



**CARACTERISATION MORPHOPEDOLOGIQUE  
DES SITES DE REFERENCE  
DU PROJET  
"GESTION DURABLE DES SOLS"  
(ANAE-TAFA-CIRAD)**

**M. RAUNET  
1999**

**CARACTERISATION MORPHOPEDOLOGIQUE  
DES SITES DE REFERENCE  
DU PROJET  
"GESTION DURABLE DES SOLS"  
(ANAE-TAFA-CIRAD)**

**M. RAUNET  
1999**

## INTRODUCTION

Le CIRAD et TAFE sont maîtres d'oeuvre d'un projet financé par l'AFD, intitulé "projet de diffusion de systèmes de gestion agrobiologique des sols cultivés" dont le maître d'ouvrage est L'ANAE.

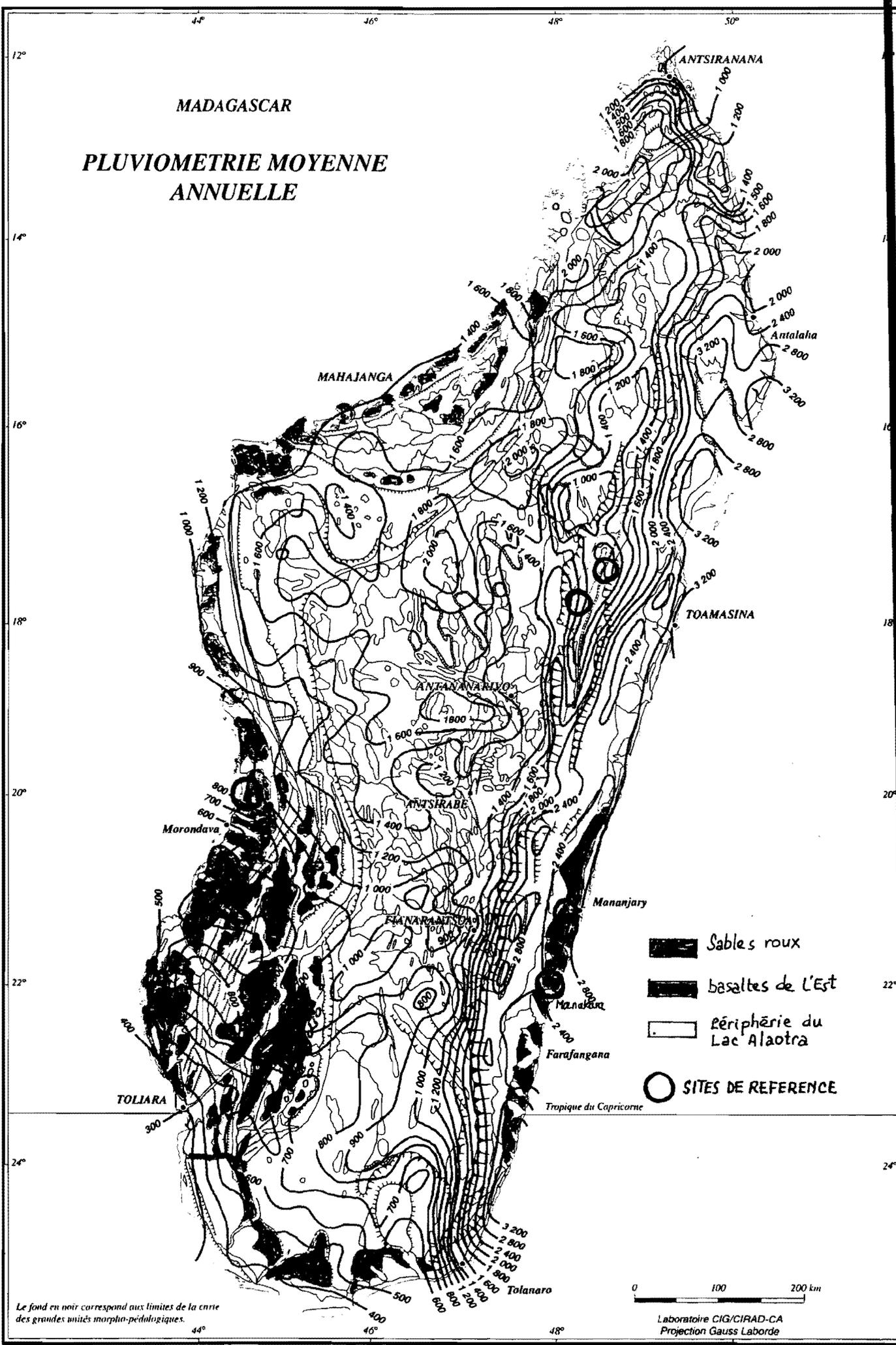
Trois régions principales font l'objet de ce projet (voir carte) :

- le lac Alaotra
- Morondava
- la Côte Sud-Est (Manakara-Mananjary).

Le présent rapport concerne les caractérisations morpho-pédologiques de ces 3 régions.

MADAGASCAR

PLUVIOMETRIE MOYENNE  
ANNUELLE



Le fond en noir correspond aux limites de la carte des grandes unités morpho-pédologiques.

-  Sables rouges
-  basaltes de l'Est
-  Périphérie du Lac Alaotra
-  SITES DE REFERENCE

0 100 200 km

Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
Projection Gauss Laborde

## RÉGION DU LAC ALAOTRA

### LE SITE DE RÉFÉRENCE DE MAROLOLO : LES COLLINES AMPHIBOLITQUES

Le site de Marololo concerne les gneiss à amphibole et les amphibolites de la rive orientale du Lac.

Cet ensemble comporte 2 types de modelés :

- des reliefs "structuraux" à pentes fortes, orientées NNW -SSE.
- des collines et piémonts à pentes moyennes, dominées par les reliefs précédents.

Le site de référence actuel de Marololo est implanté sur les piémonts, mais il est susceptible de s'étendre sur les reliefs qui les dominent. Nous décrivons donc les 2 unités.

#### **I - LES RELIEFS STRUCTURAUX SUR GNEISS A AMPHIBOLE ET AMPHIBOLITES**

Cette unité est localisée à l'Est et au Nord-Est de la cuvette ; elle présente une disposition d'ensemble orientée NNW-SSE, directement en relation avec la structure et la lithologie du substratum géologique. Ici, celui-ci est composé de roches "mélanocrates" (roches sombres), riches en minéraux "basiques" ferro-magnésiens, en particulier des amphiboles. Elles sont cependant différentes des gabbros, car elles contiennent aussi quartz et mica ; mais ces minéraux sont beaucoup moins abondants que sur granites et migmatites. Il s'agit d'amphibolites et de gneiss à amphiboles imbriqués, les secondes étant plus riches en quartz et mica que les premières qui elles, sont plus riches en minéraux ferro-magnésiens.

Le substratum Précambien présente une orientation de ses couches plissées ayant, une fois "rabotées" par les "aplanissements" multiples, une direction privilégiée NNW-SSE, qui est mise en relief et ainsi révélée, par les processus altération/érosion.

En ce qui concerne les gneiss à amphibole et les amphibolites, leur armature est constituée par la présence de barres de quartzites interstratifiées et de filons de quartz ayant également la même direction que leurs roches encaissantes. Ces roches dures peu altérées ont contribué à la mise en relief des alignements amphibolitiques.

L'altération de ces roches est plus argileuse et plus rouge que sur roches "acides" (granites, migmatites). Elle est moins favorable à la constitution de réserves aquifères (eau libre) ; seules les altérites dérivées des gneiss à amphibole en contiennent sous forme de lentilles discontinues. Ces deux caractéristiques (altérites argileuses et nappes phréatiques rares et discontinues), ajoutées à la présence d'armatures quartzitiques, ont conditionné l'évolution des versants et expliquent le modelé et les formes de la morphodynamique actuelle.

