

**LES ENSEMBLES MORPHOPÉDOLOGIQUES  
DE MADAGASCAR**

M. RAUNET  
Mars 1997  
CIRAD



OFFICE NATIONAL DE  
L'ENVIRONNEMENT

Office national  
de l'environnement



Centre national  
de la recherche appliquée



Association nationale  
d'actions environnementales



Centre de coopération internationale  
en recherche agronomique

**FOFIFA**

**CIRAD**

**ANAE**

***LES ENSEMBLES MORPHOPÉDOLOGIQUES  
DE MADAGASCAR***

***M. RAUNET  
Mars 1997  
CIRAD***

# TABLE DES MATIERES

	PAGES
<b>1. INTRODUCTION</b>	1
<b>2. APERÇU GEOLOGIQUE</b>	2
2.1 - LE SOCLE CRISTALLIN PRECAMBRIEN	2
2.2 - LE SEDIMENTAIRE	4
2.3 - LES FORMATIONS VOLCANIQUES	12
<b>3. MORPHOPEDOLOGIE DU DOMAINE CRISTALLIN</b>	14
3.1 - LES HAUTES TERRES ET LE NORD	14
3.1.1 - LES SURFACES D'APLANISSEMENT	14
3.1.1.1 - <i>La haute surface fini-crétacée</i>	14
3.1.1.2 - <i>La surface intermédiaire méso-tertiaire</i>	16
3.1.1.3 - <i>La surface inférieure fini-tertiaire</i>	18
3.1.2 - LES HAUTES COLLINES DE DISSECTION DES SURFACES D'APLANISSEMENT	21
3.1.3 - LES RELIEFS RÉSIDUELS	23
3.1.3.1 - <i>Les granites migmatitiques stratoldes et les granites intrusifs</i>	23
3.1.3.2 - <i>Les quartzites</i>	24
3.1.3.3 - <i>Les cipolins</i>	25
3.1.4 - LES TRÈS HAUTS SOMMETS	25
3.1.5 - LES RELIEFS MONTAGNEUX DU TSARATANANA	26
3.2 - LE MOYEN-OUEST	27
3.2.1. LA SURFACE D'APLANISSEMENT FINI-TERTIAIRE	27
3.2.2. LA SURFACE D'APLANISSEMENT MÉSO-TERTIAIRE	29
3.2.3. LES RELIEFS RÉSIDUELS ET RELIEFS DE DISSECTION DES SURFACES D'APLANISSEMENT	30
3.2.4 - LA BORDURE ÉRODÉE DOMINANT LE BONGOLAVA	30
3.3 - LA FACADE ORIENTALE	30
3.3.1. LES RELIEFS MONTAGNEUX MULTIFACES FORESTIERS	31
3.3.2. LES RELIEFS DE HAUTES COLLINES CONVEXES	34
3.3.3. LES BAS-PLATEAUX, RESTES DE SURFACES D'APLANISSEMENT FINI-TERTIAIRE	35
3.4 - L'EXTREME SUD	36
<b>4. MORPHOPEDOLOGIE DU DOMAINE SEDIMENTAIRE</b>	42
4.1 - LES FORMATIONS CONTINENTALES OU MIXTES DU "KAROO" : DU CARBONIFERE AU LIAS	42

<b>4.2 - LE JURASSIQUE INFÉRIEUR GRESO-ARGILO-CALCAIRE MI-MARIN MI-CONTINENTAL</b>	<b>45</b>
<b>4.3 - LE JURASSIQUE MOYEN ET SUPÉRIEUR MARIN, CALCAIRE</b>	<b>48</b>
4.3.1 - LE JURASSIQUE MOYEN CALCAIRE	48
4.3.2 - LE JURASSIQUE SUPÉRIEUR MARNEUX ET GRÉSO-MARNO-CALCAIRE	51
<b>4.4 - LE CRÉTACÉ CONTINENTAL OU MARIN</b>	<b>52</b>
4.4.1 - LE CRÉTACÉ INFÉRIEUR ET MOYEN, GRÉSEUX	53
4.4.2 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR MARNEUX	54
4.4.3 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR CALCAIRE ET MARNO-CALCAIRE	55
4.4.4 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR GRÉSEUX ET GRÉSO-ARGILEUX	56
4.4.5 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR GRÉSO-MARNO-CALCAIRE DE LA CÔTE EST	56
<b>4.5 - L'EOCÈNE CALCAIRE</b>	<b>56</b>
<b>4.6 - LE PLIOCÈNE DETRITIQUE GRESO-SABLEUX A "SABLES ROUX"</b>	<b>59</b>
<b>4.7 - LES SYSTÈMES DUNAIRE LITTORAUX QUATÉRNAIRES</b>	<b>65</b>
4.7.1 - LE SYSTÈME DUNAIRE DU TATSIMIEN (QUATÉRNAIRE ANCIEN OU "AÉPYORNIEN INFÉRIEUR")	66
4.7.2 - LE SYSTÈME DUNAIRE DU KARIMBOLIEN (QUATÉRNAIRE MOYEN OU "AÉPYORNIEN MOYEN")	69
4.7.3 - LE SYSTÈME DUNAIRE FLANDRIEN DE LA CÔTE SUD ET DE LA CÔTE OUEST (AÉPYORNIEN OU QUATÉRNAIRE RÉCENT)	71
4.7.4 - LES SYSTÈMES DUNAIRE FLANDRIENS ET PLUS ANCIENS DE LA CÔTE EST	72
<b>5 - MORPHOPÉDOLOGIE DU DOMAINE VOLCANIQUE</b>	<b>74</b>
5.1 - LE VOLCANISME CRÉTACÉ	74
5.1.1 - LES PLANÈZES BASALTIQUES DES TAMPOKETSIA DU CENTRE-NORD	74
5.1.2 - LES PLANÈZES BASALTIQUES ET RHYOLITIQUES DE LA CÔTE EST	74
5.1.3 - LES PLANÈZES BASALTIQUES DU NORD-OUEST	75
5.1.4 - LES PLANÈZES BASALTIQUES ÉRODÉES DE L'OUEST ET DU SUD-OUEST	76
5.1.5 - LES PLANÈZES BASALTO-RHYOLITIQUES DE L'EXTRÊME SUD	77
5.2 - LE VOLCANISME TERTIAIRE (et début pleistocène)	77
5.2.1 - LES HAUTS SOMMETS DE L'ANKARATRA	80
5.2.2 - LES HAUTES PLANÈZES ET RESTES D'ÉDIFICES BASALTO-TRACHYTIQUES DE L'ANKARATRA	81
5.2.3 - LES PLANÈZES BASALTIQUES DE L'ANKARATRA ET DE LA MONTAGNE D'AMBRE	83
5.3 - LE VOLCANISME DU QUATÉRNAIRE MOYEN	85
5.4 - LE VOLCANISME DU QUATÉRNAIRE RÉCENT (HOLOCÈNE)	88

<b>6 . MORPHOPEDOLOGIE DU DOMAINE ALLUVIAL</b>	91
<b>6.1 - LES ALLUVIONS LACUSTRES ET FLUVIO-LACUSTRES PLIOCENES</b>	91
<b>6.2 -LES SYSTEMES FLUVIO-LACUSTRES DES PLAINES DU NORD ET DES HAUTS-PLATEAUX</b>	94
<b>6.3 - LES SYSTEMES FLUVIALES DE LA COTE EST</b>	96
<b>6.4 - LES SYSTEMES FLUVIATILES DE L'OUEST DU TYPE "BAIBOHO"</b>	97
<b>6.5 - LES SYSTEMES FLUVIATILES TERMINAUX DE LA COTE OUEST</b>	99
<b>6.6 - LES SYSTEMES FLUVIO-MARINS DE LA COTE OUEST</b>	100
 <b>BIBLIOGRAPHIE</b>	 102
 <b>PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES</b>	 107

# 1. INTRODUCTION

Il faut considérer cette synthèse, document provisoire encore imparfait, comme la "notice explicative" de la carte morphopédologique à l'échelle de 1/4.000.000<sup>e</sup> jointe. La bonne compréhension du texte nécessite d'avoir la carte (avec sa légende) sous les yeux...et inversement.

Comme partout, les composantes géomorphologiques et pédologiques sont très interdépendantes, surtout aux petites échelles. Il est donc tout à fait logique d'aborder ensemble ces deux dernières disciplines en parlant de "morphopédologie", avec une référence commune qui est la géologie dans ses aspects lithologie et structure.

Madagascar possède une histoire très ancienne (3 milliards d'années) et mouvementée des points de vue climatique, géologique et tectonique, une grande diversité de zones éco-climatiques, une très grande variété de roches et de reliefs. On s'attend donc à ce que du "croisement" et de l'intégration naturelle de tout cela émerge une non moins grande richesse morpho-pédologique ; les ensembles morpho-pédologiques (ou "unités de paysage") sont en effet l'aboutissement évolutif et la "synthèse" de toute ces composantes du milieu naturel dans leurs modalités actuelles et anciennes.

L'arrière plan et le "soubassement" géologiques seront d'abord décrits, à l'échelle adéquate, et serviront en permanence de références pour la suite.

Pour cette synthèse morphopédologique rapide, nous nous sommes continuellement référés aux travaux des "grands anciens" naturalistes (géologues, botanistes, géomorphologues, pédologues...) qui ont étudié en détail certains aspects de différentes régions de Madagascar.

Nous avons consulté en particulier les auteurs suivants auxquels nous rendons hommage et que nous remercions :

R. Battistini (Géomorphologie, 1955 à 1986, thèse 1964), H. Bésairie (Géologie, 1930 à 1973), F. Bourgeat (Pédologie, 1960 à 1979, thèse 1972), P. Morat (Botanique, 1964 à 1973, thèse 1964), G. Mottet (Géomorphologie, 1970 à 1982, thèse 1974), M. Petit (Géomorphologie, 1966 à 1971, thèse 1970), G. Rossi (Géomorphologie, 1973 à 1984, thèse 1980), J-N. Salomon (Géomorphologie, 1976 à 1986, thèse 1986), M. Sourdats (Pédologie, 1967 à 1977, thèse 1977).

## 2. APERÇU GEOLOGIQUE

Madagascar possède un puissant bati cristallophyllien précambrien central (témoin du "Gondwana"), une série d'assiettes sédimentaires (du carbonifère à l'actuel) dans l'Ouest et des roches volcaniques d'âges divers (cretacé, tertiaire et quaternaire) superposées ou intercalées aux matériaux précédents.

### 2.1 - LE SOCLE CRISTALLIN PRECAMBRIEN

Le socle Malgache est constitué en très grande partie de diverses roches métamorphiques, constituant les "racines" profondes des plissements rabotés (érosion) issus de plusieurs orogénèses précambriennes d'âges compris entre 3,5 et 0,5 milliards d'années. Ces roches métamorphiques résultent de la transformation (physique et chimique) de roches sédimentaires originelles (grès, calcaires, argiles...) accumulées dans des géosynclinaux, et reprises dans la formation de chaînes de montagne (orogénèses) avec le métamorphisme qui les accompagnait en profondeur. En effet, les sédiments et les épanchements volcaniques associés ont subi des conditions extrêmes de pression et de température, les transformant profondément (modifications chimiques, cristallisations, foliations...) en gneiss, micachistes, migmatites, cipolins, quartzites, leptynites, amphibolites...

Le pionnier de la géologie Malgache, H. BESAIRIE, a le premier, reconnu et défini trois grands "systèmes" orogéniques et métamorphiques dans le socle, séparés par des "discordances" majeures. Du plus ancien au plus récent, ces systèmes sont les suivants :

- le système de l'Androy situé au Sud du pays ; c'est le système le plus métamorphisé, à base de leptynites, gneiss, pyroxénites et cipolins,

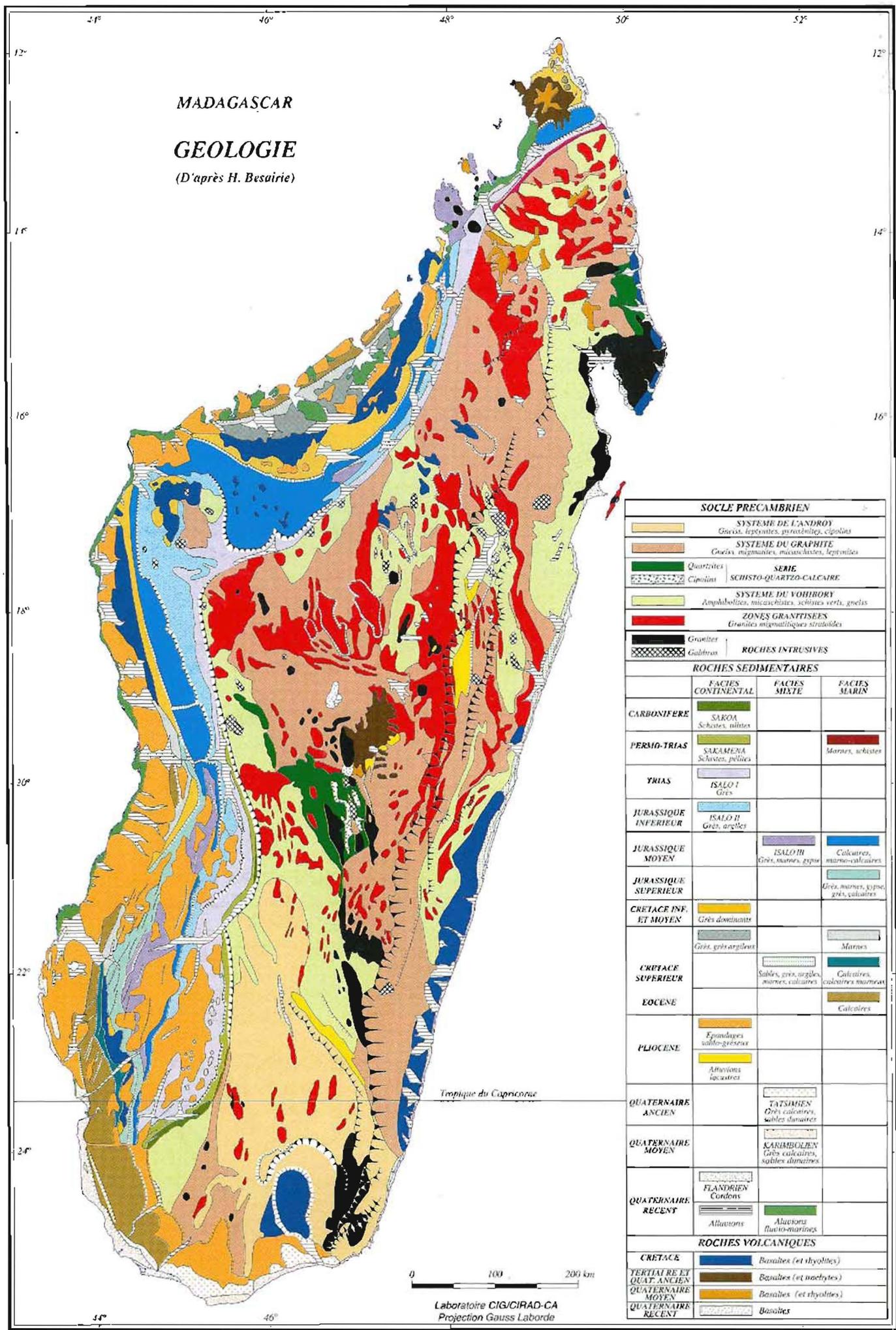
- le système du graphite qui possède la plus grande extension, et est le plus représenté sur les hautes-terres, est à base de gneiss, migmatites, micachistes, leptynites. Ce sont des roches plutôt "acides", pauvres en Fe, Mg et Ca.

- le système du vohibory, à prépondérance de roches amphibolitiques, de péridotites, de gneiss, micachistes et de schistes verts (talcschistes, chloritoschistes...). Ce sont des roches plutôt riches en Fe, Mg et Ca.

Intercalé entre le système du graphite et le système du vohibory, se place un ensemble de moindre métamorphisme qualifié de "série schisto-quartzocalcaire" (micachistes, quartzites, cipolins). C'est le "complexe" de l'Itemo, au centre du pays.

Ces "systèmes" sont subdivisés en "groupes" dont nous ne parlerons pas ici. Seul un groupe doit être mentionné, le groupe (certains parlent d'un système propre) d'Ambodiriana-Antongil situé à l'infra-graphite, c'est à dire ayant précédé immédiatement le système du graphite...

En plus de ce métamorphisme général ayant affecté les zones profondes des diverses orogénèses précambriennes, le socle a été traversé par des roches intrusives sub-volcaniques (dites "ignées"), soit acides (granites, syénites, diorites) soit basiques (gabbros...). Ces



**MADAGASCAR**  
**GEOLOGIE**  
 (D'après H. Besairie)

**SOCLE PRECAMBRIEN**

- SYSTEME DE L'ANDROY**  
Gneiss, leptynites, pyroxénites, cipolins
- SYSTEME DU GRAPHITE**  
Gneiss, migmatites, micauchistes, leptynites
- Quartzites
- Cipolins
- SERIE SCHISTO-QUARTZO-CALCAIRE**
- SYSTEME DU VOHIBORY**  
Amphibolites, micauchistes, schistes verts, gneiss
- ZONES GRANITISEES**  
Granites migmatitiques stratoides

- Granites
- Gabbros

**ROCHES INTRUSIVES**

**ROCHES SEDIMENTAIRES**

	FACIES CONTINENTAL	FACIES MIXTE	FACIES MARIN
<b>CARBONIFERE</b>	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #4caf50; border: 1px solid black;"></span> SAKOA Schistes, tillites		
<b>PERMO-TRIAS</b>	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #c8a2c8; border: 1px solid black;"></span> SAKAMENA Schistes, pélites		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #f44336; border: 1px solid black;"></span> Marnes, schistes
<b>TRIAS</b>	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black;"></span> ISALO I Gres		
<b>JURASSIQUE INFERIEUR</b>	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #42a5f5; border: 1px solid black;"></span> ISALO II Gres, argiles		
<b>JURASSIQUE MOYEN</b>		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #9c27b0; border: 1px solid black;"></span> ISALO III Gres, marnes, gypse	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #2196f3; border: 1px solid black;"></span> Calcaires, marne-calcaires
<b>JURASSIQUE SUPERIEUR</b>			<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #4db6ac; border: 1px solid black;"></span> Gres, marnes, gypse, gres, calcaires
<b>CRETACE INF. ET MOYEN</b>	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ffc107; border: 1px solid black;"></span> Gres dominants		
	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #9e9e9e; border: 1px solid black;"></span> Gres, gres argileux		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #9e9e9e; border: 1px solid black;"></span> Marnes
<b>CRETACE SUPERIEUR</b>		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black;"></span> Sables, gres, argiles, marnes, calcaires	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #00bcd4; border: 1px solid black;"></span> Calcaires, calcaires marneux
<b>EOCENE</b>			<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ffc107; border: 1px solid black;"></span> Calcaires
<b>PLIOCENE</b>	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ffc107; border: 1px solid black;"></span> Epandages sablo-gresseux		
	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ffc107; border: 1px solid black;"></span> Alluvions lacustres		
<b>QUATERNAIRE ANCIEN</b>		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black;"></span> TATSIAHEN Gres calcaires, sables dunaires	
<b>QUATERNAIRE MOYEN</b>		<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black;"></span> KARIMBOLEN Gres calcaires, sables dunaires	
<b>QUATERNAIRE RECENT</b>	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black;"></span> FLANDRIEN Cordons		
	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #e0e0e0; border: 1px solid black;"></span> Alluvions	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #4caf50; border: 1px solid black;"></span> Alluvions fluviomarines	

**ROCHES VOLCANIQUES**

- CRETACE**  Basaltes (et rhyolites)
- TERTIAIRE ET QUAT. ANCIEN**  Basaltes (et naefytes)
- QUATERNAIRE MOYEN**  Basaltes (et rhyolites)
- QUATERNAIRE RECENT**  Basaltes



Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
 Projection Gauss Laborde

intrusions sont d'âges divers, certaines contemporaines des orogénèses et tectoniques précambriennes, d'autres plus récentes en particulier crétacé et plio-pleistocènes. Contrairement aux granites migmatitiques, ces intrusions forment des massifs résiduels relativement bien circonscrits (batholites), dégagés par l'érosion après ablation différentielle des altérites (Vavavato, Carion, Ilaka, Imorona...)

Des intrusions granitiques particulières sont constituées par les "granites d'Ambatomiranty", multiples filons peu épais (10 à 100 mètres) qui forment de nombreux seuils dans les bas-fonds et des alignements sur les "tanety" de la région de Tananarive, moins altérés que les gneiss et migmatites encaissants.

Les diverses orogénèses précambriennes (dont une majeure, aurait repris l'ensemble il y a 2600 millions d'années puis d'autres vers 1890, 1125, 825 et 550 millions d'années) ont subi des phases d'érosion considérable dont les produits évacués constituent une part importante des assises sédimentaires de l'Ouest du Pays déposées en milieu marin ou continental, du carbonifère au quaternaire. Mais au fur et à mesure de son ablation, le socle malgache s'allégeant, a subi des mouvements isostasiques, avec surrection (lente ou plus rapide), entraînant à son tour des baisses de niveau de base relatif et donc de nouvelles phases d'érosion.

C'est ainsi (voir plus loin) que le socle a pu subir différentes périodes d'aplanissement ("pénéplaines") correspondant à des "niveaux de base" successifs (photos 15, 18, 19, 20, 21), étagés (profils d'équilibre momentanés des eaux de surface) qui ont pu, par la suite, être soulevés par les forces isostasiques.

Le rabotage et la "pénéplanation" des chaînes de montagnes se sont opérés de façon irrégulière dans l'espace, en fonction de la dureté des roches métamorphiques et de la vitesse de soulèvement du socle qui n'était pas la même partout. Les roches les plus granitisées, en particulier les granites migmatitiques stratoïdes, plus résistantes à l'altération, donc à l'érosion, sont restées en relief pour former lames et rides "résiduelles" dissymétriques (pendage Ouest fréquent) qui épousent généralement les axes anticlinaux des plissements. Cette granitisation a affecté essentiellement le système du graphite. Au contraire, les roches plus rapidement altérables, donc déblayables (gneiss, micaschistes...), forment des aplanissements locaux, des alvéoles et glacis de piémont, "en creux" par rapport aux reliefs résiduels granitiques.

Le système du Vohibory, composé en majorité de roches "basiques" amphibolitiques occupe les grands axes synclinoriaux du socle cristallin, souvent encadrés par les reliefs granitiques du système du graphite, à roches plus "acides".

La plupart des roches métamorphiques du socle, en particulier les roches "dures" non digérées par l'altération (migmatites, charnockites, granites, leptynites, quartzites...), montrent encore une disposition stratoïde héritée des plissements orogéniques des roches sédimentaires d'origine. Les pendages observés sont la plupart du temps très redressés, indiquant (autant que le fort degré de métamorphisme) que les chaînes montagneuses ont été arasées jusqu'à leur cœur profond.

En survol aérien, anticlinaux, syncliniaux, rides appalachiennes et crêtes monoclinaux s'observent particulièrement (photo 10) bien ainsi que les failles qui ont cisailé le tout. Le métamorphisme a donc assez bien conservé les structures sédimentaires originelles.

La "litho-structure" et la tectonique du socle conditionnent l'altération et l'érosion différentielles des roches, ainsi que la disposition du réseau hydrographique, donc en définitive l'épaisseur des altérations et les formes du relief, bref la morphopédologie au sens large (voir plus loin).

Un événement majeur pour Madagascar a été, au Crétacé, sa séparation sur son côté oriental, du vaste continent du Gondwana, avec individualisation de l'Inde, du Sri Lanka et de Madagascar (à l'Ouest, la mer était là, sporadiquement, depuis le Jurassique). Cette séparation est à l'origine de la grande faille orientale (actuellement en mer) NNE-SSW qui explique la rectitude de la côte. L'érosion régressive et les effondrements concomitants ont par la suite fait reculer l'escarpement vers l'Ouest (rebord de l'Angavo et rebord Betsimisaraka). Cette fracturation du Crétacé s'est accompagnée d'importants épanchements volcaniques basaltiques (et parfois rhyolitiques) de nature fissurale, sur toute la périphérie de l'île.

Une autre période volcano-tectonique active ayant affecté le socle s'est située au tertiaire, selon une fissuration encore sub-méridienne : volcanisme fissural de l'Ankaratra basaltique (trachytique à la fin), premières éruptions formant la Montagne d'Ambre, puis effondrements tectoniques de types graben ou mini-rift avec remplissage lacustre en bordure Est de l'Ankaratra et dans le "moyen-Est" en contrebas de la "Falaise" de l'Angavo (au niveau Ankay-Alaotra-Mangoro), enfin plus au sud, pour former le bassin allongé de Ranotsara. Ces bassins tectoniques se sont remplis d'alluvions lacustres épaisses au pliocène.

## **2.2 - LE SEDIMENTAIRE**

Le tiers occidental de Madagascar est constitué "d'assiettes" sédimentaires non plissées s'étagant du carbonifère au quaternaire. Il y a deux bassins principaux, le "bassin de Majunga" et le "bassin de Morondava-Tuléar". Les séries sédimentaires sont plus ou moins concordantes, avec un léger pendage vers l'Ouest. Elles présentent des faciès marins (peu ou moyennement profonds), continentaux ou mixtes, suivant les retraits et avancées successifs de la mer. On commence à voir quelques sédiments marins significatifs au trias, date avant laquelle Madagascar était soudée à l'Afrique. Une importante phase basaltique s'intercale dans le sédimentaire entre le crétacé moyen et le crétacé supérieur. Des formations d'épandages pliocènes issues d'une phase d'érosion majeure affectant le socle, sont venues recouvrir ou voiler en partie les affleurements des séries antérieures. Ce "dépôt" sableux est appelé "carapace sableuse" par les géologues de Madagascar. Sur cette carapace sableuse se sont formés des "sables roux" (voir plus loin) très caractéristiques et omniprésents dans l'Ouest, le Nord-Ouest et le Sud-Ouest du pays.

Le socle ne descend pas en pente douce régulière sous la couverture sédimentaire, mais il est affecté par une série de fractures NNE-SSW ou NNW-SSE délimitant horsts, grabens et fossés de subsidence et môles. A certains endroits on trouve jusqu'à 10 000 mètres de sédiments.

### **2.2.1- LES FORMATIONS CONTINENTALES DU KAROO**

Le "Karoo" est une formation continentale à dominante gréseuse qui a été définie et nommée en Afrique Australe et dont on trouve l'équivalent à Madagascar. Cette série

commence au carbonifère et se termine au jurassique moyen. L'accumulation, essentiellement continentale (malgré quelques avancées marines), s'est produite dans des bassins d'effondrement, ce qui explique la grande épaisseur des sédiments surtout au Sud-Ouest. Le Karoo à Madagascar est divisé classiquement en 3 groupes : les groupes de la Sakoa, de la Sakamena et de l'Isalo (lui-même subdivisé en Isalo I, Isalo II, Isalo III) :

- **le groupe de la Sakoa** (carbonifère à début permien) est composé à la base d'une série glaciaire (poudingues du type tillite), puis de couches de charbon, et enfin d'argilites schisteuses rougeâtres. Ces formations, toujours très érodées ("bad-lands"), sont localisées surtout dans le Sud du Bassin de Morondava-Tuléar appuyées sur le socle où elles sont hachées par des failles.

