mm
Roche-Mère	: Alluvion lacustre
Région	: Moramanga (5 Km à l'Ouest)
Drainage	: Localement bon
Végétation	: Prairie à Helichrysum, aristida, quelques philippia et fougères
Horizon ferralitique	: Horizon jaune argilo-sableux tassé compact, structure massive secondairement polyédrique à particulaire, microporosité importante, enracinement faible (la racine ne traverse pas cet horizon compacté).

PROFIL PH1 :

Type du sol	: Ferralitique jaune / rouge
Région	: Périnet
Topographie	: bas pente, relief montagneux de type polyédrique
Pluviométrie	: 1700 mm
Température	: 19°
Roche-Mère	: Migmatite

Drainage : Bon
 Végétation : Forêt ± dégradée
 Horizon ferralitique : Horizon Argileux, humide, jaune-rouge ; structure grumeleuse à polyédrique, bonne porosité, racine abondante, cohésion forte après séchage, plastique.

PROFIL PH5 :

Type du sol : jaune sur rouge de Savoka
 Région : Forêt d'Angavokely
 Topographie : Bas pente, relief montagneux polyédrique
 Roche-Mère : Granite de Carion
 Végétation : Forêt dégradée, arbustes à épiphytes, Philippia
 Horizon ferralitique : Horizon rouge, argilo-limoneux, structure polyédrique, cohésion forte, enracinement nul, le passage à l'horizon supérieur se fait d'une manière brutale.

PROFIL IR3 :

Type du sol : sol ferralitique jaune, humifère, sur trachyte
 Emplacement : Nationale 43, colline à l'arrivée à Ampefy
 Prospecteurs : RIQUIER – BOURGEAT
 Topographie : Pente modérée à forte
 Végétation : prairie à Hyparrhénia
 Erosion : nappe modérée
 Roche-Mère : Trachyte
 Horizon ferralitique : Horizon sec, limono-sableux, gris-beige, structure poudreuse, cohésion faible. On note une chute brusque de la matière organique, bonne porosité, enracinement moyen.

PROFIL RM17 :

Type du sol : sol ferralitique lessivé de Savoka
 Région : Mantasoa
 Topographie : Sommet de colline à pente 20 à 25%
 Drainage : interne et externe sont bon
 Pluviométrie : 1520 mm
 Température : 16,6°
 Roche-mère : Migmatite Granitoïde
 Végétation : Savoka à philippia (lande à bruyère)
 Horizon ferralitique : Ocre jaune, avec faible ségrégation, en tasse diffuse un peu plus rouge, limono-finement graveleux, petits débris de roche altérée indurée (diamètre : quelque centimètres), structure faible à moyenne, finement poreux, bon enracinement.

PROFIL IR7 :

Type du sol : brun rouge de prairie sur cendres volcaniques
 Région : Emplacement au Km 32 de la route d'Arivonimamo
 Prospecteur : J.RIQUIER
 Topographie : Plateau à pente nulle
 Drainage : Très bon actuellement
 Vegetation : Pseudo steppe Ctenium helychrysum, Aristida

Roche-Mère : Cendres volcaniques d'Ankaratra
Horizon ferralitique : Horizon gris-rouge, argilo-limoneux, polyédrique, cohésion forte.

PROFIL IR4 :

Type de sol : Sol ferralitique rouge enterré
Emplacement : Route National 43, colline à l'arrivée à Ampefy
Age sol : fossile
Horizon ferralitique : sous cendres volcaniques, horizon sec rouge à brun-rouge ; structure massive à polyédrique, cohésion forte, on observe un certain durcissement peut être dû à une cuisson.

PROFIL RM 2 : REGION : Massif Ankaratra
Roche-Mère : Cendres basaltiques

Analyses Physiques

N°Ech	21	22	23	24	25
Profondeur en cm	0-12	12-30	30-80	80-130	>130
Refus	Tr	Tr	0,6	3,3	16,6

Analyse mécaniques

Argile %	63,5	65,0	38,0	50,0	26,0
Limon Fin %	18,5	18,5	18,0	27,0	32,5
Limon grossier %	5,6	5,3	10,0	12,7	14,3
Sable Fin %	1,1	1,2	25,5	4,3	6,6
Sable grossier %	2,2	1,9	3,0	4,6	19,4
Matières organiques %	2,50	2,5	2,4	1,7	1,2
pH	4,3	4,5	4,3	4,4	4,6