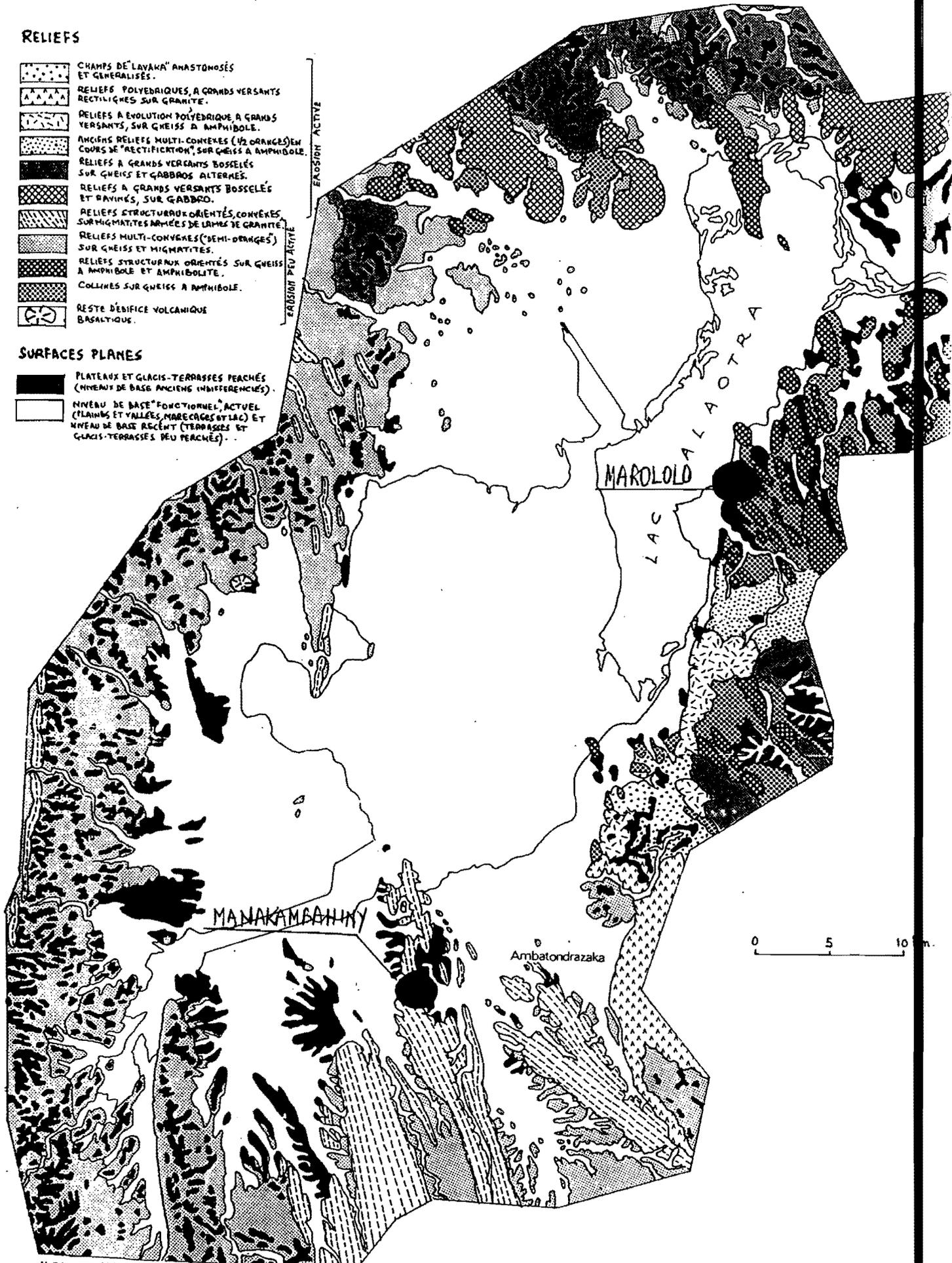
Le modelé est celui de reliefs en bandes, faciles à circonscrire, larges de 500 à 2 000 mètres, armés de façon plus ou moins apparente par des rides centrales correspondant aux passages

**RELIEFS**

-  CHAMPS DE "LAVAKA" ANASTOMOSÉS ET GÉNÉRALISÉS.
-  RELIEFS POLYÉDRIQUES, A GRANDS VERSANTS RECTILIGNES SUR GRANITE.
-  RELIEFS A ÉVOLUTION POLYÉDRIQUE, A GRANDS VERSANTS, SUR GNEISS A AMPHIBOLE.
-  ANCIENS RELIEFS MULTI-CONVEXES (1/2 ORANGES) EN COURS DE "RECTIFICATION", SUR GNEISS A AMPHIBOLE.
-  RELIEFS A GRANDS VERSANTS BOSSELÉS SUR GNEISS ET GABBROS ALTERNÉS.
-  RELIEFS A GRANDS VERSANTS BOSSELÉS ET DAVINÉS, SUR GABBRO.
-  RELIEFS STRUCTURAUX ORIENTÉS, CONVEXES SUR MIGMATITES ARMÉES DE LAMES DE GRANITE.
-  RELIEFS MULTI-CONVEXES ("DEMI-ORANGES") SUR GNEISS ET MIGMATITES.
-  RELIEFS STRUCTURAUX ORIENTÉS SUR GNEISS A AMPHIBOLE ET AMPHIBOLITE.
-  COLLINES SUR GNEISS A AMPHIBOLE.
-  RESTE D'ÉLÉMENT VOLCANIQUE BASALTIQUE.

**SURFACES PLANES**

-  PLATEAUX ET GLACIS-TERRASSES PEACHÉS (NIVEAU DE BASIS ANCIENS INDIFFÉRENCIÉS).
-  NIVEAU DE BASIS "FONCTIONNEL", ACTUEL (PLAINS ET VALLÉES, MARECAGES ET LAC) ET NIVEAU DE BASIS RÉCENT (TERRASSES ET GLACIS-TERRASSES PEU PEACHÉS).



M. RAUNET, 1984

LES PRINCIPAUX MODÈLES DE DISSECTION  
(SYSTÈMES MORPHO-GÉNÉTIQUES)  
PÉRIPHÉRIQUES AU LAC ALAOTRA

de quartzites ; leurs dénivellations par rapport aux piémonts collinaires sont de l'ordre d'une centaine de mètres. Ces reliefs assez aérés, sans figures d'érosion généralisée, ne donnent pas l'impression d'une grande vigueur. Les profils des versants sont réguliers, à tendance générale concave, à pentes comprises entre 20 et 30 % se relevant régulièrement jusqu'à la crête sommitale.

Les sols sur roches mélanocrates se reconnaissent aisément à leur couleur brun-rouge à rouge vif et non plus ocre, jaune ou rose, couleurs qui elles, caractérisent les sols sur roches acides (granites, migmatites, gneiss non mélanocrates), la roche saine n'est pratiquement jamais visible à l'affleurement. Elle est surmontée d'une grande épaisseur d'altérations bariolées (violacées, blanches, rouges...) se terminant au sommet par un sol ferrallitique de 1 à 4 mètres d'épaisseur. Celui-ci est rouge, très argileux (50 à 65 %) ; très bien structuré. La couleur rouge est le fait d'une richesse en fer plus importante de ce type de roches, d'un état plus déshydraté de ce fer et d'une meilleure liaison aux argiles que pour les sols jaunes et ocres. Ces sols possèdent une micro-nodulation composée de pseudo-sables qui les rendent très filtrants. Le pH de ces sols est voisin de 5,5 (moins acide que celui des sols ocre, jaune et rose), le complexe absorbant a une capacité d'échange (en-dessous de 30 cm) comprise entre 3 et 5 mé %, donc également un peu meilleure que pour les sols dérivant de migmatites ou de granites.