- **le groupe de la Sakamena** (permo-trias) est composé de grès, de schistes et d'argilites bariolées (vertes, rouges) il forme une bande assez régulière de 5 à 30 kilomètres de large appuyée contre le socle, dans tout le bassin de Morondava-Tuléar. Ces roches tendres sont soumises à une érosion ravinante considérable.

- **le groupe de l'Isalo** (trias à jurassique moyen) est constitué essentiellement de grès siliceux à stratification entrecroisée associés à des grès argileux et des argiles. On y trouve des bois silicifiés. Il représente 1/4 à 1/3 en surface du sédimentaire de l'Ouest. On l'a subdivisé en 3 étages :

- *l'Isalo I* (trias) est le plus gréseux (à sables grossiers) et tendre, en position topographique relativement dépressionnaire, particulièrement affouillé et érodé par les eaux de surface (photo 31). Sur 3 à 30 kilomètres de largeur, il constitue, avec la Sakamena, la "dépression marginale" (Betsiriry) longeant le socle cristallin. Localement consolidés, ces grès forment des massifs comme celui du Makay (Centre Sud, photo 36) et du Galoko (Nord).

- *l'Isalo II* (lias) est composé de grès fins (toujours à stratifications entrecroisées), de grès argileux et d'argiles. Les massifs de l'Isalo, dans le Sud, sont constitués par ces grès, consolidés par de multiples filonnets siliceux (photo 37). Mais en général ces grès sont peu consolidés et une érosion ravinante considérable les affecte.

- *l'Isalo III* (Lias supérieur à jurassique moyen) s'étend à l'Ouest des formations précédentes sur une largeur importante (plus de 70 km localement). Cet étage, dans son ensemble possède un faciès "mixte", c'est à dire une alternance de formations continentales (grès siliceux à stratification entrecroisée, grès argileux, arkoses, argilites) et marines peu profondes (marnes, marno-calcaires, gypses, grès marins...). A cette époque Madagascar commençait à se séparer de l'Afrique avec l'ouverture du Golfe du Mozambique et l'alternance d'avancées et de retraits de la mer. L'Isalo III possède un méso-relief confus et assez accidenté, témoignant d'une érosion très active avec formes et intensités différentes suivant la nature des roches. Les grès plus durs forment souvent de petites "cuestas" (exemple de la presqu'île d'Ampasindava, photo 35), alors que marnes et argilites sont affouillées préférentiellement. Lorsqu'il n'y a pas de ravinements, des placages de "sables roux" ("carapace sableuse") sont nombreux et cachent alors les formations de l'Isalo III.

## 2.2.2 - LE TRIAS MARIN

Seul le Nord de Madagascar témoigne d'une petite transgression marine peu profonde et momentanée (fin permien à début trias) directement sur le socle ; cette formation, de 2 à 8 kilomètres de large (du Sambirano à l'Océan Indien), plaquée sur les gneiss, est composée de marnes et de schistes argileux. Il forment un "couloir" entre le socle et les grès de l'Isalo.

## 2.2.3 - LE JURASSIQUE MARIN

Il correspond cette fois à une franche transgression marine avec ouverture significative du Golfe du Mozambique.

• *le Jurassique moyen* (Bajocien-Bathonien) s'observe presque sans discontinuité, sur toute la façade occidentale de Madagascar. Il se remarque aisément dans le paysage par une "cuesta" regardant vers l'Est ou le Sud-Est et dominant les formations gréseuses de l'Isalo (ou sa couverture de "sables roux"). Le Jurassique moyen (photo 39) est composé de calcaires marneux (Bajocien) ou de calcaires cristallins dolomitiques (Bathonien). Ces derniers donnent des reliefs karstiques, parfois spectaculaires tels les "tsingy" (Ankarana, Namorona, Ouest-Bemaraha, photo 38).

• *le Jurassique supérieur* (kimmeridgien, callovien, oxfordien), qui ne s'observe qu'au Sud de Belo-sur-Tsiribihina, correspond déjà à une mer moins profonde donc à un début de régression : marnes (marnes jaunes d'Ankilizato), gypses (manja), calcaires grès-marneux (formations de la sikily). Dans le Sud-Ouest, ces dernières formations sont cisailées par une tectonique (pliocène à quaternaire) très active, en faisceaux de failles NNE-SSW (faisceau du Sikily et faisceau de Manja) délimitant des compartiments soulevés (horsts) et abaissés (grabens) en "touches de piano". Ce modelé tectonique met à jour une alternance de couches dures (grès-calcaires) et de couches tendres (marno-gypseuses) favorables à une érosion en "mouvements de masse" (vastes glissements) caractéristiques des versants de faille.

## 2.2.4 - LES FORMATIONS DU CRÉTACÉ

Le crétacé malgache a vu une alternance (non concomitante partout) de régressions et d'avancées marines assez peu profondes. Entre le crétacé moyen et le crétacé supérieur s'intercale un important épisode volcanique à épanchements de basaltes fissuraux en conditions terrestres (regression marine).

### 2.2.4.1 - le Crétacé inférieur et moyen (anté-basaltique)

Les séries s'étendent du Hauterivien au Cénomaniens et sont à dominante gréseuse donc plutôt continentale. Cependant on y trouve des imbrications marneuses, marno-calcaires ou gypseuses (photo 42).

Le Crétacé anté-basaltique est composé de grès glauconieux, de grès siliceux à stratification entrecroisée, localement de marnes, de calcaires-marneux et d'argiles.

Les grès d'Ankarafantsika (bassin de Majunga) sont représentatifs des faciès continentaux ; les grès-marno-calcaires de l'Analavelona (bassin de Tuléar) sont typiques des faciès plus marins.

Des lambeaux de la "carapace sableuse" pliocène à "sables roux", peuvent cacher le crétacé. Il est parfois difficile de distinguer les 2 formations dont la pédogénèse peut donner dans les 2 cas des "sables roux".

#### **2.2.4.2 - le Crétacé supérieur (post-basaltique)**

Le crétacé supérieur (surtout maestrichien et danien) qui commence après les basaltes fissurés de la fin du crétacé moyen, est soit à dominante continentale gréseuse (bassin de Majunga) soit à dominante marine marno-calcaire (bassin de Morondava-Tuléar) soit mixte (littoral Est).

◇ **le crétacé continental**, forme une large "assiette" gréseuse dans le bassin de Majunga, célèbre pour ces gisements de grands Dinosauriens. De nombreux placages de "carapace sableuse à sables roux", viennent recouvrir et cacher ces grès crétacés qui donnent aussi des "sables roux" (sols ferrugineux tropicaux ou ferrallitiques). Du Crétacé continental ou mixte est présent aussi dans le bassin de Morondava (mais en majeure partie enfoui sous la "carapace sableuse"), entre Besalamy et Morombe.

◇ **le crétacé marin** : on le trouve essentiellement dans les "assiettes" du bassin de Morondava-Tuléar, mais aussi dans le bassin de Majunga, entre le crétacé gréseux continental précédent et les calcaires éocènes.

- *Les marnes* (danien surtout) : ces formations donnent par pédogénèse des sols vertiques (voir plus loin) ; elles sont très sensibles à l'érosion ravinante.

- *Les calcaires et calcaires grés-marneux* (maestrichien surtout) : de faciès plus franchement marin, cette formation se situe à l'amont de Tuléar et de Morombe, entre les calcaires éocènes et les basaltes de la fin du Crétacé moyen. Les calcaires purs, microcristallins et massifs, sont karstifiés avec des lapiez "en piliers" et argile rouge de décalcarification, et des dolines. Des "sables roux" (pliocènes) viennent combler les zones dépressionnaires et cacher parfois les figures karstiques ("karsts couverts").

Les failles plio-quadernaires NNE-SSW du "faisceau du sikily" recoupent et hachent ces formations, comme celles du Jurassique.

◇ **le crétacé mixte du littoral Est** : il est présent sur une étroite bande littorale (moins de 10 km) entre Fénéry au Nord et Manantenina au Sud. Au Nord de Mahanoro, il est à faciès plutôt continental (grès, sables, argiles) alors qu'au Sud il est à dominance marine (grès, marnes, calcaires) et daté du Maestrichien.

Entre le crétacé et la mer, s'étendent la plupart du temps des lambeaux de différents systèmes dunaires quadernaires et des lagunes allongées, parallèles au rivage et fermées par des cordons de sables blancs (flandriens à actuels).

#### **2.2.5 - LES CALCAIRES ÉOCÈNES**

Les assiettes tertiaires à faciès marins sont en majeure partie éocènes (nummulitique). L'éocène s'observe du Sud (Plateau Mahafaly) au Nord (Montagne des Français) de la façade Occidentale (photos 40 et 41). Ce sont des calcaires à foraminifères qui peuvent être purs, marneux ou gréseux. Les affleurements les plus vastes sont situés au Sud-Ouest, à

l'intérieur des terres : plateau Mahafaly, plateau de Tuléar-Befandriana. Ils sont également bien représentés dans le bassin de Majunga, cette fois en position littorale, sapés en falaises par la mer.

Des calcaires marneux **miocènes** (Aquitaniens et Burdigaliens) s'observent par endroits, mais ils sont généralement masqués par la carapace sableuse pliocène ou les recouvrements dunaires quaternaires.

Les calcaires éocènes présentent des figures karstiques dont les plus fréquentes sont les champs de dolines. Le Mahafaly montre des avens (photo 40) ; les calcaires qui dominent la rive gauche du Mangoky montrent des "Tsingy". Les calcaires du bassin de Majunga sont riches en "mogotes", coupoles ou cônes convexo-concaves, tours, chicots lapiazés etc..., souvent ennoyés à leur base par des "sables roux".

### 2.2.6 - LES FORMATIONS CONTINENTALES PLIOCÈNES

Tout l'Ouest de Madagascar est marqué par l'existence d'une couverture continentale détritique, gréseuse à grès-argileuse mal consolidée, que les géologues ont appelée "carapace sableuse" (photos 32, 33, 34). Ces mêmes géologues ont appelé "sables roux" la rubéfaction supérieure de la carapace sableuse (sols ferrugineux tropicaux ou sols ferrallitiques). Cette formation, qui, localement peut atteindre 100 à 200 mètres d'épaisseur, date de la fin du tertiaire, probablement du pliocène. Les matériaux proviennent d'une phase d'érosion majeure du socle précambrien qui pourrait résulter d'un soulèvement isostatique important au cours du miocène. Cette période d'érosion, probablement sous climat aride à sub-aride (faible couvert végétal, averses violentes) a déblayé jusqu'à l'arène une épaisse couverture d'altération et façonné la dernière surface d'aplanissement des Hauts Plateaux, dont les témoins les plus vastes occupent les "pénéplaines" du Moyen-Ouest et la pénéplaine Bara-Androy du Sud. Issus de ces déblaiements sont partis une masse considérable de matériaux argilo-sableux qui ont alimenté en aval, sur le sédimentaire antérieur, la construction d'immenses cônes et glacis d'épandages coalescents. Ces sédiments continentaux, qui montrent peu de stratification et de tri granulométrique, sont l'équivalent du "Continental terminal" d'Afrique Occidentale ou des formations "Barreiras" du Nord-Ouest du Brésil.

Postérieurement aux dépôts, pendant le quaternaire, l'érosion géologique a remanié la carapace sableuse et a évidé le sédimentaire antérieur sous-jacent du moins ses couches tendres. Parallèlement le socle continuait à se soulever (en même temps que la fracturation continuait), essentiellement dans le Sud-Ouest et le Nord-Ouest, en contrecoup des mouvements profonds du socle. Tous ces événements ont abouti à la configuration actuelle :

◇ évidemment (sauf dans l'extrême Sud) de la "dépression périphérique" (Betsiriry) bordant le socle, avec disparition des "racines" amont des glacis détritiques pliocènes,

◇ morcellement et remaniement de la carapace sableuse en plaines et bassins séparés soit par des cuéstras ou crêtes monoclinaux de roches plus dures (grès, calcaires) soit par des fractures.

◇ reprise éolienne littorale (surtout au Sud et au Sud-Ouest) avec formations dunaires (en particulier le "Tatsimien" et le "Karimbolien").

## 2.2.7 - LE PLIOCÈNE LACUSTRE

La fracturation en extension mi à fin-tertiaire sur les Hauts-Plateaux a provoqué des effondrements en fossés tectoniques dont les trois principaux, remplis d'alluvions lacustres, sont :

- Alaotra-Mangoro (Ankay)
- Est et Sud Ankaratra
- Ranotsara.

D'autre part la formation au tertiaire du massif volcanique de l'Ankaratra a bloqué le drainage antérieur vers l'Ouest de sa partie orientale (Bassin de l'Onive), provoquant un barrage lacustre dans lequel se sont également déposées des alluvions, avant qu'un exutoire ne s'ouvre vers l'Est (Tsinjoarivo).

Dans ces grands bassins, mais aussi dans d'autres bassins d'effondrement locaux plus petits (Antanetibe, Sambaina-Manjakandrina, Anjozorobe, une partie de la plaine de Tananarive autour d'Ivato) se sont accumulées des alluvions argileuses kaoliniques, parfois argilo-gréseuses, stratifiées et actuellement "ferrallitisées" en surface. Les alluvions d'Antsirabe (Sud Ankaratra) comportent, en plus, des dépôts cendreaux et des "hyaloclastites" plus récents (quaternaire moyen) correspondant à des éruptions phréato-magmatiques en milieu lacustre.

## 2.2.8 - LES FORMATIONS QUATERNAIRES

En dehors du volcanisme et des altérations ferrallitiques dont nous parlerons séparément, le quaternaire malgache est composé d'alluvions fluviales, d'alluvions fluvio-marines (mangroves) et de sables dunaires reposant éventuellement sur des grès coquilliers marins (cycles transgression-régression).

### 2.2.8.1 - les alluvions fluviales

- *sur les Hauts-Plateaux*, au dessus des niveaux de base actuels (plaines et bas-fonds rizicultivés ou inondables naturellement), se trouvent généralement deux terrasses que certains auteurs (Bourgeat, 1972) attribuent à des périodes plus sèches ("displuviales") et érosives du Quaternaire : le "Moramangien" et le "Sambainien" :

- *une terrasse haute*, dont il ne reste souvent que des lambeaux convexisés sur des épaulements perchés au dessus des vallées. Cette terrasse est généralement sous-tendue par un niveau de gros galets. Il s'agit de la terrasse "Moramangienne" de Bourgeat (1972),

- *une terrasse basse* (terrasse "Sambainienne"), située 2 à 4 mètres au dessus du niveau de base actuel. Elle est bien conservée et parfois rizicultivée si le réseau d'irrigation y parvient. Cette terrasse non ferrallitisée, est argilo-sableuse, avec parfois à la base un lit ou une couche de galets de quartz. En bordure de certaines plaines elle a été totalement lessivée et lavée par une nappe phréatique et il n'en reste plus que le squelette sableux ("sables blancs" ou "podzols de nappe", photo 49).

Ces terrasses sont d'anciens niveaux de base du réseau hydrographique, perchés au dessus du niveau actuel. Plutôt qu'à des périodes climatiques particulières elles nous paraissent

témoigner de phases de soulèvement plus rapide, séparant de longues stabilisations, du socle précambrien (isostasie).

• *le niveau alluvial actuel* (rizicultivé) est le plus souvent argileux dans les plaines et les petits bas-fonds ("tany manga") et argilo-limono-sablo-micacé le long des cours d'eau plus importants,

- *au contact socle-sédimentaire* : dans la "dépression périphérique", les grandes rivières des Hauts-Plateaux déchargent leurs sables, limons et micas et inondent de grandes surfaces : ce sont les riches "baibohos" (photos 51 et 52),

- *dans l'Ouest, le Sud-Ouest et le Sud* : les grands cours d'eau sont bordés de façon très discontinue d'au moins une terrasse ancienne post-pliocène ("haute terrasse"), rubéfiée (argileuse au Nord, sableuse au Sud), avec des galets de roches dures (quartz, basalte) à la base.

Une basse ou moyenne terrasse, brun-grisâtre à jaunâtre, plus argileuse, existe le plus souvent vers 2 à 5 mètres au dessus du lit majeur actuel.

Les alluvions actuelles sont argileuses, sauf dans le Sud et le Sud-Ouest (au Sud du Mangoky) où elles sont très riches en sable. Dans le Sud, la moyenne terrasse et le lit actuel même peuvent être sous-tendus par un encroûtement calcaire qui se poursuit sous les alluvions, imprégnant le sommet des altérites en place.

Dans les deltas de l'Ouest ou à l'amont des estuaires du Nord-Ouest, avant la mangrove proprement dite, l'influence du sel se fait sentir.

- *Dans l'Est*, les rivières qui dévalent les escarpements déposent galets, sables et argiles. Les exutoires des rivières sur le littoral, souvent barrés par des cordons sableux (photos 28, 30, 54), forment de longues lagunes et des plaines argilo-tourbeuses. Des terrasses (une ou deux) existent localement mais sont difficiles à identifier et à généraliser.

#### **2.2.8.2 - les alluvions fluvio-marines.**

Ce sont les dépôts terminaux argileux des fleuves sur la façade occidentale, gagnant sur la mer. Elles sont occupées par une végétation de mangrove (palétuviers) où constituées de zones nues sursalées (tannes). Des cordons sableux littoraux successifs, flandriens à actuels, peuvent constituer des rides allongées, de un à quelques mètres de haut. Les mangroves terminent les deltas à l'Ouest (photo 53), alors qu'elles colonisent des fonds d'estuaires au Nord-Ouest (invasion marine).

#### **2.2.8.3 - les formations dunaires littorales**

Dans le Sud, postérieurement aux épandages pliocènes (carapace sableuse à sables roux), la mer a subi des phases de transgression et de regression avec d'une part, dépôt de plage à grès calcaires coquilliers en phase d'avancée, et d'autre part, reprise éolienne avec formation de dunes au dessus des grès précédents en phase de retrait par déflation de la plate-forme émergée. R. Battistini (1964) reconnaît ainsi trois grands systèmes dunaires pendant le quaternaire, qu'il appelle "aépyornien" dans le Sud car il contient des débris d'oeufs d'*Aepyornis*, ratite fossile :

- la grande dune "Tatsimienne" (Aepyornien inférieur) ou "grande dune rouge" grésifiée, reposant souvent sur un grès coquillier marin (tatsimien transgressif) ou directement sur la surface continentale pliocène à sables roux. Ce complexe dunaire est représenté essentiellement au Sud où il atteint 380 mètres d'altitude. Dans le Sud-Ouest, grande dune rouge et "sables roux" sont souvent confondus, la première pouvant en partie dériver des seconds.

- la petite dune "Karimbolienne" (Aepyornien moyen) ou "petite dune jaune" grésifiée. On la trouve surtout au Sud, mais aussi, en extension beaucoup moindre, dans l'Ouest, jusqu'au Cap Saint-André. Certains auteurs (Sourdat, 1977) la décomposent en 2 ensembles.

- la dune récente "flandrienne" (Aepyornien supérieur ou holocène, et sub-actuel), de couleur beige à blanche. Elle forme des cordons parallèles au rivage, sur toute la périphérie de Madagascar. Dans l'Est les dunes flandriennes sont ultra-lavées et podzolisées en "sables blancs" (photos 28, 29, 54), par les nappes phréatiques, alors que dans l'Ouest et le Sud elles ont une couleur crème et sont souvent calcaires.

Le littoral de l'Extrême Nord, étudié par Rossi (1980), lui a permis de proposer, en plus des Tatsimien, Karimbolien et Flandrien (définis par Battistini), trois nouvelles séquences "transgression (pluvial)/régression (displuvial)" : l'Antsiranien, l'Ivovonien et l'Irodien ; ces séquences se placent les unes par rapport aux autres ainsi :

- Transgression-régression du *Tatsimien* : plages ou récifs de grès et "grande (ou vieille) dune rouge",
- Transgression-régression de l'*Antsiranien* : plages ou récifs et "vieille dune jaune",
- Transgression-régression de l'*Ivovonien* : plages ou récifs et "dune blanche grésifiée",
- Transgression-régression du *Karimbolien* : plages ou récifs et "dune jaune non grésifiée",
- Transgression-régression de l'*Irodien* : plages ou récifs et "dune grise",
- Transgression-régression du *Flandrien* : plages ou récifs et "dune blanche sub-actuelle ou actuelle".

Sur le littoral oriental cette chronologie n'a pas été validée dans le détail, mais on y a reconnu, en plus du système flandrien subactuel (dunes blanches podzolisées) des restes de systèmes plus anciens, à dunes rouges, jaunes, grises, qui seraient assez proches de la chronologie de Rossi au Nord mais cette fois sans grésification.

## 2.3 - LES FORMATIONS VOLCANIQUES

### 23.1 - LES ÉRUPTIONS CRÉTACÉES

La séparation définitive de Madagascar du continent de Gondwana, avec dérive de l'Inde par l'Est, a occasionné des fracturations du socle précambrien ayant permis la montée de grandes quantités de basaltes (associés parfois à des rhyolites) fissuraux, à l'Est, à l'Ouest et au Sud. Ce volcanisme crétacé a une extension considérable à Madagascar. Il repose sur le socle sur la côte Est et dans les sédiments crétacés sur la façade occidentale (photo 48). Le volcanisme de l'androy s'est accompagné en périphérie d'une vaste subsidence annulaire du socle, bien dégagée par l'érosion. Sur les Hauts-Plateaux on trouve aussi des nappes de basaltes crétacés dans la "zone des Tampoketsa" (moitié Nord), où ils fossilisent certaines Hautes-Surfaces crétacées. Enfin, le volcanisme crétacé est représenté dans l'Ouest et le Nord-Ouest par une multitude de filons basaltiques et doléritiques traversant le sédimentaire (Kelifely, Bemaraha, Betsiriry), mais aussi le socle au Nord-Est et à l'Est (de Tamatave à Antalaha), via leur fracturation.

A côté de ce volcanisme fissural le crétacé a aussi vu la sortie de roches intrusives, acides (granites, syénites, diorites) et basiques (gabbros), dégagées après arasement "différentiel" du socle.

### 2.3.2 - LES ÉRUPTIONS TERTIAIRE-PLÉISTOCÈNE INFÉRIEUR

#### ■ *Dans l'ankaratra :*

La montée isostasique du socle précambrien, qui a pris de l'ampleur après le crétacé (avec sa fracturation gondwanienne), s'est opérée suivant un bombement dissymétrique décalé vers l'Est ; ces contraintes ont occasionné une nouvelle fracturation méridienne au miocène et au pliocène, avec sorties de magma en éruptions fissurales N-S, ayant donné naissance au strato-volcan linéaire de l'Ankaratra. Composé essentiellement de basaltes à feldspathoïdes ("ankaratrites", basanites) à vastes planèzes, il comprend aussi des phases de volcanisme acide (trachytes, trachy-phonolites, andésites) avec extrusions visqueuses. Commencé il y a 7 millions d'années, le "vieux" volcanisme de l'Ankaratra (photos 43, 44, 45) a duré jusqu'à il y a environ 2 millions d'années (pléistocène ancien). Au sommet du Tsiafajavona (2643 m) l'empilement de laves atteint 1000 mètres d'épaisseur.

Ce volcanisme a accompagné la fracturation du socle, avec ou sans rejet. Les failles les plus visibles actuellement sont celle, très fraîche, du Betampona (faille qui se poursuit sous l'Ankaratra, via l'Est de la plaine d'Ambohibary) et celle du Mandray puis de Manandona plus au Sud. A l'intérieur du massif de l'Ankaratra, un certain nombre d'effondrements volcano-tectoniques ont donné naissance à des plaines intérieures (Faratsiho, Vinaninony, Ambohibary). Des sédiments lacustres ou volcano-lacustres se sont accumulés au pliocène, à l'Est des failles du Betampona et du Mandray et dans le bassin d'Antsirabe.

#### ■ *Dans la Montagne d'Ambre :*

Comme dans l'Ankaratra, le soubassement de la Montagne d'Ambre est essentiellement plio-pléistocène (9 millions à 2 millions d'années), même si le volcanisme y aurait débuté au miocène (rhyolites ignimbritiques) et s'y serait poursuivi jusqu'au quaternaire moyen à récent (voir plus loin).

Il s'agit de basaltes et basanites (avec quelques extrusions trachytiques et phonolitiques) formant de vastes planèzes (photo 47) à partir d'un volcan-bouclier ayant évolué plus tardivement en strato-volcan.

■ *A l'Ouest du Tsaratanana :*

De l'éocène au pléistocène ancien, en particulier dans la presqu'île d'Ampasindava, celle d'Ambato, à Nosy Be, à Nosy Komba et dans le Sambirano, en liaison avec la tectonique active, sont "montées" dans le sédimentaire des intrusions acides hypo-volcaniques, trachysyénitiques et microgranitiques.

**2.3.3 - LES ÉRUPTIONS DU QUATERNAIRE MOYEN ET DU QUATERNAIRE RÉCENT**

■ *Quaternaire moyen :*

On les trouve, dans la Montagne d'Ambre, à Nosy Be, aux piemonts du Tsaratanana (Andrahary, Ankaizina, Ankasimbelo), à l'Ouest d'Antsirabe (Vakinankaratra).

◇ *A la Montagne d'Ambre*, le quaternaire moyen forme des coulées, projections et édifices basaltiques bien conservés dans sa moitié sommitale, recouvrant les basaltes plus anciens.

◇ *A nosy Be*, l'Ouest de l'Ile est composé en grande partie de basaltes du Quaternaire moyen.

◇ *Autour du Tsaratanana* (Ankaizina, Andrahary, Ankasimbelo), on observe de vastes planèzes de basaltes ou de rhyolites (Ambondro), avec quelques édifices conservés.

◇ *A l'Ouest d'Antsirabe*, le volcanisme du quaternaire moyen (moins de 100.000 ans) occupe une partie du Vakinankaratra sous forme de coulées, de cônes (encore bien conservés), de projections et de formations hyaloclastiques basaltiques. Contrairement aux cônes de Betafo (holocène), ils sont couverts de sols ferrallitiques rouge-chocolat.

■ *Quaternaire récent :*

Ce volcanisme n'est pas encore argilifié et rubéfié et les constructions (cônes, coulées) sont parfaitement conservées. Elles pourraient dater de moins de 10.000 ans (holocène). Il s'agit :

◇ *Du volcanisme de l'Itasy* : champs de formes et de roches très diverses (photo 46), à la fois basiques (basaltes) et acides (trachytes),

◇ *Du volcanisme de Betafo et de Tritriva*, à l'Ouest d'Antsirabe (cônes, coulées et projections basaltiques), accolé au volcanisme du quaternaire moyen,

◇ *De l'extrême Nord* : il s'agit de coulées de vallées, d'édifices et de "maars" dans la Montagne d'Ambre, ainsi que de petits cônes stromboliens à Nosy Be.