Analyses Chimiques

Ataque TRIACIDE

N°Ech	21	22	23	24	25
Perte au feu	14,55	18,40	17,05	14,1	12,15
Résidu	4,1	3,3	2,95	1,95	1,6
SiO ₂	22,02	23,40	23,90	27,00	29,4
Al ₂ O ₃	31,35	31,70	32,50	32,5	31,75
Fe ₂ O ₃	19	19,05	20,05	19,9	19,05
TiO ₂	2,65	2,95	3,85	3,65	4,2
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,19	1,25	1,24	1,45	1,57

Eléments libres

Fe ₂ O ₃	8,54	7,86	8,54	6,48	2,03
--------------------------------	------	------	------	------	------

Tableau N°28 : Résultats d'Analyses, Région du massif d'Ankaratra (colloque ORSTOM 1970)

PROFIL ANR6 : REGION : Ambatolampy
Roche-Mère : Migmatite Granitoïde

Analyses Physiques

N°Ech	61	62	63
Profondeur en cm	0-15	15-40	>40
Refus	-	-	-

Analyse mécaniques

Argile %	36,5	32,4	18,8
Limon Fin %	3,9	4,4	10,0
Limon grossier %	3,6	3,3	5,6
Sable Fin %	22,5	22,5	29,1
Sable grossier %	32,0	35,7	35,5
Matières organiques %	4,90	2,7	2,4
pH	5,7	5,8	5,7

Eléments libres

Analyses Chimiques

Ataque TRIACIDE

N°Ech	62	63
Perte au feu	24,56	28,63
Résidu	0,27	0,13
SiO ₂	16,46	9,96
Al ₂ O ₃	7,28	1,33
Fe ₂ O ₃	47,94	55,74
TiO ₂	0,90	0,1
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,6	0,3
Fe ₂ O ₃	1,20	0,47
Al ₂ O ₃	6,56	5,11

Tableau N°29 : Résultats d'Analyses, Région d'Ambatolampy (colloque ORSTOM 1970)

PROFIL PH 2 : REGION : Moramanga
Roche-Mère : Alluvion lacustre

Analyses Physiques

N°Ech	21	22	23	24	25
Profondeur en cm	0/15	13/35	35/70	70/100	100/120
Refus	-	-	-	-	-

Analyse mécanique

Argile %	18,8	25,2	29,6	34,4	12,8
Limon Fin %	4,7	3,2	15,2	2,8	0,8
Limon grossier %	0,8	1,4	2,4	0	0,1
Sable Fin %	3,76	22,9	4,3	19,3	5,8
Sable grossier %	37,5	46,5	47,2	42	79,5
Matières organiques %	1,75	1,6	3,34	-	-
pH	5,8	5,7	5,6	5,5	5,4

Analyses Chimiques

Ataque TRIACIDE

N°Ech	21	22	23	24	25
Perte au feu	11,55	11,56	9,67	12,07	7,34
Résidu	55,87	55,33	56,61	38,27	66,65
SiO ₂	9,7	9,52	9,61	19,13	7,56
Al ₂ O ₃	19,4	19,65	19,09	26,17	17,37
Fe ₂ O ₃	2,84	2,65	2,5	2,9	1,55
TiO ₂	1,6	1,5	1,32	2,24	1,11
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,9	0,8	0,9	1,2	0,8

Eléments libres

Eléments libres

Fe ₂ O ₃	0,56	0,65	0,77	0,77	0,2
Al ₂ O ₃	3,38	6,14	5,71	6,39	3,63

Tableau N°30 : Résultats d'Analyses, Région de Moramanga (colloque ORSTOM 1970)

PROFIL PH 1 : REGION : Périnet
Roche-Mère : Migmatite

Analyses Physiques

N°Ech	11	12	13	14	15	16	17	18
Profo ndeur en cm	0/10	10/50	50/100	100/150	150/170	170/200	200/270	270/350
Refus	-	-	-	-	-	-	-	-