La morphodynamique affectant ce type de milieu est conditionnée par la présence ou non d'une nappe phréatique dans les altérations, elle même conditionnée par la lithologie du substratum : absence de nappe d'eau libre dans les altérites d'amphibolites strictes, nappes présentes mais discontinues dans les altérites de gneiss à amphibole. Les versants façonnés sur les premières (amphibolites) ne montrent pas de lavaka, mais des glissements lents en masse sur quelques mètres d'épaisseur, affectant l'altérite argileuses lorsque l'infiltration a été suffisante pour qu'elle soit gorgée d'eau. On observa alors des bosselements, associés à des ravinements, de même type que sur les massifs de gabbro, mais ici beaucoup moins généralisés. Sur les secondes (gneiss à amphibole) les altérites glissent sur une nappe d'eau libre et opèrent un cisaillement dans la partie supérieure plus rigide ; cela conduit à la formation de lavaka. Ceux-ci ne sont cependant jamais très denses ; ils restent au stade "lavaka unique" sans atteindre (ou très rarement) le stade paroxysmal de "lavaka coalescents" comme par exemple on peut l'observer sur les migmatites, au Sud, au Sud-Est et au Nord de la cuvette.

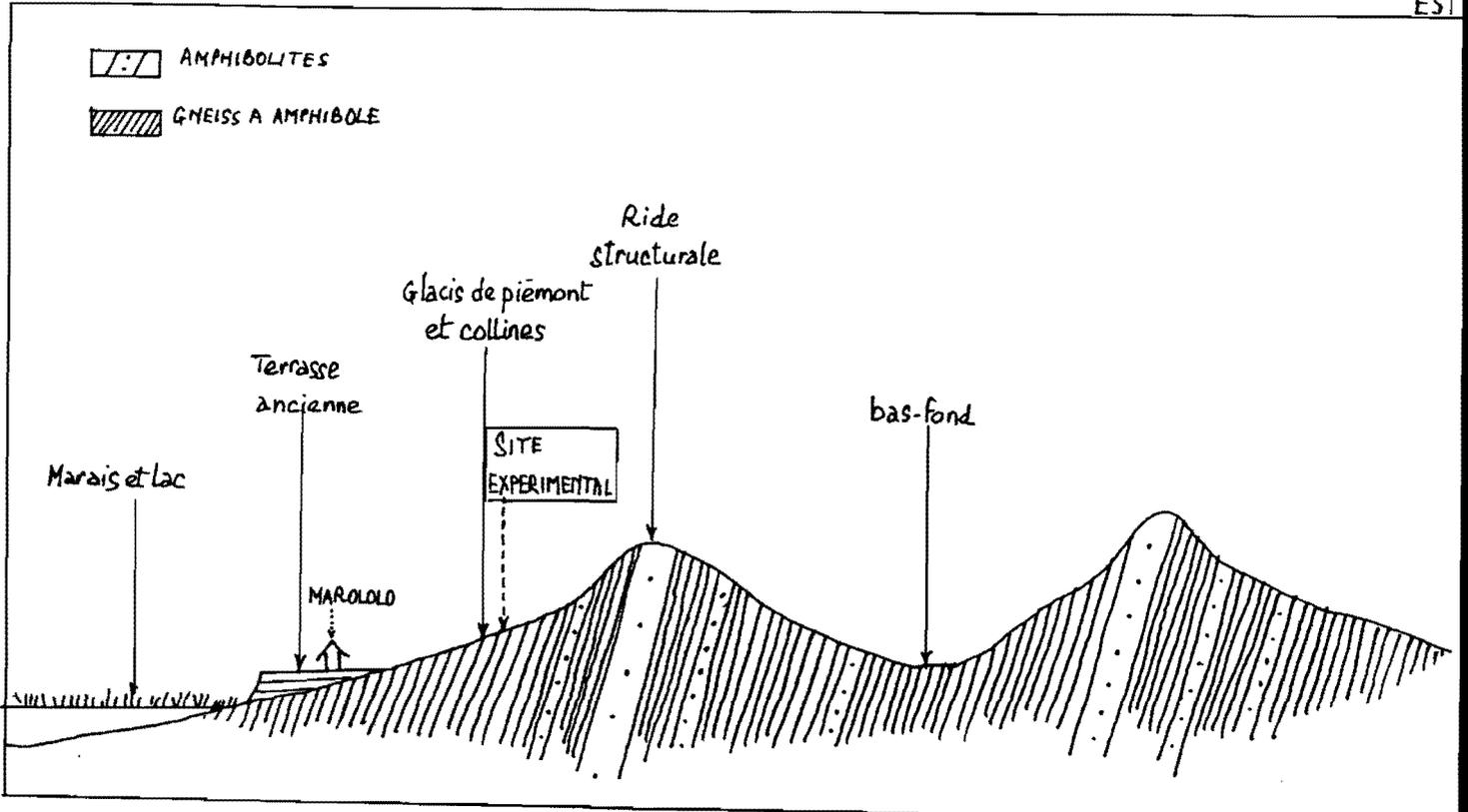
Les facteurs favorables tiennent à la qualité relativement bonne des sols rouges comparés aux autres "sols de tanety" : propriétés physiques (structure, texture), et chimiques sont meilleures. En particulier ces sols rouges ont des pH un peu moins bas que les autres.

Les facteurs défavorables sont évidemment d'ordre topographique : contraintes dues à la pente elle-même (supérieure à 20 %) et contraintes dues au déclenchement éventuel de l'érosion qui impose des précautions anti-érosives.

Ces reliefs ne sont pas prioritaires actuellement. Nous proposons de les boiser comme c'est déjà fait sur un certain nombre de sites entre Imerimandroso et Ambohidava. Mais si leur mise en valeur agricole devait être envisagée dans l'avenir, les dispositifs anti-érosifs seront indispensables. Les techniques "bio-culturelles" : plantes de couvertures, cultures associées,

QUEST

EST



LAC ALAOTRA : SITE DE REFERENCE DE MAROLOLO

bandes alternées, non-travail du sol, haies bocagères.

## 2. LES COLLINES SUR GNEISS A AMPHIBOLE ET AMPHIBOLITE

Cette unité de milieu est associée géographiquement à l'unité précédente. Elle est soutenue par le même substratum géologique. La différence qui explique ici un modelé plus doux, est, d'une part l'absence ou la moindre fréquence de barres quartzitiques et de filons quartzeux et d'autre part, la plus grande fréquence de gneiss à amphibole par rapport aux amphibolites. Ces différences suffisent à expliquer qu'entre des reliefs allongés pentus se trouvent des "gouttières collinaires" à pentes plus faibles.

Les altérations sur "roches amphibolitiques" sont épaisses (plusieurs dizaines de mètres) et assez bariolées (dominance des "violet" et "blanc" par rapport aux "rose"). Les roches intactes ne sont jamais visibles. Les altérations sont terminées dans leur partie supérieure par un sol ferrallitique de couleur rouge. Une nappe phréatique imbibe généralement la base des altérites relativement riches en sables (ce qui semble une condition nécessaire, sinon suffisante, pour la constitution d'une nappe d'eau libre). Ces considérations sont importantes car déterminantes sur l'évolution des versants vers l'état où on les observe actuellement.

Le modelé est constitué de larges interfluves collinaires, concavo-convexes ; ces reliefs sont généralement dominés en amont par des rides plus pentues (voir ci-dessus) avec lesquelles elles se raccordent par des concavités ; ils dominent à leur tour, par des convexités cette fois, des bas-fonds fonctionnels à nappe sub-affleurante et des petites vallées. Ces versants se prolongent souvent, en aval, selon une bonne continuité concave, par des terrasses récentes. Mises ensemble, ces unités de milieu forment de larges blocs d'un seul tenant, topographiquement homogènes, circonstance très favorable pour l'utilisation agricole.

Les sols sont assez comparables à ceux qui ont été décrits précédemment sur les reliefs dominants.

Ce sont des "**sols ferrallitiques fortement désaturés**" (comme tous ceux de la région), épais de plusieurs mètres, rouges à brun-rouges, argileux, très bien structurés, très drainants.

Comparés aux sols ocre, jaune ou rose développés sur altérites de "roches acides" ces sols sur "roches basiques", en diffèrent par leur couleur rouge plus vive, leur plus forte teneur en argile, aux alentours de 60 % contre 30 % (après destruction des "pseudo-sables" nodulaires ferrugino-kaoliniques), une plus faible teneur en sables quartzeux (moins de 20 % contre 60 %), une structure très développée (alors qu'elle est massive sur les sols de "roches acides").