### 3 - MORPHOPEDOLOGIE DU DOMAINE CRISTALLIN

Nous distinguerons 4 grands ensembles régionaux d'importances inégales :

- Les Hautes Terres et le Nord,
- Le Moyen-Ouest,
- La façade orientale,
- L'extrême Sud.

#### 3.1- LES HAUTES TERRES ET LE NORD

Ce sont grossièrement les régions du socle dont l'altitude est supérieure à 900 mètres, qui ont une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 1200 mm et moins de 6 mois secs ( $P < 50$  mm).

• *La partie Nord* comprend la "zone des tampoketsa" (à partir d'Ankazobe) ainsi que le Massif du Tsaratanana et ses pourtours. Nous y avons englobé aussi les collines sur socle du bassin Alaotra-Mangoro (Ankay).

• *La partie Hautes-Terres* proprement dite s'étend d'Ankazobe au Nord à Ambalavao au Sud ; c'est la région la plus peuplée du socle cristallin (ethnies Merina et Betsileo).

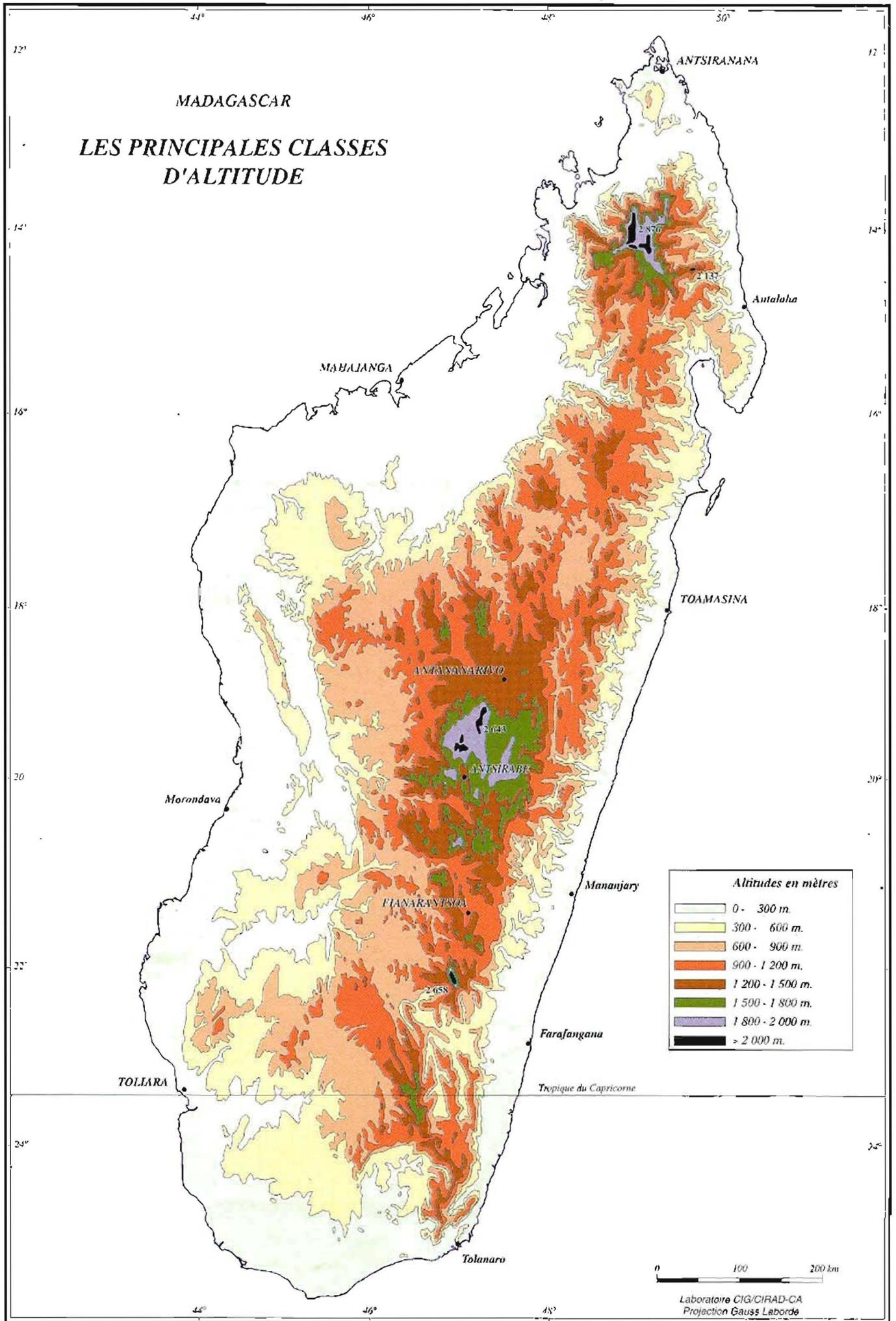
##### 3.1.1 - LES SURFACES D'APLANISSEMENT

###### 3.1.1.1 - La haute surface fini-crétacée

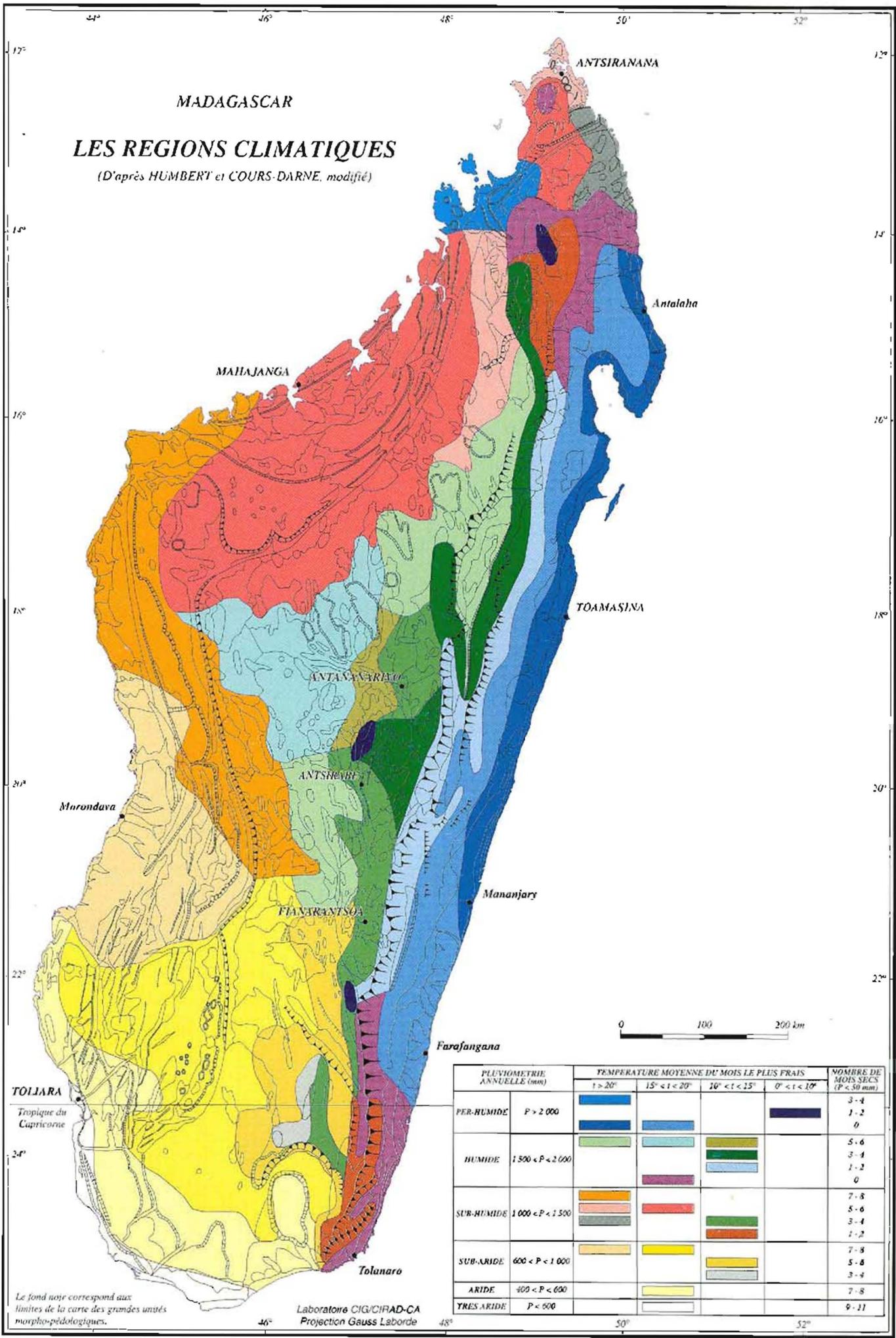
###### ■ Localisation

L'ensemble le plus important est constitué par la "guirlande" des "tampoketsa" située entre Tananarive au sud et la région de l'Ankaizina au Nord. Ils sont une dizaine de plateaux, perchés de 200 à 500 mètres par rapport aux paysages environnants, répartis selon un très large arc de cercle, avec une pente générale de 3 ‰, convergeant vers le Nord ou le Nord-Ouest c'est à dire vers le Bassin de Majunga. L'altitude de ces plateaux est la plus faible (1200 m.) de part et d'autre du "seuil de Mandritsara", l'endroit le plus déprimé du socle entre l'Est et l'Ouest. Ces plateaux du Centre-Nord avec leurs altitudes moyennes, sont les suivants, du Sud au Nord :

- Famoizankova : 1450 m,
- Fenoarivo : 1600 m,
- Ankazobe : 1650 m,
- Vohombohitra : 1400 m,
- Kamoro : 1300 m,
- Beveromay : 1200 m,
- Analamaitso : 1200 m,
- Est-Mandritsara : 1200 m,
- Analavory (Sud de Bealanana, dans l'Ankaizina) : 1500 m,



MADAGASCAR  
**LES REGIONS CLIMATIQUES**  
 (D'après HUMBERT et COURS-DARNE, modifié)



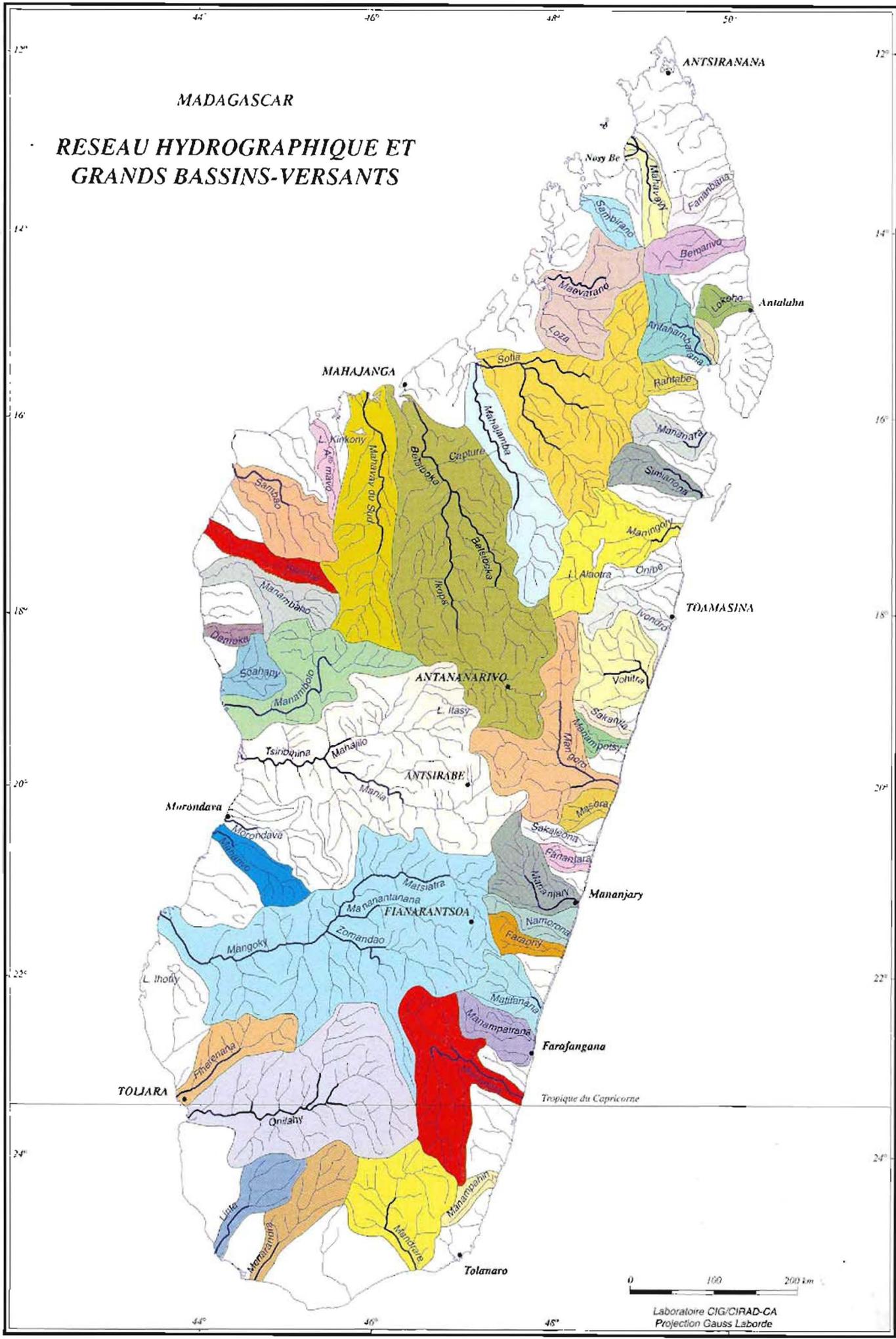
	PLUVIOMETRIE ANNUELLE (mm)	TEMPERATURE MOYENNE DU MOIS LE PLUS FRAIS				NOMBRE DE MOIS SECS (P < 50 mm)
		> 20°	15° < 1 < 20°	10° < 1 < 15°	0° < 1 < 10°	
PER-HUMIDE	P > 2 000	Dark Blue	Blue	Light Blue	White	3-4 1-2 0
HUMIDE	1 500 < P < 2 000	Green	Light Green	Yellow-Green	Yellow	5-6 3-4 1-2 0
SUB-HUMIDE	1 000 < P < 1 500	Orange	Red	Light Green	White	7-8 5-6 3-4 1-2
SUB-ARIDE	600 < P < 1 000	Light Yellow	Yellow	Light Yellow	White	7-8 5-8 3-4
ARIDE	400 < P < 600	Light Yellow	Light Yellow	Light Yellow	White	7-8
TRES ARIDE	P < 400	Light Yellow	Light Yellow	Light Yellow	White	9-11

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

Laboratoire CIG/CIFAD-CA  
 Projection Gauss Laborde

MADAGASCAR

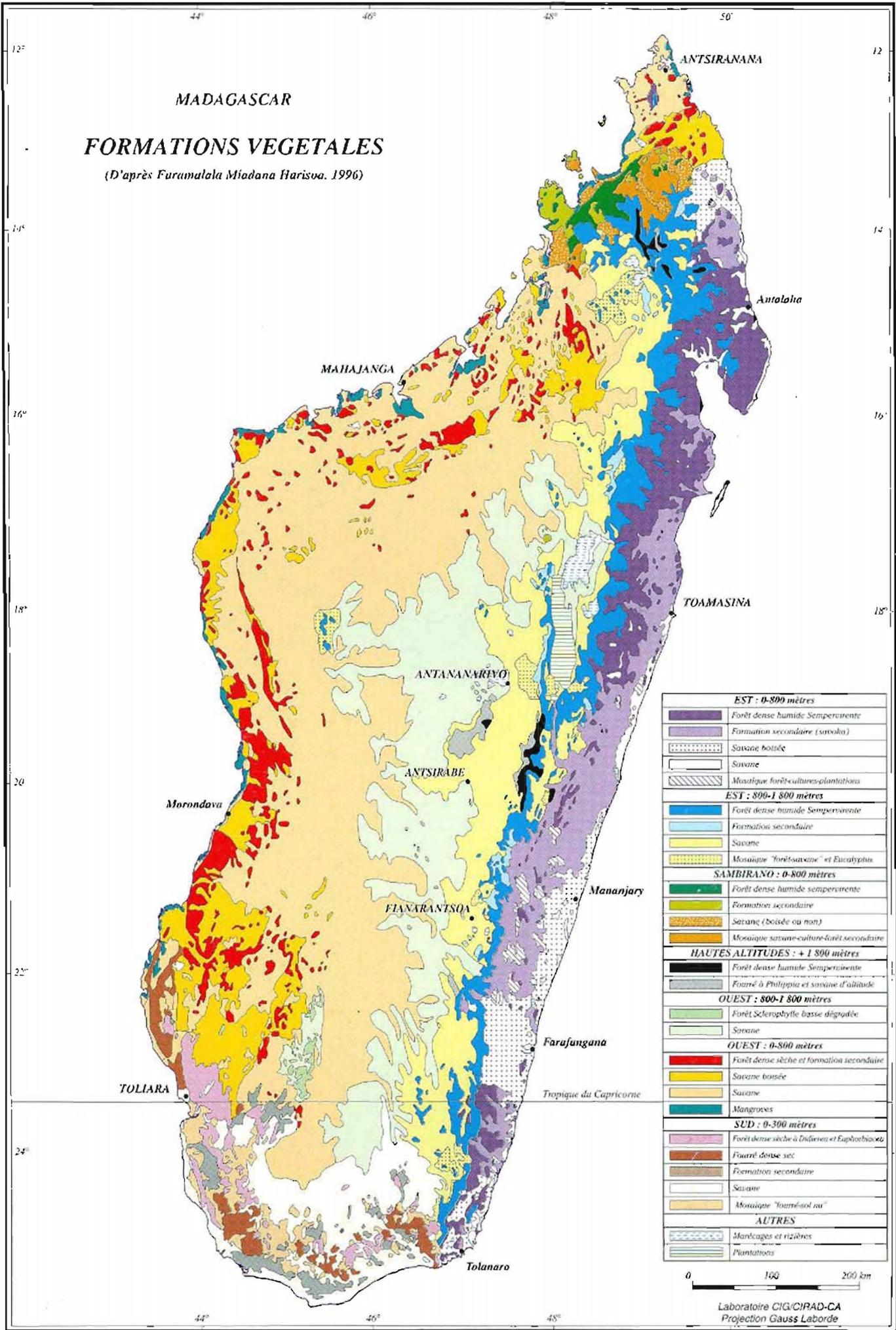
RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET  
GRANDS BASSINS-VERSANTS



0 100 200 km

Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
Projection Gauss Laborde

MADAGASCAR  
**FORMATIONS VEGETALES**  
 (D'après Furumalala Mladana Harisoa. 1996)



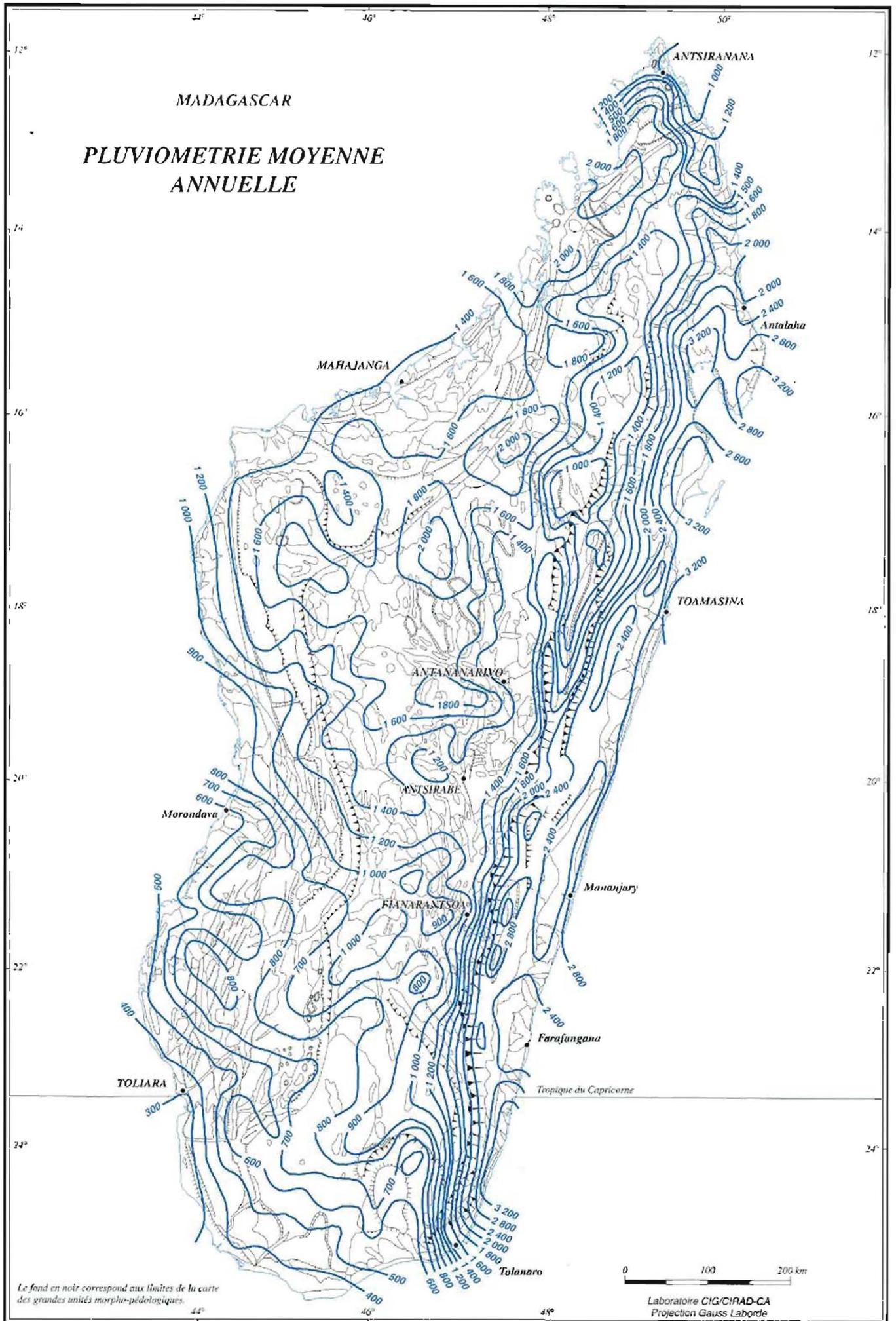
<b>EST : 0-200 mètres</b>	
	Forêt dense humide Semperverente
	Formation secondaire (savaha)
	Savane boisée
	Savane
	Mosaïque forêt-cultures-plantations
<b>EST : 200-800 mètres</b>	
	Forêt dense humide Semperverente
	Formation secondaire
	Savane
	Mosaïque "forêt-savane" et Eucalyptus
<b>SAMBIRANO : 0-800 mètres</b>	
	Forêt dense humide semperverente
	Formation secondaire
	Savane (boisée ou non)
	Mosaïque savane-culture-forêt secondaire
<b>HAUTES ALTIITUDES : + 1 500 mètres</b>	
	Forêt dense humide Semperverente
	Fourré à <i>Philippia</i> et sous-bois d'altitude
<b>OUEST : 800-1 800 mètres</b>	
	Forêt Sclerophylle basse dégradée
	Savane
<b>OUEST : 0-800 mètres</b>	
	Forêt dense sèche et formation secondaire
	Savane boisée
	Savane
	Mangroves
<b>SUD : 0-300 mètres</b>	
	Forêt dense sèche à <i>Didierea</i> et <i>Euphorbia</i> spp.
	Fourré dense sec
	Formation secondaire
	Savane
	Mosaïque "fourré-sol ou"
<b>AUTRES</b>	
	Maraîchages et rizières
	Plantations

0 100 200 km

Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
 Projection Gauss Laborde

MADAGASCAR

PLUVIOMETRIE MOYENNE  
ANNUELLE

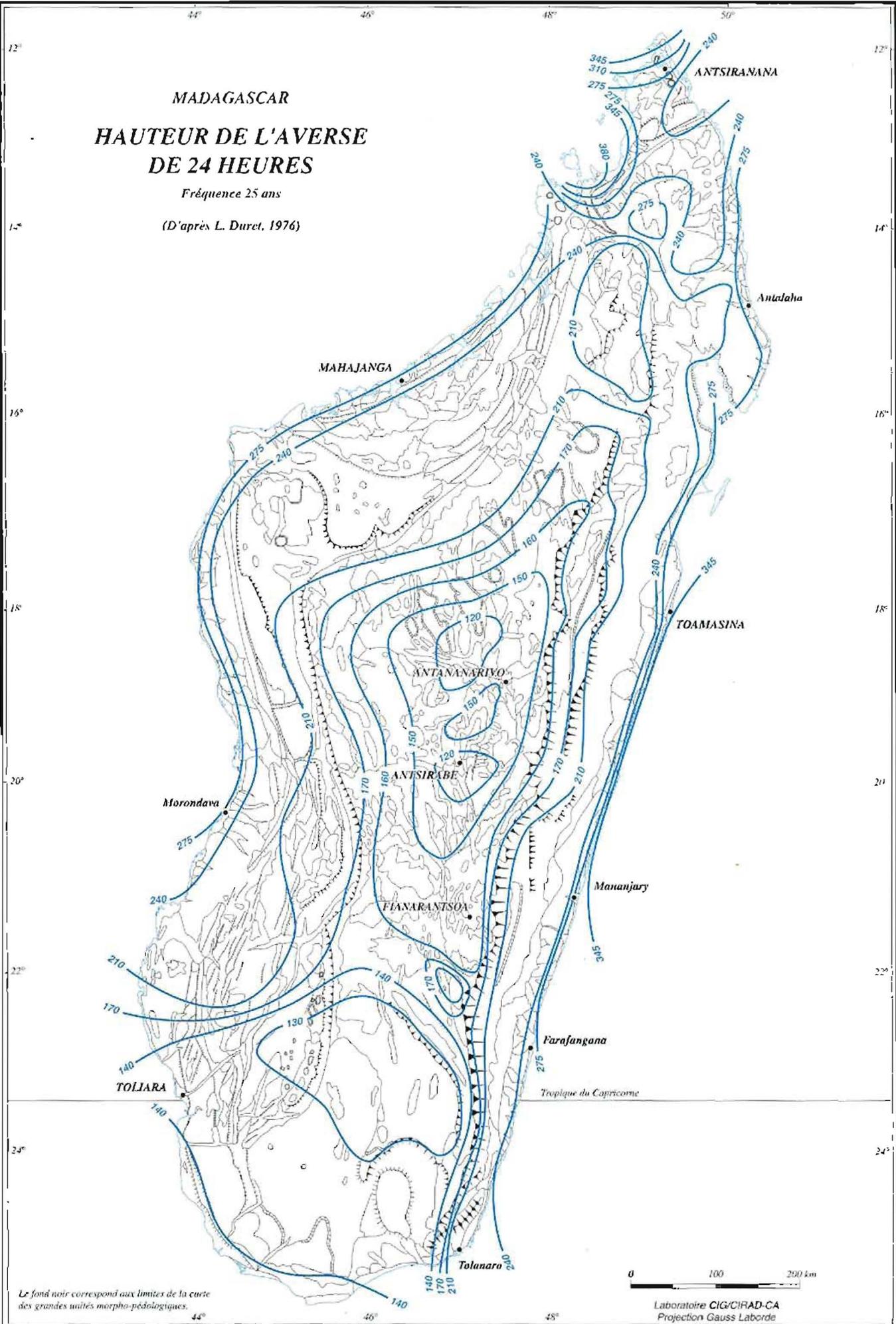


Le fond en noir correspond aux limites de la carte  
des grandes unités morpho-pédologiques.

Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
Projection Gauss Laborde

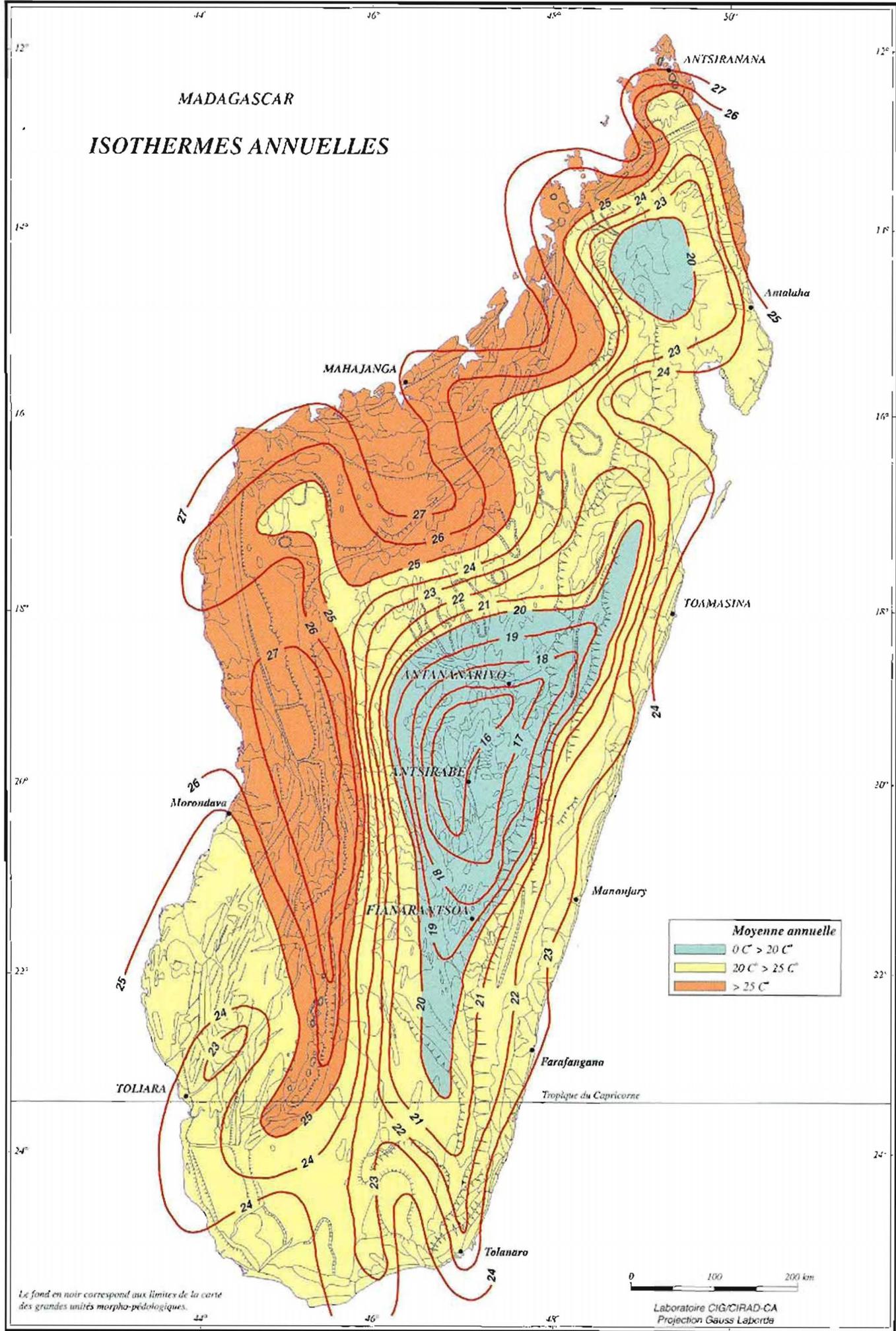
MADAGASCAR  
**HAUTEUR DE L'VERSE  
 DE 24 HEURES**

Fréquence 25 ans  
 (D'après L. Duret, 1976)



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

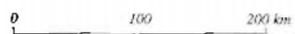
0 100 200 km  
 Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
 Projection Gauss Laborde



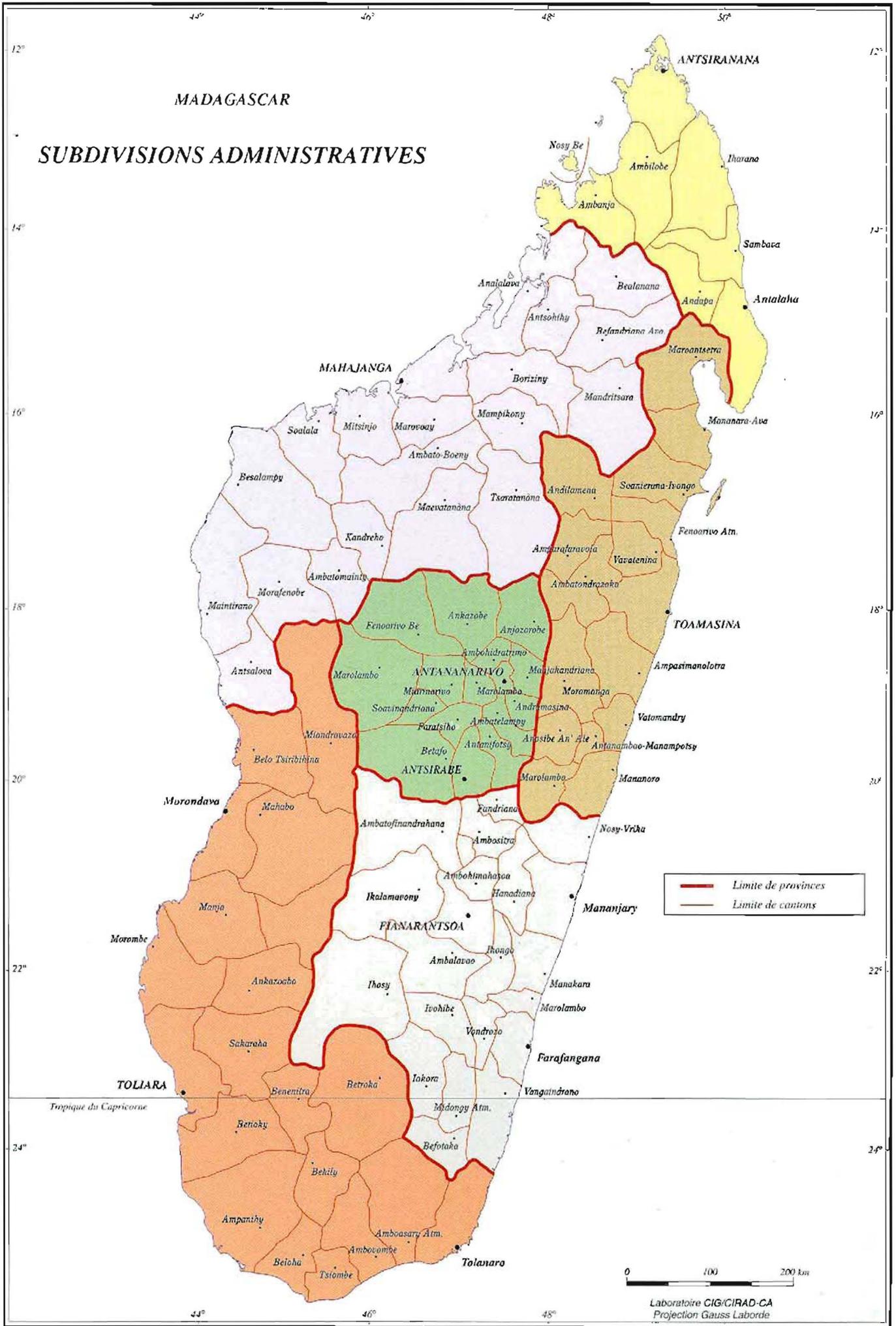
MADAGASCAR  
**ISOTHERMES ANNUELLES**

Moyenne annuelle	
	0 C° > 20 C°
	20 C° > 25 C°
	> 25 C°

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



Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
 Projection Gauss Lambert



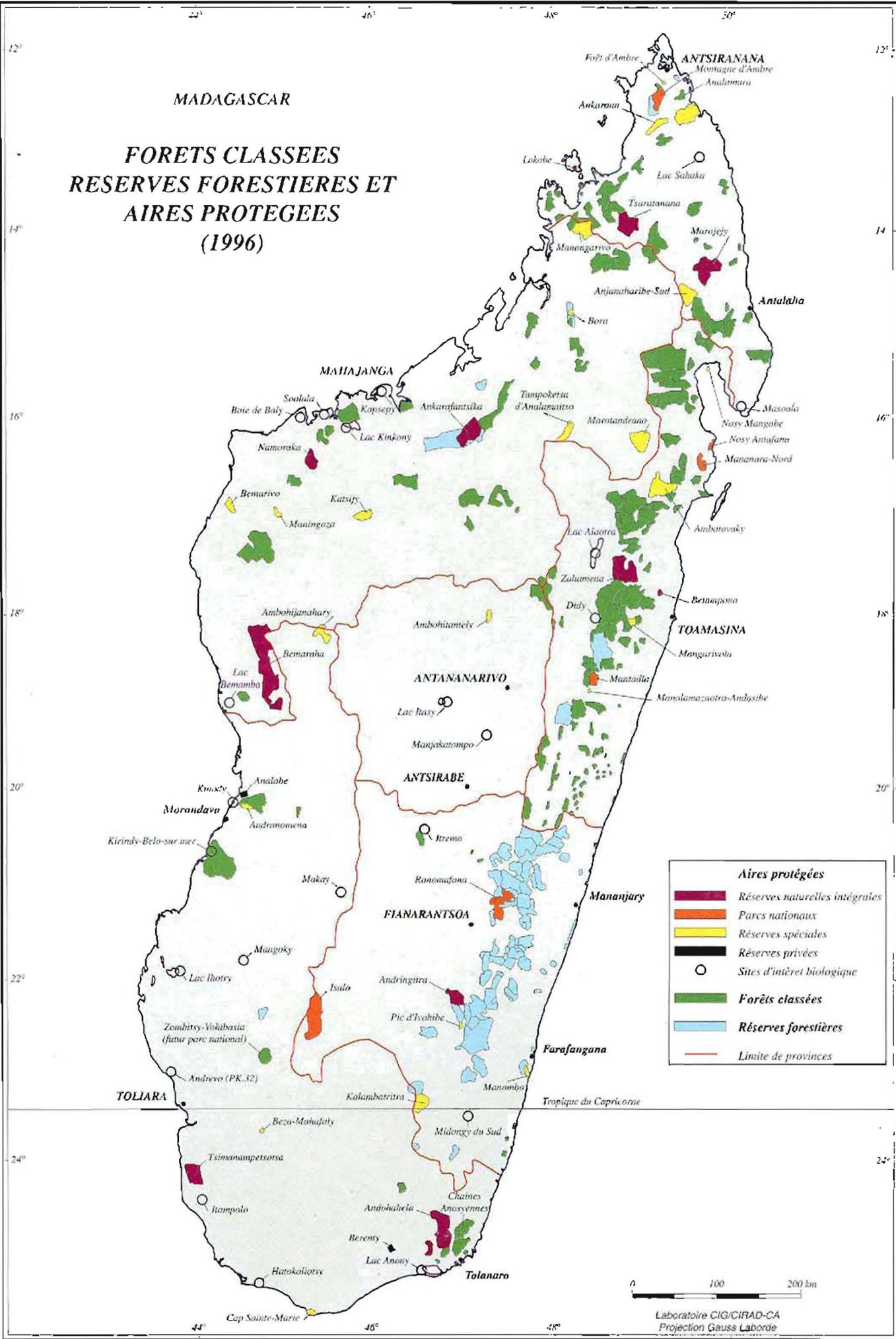
MADAGASCAR

SUBDIVISIONS ADMINISTRATIVES

— Limite de provinces  
 — Limite de cantons

0 100 200 km

Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
 Projection Gauss Laborde



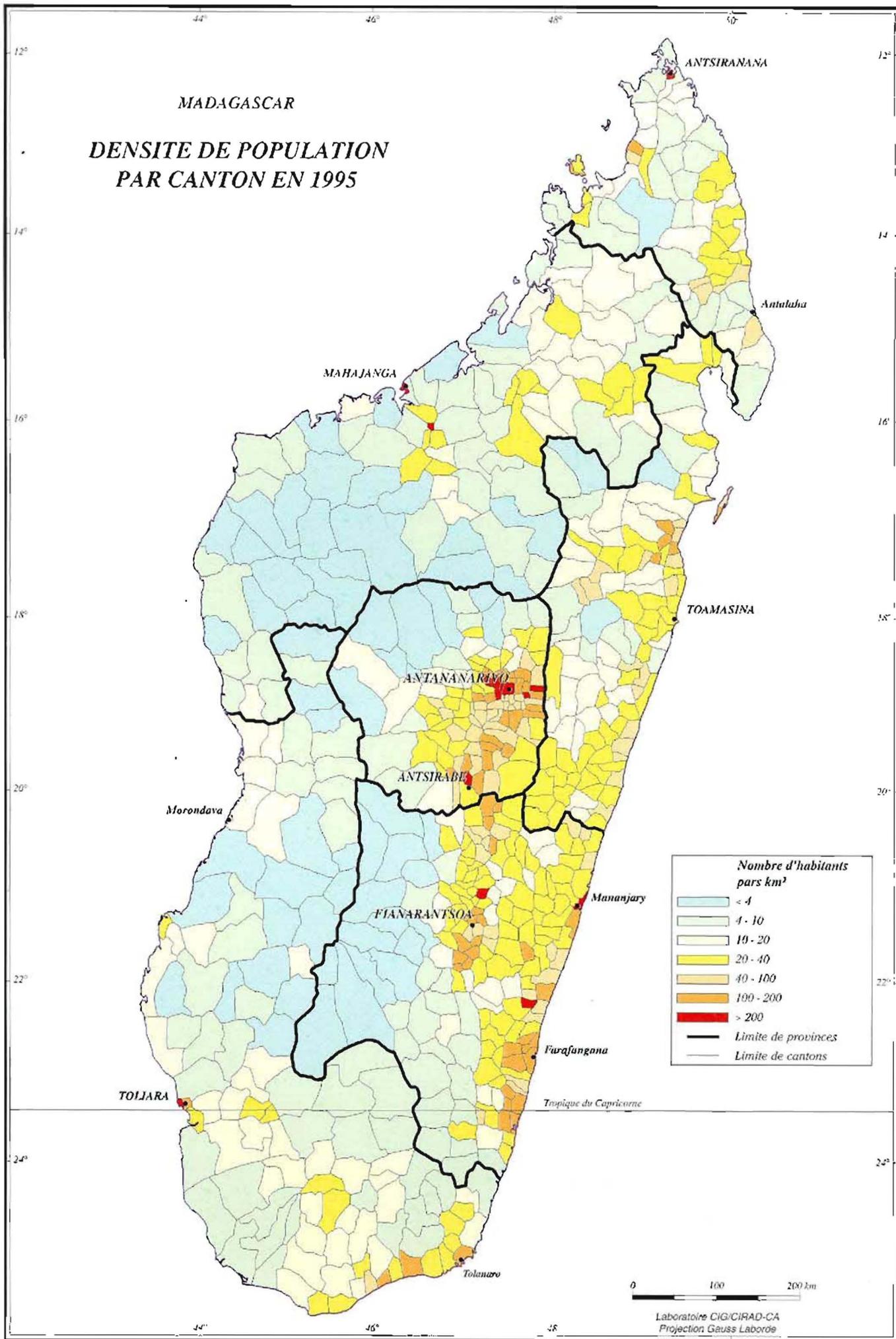
MADAGASCAR

**FORETS CLASSEES  
RESERVES FORESTIERES ET  
AIRES PROTEGEES  
(1996)**

**Aires protégées**

- Réserves naturelles intégrales
- Parcs nationaux
- Réserves spéciales
- Réserves privées
- Sites d'intérêt biologique
- Forêts classées
- Réserves forestières
- Limite de provinces

Laboratoire CIG/CIRAD-CA  
Projection Gauss Laborde



• Marangaka-Bemanevika (Nord de Bealanana, dans l'Ankaizina) : 1800 m.

Un autre ensemble de plateaux se situent au Sud de la latitude de Tananarive :

- Tsiacompaniry (extrême amont du bassin de l'Ikopa) : 1700 m,
- Sahanivotry (Est des escarpements Betampona-Mandray-Manandona) : 1800 m,
- Janjinakely-Itremo : 1700 m.

### ■ *Age et origine*

Les géologues, géomorphologues et pédologues ayant étudié ces plateaux, s'accordent pour un âge de façonnement de **la fin du crétacé**. L'argument essentiel étant que les *tampoketsa* du Kamoro et d'Analamaitso recoupent en biseau ou s'appuient sur une centaine de mètres de grès argileux arkosiques à bois silicifiés alternés avec des basaltes, formation discordante sur le socle attribuée sans trop d'hésitations par les géologues (Hottin, 1961) au Crétacé moyen par analogie avec ces mêmes formations dans le bassin de Majunga, qui elles, sont correctement datées.

On admet donc que tous ces plateaux "hauts perchés" sont contemporains et témoignent d'une même phase d'aplanissement fini-crétacé. On admet aussi que, suite à sa formation, cette surface a pu subir des mouvements de soulèvement différentiel du socle, qui expliqueraient en partie les altitudes élevées de certains d'entre eux, en particulier sur la bordure Est des Hauts-Plateaux : Sahanivotry et Tsiacompaniry. Le plateau de Sahanivotry été affecté, en plus, par le contre-coup de la tectonique N-S méso-tertiaire (failles Betampona-Manandona) qui l'a fait remonter. Pour expliquer la conservation des plateaux, on avance souvent le rôle de la litho-structure du soubassement géologique : par exemple des positions synclinales à faibles pendages de lames de granite stratoïde, formant armature et bloquant l'érosion régressive, ou bien encore de grosses coulées de basalte.

Cette vaste surface d'aplanissement fini-crétacé a pour corollaire et symétrie la sédimentation détritique grés-argileuse du crétacé supérieur (post-basaltique) en vaste "glacis" d'accumulation qui forme une large assiette dans le bassin de Majunga et qui s'étendait probablement bien au delà du rivage actuel. Dans le bassin de Morondava-Tuléar, cette série détritique du crétacé supérieur est beaucoup plus réduite. Elle fait place à des sédiments marins (marnes et calcaires).

### ■ *Caractéristiques du milieu*

Les hautes surfaces, constituent de grandes étendues désolées peu peuplées, froides à crachins et brouillards. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1500 à 1800 mm avec 5 mois "secs", mais toutefois riche en précipitations occultes. Le modelé est sub-horizontale ou mollement ondulé, couvert d'une steppe d'altitude à *Loudetia*, *Ctenium*, *Aristida*, *Philippia*, *Helichrysum*. Les pentes des versants ne dépassent généralement pas 10 %. Le réseau de drainage est constitué de bas-fonds larges, peu encaissés, à larges amphithéâtres amont, le plus souvent non rizicultivés, tourbeux et marécageux (à *Leersia*, *Hexandra*, cypéracées...). Aucun relief résiduel granitique ne domine ces étendues.

Certains plateaux sont parsemés de cuvettes sub-circulaires de 30 à 70 mètres de large, à fond marécageux. Ce sont, comme sur les surfaces du Moyen-Ouest (photo 20), des formes pseudo-karstiques de soutirage. La nappe phréatique des altérites évacue en profondeur colloïdes et produits dissous, provoquant un affaissement de la voûte.

Les sols sont des *ferrallitiques jaune/rouge* ou *jaune/rose* riches en goethite et en gibbsite en plus de la kaolinite. Ils montrent en général en profondeur une zone tachetée ("plinthite") de fluctuation de nappe. Cette zone tachetée, par retrait de la nappe, s'indure en donnant une cuirasse ou carapace peu épaisse (50 cm), caverneuse, ferrugino-alumineuse, qui affleure de façon très discontinue sur certains *tampoketsa* (Ankazobe, Fenoarivo, Analavory, Marangaka-Bemanevika, Janjinakely). La plinthite libère également des concrétions ferrugineuses qui jonchent la surface ou qui se concentrent, ainsi que des concrétions gibbsitiques, en "stone-lines". La cuirasse, lorsqu'elle existe, se situe sur les sommets d'interfluves (plus riche en Al) ou en bordure de plateau, de bas-fond ou de cuvette (plus riche en Fe).

Les sols sont acides (pH 4,5 à 5), très fortement désaturés ( $V < 10\%$ ), gibbsitiques, à rapport  $S_0_2/Al_2O_3$  très bas (moins de 0,9 parfois moins de 0,5) dans le mètre supérieur. Le taux de matière organique peut atteindre 6 % sur 10 cm, mais avec un C/N élevé (20).

### 3.1.1.2 - *La surface intermédiaire méso-tertiaire*

Ce niveau, est moins "achevé" que la haute surface et que le niveau inférieur. Il a également une moindre extension. C'est en pays Merina, autour de Tananarive surtout, entre 1450 et 1600 mètres d'altitude, que la surface intermédiaire est la mieux développée.

#### ■ *Localisation*

- *Sur les Hauts-Plateaux*, les témoins les mieux conservés sont les suivants :

- Miarinarivo-Arivotrimamo : 1450 m,
- Talata-Volonondry (NE de la Plaine de Tananarive) : 1450-1500 m,
- Mantasoa : 1450 m,
- Anjozorobe : 1500 m,
- Antsampandrano-Ambatolampy : 1600 m,
- Fandriana-Imerina Imady : 1450-1500 m.

- *Dans le Moyen-Ouest* deux plateaux (dont nous parlerons plus loin) sont considérés comme de la même génération méso-tertiaire :

- le plateau d'Ambohijanahary (ou d'Antsohitikely) à l'Ouest, au dessus du Bongolava : 1100 mètres,
- le plateau de l'Horombe, dans le Sud-ouest, le seul à posséder des indurations ferrugineuses notables : 1000 mètres.

- *Dans l'extrême Nord*, entre Ambilobe et l'Océan Indien, en bordure du socle, ont été reconnus (Rossi, 1980) des témoins de la surface intermédiaire, dite localement "surface de la Mahavavy".

#### ■ *Age et origine*

La surface "intermédiaire" a été façonnée en contrebas (150 à 300 mètres en moyenne), et au détriment, de la haute surface. Cette phase d'aplanissement, qui a laissé subsister des lambeaux de haute surface, a été la réponse à un abaissement très sensible du niveau de base général des eaux de surface des Hauts-Plateaux après le crétacé. Cette baisse de niveau de

base, ayant activé le potentiel érosif des eaux, a pu avoir deux causes possibles (qui ont pu être simultanées) :

- une régression marine importante (eustatisme),

- un soulèvement d'ensemble plus rapide du socle (isostasie), en liaison avec les phases de fracturation début et mi-tertiaire, qui aurait provoqué un bombement préférentiel des Hauts-Plateaux dans sa partie centre-orientale, c'est à dire là où la surface intermédiaire est la plus étendue.

Cette dernière hypothèse paraît vraisemblable. En conséquence, la surface "ancienne" aurait été portée plus en altitude, alors qu'une deuxième surface, se serait formée pour rattraper le nouveau niveau de base, en déblayant la précédente et en s'y emboitant 150 à 300 mètres plus bas.

A l'Est d'une ligne Anjozorobe-Carion-Ambositra la tectonique (NE-SW et NNE-SSW) accompagnant un nouveau bombement du socle fin-tertiaire, après la formation de la 2<sup>e</sup> surface, semble avoir perturbé, fragmenté et décalé vers le haut les niveaux de cette surface sur la bordure orientale des Hauts-Plateaux. L'axe du bombement sub-méridien passait sur le méridien d'Ambatolampy, où la surface intermédiaire est la plus haute (1600 mètres).

Les coulées volcaniques fin tertiaire de l'Ankaratra s'appuient, au niveau d'Arivonimamo, sur la surface intermédiaire qui se continue sur les granito-gneiss. L'âge mi-tertiaire de l'aplanissement est donc vraisemblable.

#### ■ *Caractéristiques du milieu*

La surface intermédiaire est beaucoup moins régulière que les surfaces encadrantes, comme si elle n'avait pas eu le temps de s'achever. On observe une succession de collines largement convexes, à sommets sub-horizontaux d'altitudes comparables. Les interfluves sont séparés par des bas-fonds mal drainés, souvent tourbeux via des versants convexo-concaves assez longs.

Le réseau hydrographique est moins encaissé que sur la surface fini-tertiaire. Autres différences avec cette dernière : les versants de raccordement "sommets-bas fonds" sont moins pentus (10 à 30 %), plus longs, avec un profil convexo-concave et non plus convexe.

Des reliefs résiduels granitiques émergent ça et là.

- *A l'Est des Hauts-Plateaux centraux* les sols sont des *ferrallitiques jaune/rouge* ou *jaune/rose*, à concrétions gibbsitiques radiciformes ou cavernueuses en profondeur (plus de 1 m) que l'on retrouve souvent en fines "stone lines". Ce sont des sols très désaturés ( $V < 15\%$ ), acides (pH 5), riches en aluminium échangeable. Les minéraux argileux sont à base de kaolinite, gibbsite et goéthite. Les sables quartzueux sont abondants, surtout dans la partie supérieure (sols appauvris en colloïdes). Le taux d'argile, pas très élevé, est de l'ordre de 25-40 % (sur les sols rouges ce taux peut dépasser 50 %). Le rapport  $S_iO_2/Al_2O_3$  est inférieur à 1.

Les témoins de l'Est portent une végétation de steppe ou lande steppique à *Ctenium*, *Aristida*, *Loudetia*, *Trachypogon*, *Helichrysum*, *Philippia*, fougères.

- *A l'Ouest des Hauts-Plateaux centraux*, dans la zone de Miarinarivo et sur une partie du plateau de Talata-Volonondry, les sols sont rouges dès la surface, non appauvris en colloïdes (40 à 50 % d'argile), mieux structurés, plus riches en hématite (plutôt que goethite) et moins riches en gibbsite. Il sont toujours fortement désaturés, avec des pH de 5 à 5,3.

Dans l'Ouest la steppe est à base d'*Aristida* et de *Ctenium*, avec quelques *hyparrhenia*.

### 3.1.1.3 - La surface inférieure fini-tertiaire

Cette surface d'aplanissement est la plus étendue des Hauts-Plateaux. Elle "s'infiltré" et s'insinue entre les reliefs granitiques, après déblaiement et façonnement des roches facilement altérables (gneiss, micaschistes, migmatites).