Analyse mécanique

Argile %	43,0	50,2	50,6	61,3	51,3	35,5	19,2	19,2
Limon Fin %	6,2	5,8	8,6	7,9	14,9	17,3	38,0	27,2
Limon grossier %	2,4	1,2	2,0	2,0	2,0	6,7	18	6,7
Sable Fin %	31,8	31,7	20,2	19,2	19,4	35,6	18,2	29,6
Sable grossier %	12,5	10,6	9,5	8,5	4,0	5,8	16,0	-
Matières organiques %	6,8	2,5	1,3	0,8	-	-	-	-
pH	4,8	5,0	5,1	5,1	5,1	5,0	5,3	5,4

Analyses Chimiques

Ataque TRIACIDE

N°Ech	11	12	13	14	15	16	17	18
Perte au feu	19,92	15,75	14,79	14,46	13,47	13,22	12,51	11,5
Résidu	20,07	16,95	11,24	11,6	9,66	1,41	0,3	12,5
SiO ₂	17,96	19,8	20,34	19,86	22,34	28,7	28,38	25,1
Al ₂ O ₃	23,01	26,92	28	28,6	29,09	28,34	27,54	27,82
Fe ₂ O ₃	13,24	17,41	22	23,71	23,4	26,46	28,05	23
TiO ₂	1,91	2,92	2,2	3	3	3	3	2,64
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,3	1,3	1,2	1,3	1,2	1,7	1,7	1,7

Eléments libres

Fe ₂ O ₃	6,97	7,84	8,73	8,7	8,96	12,22	11,98	12,2
Al ₂ O ₃	1,57	1,81	3,29	3,46	3,27	1,19	1,17	1,23

Bases Echangeables me/100g de sol

S : Somme des bases échangeables (m.e/%)

T : Capacité d'échange (m.e/%)

V : Degré de saturation = $S/T \times 100$

Ca	2,08	1,35	1,24	1,50	1,62	1,80	1,55	1,80
Mg	0,92	0,16	1,14	0,16	0,89	0,92	0,15	0,12
K	0,20	0,12	0,10	0,06	0,10	0,06	Trace	0,10
Na	0,35	0,35	0,18	0,18	0,31	0,22	0,50	Trace
S	3,55	1,98	2,66	1,90	2,91	3,00	1,75	3,62
T	14,04	9,45	6,55	5,18	10,99	21,98	12,12	15,00
V	5,20	20,90	40,60	36,70	26,40	13,60	14,40	24,00

Tableau N°31 : Résultats d'Analyses, Région de Périnet (colloque ORSTOM 1970)

PROFIL IR3 : REGION : Ampefy
Roche-Mère : Trachytes

Analyses Physiques

N°Ech	31	32	33
Profondeur en cm	0-10	10-25	25-45
Refus	-	-	-

Analyse mécaniques

Argile %	22,2	12,0	6,0
Limon Fin %	19,0	14,0	13,8
Limon grossier %	7,4	6,1	6,8
Sable Fin %	28,6	27,6	37,4
Sable grossier %	21,5	39,5	36,7
Matières organiques %	4,9	1,0	0,3
pH	6,0	6,5	6,6

Eléments libres**Analyses Chimiques**

Ataque TRIACIDE

N°Ech	31	32	33
Perte au feu	10,66	3,12	2,1
Résidu	44,22	74,7	75,78
SiO ₂	15,13	8,26	9,01
Al ₂ O ₃	15,27	6,7	6,68
Fe ₂ O ₃	11,5	5,06	4,80
TiO ₂	2,6	1,0	1,0
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,7	2,1	2,3

Fe ₂ O ₃	3,99	1,12	1,04
Al ₂ O ₃	1,25	1,75	1,4

Tableau N°32 : Résultats d'Analyses, Région d'Ampefy (colloque ORSTOM 1970)

PROFIL RM17 : REGION : Mantasoa
Roche-Mère : Migmatite Granitoïde

Analyses Physiques

N°Ech	171	172	173	174	175
Profondeur en cm	0/15	13/35	35/70	70/100	100/120
Refus	-	-	-	-	-

Analyse mécaniques**Analyses Chimiques**

Ataque TRIACIDE

(Elements grossiers)