Du point de vue de leurs caractères analytiques ils diffèrent assez sensiblement des sols jaune, ocre et rose sur roches acides (granites, migmatites) bien que restant cependant à un niveau chimique très bas : la somme des bases échangeables est toujours inférieure à 3 mé % (elle est inférieure à 1 mé % sur les sols ocre et jaune) ; la capacité d'échange est inférieure à 5 mé % (elle est inférieure à 3 mé % sur les sols ocre et jaune). Le pH est aux alentours de 5,5 (contre 5 sur migmatite, granite et gneiss). La teneur en phosphore total (Olsen) est inférieure à 20 ppm. Le taux de matière organique est de l'ordre de 2,5 %

(comparable aux autres sols) ; le rapport C/N est voisin de 9 (minéralisation et humification rapides des débris végétaux).

Concernant l'aptitude culturale, ces collines à sols rouges constituent le type de milieu le "moins pauvre" pour l'agriculture pluviale, de la région du lac Alaotra. Ce jugement est étayé, autant, sinon davantage, par les qualités relatives de cet ensemble comparativement aux autres unités de milieu que par ses qualités purement intrinsèques.

Les sols sur roches amphibolitiques sont, avec les sols sur gabbro les moins défavorables, autant par leurs propriétés physiques (stabilité structurale, porosité) qui en font d'excellents supports à l'enracinement que par leurs propriétés chimiques. Ces sols sont moins acides que les autres et leur complexe absorbant est d'un niveau moins bas.

La topographie, les conditions d'accès, l'homogénéité, la taille et la forme des unités, sont également des conditions extrêmement favorables à la mise en valeur. Les pentes sont inférieures à 15 % et régulières ; le tracé des pistes d'accès et de traversées est facilité par le fait que ces unités sont en continuité, sans ruptures de pente, avec les terrasses et niveaux de base actuels.

Bien que ceux-ci présentent une stabilité structurale relativement bonne (comparée à celle des autres sols de tanety), les pentes de 10 à 15 % régulières (non coupées d'obstacles) et affectant de longs versants sont propices à l'érosion en nappe puis à sa concentration en ravinements.

## REGION DU LAC ALAOTRA

### LE SITE DE REFERENCE DE MANAKAMBAHINY : LES GLACIS-TERRASSES ANCIENS

Ces "surfaces planes" perchées autour de la cuvette de l'Alaotra forment plusieurs ensembles distincts, soit des **plateaux sommitaux** des collines migmatitiques (roches acides), entre 840 et 1000 mètres d'altitude, sans orientation sensible et privilégiée vers le lac Alaotra, découpés irrégulièrement en forme de lanières et dominant le moutonnement des "demi-oranges", soit des **glacis-terrasses**, comme ici, situés à moins de 840 mètres d'altitude, qui eux, présentent généralement une nette inclinaison vers la cuvette du lac Alaotra ; leur pente est sub-horizontale à l'aval et se redresse, quand elle n'est pas interrompue et isolée en buttes, par une concavité pouvant atteindre 3 %, en amont. La taille et le développement des glacis-terrasses sont de plus en plus larges et leurs dénivellations au-dessus des plaines actuelles sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que l'on descend vers l'aval.

Ces surfaces d'aplanissement sont le résultat de mécanismes endogènes intervenant en conditions de climat humide et probablement forestières. Ces processus se manifestent par la dynamique des altérites argilo-sableuses très épaisses, gorgées par une nappe phréatique profonde. C'est l'abaissement du niveau de base général (ici lié à l'enfoncement de l'exutoire du Maningory) qui provoque un déséquilibre dans le maintien et la cohérence de ces altérites et qui est à l'origine, sur l'ensemble du bassin, d'un enchaînement et d'une imbrication de processus "de fluage" ; ces altérites fluent vers le niveau de base abaissé et s'étalent aux pieds des "reliefs pourris", dont les versants reculent, laissant la place à des "glacis-plaine" de fluage. Les matériaux de "fluage" issus d'une telle dynamique de mise en place ne sont ni des alluvions ni de vrais colluvions dans leurs acceptions habituelles ; c'est pourquoi, en l'absence de terme consacré exprimant ce concept, nous parlerons de "**matériaux de fluage** ou "**d'altérites fluées**".

Une partie importante des altérites "fluées" est évacuée par les axes d'écoulement qui sinuent sur le nouveau niveau de base (avant de rejoindre l'exutoire). Ces "glacis-plaines" sont donc couverts de matériaux argilo-sableux issus de la redistribution horizontale des altérites gneissiques ou migmatitiques. En aval des glacis-plaines, si l'exutoire est insuffisant à évacuer rapidement les eaux et matériaux, (ce qui a été le cas à l'amont de l'exutoire du Maningory) ceux-ci s'accablent en alluvions "fluvio deltaïques" ou lacustres. Les matériaux argilo-sableux transportés par les eaux courantes et soumis à leur compétence variable dans le temps et l'espace, subissent alors une nouvelle redistribution, sous forme de tri granulométrique : sables (régimes turbulents) alternés avec argiles (régime de décantation lente). Cette répartition des matériaux est conforme à ce qu'on observe actuellement dans les plaines périphériques au lac Alaotra, entre les tanety et les marais à "zozoro". Il y a un passage latéral d'amont (glacis-plaine) en aval ("plaine") de la cuvette, entre "argiles sableuses de fluage" peu triées et "argile-sable" alluviaux triés et stratifiés.

Les surfaces d'aplanissement actuellement perchées étaient autrefois des niveaux de base pour les nappes phréatiques, comme l'est maintenant la cuvette périphérique du lac Alaotra. Cela implique logiquement que nos plateaux et glacis-terrasses actuellement couverts de **sols ferrallitiques jaune ou ocre** étaient à l'origine des sols hydromorphes gris comme le sont les sols de la cuvette actuelle. Or ce fait est conforté par la présence systématique sous les reliques des "surfaces d'aplanissement" d'une "plinthite" (argile kaolinique grise marmorisée de rouge) à une profondeur de 2 à 4 mètres, sous le matériau actuellement jaune de surface.

Cette plinthite est l'héritage laissé par une ancienne fluctuation de nappe phréatique, celle-ci ayant actuellement une zone d'action située à plus de 10 mètres de profondeur en général.

Le jaunissement superficiel, que l'on observe dans les sols des glacis-terrasses et qui nous les font classer en "sols ferrallitiques", est dû à l'oxydation postérieure des matériaux remaniés (argile sableuse de fluage). Entre les deux matériaux, l'un autochtone tacheté profond, l'autre allochtone jaune superficiel se trouve très souvent une ligne de gravats ("stone line" des anglo-saxons) composée de fragments quartzeux issus du "fauchage" des filons du socle lors de la dynamique de fluage des altérites migmatitiques.

Le matériau, issu de l'altération des gneiss et migmatites, présente, du haut vers le bas, les caractéristiques suivantes :

. **Matériau jaune ou ocre sans taches** ; une tendance à la marmorisation peut cependant apparaître à la base de ce matériau de 2 à 5 mètres d'épaisseur. La texture, limono-argilo-sableuse, est riche en sables quartzeux grossiers, parfois très grossiers et même gravillonnaires ; ces derniers résultent manifestement, car étroitement lié à leur présence, du démantèlement et du fractionnement des filons de quartz traversant les gneiss et migmatites. La présence de graviers quartzeux répartis sans tri dans le matériau jaune, accompagne souvent la présence d'une "stone line" de cailloux quartzeux anguleux à la base de ce matériau, et de filons de quartz parfois infléchis et fragmentés en place, mais peu déplacés, dans l'altérite gneissique rose autochtone sous-jacente. Quant aux sables fins moyens et une partie des sables grossiers, ils proviennent du ciment quartzeux, libéré par l'altération et le remaniement consécutif au fluage, inhérent aux roches grenues.