#### ■ Localisation

- *Autour des Plaines de Tananarive* : altitude moyenne (1300 mètres). C'est l'ensemble le plus important. Faisant partie du haut-bassin de l'Ikopa, il est constitué de plaines, alvéoles, bassins et glacis cloisonnés par des rides, massifs et lames granitiques résiduels. Du Nord vers le Sud les bassins les plus importants sont ceux de : Ankazobe, Ambohitromby, Mahavelona, Fihaohana, Firavahana, Mahabo, Miantso, Mahitsy, Ambohidratrimo, Merimandroso, Ilafy, Ambohimanga, Imerintsiatosika, Masindray, Ambalavao, Ambohipandrano.

- *Au Nord des plaines de Tananarive, aux pieds des Tampoketsa*. Il s'agit de niveaux de base locaux (photos 9, 12, 15), situés au Nord des précédents, plus en aval dans le bassin Ikopa-Betsiboka, donc à des altitudes inférieures (650 à 1200 mètres). Ce sont surtout les bassins de Fenoarivobe (1000 m), Fiadanana (1000 m), Tsarahunemana (850 m), Andriba-Mahatsinjo (650-850 m), Manakana (650 m), Morafeno-Nord (900 m), Anosy-Nord Sakay (1000 m).

- *Sur les bordures Nord et Nord-Ouest du socle*. Deux séries de surfaces d'aplanissement sont assimilées à la surface fini-tertiaire :

- *Entre Maevatanana et Mampikony*. A ces endroits, entre les rivières Betsiboka et Bemarivo, le socle (gneiss et micaschistes), en pente douce vers le NW, est pratiquement en continuité topographique avec le sédimentaire. L'altitude est faible (150 à 250 mètres). Les conditions physiques y sont donc très différentes de celles des Hauts-Plateaux.

- *Dans l'extrême Nord*. Au SW et au NW d'Ambilobe, du Sambirano à l'Océan Indien, le socle gneissique se termine en pente douce que l'on rattache à la surface fini-tertiaire, à une altitude de 100 à 150 mètres, elle même dominée par des lambeaux de surface méso-tertiaire (dite "surface de la Mahavavy").

- *Les bassins du Pays Betsiléo*. Vers le Sud, passées les alvéoles de la région de Tananarive, on ne revoit la surface fini-tertiaire bien développée qu'à partir d'Ambositra :

- les bassins d'Ambositra-Imerina Imady-Fandriana (haut bassin de la Mania) : altitude moyenne 1350-1400 mètres.

- Les alvéoles et gouttières du haut bassin du Mangoky (autour de Fianarantsoa) : altitude moyenne 1200 mètres. Ces zones extrêmement digitées bordent les multiples vallées des bassins de la Manandriana, de la Fanindrona, de la Matsiatra, et de la Ranomaitso.

- Le bassin d'Ambalavao (bassin de la haute Mananantana, affluent du Mangoky) : altitude moyenne 975 mètres.

#### ■ *La gouttière Alaotra-Mangoro*

La surface fini-tertiaire est présente dans le bassin Alaotra-mangoro en contrebas de la "falaise" forestière de l'Angavo. Cette surface est en continuité avec le remblaiement lacustre plio-pleistocène. Elle se poursuit au NNE de l'Alaotra vers Andilamena puis Antranoambo, Ampatakamaroreny et jusqu'à Marotandrano. L'altitude moyenne, de 1000 mètres au Sud, s'abaisse à 800 mètres au Nord.

#### ■ *Age et origine*

La surface d'aplanissement inférieure recoupe exclusivement les roches métamorphiques les plus facilement et rapidement altérables donc déblayables. Il s'agit essentiellement de micaschistes, gneiss et migmatites. Les granites et gabbros intrusifs ainsi que les granites migmatitiques, qui s'altèrent moins vite, restent en position de "reliefs résiduels" (photos 13 et 14). Comme pour la phase précédente, l'aplanissement fini-tertiaire résulte d'une augmentation de la dénivelée du niveau de base général par eustatisme ou isostasie. Alors que cet aplanissement a été assez généralisé dans le Moyen-Ouest (voir plus loin), il était plus localisé en amont, sur les Hauts-Plateaux, s'infiltrant entre les "noyaux durs" (qui se dénudent et sur lesquels l'altération a de moins en moins prise), pour former une multitude de bassins, alvéoles, gouttières et glacis plus ou moins indépendants les uns des autres, séparés par des rides et massifs rocheux, protégés de l'érosion régressive ultérieure par la présence de seuils et barres en aval.

L'âge fini-tertiaire de la surface inférieure est attesté par la relation existante entre cette surface et le vaste glacis détritique sablo-gréseux des zones sédimentaires occidentales que les géologues ont appelé "carapace sableuse" et qu'ils ont daté du pliocène. Ces deux "surfaces corrélatives" l'une d'aplanissement (pédiment, pénélaine), l'autre d'apports détritiques constituent très certainement une seule et même surface, qui est d'ailleurs encore en continuité dans le Sud (Pays Androy et Mahafaly).

#### ■ *Caractéristiques du milieu*

Sur les Hauts-Plateaux, la surface fini-tertiaire des petits bassins et alvéoles présente un modelé de plateaux (ou de glacis dans les "gouttières") découpés en lanières irrégulières par un réseau dense de bas-fonds encaissés (de 20 à 40 mètres). Ils sont dominés par des reliefs résiduels (granitiques en général) auxquels ils se rattachent en glacis. Les plateaux ont, pour un bassin donné, des altitudes sub-égales (1300 mètres autour de Tananarive). Ils sont orientés vers le réseau hydrographique actuel avec des pentes générales de 1 à 5 %. Les versants qui conduisent aux bas-fonds sont convexes et pentus (30 à 60 %). Le réseau de vallées et bas-fonds a fréquemment une forme digitée "en bois de renne". Les bas-fonds plats, larges et sans cours d'eau individualisés, présentent des terminaisons amont en larges amphithéâtres (photo 9). Le dessin de ce réseau, très ramifié, présente des alternances de retrécissements (seuils rocheux) et d'élargissements (biefs), conditionnés par la litho-

structure des roches métamorphiques recoupées. Deux terrasses s'observent en général : une "terrasse rouge" du quaternaire ancien ("moramangien") plus ou moins bien conservée ou absente, haut-perchée ; et une "terrasse jaune" basse (2 à 5 mètres au dessus des rizières) du quaternaire récent ("sambainien") qui elle, est quasiment systématique sur les Hautes-Terres. On y observe des sols hydromorphes anciens argilo-sableux plus ou moins lessivés ou lavés, de teinte jaunâtre, grisâtre ou blanche (sables blancs, pseudo-podzoliques, photo 49). Ces terrasses s'observent jusque dans les diverticules et amphithéâtres amont des bas-fonds. Auquel cas, les terrasses ne possèdent pas de galets à la base. Ces terrasses sont alors davantage constituées de "matériaux de fluage" des altérites au même titre que les fonds des bas-fonds actuels composés d'une "nappe de transit" d'altérites fluées, mobilisées par la nappe phréatique qui sourd au pied des versants convexes et circule longitudinalement le long et au fond du réseau de vallées en "lavant" les altérites (plancher de sables lavés "flués").

Ces vallons à sols hydromorphes ("tany manga") sont tourbeux et sableux en amont du réseau, plus argileux en aval, pour passer à de véritables alluvions argileuses brunes à grisâtres de décantation (débordements calmes) puis plus riches en sables et micas au niveau des grandes vallées (débordements turbulents).

Les plateaux portent des sols ferrallitiques rouges très bien drainés, parfois à "stone line" (1 à 3 mètres de profondeur). Ils se prolongent par des altérites très épaisses (10 à 30 mètres au dessus du socle sain) ferrugino-kaoliniques et rouge/rosâtre vers le haut, puis sablo-micacées rose ou blanchâtre (roche pourrie) plus en profondeur. Ce manteau d'altération (photos 7 et 8) loge une "nappe phréatique d'altérite" permanente située entre 8 et 15 mètres de profondeur dont l'ampleur de fluctuation est de l'ordre de 3 mètres. Cette nappe émerge en bas de versant et alimente les bas-fonds.

Les sols ferrallitiques proprement dits (1 à 3 mètres d'épaisseur) sont généralement argileux (35 à 60 % d'argile en fonction de la roche mère), mal ou peu structurés dans le mètre supérieur, pauvres en matière organique (0,5 à 2 %), acides (pH de 4,8 à 5,2) et fortement désaturés ( $V = 10$  à 20 %), mais moins que les sols jaune/rouge ; des excès d'aluminium échangeable peuvent provoquer des toxicités aluminiques ; leur réserve minérale est extrêmement faible ( $S = 0,2$  à 1 mé %, moins de 30 ppm de phosphore "olsen" dit assimilable, moins de 750 ppm de phosphore total). Ces sols possèdent un fort pouvoir fixateur pour le phosphore dû à leur richesse en oxydes de fer et d'aluminium. Il y a carences en oligo-éléments (bore en particulier)..

Du point de vue minéralogique : ils sont composés de kaolinite, hématite (+ goëthite), gibbsite, quartz.

Dans ces sols, la gibbsite n'est généralement pas exprimée en concrétions et résidus d'altération, comme dans les sols jaune/rouge appauvris de la bordure orientale ("surface intermédiaire") et des Tampoketsa.

Les versants qui raccordent les plateaux aux vallées sont fortement tronqués jusqu'à l'altérite compacte, et sujets à un ruissellement maximum sous une faible couverture herbacée.

Les bordures de plateaux, déjà à pentes plus sensibles (2-5 %) ont souvent des sols mieux structurés dans leur partie supérieure par rapport à ceux du plateau proprement dit (Bourgeat, 1972).

Les plateaux de la surface fini-tertiaire sont rarement cultivés, les paysans préférant les bordures et versants (aménagés en pseudo-terrasses lorsqu'ils sont relativement peu pentus) dominant et bordant le terroir rizicole du bas-fond. Sur le plateau règne une steppe ou savane herbeuse qui brûle tous les ans, à paturage extensif à base d'*Aristida*. A proximité des villages on trouve souvent des bosquets d'Eucalyptus.

La pluviométrie moyenne annuelle varie de 1100 à 1600 mm (avec 5 à 6 mois de "mois secs", à moins de 50 mm) ; la température moyenne du mois le plus frais (Juillet) est de 10 à 15°.

### 3.1.2 - LES HAUTES COLLINES DE DISSECTION DES SURFACES D'APLANISSEMENT

Il ne s'agit pas ici des "reliefs résiduels" (granites, gabbros, quartzites, cipolins), ceux-ci étant toujours en positions dominantes, mais des reliefs, encore moulés par d'épaisses altérites, qui résultent du défoncement plus ou moins avancé par le réseau hydrographique, des "pénéplaines" fini-crétacé, méso-tertiaire et fini-tertiaire. C'est donc un ensemble morpho-pédologique extrêmement étendu (le plus vaste sur le socle).

Le substratum géologique est à base gneissique et migmatitique.

Le modelé est composé d'un moutonnement de hautes et "lourdes" collines convexes à profil transverse en "demi-orange", souvent allongées en lanières à sommets peu pentus (2 à 10 %), à pentes latérales fortes (10 à 40 %), matelassées d'épaisses altérations (10 à 40 mètres) noyées à leur base par une nappe phréatique, coiffées de *sols ferrallitiques rouge ou jaune/rouge*. Il y a toujours une rupture de pente très accusée avec les bas-fonds.

En général on n'observe pas d'affleurements rocheux dans ce type de paysage.

On peut penser que ce modelé convexe a été façonné sous des conditions forestières humides, par des actions de "creep" et de glissements lents d'altérites constamment humides et gorgées en profondeur, au fur et à mesure de l'approfondissement du réseau hydrographique qui évacue les produits glissés et "flués" en bas de versants avec l'aide de la nappe phréatique affleurante.

La circulation rapide de la nappe phréatique active l'élimination des produits d'hydrolyse qui, à son tour, accélère cette hydrolyse avec perte de cohésion du matériel, processus qui en retour, favorise glissements et fluage du manteau gorgé d'eau (dont le poids augmente) ceci d'autant plus rapidement que la pente, donc la convexité, est forte. De multiples boucles de rétroactions positives font que la dynamique de convexisation s'auto-entretient et peut même s'accélérer. On conçoit que ces processus, se poursuivant sur une période suffisamment longue, peuvent aboutir à une "fonte" progressive des collines destabilisées (à "cœur pourri", photos 1, 2, 3, 7, 8) par fluage régressif et évacuation des altérites fluées sous forme de nappes de boue transitant dans les bas-fonds et vallées ; par recul des versants ceux-ci se transforment peu à peu en "glacis de fluage" puis en véritables aplanissements qui se "ferrallitiseront" postérieurement, au fur et à mesure d'une nouvelle dissection accélérant le drainage. Une telle dynamique a été nettement observée autour du Lac Alaotra (Raunet, 1984) où des niveaux d'aplanissement étagés encadrant une surface en cours de façonnement, ont suivi le déblocage naturel du seuil Nord-Oriental de la cuvette (Maningory). Il n'est nul besoin de faire intervenir des changements climatiques quaternaires pour expliquer ces aplanissements. La dynamique des eaux de nappe (et non des eaux de surface) y joue le rôle essentiel.

Les "lavaka" peuvent être abondants (photos 1, 2, 3, 4). Leur densité est particulièrement importante dans certaines régions riches en accidents tectoniques.

La "convexisation" est donc un processus "hérité" de conditions forestières très humides ; la "lavakisation" est par contre un processus actuel traduisant le déséquilibre "hydro-morpho-climatique" des altérites.

Le paysage de collines est plus ou moins "ouvert" suivant la hauteur et la densité des reliefs résiduels dominants. Certaines zones, encadrées par des rides granitiques appalachiennes, forment des gouttières où les anciens glacis de piemont de la surface fini-tertiaire sont actuellement totalement "convexisés".

Les vitesses de dissection et d'abaissement des altitudes des sommets arrondis sont commandées par la nature lithologique locale du substratum. Par exemple les collines armées par des bancs quartzitiques ou granitiques "descendent" moins vite que celles ayant un substratum plus homogène de gneiss ou de micaschistes. **Dans le premier cas** la descente du front d'altération va moins vite que la descente du réseau hydrographique ; les altérites sont moins épaisses et la nappe phréatique tend à y disparaître ce qui ralentit encore davantage l'altération ; les sols sont riches en sable, de teinte rosâtre ou jaunâtre, moins argilifiés et à structure continue. Les collines sont alors plus hautes que sur gneiss, et deviendront avec le temps des "reliefs résiduels" (photos 13 et 14). **Dans le deuxième cas** au contraire, le front d'altération descend rapidement, toujours entretenu par une nappe phréatique. Les sols y sont plus rouges (plus ou moins sombres suivant la richesse en minéraux ferro-magnésiens), argileux, bien structurés.

En vision aérienne on s'aperçoit que les modalités des arrangements des reliefs collinaires (hauteur, degré de dissection, orientations) reflètent et respectent la litho-structure plissée héritée (anticlinaux, synclinaux, rides monoclinales...) du socle métamorphique.

Un autre facteur de différenciation du modelé dans les bassins est la plus ou moins grande proximité des grandes rivières. Les régions les plus proches des grands drains sont les plus encaissées et lacérées de lavaka, avec des bas-fonds étroits non tourbeux (photo 11). Les parties amont des bassins présentent au contraire des reliefs d'ensemble plus doux, avec des bas-fonds digités qui s'élargissent, devenant tourbeux, et se terminant en amphithéâtres. Ces bas-fonds sont alors systématiquement bordés par une terrasse basse (terrasse grise/jaune "sambainienne").

Les versants sont couverts d'une steppe herbeuse à base d'*Aristida* et *Ctenium* (dans l'Ouest), d'*Helichrysum* et fougères (dans l'Est), parcourue par les feux de brousse tous les ans. La couverture herbeuse est insuffisante pour empêcher le ruissellement et le décapage en nappe des sols qui montrent de grandes plages nues "damées".

Les sols sont fortement désaturés ( $V < 20\%$ ), acides (pH 4,8 à 5,3), pratiquement chimiquement vides (moins de 1 mé de bases échangeables, moins de 30 ppm de phosphore assimilable). Le taux de matière organique est inférieur à 2 %. L'activité biologique y est très faible du fait des feux annuels, de l'érosion en nappe et du compactage de surface. Du point de vue physique ces sols sont généralement assez bien structurés. Une stone-line quartzreuse est souvent présente de façon discontinue (suivant la densité des filons de quartz). On la trouve alors entre 50 cm et 4 mètres de profondeur.

### 3.1.3 - LES RELIEFS RÉSIDUELS

Ce sont les "noyaux durs", à affleurements rocheux, du socle précambrien dont l'altération (donc l'évacuation postérieure par l'érosion) a été moins rapide que dans les terrains environnants ; il s'agit des reliefs ayant en leur "coeur" des armatures "dures" (photos 13 et 14) qui peuvent être :

- des granites migmatitiques stratoïdes des séries métamorphiques, en grande partie du "système du graphite",
- des intrusions "hypo-volcaniques" : qu'elles soient acides (batholites de granites, syénites, ...) ou bien basiques (gabbros), d'âges divers,
- des quartzites et cipolins de la série quartzo-schisto-calcaire du Centre du Pays.

#### 3.1.3.1 - *Les granites migmatitiques stratoïdes et les granites intrusifs*

Les granites migmatitiques sont le résultat d'une granitisation différentielle ayant affecté certaines "strates" des anciennes roches sédimentaires soumises à métamorphisme au sein des orogénèses successives. C'est ainsi que les granites migmatitiques stratoïdes résistant à l'altération forment des lames ou des barres à pendages variables (souvent redressés) présentant des crêtes monoclinaux dissymétriques et des rides qui soulignent des structures anticlinales et synclinales, l'ensemble étant souvent haché de longues failles. Les granites peuvent aussi avoir **une origine intrusive** ne résultant pas alors directement de la granitisation des roches métamorphiques, mais "d'injections" hypo-volcaniques horizontales "inter-strates" (laccolithes) ou verticales (batholites).

Dégagés progressivement par l'érosion et mis en relief relatif, ces granites affleurent sous forme de véritables "crêtes appalachiennes" ou bien de monolithes en forme de coupoles, d'échines, de dômes lisses ou d'inselbergs plus ou moins dégagés, à flancs sub-verticaux à diaclases courbes, pouvant isoler et libérer par décollement d'épaisses écailles (20 à 200 cm) en "pelures d'oignons".

**La disposition en structure appalachienne** est particulièrement nette au Nord de Tananarive (en périphérie des Tampoketsa) aussi qu'en pays Betsileo (d'Ambositra à Fianarantsoa). L'altération et l'évidement différentiels y dégagent et mettent bien en valeur la structure plissée avec ses crêtes granitisés à forts pendages, ayant gardé ses caractères originaux. Les granites migmatitiques stratoïdes de Madagascar "arment" les structures sédimentaires plissées originelles. Les alignements, incurvations et parallélismes des bancs granitisés soulignent nettement les anticlinaux et synclinaux que le réseau hydrographique longe ou traverse en cluses à la faveur d'accidents tectoniques (fractures).

**Les formes monolithiques en dômes, coupoles, culot et inselbergs** (photos 13 et 14) sont particulièrement spectaculaires dans les structures laccolithiques stratoïdes et batholitiques intrusives : on les observe en particulier dans le massif de Carion, autour de Behenjy, Anjozorobe, Ambositra, Fianarantsoa et Ambalavao, dans l'Andringitra, au Marojejy (Nord), dans la plaine de Zomandao.

Certaines de ces formes sont "ornées" de figures pseudo-karstiques (lapiez), telles que cannelures serrées (Andringitra, Bevato) verticales, vasques et alvéoles. Ce sont les héritages d'actions mécaniques (racines et crampons) puis biochimiques sous une ancienne litière acide, à base de bruyères (*Philippia*), *Helichrysum*, sphaignes, mousses et lichens, ayant libéré des acides fulviques corrosifs. Les cannelures ne s'observent que sur les flancs pentus de roche nue, où l'écoulement hypodermique en filets des jus très acides et leur renouvellement sous la litière, favorisaient l'hydrolyse et la dissolution rapides du granite.

Les granites sont souvent parvourus de diaclases ; lorsque ces diaclases sont rapprochées et se recourent, l'altération y pénètre et la décohésion mécanique "exfoliante" libère de grosses boules (1 à quelques mètres de diamètre) déchaussées de leur gangue d'arène ocrée. Par l'érosion de l'arène, ces boules se concentrent et s'empilent sur place sous forme de chaos, ou bien dévalent les versants ravinés.

La plupart du temps la totalité des reliefs résiduels n'est pas granitique. Le granite proprement dit, situé en leur coeur, ne constitue que l'**armature** des reliefs, sous la forme de bancs et de "noyaux" plus ou moins épais et serrés qui affleurent dans les parties sommitales.

Le plus souvent les versants, à pentes fortes (20 à 70 %), ont un substratum de migmatites, de gneiss ou de micaschistes qui forment en quelque sorte "l'encaissant" du granite. A Madagascar, l'évidement regressif différentiel (couple "altération/déblaiement") n'a jamais atteint (sauf parfois dans le Moyen-Ouest et dans le Sud) la base des armatures granitiques. Il y a peu d'inselbergs parfaitement dégagés. Beaucoup n'en sont qu'aux stades de dômes sommitaux.

Les reliefs résiduels se raccrochent aux surfaces d'aplanissement situés en contrebas par des glacis concaves mais plus ou moins "convexisés" transversalement.

Les sols des versants sont des sols ferrallitiques fortement désaturés ; **sur granite** ils sont peu épais, jaunâtres, riches en sable, à structure massive, à faible réserve hydrique et à fort ruissellement (faible couvert graminéen). **Sur gneiss, migmatites et micaschistes** : en contrebas immédiat des sommets granitiques les sols sont fortement tronqués ou colluvionnés emballant des boules de granite venant du haut. Les ravins et lavaka peuvent être alors abondants. Dans les zones moins pentues (hautes collines et gouttières entre les crêtes granitiques), les sols sont rouges, mieux structurés, fréquemment à stone-line discontinue.

Dans les régions de reliefs résiduels, le modelé est généralement accidenté, peu "ouvert", à réseau hydrographique encaissé, avec peu de bas-fonds proprement dits (sauf sur les replats perchés souvent barrés par des seuils rocheux).

Les reliefs résiduels sont (avec les collines de dissection des surfaces d'aplanissement) les sites préférentiels des champs de lavaka. Ceux-ci peuvent présenter des concentrations spectaculaires.

### 3.1.3.2 - Les quartzites

Les massifs résiduels quartzitiques sont localisés au centre du Pays (Ambatofinandrahana), au Sud d'Antsirabe. Ils constituent l'essentiel de la "série schisto-quartzo-calcaire"

(micaschistes, quartzites, cipolins) du groupe de l'Itremo. Par recoupement d'une structure plissée, cette série présente à l'affleurement une disposition isoclinale à allongement NNW-SSE des "crêts" quartzitiques.

Du Nord au Sud, les principales chaînes quartzitiques sont : les crêts de Kinangaly, Tsinjomay, Bevitsika (séparant les pénélaines de Mandoto et de Ramartina), Vonivolo, Itremo, Ibity, Ambatomenaloha et Amporona.

Les quartzites présentent des bancs massifs très durs et non altérés restant en relief, alternés avec des passées plus fines et plus friables ou même des schistes plus altérés (sols ferrallitiques tronqués jaunes) et qui s'évident par érosion. Ce sont de longues chaînes massives, peu disséquées, couvertes d'un pavage décimétrique de blocs anguleux emballés dans une arène quartzreuse grossière blanche ou jaunâtre. La végétation herbacée est pauvre, xérophytique et peu couvrante. Les crêtes sont parfois déchiquetées en aiguilles et clochetons. Les crêts isoclinaux dissymétriques sont souvent ravinés, à déploiement de ravins en "bad-lands" à la traversée des passés altéritiques schisteuses.

### 3.1.3.3 - *Les cipolins*

On les trouve dans le complexe de l'Itremo près d'Ambatofinandrahana, spécialement sur le "plateau" de Salazana.

Dans cette zone les reliefs résiduels présentent des formes karstiques ennoyées dans les résidus de "décalcification - ferrallitisation". Les lapiez à longues lames de 1 à 5 mètres, se concentrent en petits îlots qui émergent des versants. La végétation de ces cipolins est repérable par des aloes pittoresques.

### 3.1.4 - LES TRÈS HAUTS SOMMETS

Sur socle cristallin, deux régions sont situées à plus de 2200 mètres d'altitude : le Tsaratanana au Nord (sommet au Maromokotra à 2876 mètres) et l'Andringitra au Sud (sommet au Pic Bobby à 2658 mètres).

L'origine de ces hautes altitudes est le soulèvement isostasique du socle. Certains auteurs pensent qu'une surface d'aplanissement très ancienne (Jurassique ?) tangente les sommets. Mais absolument rien ne le prouve (absence de surface sub-horizontale).

Ces zones de haute altitude sont soumises à des climats froids et humides (2500 mm annuels en moyenne) et couverts par une végétation rase ou rabougrie, adaptée.

En saison sèche, ces sommets sont exposés à des températures qui descendent en dessous de  $-10^{\circ}$  à 2600 mètres. De 2200 mètres à 2600 mètres les minima absolus en juillet sont de  $-10$  à  $-13^{\circ}$  (moyenne  $6^{\circ}$ ) à l'Andringitra et de  $-8$  à  $-10^{\circ}$  au Tsaratanana (moyenne  $8^{\circ}$ ). Les gelées sont très fréquentes. Il y a de très fortes amplitudes diurnes pouvant dépasser  $25^{\circ}$ . D'autre part, en "saison sèche" (1 à 2 mois au Tsaratanana, 3 à 4 mois à l'Andringitra) même s'il ne pleut pas, il y a de nombreuses précipitations occultes (brouillards, rosées, crachins). Les pluies très abondantes tombent avec de fortes intensités, avec orages violents fréquents et grêle.

La végétation a une allure générale de pelouse, de maquis ou de lande, selon les endroits. A partir de 2200 mètres, sur les flancs des ondulations sommitales, on observe une disparition des formations arborescentes. Il peut y avoir des arbrisseaux bas, rameux, à port "myrtoïde" ou éricoïde, à petites feuilles le plus souvent aciculaires (pointues et rigides) ou écailleuses : *Philippia*, *Dombeya*, *Senecio*, *Agauria*, *Helychrysum*, myrtacées. On trouve aussi, surtout au Tsaratanana, de petits "palmiers" (*Pandanus*, *Dracaena*).

Les zones dépressionnaires, très humides ou marécageuses, sont fréquentes et sont riches en sphaignes, *Cyperus*, hypnacées, *Philippia*.

Sur les espaces rocheux (dômes diaclasés) s'accrochent des xérophites : *Kalanchoe*, *Aloe*, *Senecio*, *Drosera*, *Utricularia*, *Helychrysum*, mousses, lichens.