N°Ech	171	172	173	174	175	173	174
Perte au feu	29,75	26,4	20,2	18,4	19	18,25	18,6
Résidu	32,35	30,5	35,7	34,05	24,45	41,75	39,7
SiO ₂	4,60	5,5	4,81	5,25	9,09	3,08	3,58
Al ₂ O ₃	22,00	27,52	30,85	32,25	35,05	32,05	1,58
TiO ₂	0,80	0,85	0,9	1,3	1,2	1,05	1,8
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,34	0,34	0,26	6,28	0,44	0,16	1,17

Argile %	18,8	13,0	12,0	25,5	23,5
Limon Fin %	14,0	15,5	10,0	8,5	12,0
Limon grossier %	6,0	9,5	8,5	6,5	7,0
Sable Fin %	13,4	17,0	16,3	13,1	14,0
Sable grossier %	27,4	29,8	47,6	45,3	42,0
Matières organiques %	17,5	12,3	3,5	Néglig	Néglig
Humidité	3,2	2,9	2,1	1,1	1,5
pH	5,1	5,2	5,0	5,0	5,3

Eléments libres

Fe ₂ O ₃	4,43	4,71	3,71	5,43	6,94
--------------------------------	------	------	------	------	------

Tableau N°33 : Résultats d'Analyses, Région de Mantasoa (colloque ORSTOM 1970)

PROFIL IR7 : REGION : Ankaratra
Roche-Mère : Cendres volcanique d'Ankaratra

Analyses Physiques

N°Ech	71	72	73	74
Profondeur en cm	0-100	100-200	200-300	300-400
Refus	-	-	-	-

Analyse mécaniques

Argile %	24,3	28,9	22,9	18,7
Limon Fin %	22,2	26,3	6,1	18,7
Limon grossier %	14,2	7,6	8	6,1
Sable Fin %	9,1	40,6	57	36,2
Sable grossier %	28,0	4,7	5,2	17,8
Matières organiques %	1,59	0,2	0,3	0,3
pH	6,1	6,0	5,9	6,2

Analyses Chimiques

Ataque TRIACIDE

N°Ech	71	72	73	74
Perte au feu	16,35	13,83	12,6	12
Résidu	-	-	-	-
SiO ₂	9,4	17,9	24,7	27,2
Al ₂ O ₃	33,8	33,9	32	31,5
Fe ₂ O ₃	26,8	27,4	25,2	23,8
TiO ₂	4	4,9	4,8	4,0
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,5	0,9	1,3	1,5

Tableau N°34 : Résultats d'Analyses, Massif d'Ankaratra (colloque ORSTOM 1970)

PROFIL IR4 : REGION : Ampefy
Roche-Mère : Sol ferrallitique rouge en terre sous cendres