Minéralogiquement, l'argile est composée de kaolinite, de gibbsite et de goéthite. Ce matériau, s'est mise en place par "fluage" des altérites des "reliefs pourris" préexistants. Gorgées, déstabilisées et mobilisées par la nappe, elles se sont étalées aux pieds des versants qui fondaient en reculant (image du morceau de sucre mouillé, qui s'étale).

Le matériau jaune-ocre est massif, sans structure, actuellement apte au cisaillement vertical et au recul des parois par pans rigides entiers, comme on peut l'observer dans les lavaka.

. **Une nappe de gravats ("stone-line") peu épaisse, discontinue et facultative**, peut matérialiser ou souligner le passage entre le matériau jaune-ocre supérieur et l'altérite tachetée sous-jacente. Elle est composée de fragments anguleux de quartz, ayant pour origine les filons qui traversent le socle et dont une partie, nous l'avons vu, se "perd", après "fauchage" et démantèlement au sein du matériau jaune

supérieur, selon une dynamique particulière liée au "fluage" et à l'engorgement par des nappes phréatiques "circulantes".

. **Une zone tachetée ou plinthite** de 1 à quelques mètres d'épaisseur, affectant l'altération en place de la roche. Marbrures et trame ferrugineuses rouges, sont associées à un fond grisâtre defferifié. Il s'agit d'un matériau d'altération ferrugino-kaolinique en place (non ou peu remanié excepté quelques tassements et cisaillements) ; la kaolinisation est bien avancée et les minéraux primaires résiduels de roche sont peu nombreux (excepté le quartz bien entendu). La marmorisation de ce matériau est un héritage et non une différenciation par des processus actuels ; c'est l'empreinte de la fluctuation d'une nappe phréatique ; celle-ci a été rabattue depuis longtemps ; elle a suivi l'évolution et la descente des niveaux de bases aval.

. **La roche pourrie rosâtre**, située 3 à 6 mètres sous la surface, ne présentant plus de marmorisation, est à un stade d'argilification moins avancée que celui des matériaux du dessus. On y reconnaît la structure de la roche d'origine, (les foliations, les alignements de minéraux, les filons de quartz etc...). C'est ce qu'on appelle généralement la "zone d'altération", le "sol" ferrallitique étant un mot plutôt réservé au matériau coloré homogène supérieur. Cette roche pourrie peut être extrêmement épaisse, jusqu'à 50 mètres ; elle constitue le "coeur" des reliefs de dissection de la surface fin-tertiaire. Elle est imbibée par l'eau libre saturante (nappe phréatique d'altérite) alimentée par l'infiltration des eaux de pluies dans les matériaux supérieurs très filtrants.

Les sols (au sens strict du terme) concernent la partie supérieure jaune-ocre de la séquence différenciée précédente.

Leur couleur, leur profondeur, leur composition minéralogique (kaolinite, gibbsite, oxyde de fer plus ou moins hydraté), leurs caractéristiques chimiques (pH, complexe absorbant) nous les font ranger dans les **sols ferrallitiques fortement désaturés**.

Ces sols ont les caractères physiques suivants : leur profondeur utile est grande (plus de 2 mètres) ; il n'y a pas d'obstacle à la pénétration racinaire, la structure est peu développée, massive, très fragile en surface, poussiéreuse et soufflée quand elle est travaillée, compte tenu de la présence de "pseudo-sables" et de la faible teneur en matière organique ; la texture (appréciation synthétique de terrain) est limono-sableuse, parfois sableuse. L'analyse granulométrique de laboratoire, sans destruction des pseudo-sables, donne en moyenne : 5 à 10 % d'argile, 20 % de limons, 30 à 35 % de sables fins et 40 % de sables grossiers. Après destruction des pseudo-sables cette granulométrie devient : 20 % d'argile, 15 % de limon, 25 % de sables fins, 40 % de sables grossiers.

Après destruction des "pseudo-sables" la granulométrie se déplace vers le pôle argileux : 20 % d'argile, 15 % de limon, 25 % de sables fins et 40 % de sables grossiers.

Leur comportement hydrique au champ est celui de sols sableux à limono-sableux ; la capacité de rétention en eau "utile" (différence entre humidités à pF 4,2 et à pF 3) est très faible (2 à 5 %) ; l'infiltration dans ces sols, est extrêmement rapide.

Les caractères chimiques sont défavorables (comme pour les sols jaune et ocre sur migmatite et gneiss) : carence forte en phosphore (10 à 20 ppm de phosphore "assimilable", méthode Olsen), en calcium, magnésium et potassium ; la capacité d'échange est inférieure à 3 mé %. La somme des bases échangeables est inférieure à 1 mé %. Le pH est compris entre 5 et 5,5 en surface et de l'ordre de 5 en profondeur. Il faut donc s'attendre à des toxicités aluminiques et à des carences en oligo-éléments (dont le bore).

Les grandes superficies facilement accessibles de cette unité de milieu constituent un facteur favorable à leur utilisation en agriculture pluviale. D'ailleurs une grande partie de ces sols a été cultivée dans le passé, à grande échelle et souvent en mécanisation lourde (maïs, manioc), de sorte que leur état de "dégradation" est assez avancé (structure "soufflée", semelle de labour, compaction du niveau 25/35 cm, baisse du stock organique, acidification...).

Leur mise ou remise en culture devra mettre en oeuvre des techniques de régénération et conservation de la fertilité du sol, devant viser à refaire une structure favorable, à remonter le stock de matière organique (objectif 3 %), à limiter au maximum tout ce qui favorise le lessivage des bases (recyclage par des plantes de couverture) .

Les pentes, sans êtres fortes (moins de 3 %), peuvent être longues et donc favorables au ruissellement érosif. La meilleure protection sera la couverture permanente et le non-travail du sol. L'aménagement anti-érosif lui-même ne semble pas s'imposer, sinon devoir se limiter à la création de cordons isohypses ou levées plantées d'arbres coupant le ruissellement.

## LES SABLES ROUX DE L'OUEST SITES DE MORONDAVA

### ◆ Mode de mise en place des "sables roux"

A la fin de l'ère tertiaire, d'immenses nappes détritiques argilo-sableuses (vastes cônes d'épandage coalescents) ont recouvert pratiquement tout l'Ouest sédimentaire malgache. Ce sont les dépôts corrélatifs de la surface d'aplanissement fini-tertiaire qui a raboté et évacué une partie du manteau d'altération préexistant du socle cristallin. Cette même "surface" se poursuivait sans discontinuité topographique sur le sédimentaire qu'elle a tronqué de la même façon pour y déposer ensuite ses produits issus du socle suivant une épaisseur plus ou moins grande en fonction des "creux" à combler.

Les géologues ont appelé génériquement cette formation détritique "carapace sableuse". L'érosion quaternaire a ensuite fait son oeuvre en dégageant (dans le sédimentaire sous-jacent) en plateaux les "zones dures" (calcaires, grès consolidés...) et en creusant en gouttières les "zones tendres" (grès peu consolidés, schistes, marnes, argilites...). La carapace sableuse a ainsi été "reprise" et redistribuée en partie, en différents "glacis" locaux façonnés par les processus d'érosion en nappe. Les phases humides du quaternaire ont par la suite "rubéfié" la surface de ces formations détritiques en place ou remaniées, que les géologues ont appelés "sables roux", autre terme générique, désignant toutes les couvertures rougeâtres qui cachent l'observation des séries sédimentaires antérieures.

Depuis, le terme de "sables roux" est devenu un terme courant entré dans l'usage général des géographes, pédologues, géomorphologues et agronomes lorsqu'ils raisonnent à échelle régionale. Ce n'est cependant pas quelque chose de parfaitement homogène, quand on descend dans des observations plus fines. Les "sables roux" en tant que matériau superficiel ont subi de multiples remaniements alluviaux, colluviaux ou éoliens. D'autre part, la carapace sableuse n'est pas altérée partout en sables roux. Dans certaines conditions, elle a pu donner des sols hydromorphes et des "sables blancs". Il faut toujours avoir à l'esprit que le terme de "sables roux" ne désigne pas en toute rigueur une "formation superficielle" mais une pédogénèse ayant affecté postérieurement ce dépôt plus ou moins remanié.