Les hauts sommets présentent souvent des reliefs adoucis entre des grands reliefs granitiques nus. L'Andringitra est très spectaculaire de ce point de vue avec une extraordinaire collection de formes (Petit, 1970) : grands monolithes ou dômes nus, à vasques, cuvettes et coupes ; flancs à cannelures géantes (pseudo lapiez), chaos de boules, chicots et tours ruiniformes. Entre ces reliefs granitiques, le paysage est vallonné, convexo-concave, à dépressions marécageuses.

Les sols sont peu épais. Ils sont composés d'une arène jaunâtre peu argilifiée, plus ou moins hydromorphe, à horizon organique assez épais noirâtre, semi-tourbeux et mal humifié, passant à la tourbe en position basse.

### 3.1.5 - LES RELIEFS MONTAGNEUX DU TSARATANANA

Le Tsaratanana a été très peu étudié et cartographié par les géologues, pédologues et géomorphologues, compte tenu de ses difficiles conditions d'accès.

Il faut voir l'origine de ce massif qui culmine à 2876 mètres (Maromokotra), comme essentiellement isostasique (soulèvement), tectonique (cassures) et litho-structurale. Aucun argument ne permet d'affirmer qu'il résulte du démantèlement d'une vieille surface d'érosion anté-crétacée (pas plus que pour l'Andringitra).

Le massif est constitué à peu près pour moitié, surtout dans sa partie Nord, de roches granitiques (granites migmatitiques) "dures", issues de la granitisation des séries métamorphiques, l'autre moitié étant formée de gneiss, migmatites et micaschistes. Il ne présente donc pas de particularités lithologiques par rapport aux reliefs collinaires environnants qu'il domine.

Depuis les sommets, l'Andringitra est constitué de reliefs profondément disséqués (photo 16) : de longues échines radiales et sinueuses divergent, se ramifient et s'abaissent vers la périphérie, dominant des reliefs "multifaces" (ou "polyédriques") escarpés et des vallées alluviales étroites encaissées à pentes longitudinales très fortes (8 à 15 %).

Le réseau hydrographique se rassemble en grandes rivières qui débouchent des montagnes avec des débits saisonniers très importants (crues en chasses d'eau) provoquant des dégâts importants dans les plaines rizicoles ; les rivières sont, côté Ouest, la Mahavavy, la Ramena, le Sambirano, la Sandrakota, la Maevarano et la Sofia. Côté Océan Indien il s'agit de la Manapatrana, l'Ankavana, la Lokoho, l'Amparihy, l'Androranga, la Bemarivo, la Fanambana, le Manambato.

D'importants lambeaux de forêts, primaire ou secondaire, subsistent, attaqués de toutes parts par les tavy, et transformés peu à peu, d'abord en "savoka" à *Ravenala* et bambous, puis en savane herbeuse ou lande, parcourue tous les ans par des feux de brousse, précédant les troupeaux transhumants. La forêt, très riche en lianes, est à base de *Gluta tourtour*, *Diospyros* (ébène), *Canarium*, *Terminalia*, *Dalbergia* (palissandre), *Ficus*, *Dombeya*, *Ocotea*, *Dracoena*. A partir de 1000 mètres apparaissent les fougères arborescentes (*Cyathea*) ; les épiphytes deviennent très nombreux (lichens, mousses pendantes, *Asplenium*). A 1300 mètres les arbres ne dépassent pas 4-5 mètres de hauteur. Au delà de 1500 mètres, les ericoïdes deviennent dominants (*Philippia*, *Anthospermum*).

Le massif du Tsaratanana reçoit 1300 à 1500 mm de pluies annuelles avec 1 à 2 mois secs au Sud, contre 1500 à 1800 mm sans mois sec au Nord. Il y pleut donc presque tout le temps.

Les sols sont hétérogènes. L'épaisseur de la couverture altéritique dépend de son degré de troncature, donc de la pente. Sur les dômes, barres et échines granitiques, la roche affleure, ou bien les sols sont peu épais, développés sur altérite rose-jaunâtre, massifs, riches en sables grossiers. Sur gneiss les altérites sont plus épaisses, et portent des sols ferrallitiques rouge à "jaune sur rouge", argileux, structurés, plus ou moins tronqués ou colluvionnés. Sous forêt l'érosion présente la forme de glissements localisés en "coups de cuiller", avec grandes cicatrices d'arrachement. Sous savane et modelé collinaire, surtout à basse et moyenne altitude, on observe des ravinements et lavaka. Les versants rectilignes en pente forte montrent des processus de "creep" (reptation) en "pieds de vache".

A l'intérieur et en périphérie du massif, se trouvent des plaines et bassins d'origine tectonique de grand intérêt agricole : ce sont les plaines du Sambirano (Ambanja) et son mini rift W-E, de l'Ankaizina (Bealanana, Mangindrano, Marotolana...) et de l'Ankaibe (Andapa).

### 3.2 - LE MOYEN-OUEST

#### 3.2.1 - LA SURFACE D'APLANISSEMENT FINI-TERTIAIRE

Les "pénéplaines" herbeuses (sans aucun arbre), quasiment inhabitées (photos 19, 20, 21), parcourues par les feux et les troupeaux transhumants, s'étendent sur des superficies considérables dans le Moyen-Ouest et en occupent la majeure partie. Il s'agit, du Nord au Sud, des pénéplaines de : Kiranomena (800 m), Anosy-Ihazomay (1000 m), Tsiroanomandidy (850 m), Belobaka (825 m), la Sakay (950 m), Mahasolo (900 m), Mandalo-Imanga (825 m), Anjoma-Ramartina (700 m), Mandoto-Kitsamby (900 m), Mandrosonoro (950 m), Ambatofinandrahana (1200 m), Amborompotsy (900 m), Ikalamavony (800 m), Tsintondroina (800 m), Zomandao (775 m).

Le vaste ensemble s'étendant du Nord de Tsiroanomandidy au Sud de Mandoto est constitué de plusieurs (environ six) paliers décalés en altitude (entre 800 et 950 mètres) qui sont autant de niveaux de base "locaux", séparés par des dénivellations en talus de 30 à 50 mètres ou bien par des lames granitiques de reliefs résiduels (~~crêts isoclinaux~~ en général).

L'altitude de la surface fini-tertiaire du Moyen-Ouest est comprise entre 700 et 1100 mètres.

La pluviométrie diminue du Nord au Sud : 1600 mm avec 5 à 6 mois secs (moins de 50 mm) dans la plaine de Kiranomena contre 900 mm avec 6 à 7 mois secs dans la plaine de Zomandao. Les températures suivent la même tendance en fonction de la latitude.

La végétation est une savane herbeuse à base d'*Hétéropogon*, *Hyparrhenia*, *Aristida*...

Les bas-fonds marécageux sont occupés par *Leersia*, *Panicum*, cyperacées, fougères...

En certains endroits une forêt-galerie subsiste (Pénéplaines de Mandalo et de Belobaka, photo 21).

Les pénélaines sont découpées en plateaux festonnés (à pentes de 2 à 5 %) par un réseau hydrographique très dense et hiérarchisé, ramifié en "bois de renne" ; les bas-fonds, terminés en amont en amphithéâtres, sont plus ou moins encaissés et plus ou moins larges suivant les endroits (photo 20). ~~(En règle générale la largeur moyenne des bas-fonds diminue progressivement d'Est en ouest, en même temps que le drainage général s'améliore)~~ Les versants de raccordement aux bas-fonds sont convexes et pentus (30 à 40 %). Le réseau hydrographique est bordé par 1 ou 2 terrasses étagées : une terrasse basse perchée de 1 à 3 mètres, systématique, ~~identique à celle que l'on voit sur les Hauts-Plateaux (terrasse "sambainienne")~~ et une terrasse haute (terrasse "moramangienne"), moins systématique, située entre la terrasse basse (6-10 mètres au dessus) et le plateau ~~(il peut n'en rester sur le versant qu'un simple "épaulement" convexe)~~ La terrasse basse porte des sols gris-jaunâtre argilo-sableux (anciens sols hydromorphes de bas-fonds) à nappe phréatique vers un mètre. La terrasse haute porte des sols rouges ferrallitiques avec une semelle ou des niveaux de galets (il peut ne subsister après érosion, que des galets).

Les surfaces d'aplanissement (en particulier celles d'Anosy, Mahasolo, Sakay, Mandalo, Mandoto) sont souvent parsemées de cuvettes fermées sub-circulaires (diamètre 20 à 200 mètres), enchassées de 1 à 3 mètres, inondables en hivernage (photo 20). Une cuirasse ferrugineuse discontinue les borde (induration de la plinthite). Ces cuvettes semblent plus nombreuses vers l'Est que vers l'Ouest. Comme sur les tampoketsa et sur les "sables roux" de l'Ouest, il s'agit de formes de soutirage ("suffosion"), activé par la nappe phréatique d'altérite (permanente mais circulante) qui évacue en profondeur, produits d'hydrolyse et substances colloïdales (dont argiles et silice). Cette perte de matière provoque l'affaissement de la voûte en surface. La suffosion est donc un processus pseudo-karstique, les cuvettes étant comparables aux dolines des pays calcaires.

Les sols des plateaux sont des *sols ferrallitiques moyennement à faiblement désaturés* ( $V = 30$  à  $60$  %), à pH 5,5 à 6, donc d'une fertilité intrinsèque un peu supérieure à celle des sols comparables des Hauts-Plateaux. Une autre différence tient à leurs propriétés physiques : leur structure, sous l'horizon de surface et sur une épaisseur de 0,50 à 1 mètre est généralement faiblement développée à poudreuse du fait d'une grande richesse en "pseudosables", qui sont des particules très stables argilo-ferrugineuses (sesquioxydes pectisés) enrobant des grains de quartz. A l'état sec le matériau est facilement pulvérulent, à l'état humide il est très friable. Travaillés, ces sols sont donc sensibles à l'érosion éolienne. Ils sont également extrêmement perméables.

Une autre caractéristique des sols de plateaux du Moyen-Ouest est la présence fréquente d'une "stone-line" quartzreuse entre 50 cm et 150 cm de profondeur (si toutefois le substratum contient des filons de quartz) alors qu'aucun élément grossier ne jonche la surface. Les caractères du sol rouge sont souvent identiques au dessus et en dessous de la

stone-line. L'origine de cette stone-line a fait l'objet de diverses hypothèses (qui ne seront pas discutées ici).

### 3.2.2. LA SURFACE D'APLANISSEMENT MÉSO-TERTIAIRE

Le Moyen-Ouest nous montre deux témoins importants de la surface méso-tertiaire :

- *le plateau de l'Antsohitikely (ou d'Ambohijanahary)* : d'une altitude moyenne de 1100 mètres, il domine l'escarpement du Bongolava et coiffe le massif du même nom, à l'Ouest de la "cuvette" de Kiranomena (surface fini-tertiaire). Le plateau tronque des granites migmatitiques et a sans doute été protégé de l'érosion régressive grâce à d'épaisses lames de granites stratoïdes à faible pendage. Un important lambeau de forêt primaire ombrophile (forêt d'Ambohijanahary) de type "façade orientale", y subsiste, protégé et classé en "réserve spéciale". La pluviométrie moyenne annuelle y est de l'ordre de 1500 mm avec 6 "mois secs" ( $P < 50$  mm). Les sols sont des ferrallitiques fortement désaturés.

- *le plateau de l'Horombe* : il s'étend, vers 1000 mètres d'altitude, entre Ihosy et Ranohira, sur environ 3500 km<sup>2</sup>. Son inclinaison Nord-Est/Sud-Ouest le place en continuité topographique avec les buttes tabulaires sommitales du massif gréseux de l'Isalo et les buttes cuirassées situées derrière ce massif. La surface méso-tertiaire semblait donc recouper uniformément le sédimentaire et le socle, avant l'évidement de la dépression périphérique de Ranohira. La conservation de cette surface ne paraît pas d'origine lithologique, le substratum étant constitué de gneiss très altérables, même si des rides granitiques appalachiennes "arment" ces gneiss. Climatiquement ce plateau appartient déjà à la zone sub-aride, avec un total pluviométrique annuel de 750 à 900 mm, avec 7 à 8 mois "secs".

Le modelé du "plateau" présente de très larges interfluves à pentes faibles, dus à un réseau hydrographique peu encaissé orienté ENE-WSW. Quelques rides granitiques (NNE-SSW) rompent la monotonie du paysage. La partie centrale du plateau paraît déprimée, avec la présence de cuvettes et mares, permanentes ou temporaires. Elle correspond dans ses parties "hautes", à la présence de *sols ferrallitiques rouges à carapace ferrugineuse*, ou à gravillons ferrugineux entre 1 et 1,5 mètres de profondeur. Il s'agit d'une ancienne zone hydromorphe tachetée ("plinthite") où les oxydes de fer se sont concentrés dans la frange de fluctuation de la nappe phréatique. Dans les zones périphériques du "plateau déprimé" central à indurations ferrugineuses, les sols sont des ferrallitiques rouges à stone-line fréquente. Des sols ferrallitiques "jaune-rouge" appauvris en argile et à concrétions gibbsitiques existent sur le rebord oriental, parfois associés à des sols lavés à sables blancs pseudo-podzoliques.

La végétation de l'Horombe (étudiée par P. Morat, 1973) est une savane graminéenne sans arbre (sauf localement), assez peu couvrante, à base de *Loudetia*, *Heteropogon*, *Trachypogon*, *Chrysopogon* et *Aristida*. Dans les bas de pente (conditions plus favorables ?) peut se trouver une savane haute à *Hyparrhenia*.

Au Sud et à l'Ouest du plateau se trouvent quelques savanes arbustives à *Poupartia cafra* ("*Sakoa*"). Dans les zones hydromorphes on observe des associations végétales en auréoles selon l'intensité de l'hydromorphie.

### **3.2.3 - LES RELIEFS RÉSIDUELS ET RELIEFS DE DISSECTION DES SURFACES D'APLANISSEMENT**

Ces types de milieu ont été décrits à l'occasion des exposés concernant les Hauts-Plateaux, c'est pourquoi nous les citerons ici surtout pour mémoire.

Les reliefs résiduels granitiques du Moyen-Ouest se dégagent bien dans le paysage par contraste avec les étendues immenses et monotones constituées par les "pénéplaines" finitertiaires (photos 19 et 24). Ils forment deux grands types de modelés :

⇒ **des ensembles montagneux complexes**, avec des crêtes de différentes directions, associant granites (armatures), gneiss et micaschistes : il s'agit au Nord, de la région du Bongolava, puis de la région qui sépare les pénéplaines de Kiranomena et de Tsiroanomandidy. Dans la région Centre il s'agit de la partie du bassin de la Mania qui est située à l'Ouest de la série "schisto-quartzo-calcaire" du système de l'Itremo. Ici les granites, gneiss, micaschistes sont imbriqués étroitement, les reliefs sont très accidentés et la couverture altéritique est fortement ravinée.

⇒ **des rides appalachiennes à orientation sub-méridienne** : ces reliefs sont très abondants à partir du Sud de la pénéplaine d'Ikalavavony ; les granites, très redressés, forment des crêtes isoclinales rocheuses, parallèles, parfois très serrées, particulièrement autour de la plaine du Zomandao elle même traversée par ces rides qui forment des inselberg allongés Nord-Sud.

### **3.2.4 - LA BORDURE ÉRODÉE DOMINANT LE BONGOLAVA**

De Maevatanana au Nord à Ranohira au Sud, le socle précambrien domine les séries sédimentaires évidées et ravinées du Karoo ("Betsiriry") suivant une dénivellation ("Bongolava") plus ou moins escarpée (200 à 800 mètres), cause d'une érosion importante et généralisée qui se prolonge en amont, sur une largeur de 2 à 30 kilomètres.

Dans cette bande, le manteau altéritique à couverture graminéenne très lâche est attaqué profondément et toutes les formes d'érosion s'y manifestent souvent de façon spectaculaire : glissements des versants, "pieds de vache" généralisés, ravinements linéaires de toutes les profondeurs ("bad-lands"), lavaka, décapage en nappe (photos 22 et 23). La surface du sol, a modelé de détail tourmenté, est généralement jonchée d'éléments grossiers anguleux à base de quartz. Le réseau hydrographique présente un chevelu extrêmement ramifié et charrie du sable quartzo-micacé qui vient alimenter les rivières importantes dans la dépression sédimentaire ou s'accumulent les "baibohos".

## **3.3 - LA FACADE ORIENTALE**

Elle s'étend d'Antalaha au Nord à Fort-Dauphin au Sud, sur une bande longue de 1200 km et large de 40 à 180 km à vol d'oiseau (du niveau de la mer à 1200/1600 mètres d'altitude), suivant une direction NNE-SSW qui est la direction structurale et tectonique majeure de Madagascar. Mise à part l'échancrure du Rift de la Baie d'Antongil (NNW-SSE) le tracé de la côte est remarquablement rectiligne, régularisé par les cordons littoraux sableux flamandais-actuels. La façade orientale correspond à la "cicatrice" de la rupture et de l'individualisation de Madagascar par rapport au Gondwana, au crétacé. Cet accident

fondamental suivi par le soulèvement de Madagascar suivant la même direction NNE-SSW a provoqué une érosion régressive de l'Est vers l'Ouest suivant un front mordant sur les Hauts-Plateaux et gardant cette direction sub-méridienne. Ce front d'attaque des Hautes Terres Centrales forme de grands "escarpements" montagneux fortement disséqués que l'on appelle à Madagascar des "falaises" (falaise de l'Angavo, falaise Betsimisaraka, falaise Tanala). La bordure amont du front d'attaque, à partir de laquelle commencent les "Hauts-Plateaux", est située à une altitude de 1200 à 1700 mètres. Des fossés d'effondrement (Alaotra-Mangoro, pays Tanala, zone de Iazafo), allongés NNE-SSW, viennent interrompre ou adoucir l'aspect montagneux.

La façade orientale montagneuse ou collinaire porte les reliques les plus importantes de la forêt ombrophile per-humide. En effet cette région est exposée directement aux alizés humides et aux cyclônes issus de l'Océan Indien. Il y pleut en moyenne : 1500 à 3200 mm par an. Il n'y a pratiquement pas de saison sèche.

La façade orientale, pour sa majeure partie, présente un substratum précambrien cristallin. Seul cet ensemble sera traité ici. Des nappes basaltiques et des sédiments créacé ainsi que des alluvions et des cordons sableux bordent une partie du littoral. Nous en parlerons plus loin.

Concernant le socle cristallin, 3 grands ensembles physiographiques se distinguent :

- ⇒ les reliefs montagneux multifaces forestiers,
- ⇒ les reliefs de hautes collines convexes,
- ⇒ les bas-plateaux, restes de surfaces d'aplanissement fini-tertiaires.

### **3.3.1 - LES RELIEFS MONTAGNEUX MULTIFACES FORESTIERS**

Les "vraies" montagnes dominant à l'Ouest les régions d'altitude moyenne et plus littorales de hautes collines et bas-plateaux. Au Nord (Antongil), les montagnes commencent très près de la côte ; en allant vers le Sud (de Fénérive à Manantenina) la bande collinaire s'élargit et les montagnes ne commencent qu'à environ 25-50 kilomètres du rivage ; cette bande se réduit à nouveau dans l'extrême Sud à moins de 10 kilomètres de large. Ces reliefs sont compris entre 400 et 1600 mètres d'altitude.

#### **◆ Le modelé**

C'est typiquement un relief "multifaces" (ou "polyédrique") forestier, présentant un chevelu hydrographique dense et très ramifié à vallées étroites et un réseau de crêtes montrant "symétriquement" les mêmes densités, ramifications (crêtes maîtresses, secondaires, tertiaires...) et étroitesse (photos 25, 26, 27). Entre crêtes et vallées, les versants triangulaires à orientations multiples, présentent des pentes fortes (25 à 70 %).

Les régions les plus fortement accidentées sont les "falaises" occidentales qui, sur 10 à 30 km à vol d'oiseau, ont une dénivellation de 500 à 800 mètres. Les bassins versants élémentaires amont sont toujours très "compacts" et pentus.

Les vallées alluviales d'une largeur significative ne commencent à apparaître que loin en aval. Les orientations des grandes vallées (donc des grandes crêtes) sont commandées par la lithologie (granites), la structure (crêtes appalachiennes) et la tectonique (failles, diaclases)

du socle, souvent d'orientation sub-méridienne, avant de percer "en baïonnette", via des accidents transverses, ces reliefs N-S. Le cas le plus spectaculaire est le réseau du Faraony en pays Tanala (Ifanadiana). En certains endroits le tracé en baïonnette présente la physionomie inverse, c'est à dire que les directions principales sont E-W et non plus N-S, avec de longs tronçons rectilignes vers la mer, dans le sens de la pente générale (Sud d'Ikongo en Pays Tanala).

Alors qu'au sol on est "noyé" dans un fouillis apparent de versants, crêtes et vallées, à un niveau supérieur, en survol aérien, il est remarquable de constater l'apparition d'ordre et d'orientations dans ces différents modelés avec des modalités différentes de dissection et des directions privilégiées des crêtes et des vallées. Cet ordre épouse les grandes structures géologiques, en particulier les racines des plissements métamorphisés (avec alignements parallèles appalachiens), les grandes fractures et les différences de dureté des roches suivant leur degré de granitisation.

La dissection ne progresse donc pas au hasard et se fait suivant des modalités différentes en fonction de la géologie.

#### ◆ Du point de vue climatique

La zone la plus arrosée est la partie Nord, particulièrement de Fénériver à Antalaha, avec 2800-3200 mm annuels. Au Sud la pluviométrie passe en gros de 2400 mm (avec 0 mois sec) à 300 mètres d'altitude à 1600 mm (avec 2 mois secs) sur le rebord des Hauts-Plateaux (1200 à 1600 mètres d'altitude). La température moyenne du mois le plus frais est supérieure à 20° sur la côte, puis comprise entre 15 et 20° jusqu'à 1000 mètres d'altitude, enfin comprise entre 10 et 15° au dessus de 1000 mètres. On a un gradient décroissant de température (pour une même altitude) du Nord au Sud (en augmentant en latitude), et également (pour une même latitude) de la côte vers la bordure des Hauts-Plateaux (en augmentant en altitude).

#### ◆ Concernant la couverture végétale

La forêt dense humide naturelle est encore très fournie sinon intacte dans le Nord de la façade orientale ou elle commence dès le rivage : Antalaha, Moroantsetra, Mananara. A partir de Mananara, les formations secondaires ("Savoka") consécutives aux déboisements et cultures sur brûlis ("tavy") commencent à grignoter la forêt et la repousser loin de la côte, vers les reliefs intérieurs les plus accidentés et inhabités. A la latitude de Fénériver la forêt naturelle ne commence qu'à 40 km du rivage. Au Sud de la latitude de Vatomandry et jusqu'à Vangaindrano la forêt intacte se rétracte et est repoussée de 50 à 100 km vers l'intérieur où elle se restreint à la "falaise" (sur une largeur de 10 à 30 kilomètres seulement) ou bien sur les reliefs les plus hauts (rides N-S). Au Sud de Vangaindrano et jusqu'à Fort-Dauphin elle redevient à nouveau plus fournie.

La forêt malgache est une des plus riches au monde (plus de 2000 espèces) avec un très fort taux d'endémicité (36 % au niveau des genres et 90 % au niveau des espèces !).

• *Jusqu'à 800 mètres d'altitude* la forêt dense, d'une hauteur de 25-30 mètres pour sa strate supérieure, est constituée d'une vingtaine de familles avec surtout *Anthostema*, *Diospyros* (ébène), *Protorhus*, *Cussonia*, *Sloanea*, *Flacourtia*, *Ocotea*, *Ravensara*, *Canarium*, *Tambourissa*, *Eugenia*, *Syzygium*, *Dombeya*, *Dracaena*, *Dalbergia*... En dessous de cette strate haute (riche en épiphytes : orchidées, fougères, lichens, mousses,

lianes), se trouvent une strate moyenne et une strate inférieure herbacée riche en fougères acaules.

Les formations secondaires ou "savoka" peuvent être de trois sortes :

- ⇒ savoka à *Lantana* (corbeille d'or), *Rubus* (vigne marronne), *Dodonea*, *Afromamum* (longoze), *Psiada*,
- ⇒ savoka à *Harungana*, *Solanum*, *Clidemia*, *Trema*, *Macaranga*, *Albizia*, *Croton*,
- ⇒ savoka à *Ravenala* (arbre du voyageur) ou *Ochlandra* (bambou).

Au stade "savane", on trouve des graminées (*Aristida*, *Imperata*, *Hyparrhenia*) parfois avec un piquetage de *Psidium* (goyavier), *Albizia*, fougères, *Philippia*.

• **Au dessus de 800 mètres d'altitude** les arbres sont moins hauts (10 à 15 mètres) avec surtout *Weinmania*, *Toubourissa*, *Symphonia*, *Brachylaena*, *Canarium*, *Dalbergia*, *Dombeya*, *Eugenia*, *Grewia*, *Ravensara*, *Sloanea*, *Zanthoxylum*. Les épiphytes sont très nombreux : fougères, lichens, usnées, mousses pendantes, orchidées, kalenchoe. La strate moyenne est riche en *Croton*, *Cyathea* (fougères arborescentes), *Diospyros*, *Dracaena*, *Hedycariopsis*, *Pandanus*, *Protorhus*, *Vernonia*, *Psiadia*, *Senecio*, *Uapaca*. Les formations secondaires (savoka) de cet étage 800-1600 mètres sont à base de *Harungana*, *Solanum*, *Dombeya*, *Trema*, *Ravenala*. A un stade plus avancé de dégradation, on voit apparaître *Philippia*, *Agauria*, *Helichrysum*, fougères. Enfin, au stade savane : *Aristida*, *Heteropogon*, *Hyparrhenia*, *Rhynchelitrum*.

#### ◆ Les sols

Sur ces versants à pentes fortes, les sols, reposant sur une zone d'altération argilo-sablonmicacée de plusieurs mètres d'épaisseur, sont des sols ferrallitiques, souvent remaniés, tronqués ou colluvionnés. Sous forêt, le taux de matière organique est élevé et augmente avec l'altitude (5 à 8 %), mais les sols sont chimiquement très pauvres, fortement désaturés et acides (pH 4,5 à 5). En position relativement stable ce sont des *sols ferrallitiques "jaune sur rouge"*, riches en concrétions gibbsitiques. On observe un appauvrissement en argile dans la partie supérieure jaunâtre (20 à 30 % d'argile contre 30 à 50 % en dessous). Les minéraux argileux sont composés essentiellement de kaolinite, goéthite et gibbsite. Sur pentes fortes, les sols sont tronqués ou recouverts de colluvions de pente, donc extrêmement hétérogènes, avec parfois une forte proportion d'éléments grossiers.

#### ◆ La morphodynamique

Les pentes fortes, la "compacité" des bassins versants, les pluies abondantes et à fortes intensités (surtout au cours des périodes cycloniques), la nature des altérations, les déboisements et "tavy", sont des facteurs qui génèrent une forte instabilité des versants et des écoulements torrentiels dans le réseau hydrographique.