Analyses Physiques

N°Ech	41	42	43	44
Profondeur en cm	0-100	10-80	80-400	400
Refus	-	-	-	-

Analyses Chimiques

Ataque TRIACIDE

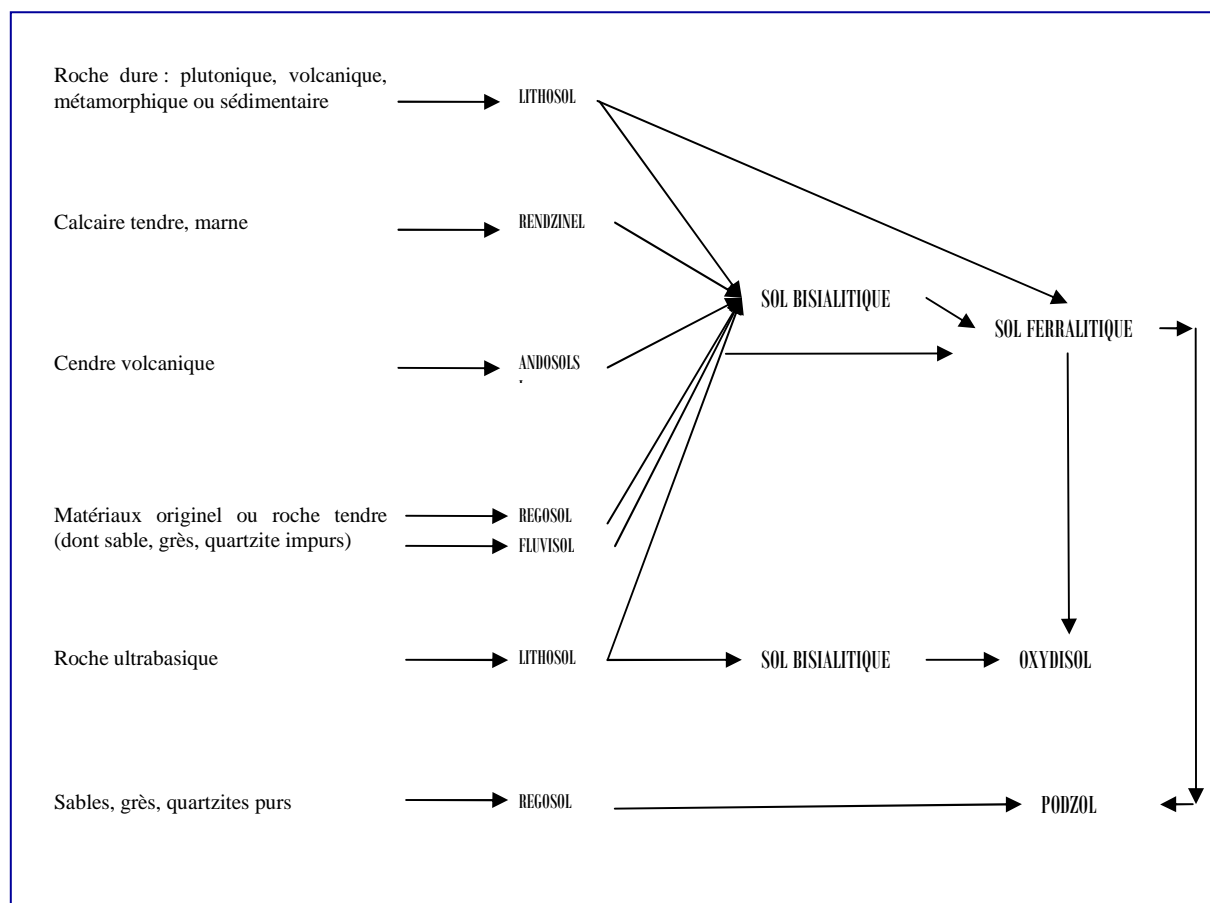
Analyse mécaniques

Argile %	22,2	27,7	26,5	
Limon Fin %	20,2	13,9	15,8	
Limon grossier %	7,4	9,6	8,8	
Sable Fin %	27,1	33,3	35,2	
Sable grossier %	21,7	14,0	15,0	
Matières organiques %	0,25	0,5	-	
pH	7,5	7,1	6,0	6,1

N°Ech	41	42	43	44
Perte au feu	7,18	9,6	10,4	7,63
Résidu	61,65	22,26	20,67	29,85
SiO ₂	21,34	29,49	31,74	29,61
Al ₂ O ₃	19,79	26,77	25,72	21,72
Fe ₂ O ₃	19,52	9,15	10,50	7,61
TiO ₂	2,6	1,17	1,2	1,25
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,8	1,9	2,1	2,3

Tableau N°35 : Résultats d'Analyses, Région d'Ampefy (colloque ORSTOM 1970)

ANNEXE IV :



**Figure 23 : Evolution pédogénétique de diverses roches sous les tropiques Humides.
SEGALEN P. (1994)**

BIBLIOGRAPHIE

- 1- AMAND (R.D) de Saint. Méthode d'analyses physiques et chimiques des terres en application aux laboratoires de l'Alaotra.
- 2- AUBERT G. (1948). et suivi-Cours de pédologie professée à l'ORSTOM. 1948.
- 3- AUBERT G. (1964). Les sols tropicaux.
- 4- AUTRET P. (1983). Latérites et Graveleux latéritiques. ISTED-LCPC. Pp 5 à 14.
- 5- BONIFAS M. (1959). Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Inspection générale des Mines et de la Géologie. 1959. 159 pp.
- 6- BOURGEAT F. (1970). Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Thèse ORSTOM, Antananarivo.
- 7- BOURGEAT F. Les formations gibbsitiques indurées à Madagascar. Tananarive. 21 pp.
- 8- CAHIER ORSTOM. Premières Observations sur l'altération de quelques roches des hautes terres Malagasy, Massif volcanique de l'Ankaratra et le massif granitique de Carion.
- 9- CAILLERE S., HENIN S. et RAUTUREAU M. (1989). Les argiles Editions SEPTIMA. Paris.
- 10- CHATELIN Y. (1972). Les sols ferralitiques. Tome 1. Historique, développement des connaissances et formation des concepts actuels. ORSTOM. Paris. 78 p.
- 11- Colloque International, Centre ORSTOM de Tananarive. 1970. Présentation de quelques profils de sols ferralitiques et de l'étude du milieu pédologique dans les environs de Tananarive.
- 12- DREYFUS. (1952). Les latérites, généralités, leur utilisation en technique routière. RGRA N°245, 1952.
- 13- DUCHAFOUR P. (1951). Lessivage et podzolisation. Rev. Forest. France. 3-10. 647-652.
- 14- DUCHAFOUR P. (1972). Processus de formation des sols. Biochimie et Géochimie. CROP Nancy, 186 pp..
- 15- DUCHAFOUR P. (1988). Abrégés Pédologie, deuxième édition revue et complétée avec 2 planches couleurs. Masson, Paris, 1988.