L'épaisseur du dépôt détritique est de quelques dizaines de mètres à quelques mètres. A l'état initial (sous la surface pliocène avant remaniement) il est composé d'une masse sablo-argileuse sans stratification nette donc sans triage, mais avec parfois des intercalations de cailloutis ou galets ; il est composé minéralogiquement de quartz, kaolinite et oxydes de fer. Ces dépôts sont très comparables à ceux du "Continental terminal" ouest-Africain et aux formations "Barreiras" du Brésil, également pliocènes. La pédogénèse a "rubéfié" et très partiellement argilié (sols ferrugineux tropicaux ou ferrallitiques) la partie supérieure, sur 1 à 5 mètres. En dessous, la couleur s'éclaircit et le matériau devient marmorisé, héritage ou action actuelle d'une nappe phréatique.

L'origine des matériaux détritiques est constitué du matériau altéritique épais des roches cristallines du socle, à différents niveaux de troncature de ce manteau (de l'argile supérieure

“ferrallitisée” ou “plinthitique” à l’arène profonde) et des matériaux arrachés aux formations gréseuses et gréso-argileuses du karoo (Isalo).

On aurait reconnu globalement deux séries de matériaux : une série inférieure argilo-sableuse (décapage d’altérations assez argilifiées donc “évoluées”, de type ferrallitique) et une série supérieure gréso-sableuse (décapage de grès tendres, de racines d’altérations non argilifiées et d’arènes). On a montré que les nappes détritiques, avec une pente générale de 1 à 3 ‰, se poursuivaient en pente douce (glacis) sous le niveau marin. Elles se sont donc déposées en période de régression marine. L’érosion marine a été importante dans le bassin de Majunga du fait de la montée récente du niveau marin (affaissement actuel du Nord du Pays) jusqu’aux calcaires éocènes, alors que dans le bassin de Morondava (entre la Tsiribihina et le Fieherenana) les sables roux se sont maintenus à l’avant des plateaux éocènes.

#### ◆ Extension

Les “sables roux” sont omni-présents, soit sur de grandes distances et de grandes épaisseurs, soit en formations discontinues et en voiles peu épais. C’est cependant dans l’Ouest et le Sud-Ouest qu’ils ont le maximum d’ampleur en superficie.

Du Nord vers le Sud, les ensembles les plus importants sont les suivants :

- **dans le bassin de Majunga** : ils n’occupent pas des ensembles d’un seul tenant très importants. Ils ont été déblayés par les réseaux hydrographiques tributaires des grands fleuves qui descendent des Hauts-Plateaux. A l’intérieur du “Pays” ils forment des “placages” de quelques mètres d’épaisseur sur les assises monoclinales sédimentaires et basaltiques, spécialement dans les sillons surcreusés et aux pieds des “cuestas” où les sables roux ont été piégés.

On trouve une épaisseur importante (plusieurs dizaines de mètres) de “carapace sableuse” à sables roux, sur les plateaux calcaires éocènes du littoral de part et d’autre de Majunga. La cuesta qui les borde au Sud-Est les a isolé et protégé des actions érosives des réseaux hydrographiques. Par contre l’érosion marine les sape en falaises littorales. Les karsts éocènes sont en partie ennoyés par les sables roux.

La région du Cap Saint-André, de Soalala à Besalampy, possède une grosse épaisseur de ces dépôts.

- **dans le bassin de Morondava-Tuléar** :

• *dans la moitié Nord du Bassin* (entre les rivières Ranobe et Tsiribihina) la carapace sableuse à sables roux couvre toutes les formations sédimentaires situées à l’arrière (à l’Ouest) du plateau calcaire Jurassique du Bemaraha et des plateaux basaltiques créacés. La grande cuesta orientale du Bemaraha les a protégé efficacement de l’érosion géologique quaternaire à partir de l’amont, canalisant les grands fleuves. Par contre dans le Betsiriry l’érosion ravinante dans les formations tendres du Karoo à partir du réseau des grands fleuves à “Baibohos”, a décapé en totalité la carapace sableuse.

• *dans la moitié Sud du bassin* (entre les rivières Tsiribihina et Onilahy), la carapace sableuse prend une ampleur très importante à l'intérieur du pays, jusqu'aux revers des plateaux gréseux du Makay et de l'Isalo.

Jusqu'aux plateaux calcaires éocènes, c'est-à-dire dans le Menabe, les sables roux sont présents partout, seulement interrompus par les vallées alluviales ; le sédimentaire sous-jacent y est pratiquement invisible. Au Sud du Mangoky une partie des sables roux a été remaniée en dunes au quaternaire ancien et moyen (voir plus loin).

A l'arrière des plateaux éocènes et jusqu'au Makay et à l'Isalo, la couverture à sables roux n'est absente que sur les zones fortement tectonisées et localement soulevées (autour du massif de l'Analavelona) où la régularité des pendages des assiettes sédimentaires a été interrompue, gênant, orientant ou déviant la sédimentation détritique pliocène puis activant sa reprise d'érosion quaternaire. C'est ainsi que les séries sédimentaires situées à l'intérieur des terres entre la Morondava et le Fieherenana, affectées par les faisceaux de failles du Sikily, de l'Ilovo et de la Sakamena, orientés NNE-SSW, ont été en partie déblayées de leur couverture détritique, laissant bien affleurer les séries sédimentaires et volcaniques (grès, grès calcaires, calcaires, calcaires-marneux, basaltes).

- *Dans l'extrême Sud* (entre les rivières Onilahy et Mandrare), les sables roux forment une large accumulation à l'arrière du plateau Mahafaly (derrière sa cuesta), en recouvrement direct (sans dénivelée) du socle cristallin arasé en "pénéplaine fini-tertiaire". C'est le seul endroit de Madagascar où la carapace sableuse à sables roux forme un net biseau de recouvrement sur le socle. Ce biseau se termine par une "cuesta" au Nord. Ailleurs, où le socle s'est soulevé, les "racines" ont été déblayées par l'érosion et le creusement de la "dépression périphérique". Dans la partie littorale de l'extrême Sud, les alternances de transgression-régression de la mer et l'action du vent ont formé au quaternaire de grands systèmes dunaires qui ont repris en partie le matériel antérieur de la carapace sableuse, et sur lequel se sont aussi formés des "sables roux".

#### ◆ Les sols

La rubéfaction quasi générale du sommet de la "carapace sableuse" que l'on observe du Nord au Sud de l'Ile, avec des pluviométries actuelles de 1600 mm (Nord du bassin de Majunga) à 400 mm (extrême Sud) permet de dire que cette rubéfaction est, dans la plupart des cas (en dessous de 1000-1200 mm) inactuelle, mais un héritage de périodes plus humides du quaternaire.

Il est d'usage de classer les sables-roux dans la catégorie des *sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés* (lessivés dans les 2/3 Nord, non lessivés dans le 1/3 Sud). Ce caractère de lessivage serait plus le fait du climat actuel puisque logique avec la répartition des pluies.

Dans la partie Nord (bassin de Majunga), les sables roux paraissent cependant plus proches des *sols ferrallitiques* (appauvris) que des sols ferrugineux tropicaux. Ils sont en effet tout à fait comparables aux "terres de barre" du Golfe du Bénin, formés sur "continental terminal".

Localement, les sables roux prennent des caractéristiques (couleur, texture, pH, matière organique) propres à leur "environnement" : position topographique, mouvements de la nappe phréatique, épaisseur du matériau détritique, nature du substratum géologique "autochtone" sous-jacent et périphérique, nature du "remaniement" (alluvial, colluvial, éolien), conditions climatiques.

**- Les sables roux "typiques" légèrement lessivés de la région sub-aride à sub-humide (600-1200 mm de pluies annuelles), de l'Ouest.**

Ce sont les sols que l'on connaît le mieux agronomiquement (Morondava, Tanandava, Ankazoabo, Manja...).