Sous forêt naturelle il y a un équilibre global et l'évolution est lente (glissements, reptation...). De temps à autre l'infiltration excessive crée une poche d'eau qui provoque un glissement ponctuel rotationnel ("coups de cuiller") avec niche de décollement de moins d'un quart d'hectare, sur lequel se reconstituera assez rapidement le couvert végétal antérieur.

Une fois la forêt disparue, remplacée par la savoka et la jachère après le tavy, l'effet

régulateur et tampon de la forêt sur l'infiltration et le ruissellement disparaît. Les phénomènes érosifs s'amplifient et déclenchent de façon brutale après de forts épisodes pluvieux une "liquéfaction-fluage" des couches argileuses : glissements, éboulements, coulées boueuses, mouvements de masse. Les versants peuvent alors être zébrés, parfois sur toute leur hauteur (photo 26), de longues cicatrices d'arrachement de couleur claire (beige, rose ou rouge...).

La concentration du ruissellement augmente et le réseau hydrographique prend un régime torrentiel (photo 27) qui renforce l'érosion par sapement des bas de versant et déclenchement de glissements qui se propagent d'aval en amont des versants. Les coulées de boue et la végétation arrachée viennent obstruer les talwegs avec barrages de rétention qui crèvent en chasses d'eau, provoquant des dégâts en aval sur les ouvrages (routes, voie ferrées, ponts...).

### 3.3.2 - LES RELIEFS DE HAUTES COLLINES CONVEXES

On peut distinguer trois grands ensembles :

⇒ le "Pays" *Bezanozano* : bande NNE-SSW composée du sillon du Mangoro et des collines orientales de l'Ankay, au Nord et au Sud de Moramanga (600-950 mètres d'altitude),

⇒ le "Pays" *Tanala* : sillon Ifanadiana-Ikongo-Ifanirea (400-600 mètres d'altitude).

⇒ les hautes collines de la bande côtière : entre Fénériver et Fort Dauphin (moins de 400 mètres d'altitude)

◆ **Le modelé** : le paysage apparaît comme un moutonnement de collines fortement convexes sur socle, du type "demi-orange", dominant un réseau bien hiérarchisé de bas-fonds plats, marécageux ou rizicultivés. Ce modelé résulte du "défonçage" de la surface d'aplanissement fini-tertiaire (photo 30) dont on trouve des lambeaux, en tant qu'anciens niveau de base locaux, à différentes altitudes, soit à l'intérieur des zones montagneuses, du fait de la tectonique (horst et graben de l'Ankay et du Mangoro, effondrement de la plaine de Ranomafana, failles et compartiments affaissés du pays Tanala et d'Izafo), soit de façon plus généralisée sur la bande côtière jusqu'à 400-500 mètres d'altitude.

Sur le plateau oriental de l'Ankay, en partie déforesté sont encastrées de vastes cuvettes marécageuses (qui sont du Nord au Sud : Didy, Fierenana, Torotorofotsy) qui drainent difficilement vers l'Est, des barres granitiques ayant protégé ce plateau allongé (horst ?) d'une dissection plus avancée.

Le Pays Tanala, quant à lui, possède un modelé intermédiaire entre hautes collines et montagnes ; les pentes y sont de 30 à 50 % et fréquemment occupées par des tavy ; les bas-fonds sont étroits.

◆ **La végétation** : en règle générale les collines en demi-orange sont occupées par une formation secondaire de savoka à *Ravenala* et bambous en dessous de 400 mètres d'altitude, puis se dégradant en savane herbeuse à *Aristida*, *Imperata*, *Hyparrhenia*, *Andropogon*, *Digitaria*, *Philippia*, fougères, piquetée de *Ravenala* et de *Rubus*.

◆ **Sols et morphodynamique** : les collines convexes possèdent un épais manteau d'altération qui peut même constituer l'ensemble de leur volume. Ces altérites se différencient dans les mètres supérieurs en *sols ferrallitiques "jaune sur rouge"* très fortement désaturés, à pH très acides (4,5 à 5), absolument vides chimiquement, dont la seule richesse est constituée, quand elle existe encore, par la matière organique relique de la couverture forestière (2 à 5 %). Mais en général les tavy, les feux répétés et le décapage ont fait disparaître cette couche humifère. Ces sols sont généralement riches en concrétions gibbsitiques de couleur crème.

Les collines, lorsque la forêt est partie, sont soumises à une érosion active par décapage en nappe et par "creep" sous forme de "pieds de vaches" généralisés.

### 3.3.3 - LES BAS-PLATEAUX, RESTES DE SURFACES D'APLANISSEMENT FINI-TERTIAIRES

A partir du crétacé, la façade orientale a subi une série de réajustements tectoniques en même temps que les Hauts-Plateaux se soulevaient. Les zones littorales, relativement stables à la fin du tertiaire, ont permis le façonnement d'une surface d'aplanissement à partir du rivage sur une bande d'environ 50 kilomètres de large. Le soulèvement isostatique post-tertiaire ayant continué au pleistocène, la surface fini-tertiaire a été portée à faible ou moyenne altitude. Le soulèvement de Madagascar a été plus important au Nord qu'au Sud. De ce fait les lambeaux actuels de la surface fini-tertiaire sont à des altitudes différentes ; ainsi, du Nord au Sud on observe les plateaux ou "pénéplaines" suivants :

- ◇ plateau de Mahakira : 900 m
- ◇ plateau de l'Antanetivy : 600 m
- ◇ plateau de Tamatave-Foulpointe : 160 m
- ◇ plateau de Ranomafana-Brickaville : 150 m
- ◇ plateau de Mahanoro : 200 m
- ◇ plateau de Mananjary : 100 m
- ◇ pénéplaine Antaisaka-Antaifasy : 100 m
- ◇ pénéplaine de Manantenina : 60 m.

Dans la moitié Sud de la façade orientale, la surface fini-tertiaire coiffe et tronque aussi les coulées basaltiques crétacées, au même titre que le socle plus dans l'arrière pays. Nous parlerons de ces basaltes un peu plus loin.

La surface fini-tertiaire était donc pratiquement continue de Mananara à Fort Dauphin sur une largeur de 20 à 60 kilomètres sous la forme de vastes glacis en piémont des hauts reliefs orientaux. Une partie a été disséquée au cours du quaternaire pour donner les reliefs convexes en demi-oranges. Les lambeaux les plus grands et les mieux conservés sont présents dans la moitié Sud où il semble que les soulèvements isostatiques ont eu une plus faible ampleur qu'au Nord.

#### ◆ Les sols

Ce sont des *sols ferrallitiques jaune/rouge*, légèrement appauvris en argile en surface, très fortement désaturés, acides (pH 4,5 à 5), riches en aluminium échangeable et en concrétions gibbsitiques.

Dans le Sud (Manantenina), la zone d'altération, tachetée, s'est enrichie en oxydes de fer et d'aluminium et s'est localement indurée en cuirasse ferrugino-bauxitique.

### 3.4 - L'EXTREME SUD

L'extrême Sud cristallin comprend l'essentiel des "pénéplaines" Androy-Mahafaly et "bas-pays" Bara. Cet aplanissement est le plus vaste de Madagascar d'un seul tenant. Il est drainé par 5 fleuves : le Mandrare (le seul pérenne), la Manambovo, la Menarandra, la Linta, l'Onilahy. Il appartient aux domaines aride et sub-aride avec une pluviométrie comprise entre 500 mm au Sud et 800 mm au Nord-Est et avec 7 à 8 mois "secs" (à moins de 50 mm). Du fait de la latitude, l'amplitude thermique (8°) interannuelle est la plus élevée de Madagascar.

#### ◆ Géologie

L'absence de couverture ferrallitique et l'arasement jusqu'à l'arène permettent une bonne "lecture" géologique de la litho-structure. C'est dans le Sud que Besairie (1954) a reconnu et défini les trois grands systèmes orogéniques en discordance du socle précambrien pour ensuite les étendre à l'ensemble du socle Malgache ; du plus ancien au plus récent et d'est en Ouest, ce sont les systèmes de l'Androy (le plus vaste dans le Sud), du Graphite et du Vohibory.

Dans le Sud, les axes des plissements (anticlinaux et synclinaux), parfaitement visibles, sont de direction sub-méridienne et possèdent un pendage très redressé, souvent vertical. La lithologie et l'arasement différentiels dégagent les roches les plus dures en rides, murs ("koppies", photo 18), crêts appalachiens monoclinaux et inselbergs Nord-Sud sur de longues distances parfois. Ce sont surtout des granites migmatiques stratoïdes, des quartzites, et des cipolins. Mais il y a aussi des roches intrusives (granites ou gabbros) qui donnent des inselbergs en dômes. Recoupant ces structures méridiennes suivant une direction WNW/ESE s'observent des faisceaux serrés de filons et dykes crétacés (plus de 500 au total) composés de dolérites, basaltes et rhyolites.

Du point de vue tectonique, l'accident majeur s'est produit au Crétracé supérieur, par l'effondrement, à l'Est, de l'Androy Mandraréen (ou la surrection du Haut-Pays Bara), qui a délimité un rebord tectonique ("rebord manambien") en arc de cercle sur 120-150 km de long, avec une dénivellation de 600 à 1000 mètres.

On peut mettre cette tectonique en correspondance avec d'autres évènements crétacés : la fracture "côte Est", le soulèvement d'ensemble des Hauts-Plateaux et les épanchements volcaniques basalto-rhyolitiques généralisés du pourtour de Madagascar et de la zone des Tampoketsa. Le rebord Manambien est autant, sinon davantage, une cassure due au soulèvement du "Haut Pays Bara" au Nord, qu'à une subsidence du Mandrare. En effet l'extrême Sud, contrairement au reste du socle, semble avoir subi peu de dislocations déformantes et de soulèvement isostasique.

#### ◆ Couverture végétale

Le couvert végétal, très peu dense, est adapté aux conditions climatiques semi-arides à faible pluviométrie annuelle mais pluies brutales et intenses, aux feux de brousse et aux ruissellements en nappe. La formation la plus courante est la savane à *Hyparrhenia* et *Aristida*, piquetée d'arbres de moins de 10 mètres composés de *Poupartia caffra* (Sakoa).

Mais ces arbres peuvent être absents et la savane herbeuse se maintient sur de grandes distances. Le long des goutières et thalwegs des ondulations du paysage, on peut observer une savane arbustive ou un taillis épineux à *Acacia Sarnesiana* ("roy").

Dans la "pénéplaine" de Tranomaro (Mandrare) apparaissent des baobabs. Au Sud de cette région la plaine de Mananara (carapace calcaire sur cipolins) est couverte d'un bush dense à *Didiera*, *Alluaudia* et Euphorbes.

Les rochers dénudés portent quelques plantes grasses : Aloes, *Pachypodium*, Euphorbes naines.

#### ◆ Géomorphologie

L'ensemble constitué par les "pays" Androy, Mahafaly et Bara du Sud, d'une altitude comprise entre 900 mètres au Nord à 200 mètres au Sud a été "raboté" en un vaste aplanissement fini-tertiaire "rajeuni", à vastes ondulations et faibles dénivellations, monotone, dominé en certains endroits par des reliefs résiduels appalachiens et inselbergs granitiques ou quartzitiques. L'Androy Mandraréen est occupé en son centre par un vaste plateau basalto-rhyolitique crétacé à une altitude moyenne de 900 mètres (voir plus loin) surplombant la pénéplaine de Tranomaro par des falaises impressionnantes.

Ce vaste ensemble arasé est nettement délimité de tous les côtés :

- *au Nord et au Nord-Est* (hauts-bassins de l'Onilahy et de la Menarandra) : la surface fini-tertiaire est bordée par les haut-reliefs et hautes plaines du haut-pays Bara qui se raccordent au plateau de l'Horombe (surface méso-tertiaire à 1000-1100 mètres d'altitude). Au Sud de l'Horombe et à l'Est, de Betroka à Isoanala et Berakety, une grande quantité de reliefs résiduels en crêts appalachiens et inselbergs granitiques (dénivellations jusqu'à 500 à 1000 mètres entre Isoanala et Beraketa) orientés N-S dominant le Nord et l'Est de la surface fini-tertiaire qui s'y insinue en golfes et digitations. Ces faisceaux d'alignements granitiques se poursuivent vers le Sud jusqu'à Antanimora.

- *à l'Est* (bassin du Mandrare) : la pénéplaine fini-tertiaire est "fermée" et dominée à l'extrême Est par les reliefs N-S des chaînes Anosyennes granitiques qui culminent entre 1600 et 2000 mètres et qui constituent une barrière climatique très efficace entre le Sud et l'Est ("faille pluviométrique"). Au Nord de l'Androy oriental se dresse le rebord Manambien résultant d'une tectonique en arc de cercle sur 120 km de long. Il présente une dénivellation de 600 à 1000 mètres, mais ne constitue pas un rempart régulier. C'est au Nord-Ouest qu'il est le plus beau ; plus à l'Est, il est effondré en plusieurs talus et épaulements successifs. Chaînes Anosyennes et rebord Manambien sont couverts d'un manteau altéritique épais et continu, permettant des formes d'érosion en vastes glissements, ravinements et lavaka.

A l'Ouest de Beraketa, le rebord Manambien est chapeauté par le plateau du Kely-Horombe (1400 mètres), témoin d'une surface ancienne fini-crétacé ou méso-tertiaire.

- *au Sud et au Sud-Ouest* : le socle aplani est bordé par la couverture détritique grésosableuse pliocène appelée par les géologues "carapace sableuse" ou "sables roux" qui constitue les sédiments corrélatifs de l'aplanissement fini-tertiaire (voir plus loin). La limite "socle-sable roux" est marquée par une cuesta discontinue, modelée par l'érosion

différentielle et traversée par les fleuves Linta, Menarandra et Manambovo.

• à l'Ouest : se trouve le sédimentaire continental de la série du Karoo (Sakoa et Sakamena). Le contact Karoo-socle est haché par des failles NNE-SSW.

#### ***- La surface fini-tertiaire originelle***

La pénéplaine Androy-Mahafaly, avec ses larges ondulations, ses rides et crêtes appalachiens, ses "murs" de koppies et son absence de couverture altéritique argileuse, correspond au rajeunissement d'une surface d'aplanissement originelle fini-tertiaire, dont subsistent un certain nombre de buttes et plateaux témoin, en particulier :

- le plateau d'Analamatahotra au SSW de Beraketa, à 480 mètres d'altitude, avec une dénivelée de 70 mètres, chapeauté par une altérite ferrallitique cuirassée, sur quartzites et granites,
- le plateau de Fotadrevo, 30 km au NW de Bekily, à 490 mètres d'altitude (dénivelée 60 mètres), coiffé d'une croûte calcaire sur cipolins.
- les buttes de Soamanonga, à l'WNW du plateau précédent, vers 500 mètres d'altitude (dénivelée, 40 à 100 mètres), couvertes de sables roux pliocènes,
- les sommets d'interfluves situés entre 420 et 390 mètres d'altitude, entre Fotadrevo et Ejeda, avec nombreux lambeaux de carapace ferrugineuse ou de croûte calcaire suivant la nature du substrat,
- les buttes du Vohibataza, au NNE d'Ampanihy, vers 400 mètres d'altitude (dénivelée 100 mètres).

Certaines de ces buttes possèdent également des reliques de grès pliocènes (grès violets, argiles bariolées et "sables roux") transformés en grès ferrugineux. Ces buttes paraissent en continuité topographique avec les vastes épandages de sables roux pliocènes du Sud (plateaux d'Ambaliandro, de Lovokarefo, de Retanja et d'Andranoabo). Ce sont les témoins de la surface fini-tertiaire d'origine qui aurait été suivie d'un ou plusieurs cycles "humide (altération ferrallitique)-semi-humide (carapace ferrugineuse, croûte calcaire)", avant d'arriver à la phase sub-aride actuelle qui a vu -et voit encore- son "rajeunissement". Ces cycles "pluvial-displuvial" ont pu être corrélés avec les phases "transgressions-regressions marines" reconnues par Battistini (1964) dans les complexes grésodunaires du Sud (voir plus loin), qu'il a défini par la "grande dune rouge Tatsimienne" et "la petite dune jaune Karimbolienne".

#### ***- Le rajeunissement de la surface fini-tertiaire : état actuel***

Actuellement, la "surface fonctionnelle" a été presque partout déblayée de l'épais manteau d'altération argileuse à sols ferrallitiques formé au quaternaire ancien et moyen (pleistocène) sous climat humide sur la surface fini-tertiaire originelle. Seules les buttes résiduelles, sous leurs "chapeaux" durcis en carapace et leurs glacis de piémont périphériques, montrent encore des altérites argileuses kaoliniques (blanches ou roses), ou micacées transformées en sols vertiques. La reprise d'érosion ("rajeunissement") a déblayé 20 à 100 mètres d'altérites (ce sont les dénivellations actuelles des plateaux et buttes témoins). La surface actuelle présente de faibles dénivellations, avec des ondulations à très longs versants (pentes

inférieures à 5 %). Ce modelé est façonné, par troncature des altérations anciennes jusqu'à leurs racines, c'est à dire jusqu'à l'arène, plus sablo-micacée qu'argileuse. Les bancs durs (s'altérant moins vite) tels que granites, leptynites, quartzites et cipolins, restent en léger relief et forment de très longs murs fissurés de 1 à 5 mètres de haut ou alignements de blocs de 1 à 50 mètres de large, appelés "Koppies" (photo 18). Ils forment des micro-reliefs appalachiens plus ou moins serrés. Vus d'avion, les racines et axes des plissements à pendages sub-verticaux et de direction le plus souvent N-S sont parfaitement visibles, par leurs couches métamorphiques (anciennes roches sédimentaires) dont les arènes et blocailles de surface sont de couleurs différentes (plus ou moins sombre), que soulignent les bancs durs, et dont les plus tendres, en creux, sont comblés de sables roux, ou sont soulignés par les oueds du réseau hydrographique, souvent d'aspect "en baïonnette". Lorsque les noyaux et bancs granitiques sont plus larges, on passe, dans certaines régions, aux reliefs appalachiens (en crêts monoclinaux à pendages très forts) ou aux monolithes de type inselberg à surface lisse, pouvant avoir 50 à 400 mètres de dénivelée au dessus de la surface fonctionnelle actuelle. Les zones qui montrent les plus beaux reliefs résiduels de ce type sont, du Nord au Sud :

- Sud d'Andriandampy (Sud du Plateau de l'Horombe), dans le haut-bassin de l'Onilahy : longs et hauts crêts appalachiens,

- Ouest de la route Ihosy-Betroka,

- zone Nord d'Isoanala-Anivorano-Sud de Beraketa (magnifique synclinal souligné par des inselbergs de granites stratoïdes) ; cette zone est franchement montagneuse avec des chainons parallèles de 500 à 1000 mètres de hauteur, intermédiaires avec les Hautes-Terres Bara à l'Est.

- Région Sud de Bekily (quartzites surtout)

- Sud d'Imanombo : dans le prolongement méridional du rebord Manambien. Les reliefs résiduels y sont variés (cipolins, quartzites, leptynites, granites).

- Région Andalatanosy-Antanimora, à l'Ouest de la zone précédente. Association de petits et grands inselbergs granitiques, soit en barres appalachiennes (granites stratoïdes), soit en formes plus lourdes de dômes et coupoles (granites intrusifs discordants).

- Plaine de Mahaly et de Tranomaro (haut-Mandrare) : beaux reliefs appalachiens de quartzites, cipolins et granites possédant jusqu'à 300 mètres de dénivelée.

- *Les terrasses alluviales*

Les 5 fleuves qui drainent le grand Sud ainsi que leurs principaux affluents sont bordés, de part et d'autre de leur large lit sableux, d'un système de deux terrasses discontinues :

- une terrasse haute, 10-15 mètres au dessus du lit. Cette terrasse est sableuse et rubéfiée, assez comparable aux sables-roux des épandages détritiques pliocènes. Des lits de galets la sous-tendent,

- une terrasse moyenne (ou basse) : 2 à 5 mètres au dessus du lit mineur ; de couleur brun-grisâtre à jaunâtre elle est souvent plus riche en éléments fins (sables fins et

limons) que la terrasse haute. Elle est inondable. Ses sols sont appréciés par les agriculteurs.

Sous les terrasses et le lit mineur sableux, dans les altérations et les fissures du socle, des encroûtements calcaires déposés par les eaux chargées en carbonates, sont fréquents.

#### ◆ Les sols

- sauf très rares exceptions (vers le Nord), il ne reste plus d'altérites argileuses ferrallitiques rouges.

- Si on doit les "classer" (ce qui présente peu d'intérêt pratique) la plupart des sols rentrent dans les classes des "*Sols ferrugineux tropicaux non lessivés*, des *sols peu évolués d'érosion*, des *régosols*, des *lithosols*, des *vertisols*."

- Le sol le plus courant est constitué d'une *arène peu argilifiée* (moins de 15 % d'argile, 70 à 80 % de sables grossiers) riche en minéraux primaires (quartz, mica, feldspath, grenat, amphibole, pyroxène, calcite...) où les oxydes de fer sont plus ou moins libérés, donnant à ce sol et à sa surface une coloration variée : rousse, rose, beige, grise, noirâtre, jaune, blanche....

Cette arène est épaisse de 50 à 200 cm, devenant plus grossière et compacte en profondeur. La surface est généralement jonchée d'un pavage de blocailles anguleuses de différentes couleurs constituées du démantèlement des différentes roches du socle (granites, leptynites, quartzites, gneiss à grenat, cipolins, amphibolites, roches filoniennes : quartz, dolérites, rhyolites...). Ces cailloux présentent souvent des facettes noircies à patine d'exudation ferromanganique, donnant, quand la végétation est très clairsemée, une allure de reg au paysage. Le pavage est le plus dense au passage des bancs de roches les moins arénisées, et à proximité des "koppies". Entre les cailloux, pointent des termitières rougeâtres coniques de moins de 50 cm de haut.

- Dans les zones dépressionnaires et les moitiés inférieures des longs versants, un voile colluvial discontinu de "**sables roux**" reliques, généralement inférieur à 3 mètres, peut recouvrir et cacher les arènes et leurs blocailles. Ces épandages de sables roux sont surtout fréquents dans la partie méridionale, à l'approche de la couverture détritique pliocène (sables roux en place). Les sols sont alors des *sols ferrugineux tropicaux non lessivés*, sableux, massifs, de 50 à 200 cm, montrant en surface de grandes plages nues à termitières de 20 à 50 cm de haut, et sans aucune végétation du fait du damage par le ruissellement en nappe. Des ravins à parois verticales, qui reculent vers l'amont, s'y forment souvent ("sakasaka").

- Certains sites, sur cipolins ou roches très riches en minéraux calciques, montrent une **croûte calcaire affleurante**, fragmentée en surface (*lithosols calcaires*). Ces zones correspondent souvent à des reliques de la surface fini-tertiaire peu ou non rajeunie, protégées de la reprise d'érosion. On les observe soit sur certaines buttes et plateaux résiduels (plateau de Fotadrevo), soit sur des bombements d'interfluves, par exemple dans la région de Gogogogo (entre Ejeda et Fotadrevo) et surtout au Sud de la Plaine de Tranomaro (Plaine de Mananara) où elle est présente sur de grandes étendues, correspondant à une végétation de fourré xérophile épineux à *Alluaudia*.

- Sur certains plateaux et buttes témoins, perchés 20 à 100 mètres au dessus de la plaine, on peut observer d'anciennes altérations ferrallitiques dont la plinthite s'est indurée

**en carapace ou cuirasse ferrugineuse, pisolitique ou vacuolaire ; on peut aussi y voir des reliques de formations détritiques gréseuses (grès violet) ou argileuses également souvent indurées, de la surface fini-tertiaire originelle.**

- Les zones dépressionnaires et les gouttières, à drainage plus lent, peuvent montrer une argilisation montmorillonitique des arènes, donnant naissance à des **sols vertiques** gris-jaunâtre, parfois à concrétions calcaires.

#### ◆ **La morphodynamique**

Les pénéplaines possèdent des versants à pentes faibles mais longs, ainsi qu'un chevelu hydrographique dense, ramifié et très peu encaissé. La végétation est très peu couvrante ; la savane graminéenne brûle tous les ans, incendiée par les pasteurs transhumants. Les sols sont compacts et damés en surface, à faible infiltration. Les pluies, lors des orages intérieurs ou des cyclones, sont brutales et intenses, tombant sur un sol initialement sec.

Tous ces facteurs concourent à ce qu'il y ait un ruissellement et une érosion en nappe extrêmement importants. Le pavage caillouteux entretient ce ruissellement en nappe (en ralentissant la concentration linéaire des eaux) autant qu'il en est la conséquence. Les particules de sols partent, les éléments grossiers restent et se concentrent sur place. Le ravinement s'observe surtout sur les placages de sables roux, sans cailloux ; ce sont les "sakasaka", ravins de 1 à 3 mètres de profondeur, à parois verticales et fonds plats, remontant la pente un peu plus tous les ans.

Le réseau hydrographique, qui fonctionne en régime d'"oueds", se rassemble en 5 grands fleuves :

- le Mandrare : le seul à avoir de l'eau toute l'année jusqu'à la mer (sauf années exceptionnelles),
- la Manambovo
- la Menarandra
- la Linta
- l'Onilahy.

Tous ces fleuves ont la particularité d'avoir un lit mineur très large (300 à 700 mètres) et totalement sableux. Ils peuvent avoir des crues très brutales et de courte durée. Le front de crue surprend par l'arrivée sur toute la largeur du lit d'une vague grondante chargée en terre, sable et arbres. L'eau peut alors monter de 2 mètres en quelques minutes. La crue peut durer quelques heures à 2 jours.

## **4 - MORPHOPEDOLOGIE DU DOMAINE SEDIMENTAIRE**

A cette échelle de perception, nous suivrons globalement la stratigraphie géologique, qui, par la nature de ses matériaux sous-tend fondamentalement les caractéristiques morpho-pédologiques. Les déterminants climatiques interviennent à un deuxième niveau hiérarchique.

Les séries géologiques sédimentaires occidentales de Madagascar constituent un empilement d'assiettes sub-horizontales non plissées (mais localement très faillées), adossées au substratum cristallin. Elles s'étagent depuis le carbonifère jusqu'au quaternaire. Très souvent des cuestas orientées vers l'Est soulignent les bordures des assiettes. Au crétacé un important épisode effusif basaltique s'est produit. Nous en parlerons au chapitre suivant concernant le domaine volcanique.

Une nappe détritique sablo-gréseuse pliocène ("carapace sableuse" ou "sables roux") a recouvert en partie, sans distinction, l'ensemble des séries stratifiées. Les matériaux de ce vaste glaciais d'accumulation proviennent de la surface d'aplanissement fini-tertiaire qui a raboté la couverture altéritique du socle. Donc un peu partout, quelque soit le substrat, on pourra trouver des lambeaux de sables roux, qui, dans l'Ouest représentent le matériau originel principal des sols.

Nous aborderons donc successivement :

- les séries continentales du "Karoo" (carbonifère à Lias),
- le jurassique inférieur mixte, grés-argilo-calcaire,
- le jurassique moyen et supérieur, marin calcaire,
- les séries crétacé, continentales ou marines,
- l'éocène calcaire,
- le pliocène détritique grés-sableux (sables-roux),
- les systèmes dunaires littoraux quaternaires.