- 16-DUDAL R.** (1967). Sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales FAO. Rome. 83-161 pp.
- 17-ERHART H.** (1933-1935). Traité de pédologie. Strasbourg, 21.
- 18-ERHART H.** (1956). La genèse des sols en tant que phénomène géologique, esquisse d'une théorie géologique et géochimique. Paris-Masson et Cie.
- 19-FAUCK R.** (1974). Les facteurs et les mécanismes de la pédogenèse dans les sols rouges et jaunes ferrallitiques sur sables et grès d'Afrique. Cah. ORSTOM.
- 20-FOX C.S.** (1933). Latérites and laterite soils, Ind. Forest.
- 21-FOX C.** Encyclopedia Britannica. 740 p.
- 22-FRITZ B.,TARDY Y.** (1973). Etude thermologique du système gibbsite, quartz, kaolinite, gaz carbonique. Application à la genèse des podzols et des bauxites. Sci. Géol. Bull. 26,4. 1973.
- 23-GOLDICH S.S, Bergquist H.H.R.** (1947). Aluminous lateritic soil of Sierra de Barbuco Area, Dominican Republic. Cah. ORSTOM.
- 24-HERVIEU J.** (1967). Géographie des sols Malgaches. Essai synthétique / Cah. ORSTOM.
- 25-HERVIEU J.** (1966). Géographie des sols Malgaches. Essai synthétique. ORSTOM.
- 26-HOTTIN G.** (1958). Géochimie isotopique et Géochronologie. 1958
- 27-LACROIX A.** (1926). La minéralogie de Madagascar. 3 vol. spécial volume III. Paris.
- 28-MAIGNIEN R.** (1966). Intensité de la ferrallitisation. Caractérisation des différents stades. Cah. ORSTOM.
- 29-MAIGNIEN R.** (1958). Contribution à l'étude du cuirassement des sols en Guinée française. Thèse de Doctorat ES-Sciences. Strasbourg.
- 30-MAIGNIEN R.** (1969). Manuel de prospection pédologique. ORSTOM. Paris. 132 p.
- 31-MILLOT G.** (1980). Géochimie de la surface et forme du relief. Présentation Sci. Géol. Bull. 30,4.
- 32-MILLOT G.** (1964). Géologie des Argiles. Sédimentologie. Géochimie. Paris, Masson et Compagnie.
- 33-RABENATOANDRO M.** (1999). Cours de mécanique des sols. 4^e année ESPA. 1997-1998. Cours de géotechnique 5^e année ESPA. 1999.