- du point de vue de la granulométrie ces sols contiennent dans les 50 premiers centimètres 70 à 85 % de sables quartzeux (dont 40 à 50 % de sables grossiers), 10 à 15 % de limons et 5 à 15 % d'argile. En profondeur, la texture devient progressivement un peu plus argileuse (10 à 25 % d'argile vers 150 cm).

- la teneur en matière organique (sous savane) est de 0,5 à 2,5 % de 0 à 10 cm, de 0,2 à 0,4 % de 10 à 40 cm. Cette teneur peut être de 2 à 9 % sous forêt.

- le pH est de 5,5 à 6,5 en surface, souvent un peu plus élevé en dessous,

- la capacité d'échange est de 5 à 10 mé% en surface (0-10 cm),

- la somme des bases échangeables est, pour les mêmes profondeurs, de 6 à 11 mé% (saturation : 60 à 90 %) et de 2 à 6 mé% (saturation : 40 à 80%) ; elle est composée en surface de 3 à 10 mé de  $Ca^{++}$ , 0,4 à 2,0 mé de  $Mg^{++}$  et 0,2 à 0,5 mé de  $K^{+}$ ,

- du point de vue physique, les sables roux présentent une structure massive (prise en masse) en profondeur, à partir de 30/40 cm. La densité apparente est de l'ordre de 1,70 ce qui est élevé. Ces sols sont impossibles à travailler en sec, et les racines des plantes cultivées ont du mal à passer ; c'est leur problème agronomique fondamental avec l'érosion en nappe. Leur capacité de rétention en eau est de l'ordre de 17 % en volume, soit 10 % en pondéral, ce qui donne en réserve facilement utilisable (RFU) : 35 mm de 0 à 50 cm, 40 mm de 50 à 100 cm, 60 mm de 100 à 200 cm.

**- Les sables roux de la région humide à sub-humide (1200 à 1600 mm) du Nord-Ouest (bassin de Majunga).**

Nous avons moins de données sur ces sols. Par rapport aux sols précédents ils sont globalement un peu plus argileux, avec 10 à 20 % d'argile dans les 50 premiers centimètres et jusqu'à 35 % en dessous. Ils montrent cependant de nets caractères "d'appauvrissement" relatif (lessivage) en argile. Leur pH est plus acide (5 à 6), leur capacité d'échange est inférieure (5 à 10 mé%) et leur taux de saturation est de l'ordre de 30 à 50 %. Ces sols ont une structure mal exprimée, mais plus nette (polyédrique) que celle des sols précédents.

En dessous de la "zone rouge" (vers 2 à 3 mètres), la zone d'altération est marmorisée par

la fluctuation d'une nappe phréatique. Il s'agit d'une "plinthite". Ces sols sont donc plutôt des sols ferrallitiques appauvris moyennement désaturés. Ce sont en fait les mêmes sols que les "terres de barre" du golfe du Bénin (Togo, Bénin, Nigéria).

#### - Les sables roux de la région aride (moins de 600 mm) du Sud

Par rapport aux sables roux typiques (600-1200 mm) ceux-ci sont généralement encore plus vivement colorés, plus sableux, non lessivés ; avec des pH comparables (5,5 à 6,5 en surface). Souvent "l'environnement" calcaire proche (plateaux éocènes, grès calcaires et sables dunaires) font que les sables roux sont mélangés à des particules calcaires ou influencés par des ruissellements et des infiltrations d'eaux imprégnées par des carbonates. Cela se répercute sur le caractère plus calcique où même calcaire des sables roux du Sud, qui dans ce cas présentent des pH de 6,5 à 7,5 et montrent parfois en profondeur des "poupées" ou des croûtes calcaires.

#### - Les sables roux évoluant en sables blancs podzoliques

Ces "podzols de nappe" sont fréquents par taches, au sein des sables roux, spécialement sous forêt sèche (forêt de Zombitsy). Ce sont des zones qui ont subi autrefois de fortes fluctuations de nappe phréatique et dont les colloïdes (argiles et hydroxydes) ont été totalement éliminés ne laissant et concentrant en place que le squelette sablo-quartzueux.

#### - Autres "variantes" des sables roux

Ils ont été décrits dans la région d'Ankazoabo par les agronomes (De Casabianca, 1966) qui, à côté des sables roux typiques, ont différencié, au vu de leurs caractéristiques et de leurs performances agronomiques :

. *des sables roux "dégradés"* avec effondrement total de leur structure de surface et de leur taux de matière organique. Performance : 0,2 à 0,9 T/ha d'arachide en traditionnel (contre 0,9 à 1,3 T/ha sur sable roux "typique"),

. *des sables roux "humifères"* dits localement "terres noires" avec un horizon organique de 15 à 20 cm (3 à 4 % de matière organique) ; performance : 1,3 à 1,7 T/ha d'arachide. Ces sols (réservés au coton) sont légèrement plus argileux, ont une meilleure rétention en eau, de meilleures qualités physiques et chimiques et une nappe phréatique qui les alimente en capillarité. Ces sols sont prisés pour le coton dans la région d'Ankazoabo. Ils occupent les zones dépressionnaires.

. *des sables roux hydromorphes* et gris tachetés engorgés en saison des pluies,

. *des sables roux vertiques, gris-jaunâtres* : en position basse, enrichis en argile par colmatage des pores par les eaux de nappe. Sols lourds à concrétions calcaires, à pH de 7 à 8.

### ◆ Végétation

La formation la plus fréquente, au-dessus de 600 mm de pluies annuelles, est la savane boisée, arborée ou arbustive. Les graminées sont *Hétéropogon*, *Hyparrhenia*, *Panicum*, *Chloris*. Les arbres dominants sont les "classiques" *Poupartia* ("sakoa"), *Tamarindus* ("kily"), *Stereospermum*, *Gymnosporia*, *Dicoma*, *Ziziphas* ("mokonazy"), *Medemia* ("satrabe"), *Hyphaene* ("satra"). Ces deux derniers sont des palmiers qui affectionnent les zones sableuses hydromorphes.

Cependant de grandes et belles forêts denses, sèches, décidues ou semi-décidues dont certaines sont en réserves forestières existent avec : *Diospyros*, *Delonix*, *Adansonia* (baobab), *Albizia*, *Dalbergia*, *Commiphora*, *Givotia*, *Bivinia*, *Sideroxylon*, *Roupellina*, *Protorhus*, *Dialium*, *Cordyla*, *Chlorophora*, *Colvillea*, *Bauhinia*, *Annona*, *Leptadenia*, *Cryptostegia*, *Tetrapterocarpon*, *Marsdenia*, *Clerodendrum*, *Euphorbia*, *Ficus*.

En zone très sèche (moins de 500 mm), la région Nord de Tuléar montre un fourré xérophile à *Didierea madagascariensis* ("sony"), *Euphorbia fiherenensis*, *Adansonia fony* ("fony") *Alluaudia*, *Pachypodium geayi*, *Gyrocarpus americanus*, *Chadsia grevei*, *Acacia sp.*, *Clerodendron globosum*, *Salvadora angustifolia*, *Terminalia divaricata*...

### ◆ Morphodynamique actuelle

Les sables roux sont affectés par un ruissellement et par une érosion en nappe extrêmement actifs. La savane graminéenne qui brûle tous les ans est appauvrie et généralement peu couvrante. Les pentes sont faibles (moins de 3%) en général mais toujours très longues, sans rien pour arrêter le ruissellement qui peut prendre une ampleur spectaculaire sous forme de lames d'eau de 10 cm de haut, s'écoulant entre les nombreuses termitières.

L'érosion en nappe peut se concentrer en bas de glacis et former des ravins appelés "sakasaka". Ce sont des gouttières de 1 à 4 mètres de profondeur (qui reste à peu près constante pour un même ravin, correspondant au niveau maximum de la nappe phréatique) à fond plat et parois verticales jusqu'en tête terminée en arrondi. Le sakasaka prend naissance en aval, à partir d'un cours d'eau et remonte le glacis-versant de façon linéaire ou sinueuse, la tête reculant par effondrement un peu plus tous les ans. Les sakasaka peuvent être initiés par les passages des troupeaux.