- 34-** RAKOTOMALALA ANDRIANARY R. (1971). Etudes de Géologie de Génie Civil à Madagascar, liaison ferroviaire Antsirabe-Fianarantsoa. Service Géologique. Antananarivo.
- 35-** RAMBAUD D. (1969). Etudes sur la répartition des éléments traces dans quelques sols ferralitiques. ORSTOM. Thèse Sciences 1969, Paris.
- 36-** RAMBELOSON R. (1996). Cours de Géologie de Madagascar, 3^{ème} année EESS Sciences, Université d'Antananarivo.
- 37-** RANAIVOSON G. (1999). Cours de Géomorphologie I et II. 3^e et 4^e année. ESPA. 1996-1998.
- 38-** RANDRIAMANDIMBIARIVELO C. Propriétés Géotechniques des latérites de Madagascar. Mémoire DEA. Antananarivo.
- 39-** RATSIMBAZAFY R. (1970). Contribution au projet d'aménagement de la plaine d'Antananarivo. Université de Grenoble. Faculté des Sciences, 1970.
- 40-** RAZAFIMANDIMBY – RAHERIVAO A. (1978). Contribution à l'étude de quelques échantillons d'argile d'intérêt économique Malagasy. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, EESS. Chimie minérale, Antananarivo.
- 41-** RAZAFIMBELO E. (1998). Cours de Géologie sédimentaire Malagasy. 4^e année à l'ESPA.
- 42-** RAZAFINIMPARANY A. (1969). Les charnockites du socle précambrien de Madagascar. Service Géologique, Thèse de Doctorat.
- 43-** RIQUIER J. et BOURGEAT F. Histoires des sols ferralitiques de Madagascar.
- 44-** SECRETARIAT d'Etat aux affaires étrangères chargées de la coopération. (1975). Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques. BCEOM-CEBTP. Tome 3.
- 45-** SEGALEN P. (1995). Les sols ferralitiques et leur répartition géographique. Tome 1. Edition de l'ORSTOM Collection Etudes et Thèses, Paris. Tome 2. Editions de l'ORSTOM Collection Etudes et Thèses, Paris.
- 46-** SEGALEN P. (1964). Le fer dans les sols. ORSTOM. Paris. 130 p.
- 47-** TARDY Y. (1993). Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Masson, Paris 1993. 461 p- ISBN. 2-225-84-176-4.

ANDRIAMANATSOA Elie

RAKOTO Dominique Joseph

elie.andriamanantsoa@gmail.com

dominique.rakoto@yahoo.com

Titre du mémoire : « *Contribution à une étude interdisciplinaire des sols ferralitiques Malgaches, matériaux de construction : cas d'échantillons typiques de la Région d'Antananarivo* ».

Pagination : Nombre des pages : 93

Nombre des tableaux : 34

Nombre des figures : 23

Nombre des annexes : 4

Nombre de photos : 4

Résumé :

Les échantillons prélevés sont des sols sur des roches typiques d'Antananarivo : migmatite granitoïde, granite, granite porphyroïde, migmatite, charnockite, ankaratrite, gneiss à graphite et gneiss à grenat.

Les études géochimiques et géotechniques de ces sols permettent de les classifier et de les qualifier de bon ou de mauvais matériaux de construction.

La région d'Antananarivo se distingue en quatre délimitations pédologiques : la partie Est, la partie Nord, la partie Sud-ouest et le Centre.

Mots clés : Antananarivo, géologie, roche-mère, climat, sol ferralitique, géotechnique, Matériaux, géochimie, minéralogie.

Rapporteurs : Monsieur RAKOTOMARIA Etienne
Madame RAHARIJAONA Léa jacqueline

Promotion « Mendrika 1998-1999 »

Elie & Dominique

ANDRIAMANATSOA Elie

RAKOTO Dominique Joseph

elie.andriamanantsoa@gmail.com

dominique.rakoto@yahoo.com

Titre du mémoire : « *Contribution à une étude interdisciplinaire des sols ferralitiques Malgaches, matériaux de construction : cas d'échantillons typiques de la Région d'Antananarivo* ».

Pagination : Nombre des pages : 93

Nombre des tableaux : 34

Nombre des figures : 23

Nombre des annexes : 4

Nombre de photos : 4

Résumé :

Les échantillons prélevés sont des sols sur des roches typiques d'Antananarivo : migmatite granitoïde, granite, granite porphyroïde, migmatite, charnockite, ankaratrite, gneiss à graphite et gneiss à grenat.

Les études géochimiques et géotechniques de ces sols permettent de les classifier et de les qualifier de bon ou de mauvais matériaux de construction.

La région d'Antananarivo se distingue en quatre délimitations pédologiques : la partie Est, la partie Nord, la partie Sud-ouest et le Centre.

Mots clés : Antananarivo, géologie, roche-mère, climat, sol ferralitique, géotechnique, Matériaux, géochimie, minéralogie.

Rapporteurs : Monsieur RAKOTOMARIA Etienne
Madame RAHARIJAONA Léa jacqueline

Promotion « Mendrika 1998-1999 »

Elie & Dominique