Les zones de sables roux sont souvent caractérisées par des champs de cuvettes ovoïdes ("ranovory") à fonds plats, de 50 à 200 mètres de diamètre, enfoncées de moins de 2 mètres. Ces cuvettes représentent un modelé de "suffosion", affaissement activé par un soutirage profond de matière colloïdales (argile, hydroxydes, silice) par la nappe phréatique située à quelques mètres sous les sables roux. En ce sens on peut parler de pseudo-dolines, par analogie avec les dolines des zones calcaires. Les cuvettes sont colmatées par des argiles qui s'accumulent lorsque la nappe phréatique y affleure en saison des pluies (abreuvoirs pour les animaux). Ces argiles colmatent les sables des fonds de cuvettes où se forment des sols hydromorphes ou des vertisols hydromorphes.

A côté des cuvettes de dimension modeste, peuvent exister aussi sur les glacis à sables roux,

de vastes zones dépressionnaires argileuses, remplies par des mares ou lacs, permanents ou non (exemple de la région d'Antsalova). Des peuplements de palmiers du genre *Medemia* les entourent parfois. Ils sont autant alimentés par les ruissellements que par l'affleurement de la nappe phréatique. Les processus de suffosion à grande échelle et d'affaissement généralisés, ne sont probablement pas étrangers à la formation de ces vastes cuvettes.

## COTE EST

### LES SITES DE RÉFÉRENCE DE MANANJARY ET DE MANAKARA :

### LES MODELÉS BASALTIQUES

Sur la Côte Est, entre Mananjary et Manakara (pluviométrie 2400 à 3000 mm), les sites de référence du projet TAFE-CIRAD sont au nombre de 4 :

- près de Manakara :

- . Site de Sakoana : plateau incliné sur basalte crétacé,
- . Site d'Ankepaka : glacis-versant sur grès du crétacé,

- près de Mananjary :

- . Site d'Ambalapaiso : colline en demi-orange sur basalte crétacé,
- . Site d'Ambatofotsy : colline en demi-orange sur basalte crétacé.

Les basaltes crétacés forment des plateaux parallèles au littoral et plus ou moins disséqués en collines convexes, larges de 10 à 30 km et situés à moins de 200 mètres d'altitude. On les observe, d'une part au Nord-Est, entre Vohémar et la pointe de la presqu'île Masoala (Rossi, 1980, considère qu'ils sont plus récents que le crétacé), d'autre part au Centre-Sud entre Vatamandry et Manambondro (au Sud de Vangaindrano). Ils appartiennent au domaine per-humide de l'Ile (plus de 2000 mm annuels, pas de mois "secs"). A l'Est, ils sont bordés soit par des complexes dunaires pleistocènes ou flandriens, soit par des formations grés-marneuses du crétacé supérieur qui les recouvrent en partie.

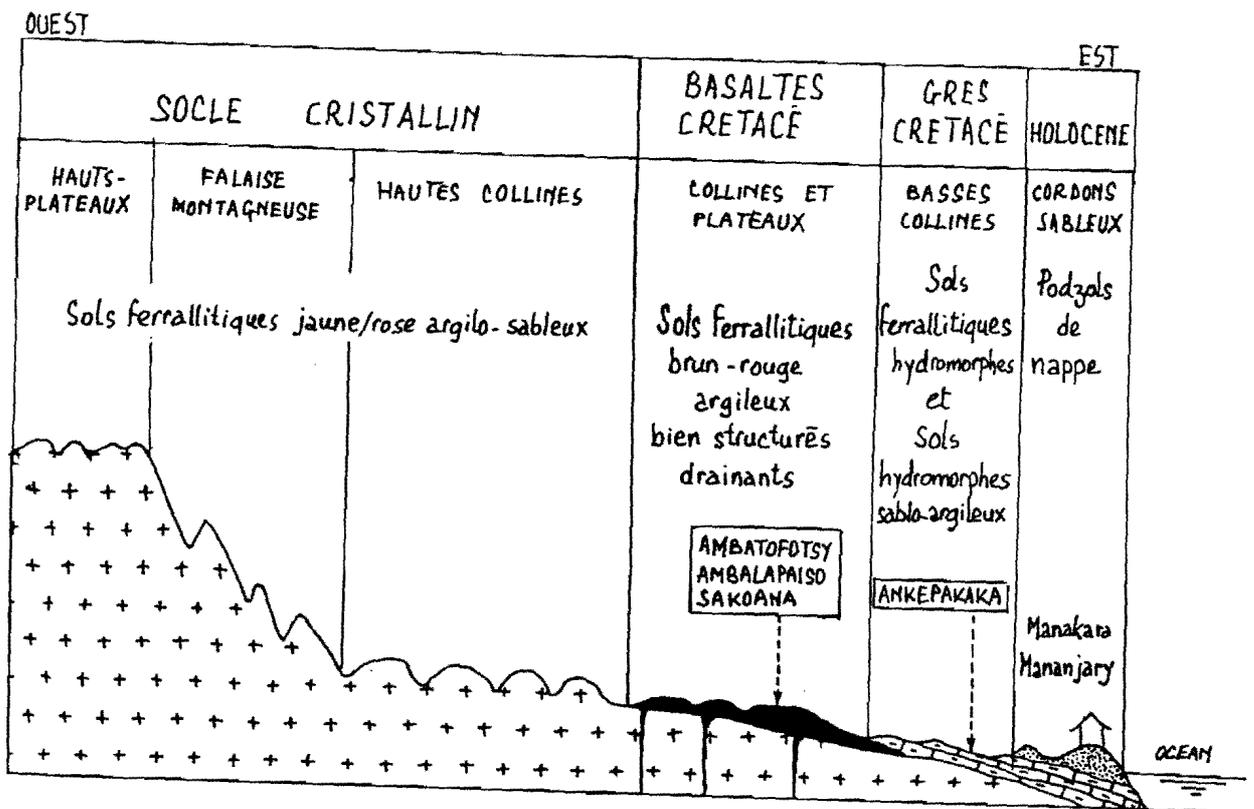
Tous ces plateaux sont interrompus et morcelés par les plaines alluviales des fleuves qui descendent des Hauts-Plateaux.

Au Nord-Est du pays les plateaux basaltiques sont dominés directement par les reliefs montagneux multifaces sur socle précambrien.

Au Centre-Sud, ces plateaux basaltiques sont en continuité à l'Ouest, avec les surfaces d'aplanissement ("pénéplaines") fini-tertiaires sur socle ou leurs reliefs collinaires dérivés. Ils font d'ailleurs partie intégrante de cette surface d'aplanissement.

Leur végétation est le plus souvent une "savoka" à *Ravenala* et *Aristida*.

Le modelé est généralement peu accidenté et prend la forme de plateaux mollement vallonnés à longs versants ou de reliefs collinaires en "demi-oranges", à croupes et versants convexes, séparés par des bas-fonds à Raphias.



SITUATIONS SCHEMATIQUES DES SITES DE REFERENCE SUR LA COTE EST

Les sols sont des sols ferrallitiques de couleur rouge foncé à brun-chocolat. Ils sont très argileux et bien structurés. L'épaisseur de ces sols est de 1 à 3 mètres. La zone d'altération est parfois peu épaisse et le basalte sain à cortex d'altération en "pain d'épice" orangé peut apparaître directement sous le sol rouge. Ces sols sont fortement désaturés, acides (pH = 5). Ils sont toujours riches en gibbsite. Ils peuvent être plus riches en matière organique (2 à 4 %) et avoir de meilleures propriétés physiques que les sols ferrallitiques jaune/rouge voisins sur socle. Ce sont les "sols à café" par excellence.

Des concrétions ou une cuirasse ferrugineuse pisolithique ou vacuolaire de 1 à 2 mètres d'épaisseur peuvent exister localement et affleurer. Dans le Sud, entre Vohipeno et Manambondro, se trouvent d'importants lambeaux de cuirasse ferrugino-bauxitique.