Nous parlerons de tout ce qui est alluvial (lacustre, fluviatile, fluvio-marin), pliocène à actuel, dans un chapitre ultérieur.

### **4.1 - LES FORMATIONS CONTINENTALES OU MIXTES DU "KAROO" : DU CARBONIFERE AU LIAS**

#### **◆ Géologie**

Il s'agit en gros de la bande de terrains sédimentaires qui borde le socle cristallin sur son côté Ouest.

- Les plus anciennes de ces formations continentales datent du **carbonifère**, ce sont les **tillites** (conglomérat glaciaire), **schistes et couches à charbon** de l'étage de la "Sakoa" que l'on trouve surtout dans le Sud, entre Betioky et Ranohira et près de Malaimbandy.

• Puis viennent les **schistes, pélites, argilites et grès fins du permo-trias** qualifiés d'étage de la "Sakamena". Ces formations ne se trouvent également que dans la moitié Sud, mais de façon continue, de Betioky à Malaimbandy sur une largeur de 5 à 30 kilomètres.

• On trouve ensuite des **grès du trias** et du début du lias, sur toute la bordure du socle, depuis Betioky au Sud, jusqu'à Diego au Nord. Ces grès appartiennent aux formations dites de "l'Isalo" à bois silicifiés, plus particulièrement l'étage "Isalo I" (trias) constitué de grès tendres à sables grossiers et à stratifications entrecroisées et l'étage "Isalo II" (trias à lias) formé de grès plus fins (toujours à stratifications entrecroisées) ainsi que de grès argileux et de quelques couches d'argiles. Ces grès de l'Isalo ont une extension plus importante que les formations de la Sakoa et de la Sakamena ; ils affleurent sur une bande de 20 à 50 kilomètres de large.

#### ◆ Géomorphologie et sols

➔ Ces formations géologiques détritiques continentales sont généralement **tendres** (photo 31). Elles constituent la "dépression (ou le couloir) périphérique" du socle cristallin. L'érosion géologique a affouillé préférentiellement ces formations reposant en biseau sur le socle. Cette dépression est appelée "Betsiriry" dans l'Ouest, entre Malaimbandy et Morafenobe, et se situe entre la cuesta calcaire du Bemaraha et l'escarpement cristallin du "Bongolava". Les fleuves qui descendent des hauts-plateaux accusent une rupture de pente et y déposent leur charge grossière (sables, limons et micas) sous forme d'alluvions inondables (appelées "baibohos", voir plus loin) emboîtées dans les grès, schistes et argiles du Karoo.

L'érosion est très importante dans ces formations ; elle prend le plus souvent la forme d'un ravinement hiérarchisé et généralisé du type "bad-land". Les grès tendres et les argilites bariolées, rouges ou vertes (Sakamena) affleurent partout. La végétation de savane herbeuse (*Heteropogon*, *Hyparrhenia*...) couvre très peu la surface sur les micro-glacis sableux situés entre les bads-lands et décapés par une érosion en nappe très puissante. Les sols n'ont pas le temps de se former. Ce sont des "sols" minéraux bruts d'érosion et des régosols sableux. Seule la partie Nord, avec une pluviométrie annuelle supérieure à 1500 mm, peut montrer des reliques de sols ferrallitiques sur des buttes témoins épargnées par l'érosion ravinante.

#### ➔ Sur les grès durcis :

L'érosion a eu moins de prise et a laissé subsister des massifs gréseux, tous assez spectaculaires, et qui sont, du Sud vers le Nord les massifs de l'Isalo (photo 37), du Makay (photo 36) et du Galoko (extrême nord),

• *Les deux massifs de l'Isalo* : ils sont formés de grès et de poudingues consolidés par une multitude de micro-filons siliceux (photo 37) qui remplissent le réseau de diaclases en recoupant la stratification entrecroisée ; ils s'étendent sur 150 kilomètres entre Beroroha et Benenitra. Le massif à une disposition monoclinale à léger pendage vers l'Ouest, dégagé par l'érosion (avec l'aide de failles ?) à l'Est sous forme de **grands escarpements de 150 à 500 mètres de commandement**, bordés à leurs pieds par des blocailles d'éboulis ou des glacis sableux. Les massifs sont fracturés, permettant à l'érosion une pénétration et un découpage en gorges. Les revers des escarpements montrent une érosion en "reliefs ruiniformes" (en tourelles ou chicots déchiquetés) ou tabulaires émergeant de glacis sableux blanchâtres ou rougâtres à fort décapage en nappe. Les sommets des massifs montrent des "tables" découpées en plateaux de tailles diverses qui seraient, pour les plus hautes (1100-1200

mètres), des témoins de la surface d'aplanissement méso-tertiaire (à reliques de sols ferrallitiques), pour les autres des surfaces simplement structurales (correspondant au pendage des couches) .

A l'arrière des massifs, derrière le revers (col des Tapias), se dressent des buttes témoins de 150 mètres de haut, chapeautées par une cuirasse ferrugineuse de plusieurs mètres d'épaisseur au dessus d'une altération argileuse kaolinique. A 1000-1100 mètres d'altitude, ces buttes correspondent à des témoins de la surface méso-tertiaire, en continuité avec le plateau de l'Horombe à l'Est.

• *Le massif du Makay* : d'une longueur de 110 kilomètres du Nord au Sud, ce massif est constitué de bancs gréseux, stratifiés et bien consolidés, à stratifications entrecroisées, donnant des formes d'érosion (photo 36) un peu différentes (plus lourdes et sans reliefs ruiniforme) par rapport à celles des massifs de l'Isalo. D'une altitude de 600 à 1000 mètres sur son rebord oriental, les plateaux descendent en pente douce vers l'Ouest correspondant à leur léger pendage. Un escarpement échancré de 200 à 400 mètres de hauteur domine à l'Est la dépression du Betsiriry, avec des échines et buttes-témoin, des gorges à mares permanentes profondes et à forêt galerie pénétrant le massif. La surface du plateau, à quadrillage serré de diaclases, est en partie structurale et en partie reste d'aplanissement. Elle est entaillée, directement dans la roche dure (complètement déblayée de toute couverture pédologique ou matériaux superficiels) par un réseau hydrographique perché, très dense et profond, fossile (surimposé) drainant vers l'Ouest et dont les grands axes suivent des cassures du massif. Au pied de la cuesta orientale, des glacis de piemont sablo-rocheux portent de grands lambeaux de forêt sèche ; des oueds sableux y débouchent pour former des cônes de déjection.

• *Le massif (ou chaîne) du Galoko* : ce massif grés-conglomératique assez étroit et rectiligne (4 à 12 kilomètres de large) s'étend sur 70 kilomètres, entre Ambanja et Ambilobe. Il est bordé au SE par un escarpement continu, parfois très abrupt et déchiqueté (vers le Nord), correspondant à une faille NE-SW qui domine la dépression bordant le socle (dont la vallée de l'Ifasy). Cette faille a relevé le massif côté oriental (semi-horst) jusqu'à 1148 mètres d'altitude au Marovato. Le massif est fortement faillé et diaclasé : au Sud (Ambanja) failles parallèles à celle de l'escarpement, au centre et au Nord failles plutôt transverses, donnant un aspect ruiniforme au massif. La largeur de la dépression périphérique creusée dans les schistes marneux (permo-trias marin) entre les grès et le socle est ici étroite (3 à 8 kilomètres) ; elle est constituée de glacis de piemont (de dénudation ou d'accumulation) et d'alluvions, sans érosion généralisée et montrant peu ou pas de dénivellation avec le socle. Le massif est couvert d'une forêt secondaire basse à *Ravenala* (Savoka), dérivant de la dégradation d'une forêt primaire hygrophile. Contrairement aux massifs de l'Isalo et du Makay, le Galoko, situé en région très humide (2000 mm annuels) porte des sols ferrallitiques plus ou moins tronqués (très ravinés dès que la forêt disparaît).

➡ Mention à part doit être faite des **formations marines du permo-trias**, qui forment le substratum de la dépression périphérique du socle, entre Ambilobe et l'Océan Indien. Il s'agit de la seule formation marine (peu profonde) qui s'est intercalée entre les étages continentaux de la Sakamena et de l'Isalo I. Ce sont des marnes, des argilites et des schistes qui forment une bande de 2 à 10 km de large le long du socle, dominée au Sud par le grand escarpement du massif gréseux du Galoko et au Nord par des cuestas gréseuses de l'Isalo I dans l'alignement de la faille du Galoko (escarpement de l'Andavakoera). Le contact avec le socle est par contre peu marqué dans la topographie. Le modelé est ici celui de glacis, terrasses et vallées alluviales (Ifasy, Loky) non ravinés, mais à érosion en nappe. Les schistes

et marnes argileuses sont généralement très altérées. On y trouve une association de sols ferrallitiques rouges, sols ferrugineux tropicaux à concrétions, régosols ou lithosols sur schistes, sols hydromorphes alluviaux.

#### **4.2 - LE JURASSIQUE INFÉRIEUR GRESO-ARGILO-CALCAIRE MI-MARIN MI-CONTINENTAL**

##### **◆ Géologie**

Ces formations "mixtes" se situent entre 100 et 700 mètres d'altitude, en continuité, vers l'Ouest, avec les formations gréseuses précédentes à majorité continentales, c'est à dire l'Isalo I (trias) et l'Isalo II (lias inférieur). Certains géologues les situent encore dans le grand ensemble du "Karoo" y formant son étage supérieur, et l'appelant "Isalo III", qui se situerait entre le lias supérieur et le Jurassique moyen. D'autres auteurs placent ces séries dans un "post-karoo".

Les matériaux géologiques sont constitués par une alternance de formations continentales (grès siliceux à stratifications entrecroisées, grès argileux colorés, jaunâtres à violacés, arkoses, argilites rougâtres ou verdâtres...) et de formations marines peu profondes (marnes, marno-calcaires, gypses, grès calcaires...) témoignant d'avancées et reculées marines qui n'étaient pas forcément synchrones dans tout l'Ouest. En règle très générale cependant les faciès deviennent de plus en plus marins d'Est en Ouest.

Ces formations sont souvent "polluées" en surface par des voiles résiduels de "sables roux" issus des épandages détritiques sableux pliocènes (ou de leurs remaniements) qui ont irrégulièrement recouvert toutes les séries sédimentaires antérieures.

Des dykes doléritiques ou basaltiques de 2 à 100 mètres de large peuvent traverser ces formations, dans toutes les directions. Ces filons sont particulièrement denses au Centre Nord, entre le Bemaraha et le Kelifely.

La plupart de ces dépôts mixtes s'étendent à l'Est et au pied des cuestas calcaires du Jurassique moyen. Mais au Sud du Plateau du Bemaraha, et jusqu'à Bekily, on les trouve aussi sur de grandes étendues (mais avec beaucoup de recouvrements de sables roux) à l'Ouest de ces plateaux qui d'ailleurs deviennent discontinus et très étroits. Dans cette dernière région les formations sont hachées par de nombreuses failles NNE-SSW (faisceaux du Sikily et de l'Ilovo).

Les affleurements les plus étendus se situent plus au Nord, de part et d'autre du dôme cristallin de Bekodoka, à l'arrière des plateaux calcaires du Bemaraha et du Kelifely, sur une largeur de 70 kilomètres. Plus au Nord encore, la presqu'île d'Ampasindava (photo 35) est constituée de l'Isalo III.

##### **◆ Géomorphologie :**

Le modelé des formations tendres de l'Isalo III est très diversifié. Il résulte de différents niveaux d'aplanissement et glacis : surface fini-tertiaire fondamentale et divers "épicycles" quaternaires en fonction des niveaux de base locaux. Ces glacis à substratum tendre ont subi diverses reprises d'érosion, dont les formes et les intensités ont été commandées localement

par plusieurs facteurs : la stratigraphie avec sa lithologie différentielle, la tectonique et souvent ses filons doléritiques, l'éloignement et l'évolution du niveau de base, le climat donc la couverture d'altération et le couvert végétal. Ces déterminants se combinent et se croisent suivant des modalités qui ne sont pas les mêmes partout, conditionnant le degré de stabilité ou d'instabilité du milieu. On a une alternance assez rapide, dans le temps et dans l'espace de phases de creusement, de pédimentation et d'accumulation.

La tendance générale est à l'instabilité et à l'érosion, en nappe, en glissements ou en ravinements. Les différentes formes de décapage et de redistribution superficielle des matériaux aboutissent plutôt à étaler et concentrer en surface les éléments grossiers (sables et cailloux de toutes sortes) et à éliminer les argiles par le réseau de drainage ou bien les concentrer dans les zones dépressionnaires. Des "nappes" de matériaux sableux "en transit", repris et redistribués de multiples fois par l'érosion (nombreux niveaux de cailloutis), associant sans distinction possible sables roux pliocènes et matériaux de l'Isalo III, se trouvent un peu partout sur les glacis (moins de 2 % de pente), les glacis-versants (2 à 5 %) ou les vastes zones et couloirs dépressionnaires.

Suivant les endroits on peut trouver les modelés suivants :

- petits escarpements linéaires ou petits massifs fortement ravinés, parfois à bancs plus résistants (petites cuestas),
- successions rapprochées de buttes et collines à glissements et ravinements dans toutes les directions,
- glacis et dômes à termitières côniques rouges, à forte érosion en nappe pouvant se concentrer en ravines à l'approche du réseau hydrographique,
- zones dépressionnaires ou cuvettes ("ranovory") argileuses.

Lorsqu'elles ne sont pas protégées par des sables roux, les formations tendres de l'Isalo III sont attaquées par une érosion très importante pouvant prendre localement une ampleur spectaculaire, soit sous forme de "bads-lands", soit sous forme de décapage en nappe intense (accentué par le surpâturage) qui se concentre en ravines puis en ravins. C'est le cas par exemple de la presqu'île d'Ampasindava (photo 35). Les roches qui peuvent rester en relief sont surtout les grès lorsqu'ils sont suffisamment durs (grès à ciment argileux ou grès à induration ferrugineuse), parfois mais plus rarement, des calcaires marneux. Ils forment alors de petits escarpements ou cuestas. Dans le Sud-Ouest ils ont fréquemment une origine tectonique (failles N-S). Les zones planes (glacis) ou en légère dépression, sans ravinements, signalent le plus souvent la présence d'une couche de sables-roux "allochtones" remaniés, de 1 à quelques mètres d'épaisseur.

Les zones à substrat riche en matériaux argileux peuvent montrer une érosion "mixte" associant glissements généralisés et ravinements linéaires radiaux (exemple des méso-reliefs très accidentés d'Ampasindava).

#### ◆ Les sols

Comme le modelé, la lithologie et la morphodynamique, les sols sont diversifiés. La tendance générale est aux sols plutôt sableux rougeâtres (sols ferrugineux tropicaux lessivés au Sud et sols ferrallitiques appauvris au Nord) dans les zones relativement stables non

ravinées, et aux roches affleurantes dans les zones ravinées (“sols squelettiques” : “régosols” sur roches tendres et “lithosols” sur roches dures) à pavages caillouteux.

On peut donc trouver, en plus des affleurements rocheux et encadrés par des zones de ravinement :

- *des sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés*, rougeâtres, comparables aux “sables roux” des sédiments pliocènes, de 1 à 2 mètres d'épaisseur au dessus des grès altérés bariolés (pouvant représenter la base d'une ancienne altération ferrallitique, héritage paléoclimatique) ; ces sols sont sableux en surface, plus argilo-sableux et massifs en dessous, à lignes de cailloutis à différentes profondeurs, très pauvres en matière organique (moins de 1 %), à pH de 5,5 à 6. Ils sont toujours affectés d'un fort ruissellement avec érosion aréolaire. Ils sont le plus souvent parsemés de termitières. On les observe sur des reliques relativement stables de glacis, dômes, “glacis-versants” dans le Bassin de Morondava-Tuléar, sur les revers occidentaux des massifs de l'Isalo et du Makay, ainsi que de part et d'autre des plateaux calcaires qui prolongent le Bemaraha au Sud, plus rarement à l'Est de la cuesta du Bemaraha. Ces sols ferrugineux tropicaux peuvent être plus ou moins bien drainés et hydromorphes, selon leurs situations sur les glacis, rouges en amont, ils deviennent beiges puis grisâtres en aval.

La végétation est une savane à *Hétéropogon*, *Chrysopogon*, *Hyparrhenia* et *Loudetia*, piquetée de *Terminalia*, *Stereospermum*, *Gymnosporia*, *Dicoma*, *Ziziphus*, *Poupartia*, *Hyphaene*, *Medemia*.

Ces sols correspondent au climat actuel à 800-1500 mm de pluviosité annuelle et très longue saison sèche (7 à 8 mois “secs”, à moins de 50 mm).

- *des sols ferrallitiques rouges et appauvris*

Ce sont des sols plus argileux que les précédents (légèrement appauvris en argile en surface), rouges sur 1 à 3 mètres, se poursuivant en profondeur par une zone d'altération bariolée (plinthite) épaisse. Ils sont toujours très pauvres en matière organique (moins de 2 %) ; le pH est de 5 à 5,5. Le complexe absorbant possède une capacité d'échange de 10 à 20 mé %, et est moyennement désaturé.

Ces sols s'observent sur les collines grésio-argilo-calcaires du Nord (exemple : presque île d'Amipasindava), lorsque la pluviométrie moyenne annuelle est supérieure à 1400 mm, avec 5 à 6 mois “secs”. Ils sont entourés de zones d'érosion avec un réseau hydrographique très dense et ramifié, et sont donc en situation précaire, protégés le plus souvent (pour combien de temps ?) par une forêt sèche à *Ficus*, *Hazomalania*, *Obetia*, *Tylachium*, *Hopalocarpus*, *Cassia*, *Gonocrypta* (liane).

- *des sols à tendance vertique*

Ces sols se trouvent dans des situations pas très fréquentes, en position plutôt dépressionnaire ou de bas glacis-versant mais où le voile supérieur de sables colluviaux est parti, où le substrat “autochtone” est à dominance marneuse ou marno-calcaire et où l'érosion ravinante n'a pas encore fait entièrement son oeuvre, pour empêcher toute pédogénèse. On voit alors des sols peu épais, argileux, de teinte grisâtre ou olive, à fissuration profonde, souvent à concrétions calcaires (concentrées parfois en surface). La végétation est le plus souvent une savane à *Hétéropogon* piquetée d'arbres ou arbustes :

*Tamarindus, Ziziphus, Gymnosporia, Acacia.*

• *des sols hydromorphes minéraux*

Ces sols occupent les positions basses mal drainées, où l'eau et l'argile s'accumulent ; ils sont engorgés par une nappe phréatique ou une nappe d'inondation, pendant une période de l'année ; ils sont donc une zone privilégiée de pâturage et de riziculture aquatique en casiers. Les sols sont argileux fins ou argilo-sableux (couverture sableuse "colmatée" par les colloïdes), de teinte grisâtre à gris-jaunâtre, tachetés en profondeur.

### **4.3 - LE JURASSIQUE MOYEN ET SUPERIEUR, MARIN, CALCAIRE**

Une franche transgression marine à dépôts calcaires s'est produite à partir du Jurassique moyen (bajocien-bathonien) dans tout l'Ouest du Pays. Elle s'est poursuivie dans le bassin de Morondava-Tuléar, mais déjà en conditions moins profonde, au Jurassique Supérieur (kimmeridjien, callovien, oxfordien), avec des dépôts marneux, grésos-marne-calcaires et gypseux. Ces derniers étages paraissent manquer dans le bassin de Majunga.

#### **4.3.1 - LE JURASSIQUE MOYEN CALCAIRE**

Les séries Bajociennes et Bathoniennes de calcaires et calcaires marneux sont parmi les formations les plus continues et les plus remarquables du sédimentaire occidental Malgache. On les observe du Nord au Sud (de Diego à Betsioky) sous forme de plateaux karstiques monoclinaux (pendage vers l'Ouest ou le NW de 5 à 15 %) à très belles cuestas regardant vers le socle cristallin. Ainsi, les plateaux les plus beaux sont, du Nord au Sud :

- Analamera-Ankarana (entre Ambilobe et Diego) : 2200 mm de pluies, 5 mois secs, 200 à 700 mètres d'altitude,
- Ankara-Kelifely-Namoroka (entre Besalampy et Maevatanana) : 1500 mm de pluies, 7 mois secs, 400-800 mètres d'altitude,
- Bemarivo (Sud de Besalampy) : 1500 mm de pluies, 7 mois secs, 200 mètres d'altitude,
- Bemaraha (Ouest de Morafenobe-Miandrivazo) : 1100-1600 mm de pluies, 7 mois secs, 400-900 mètres d'altitude,
- Lambosina (Est d'Ankazoabo) : 850 mm de pluies, 7 mois secs, 750 mètres d'altitude,
- Sakaraha (Sakaraha-Bezaha) : 800 mm de pluies, 8 mois secs, 574 mètres d'altitude.

#### **◆ Géologie**

Les faciès lithologiques sont très variables, en fonction des proportions relatives dans les roches de calcaire, dolomie et impuretés (argile et sables quartzeux). On a ainsi une dominance, une alternance ou une juxtaposition, suivant les endroits (photo 39), de calcaires francs purs, de calcaires dolomitiques, de dolomies, de calcaires argileux (marneux ou

crayeux) et de calcaires gréseux. Les roches sont également plus ou moins finement cristallisées (calcite, dolomie), donc plus ou moins compactes et poreuses. Les calcaires purs cristallins compacts (souvent coralliens) sont les plus durs (ce sont eux qui donnent des karsts en "tsingy", photo 38). Tout cela va conditionner la solubilité de la roche, la présence ou non de résidus après décalcarification, donc l'intensité et la nature de la "karstification" avec ses modelés et ses sols.

Autres éléments qui jouent dans la morphologie de dissection et de dissolution sont l'épaisseur des strates (gros bancs ou fines plaquettes) et des joints de stratification, ainsi que la densité de la fracturation des roches (diaclasses, failles). L'histoire hydrogéologique et climatique (donc aussi la tectonique cassante et de soulèvement) est évidemment fondamentale, puisque ce sont les nappes phréatiques riches en CO<sub>2</sub>, avec leur dynamique hydraulique, qui dissolvent les calcaires, évacuent les carbonates, créent des conduits souterrains, et sont donc les agents actifs de la karstification. Porosités (en grand et en petit), présence de niveaux imperméables, pendages des couches, variations de niveaux de base relatifs des aquifères karstiques (vitesse et gradients d'écoulement), sont aussi des facteurs explicatifs de la vitesse de dissolution.

Les plateaux jurassiques ont comme caractéristique commune d'être tous fortement fracturés, dans différentes directions recoupantes. Beaucoup (surtout Bemaraha, Bemarivo, Kelifely, Namoroka) sont injectés de dykes doléritiques ou basaltiques (crétacé ?). Cette tectonique cassante est le résultat de soulèvements différentiels des plateaux au crétacé et à la fin du tertiaire.

#### ◆ Végétation

La végétation est soit une forêt sèche dense (trophile), soit une savane plus ou moins arborée.

•Au Nord (Ankarana-Analamera) les lambeaux de forêt sont à base de *Cassia*, *Delonix*, *Obetia*, *Hazomalania*, *Rhopalocarpus*, *Ficus*, *Adenia*, *Hildegardia*, *Tylachium*, riches en épiphytes et lianes.

•Sur le Bemaraha on observe une forêt sèche haute et dense avec en strate supérieure sur sols peu épais : *Givotia*, *Grewia*, *Hymenodictyon*, *Ixora*, *Antidesma*, *Bridelia*, *Commiphora*, *Enterospermum*, *Poupartia*, *Rhopalocarpus*, *Sideroxylon*, *Ruiza*, *Stereospermum*, *Trema*. Sur sols plus épais, s'ajoutent *Albizia*, *Bivinia*, *Bridelia*, *Calliandra*, *Dichrostachys*, *Norombia*, *Oucostema*, *Premma*, *Rinorea*, *Sorindeia*, *Tabernaemontana*, *Tisonia*, *Turraea*.

•Sur les zones les plus sèches on observe *Commiphora*, *Kalanchoe*, *Euphorbia*, *Adenia*, *Pandanus*, *Dracaena*, *Pachypodium*, *Croton*, *Xerophitea*...

•Les savanes herbeuses sont à base de *Hétéropogon*, *Hyparrhenia*, *Chysopogon*, *Aristida*, *Panicum*, *Eragrostis*. Elles peuvent être assez riches ou simplement "piquetées", de *Tamarindus* ("Kily"), *Poupartia* ("Sakoa") etc...

#### ◆ Géomorphologie

Les plateaux calcaires présentent des morphologies karstiques diverses dont les plus courantes sont les différentes formes de dolines et de lapiez. La dissolution par les eaux a été activée et réactivée par les phases de soulèvement tectonique et de fracturation ouverte

des calcaires.

Les karsts les plus spectaculaires sont les lapiez géants en "Tsingy" de l'Ankarana (photo 38), du Namoroka, et du Bemaraha. Ce sont des zones déchiquetées en lames aiguës cannelées de 10 à 30 mètres de dénivellation. Cette forme ne s'observe que sur les calcaires cristallins, purs et durs. Ils sont parcourus de "couloirs" étroits empruntant les fractures du plateau, qui se recourent. Les fonds des couloirs, plus humides sont occupés par une végétation sub-humide relativement dense et riche en lianes.

Sur les plateaux sans tsingy (la majorité), le karst est formé de champs de dolines : soit d'effondrement de conduits souterrains à parois verticales rocheuses (les plus belles et les plus vastes sont sur l'Ankarana), soit le plus souvent de dissolution plus lente à fond argileux inondable. Elles sont alors plus ou moins denses, larges et profondes (dolines en entonnoirs côniques, dolines en "verre de montre"). L'affaissement par dissolution peut conduire à des formes plus larges de dépressions dont les dimensions peuvent atteindre le kilomètre. Beaucoup de dolines sont conditionnées par la fracturation et se situent au croisement de plusieurs diaclases ou failles où la dissolution est plus active. Entre les dolines et dépressions les plateaux montrent souvent des chicots rocheux lapiazés, ou des reliefs en coupes, dômes, croupes convexo-concaves ("kuppen") ou bien en tours à parois verticales rocheuses ("mogotes"). Lorsque la densité de dolines est très forte, à devenir coalescentes, elles isolent des buttes côniques et lanières séparées par des dépressions anastomosées ; ce relief, appelé "cockpit-karst" (Rossi, 1980), s'observe sur le causse du Kelifely.

Sur les zones alternant calcaires et marnes (certaines zones du Bemaraha) le rabotage par l'érosion révèle les alternances régulières des empilements de strates (photo 39) : calcaires blanchâtres à lapiez et marnes à sols bruns vertiques plus sombres.

Un certain nombre de plateaux sont entaillés par des vallées rectilignes encaissées en "canyons", isolant des lanières (Ankarana, Kelifily) ; ce sont des couloirs d'effondrement de conduits souterrains, alignés selon les fractures ouvertes. Ces fractures, lorsqu'elles se recourent, isolent des petits plateaux de forme trapézoïdale.

#### ◆ Les sols

• *Sur calcaires durs* les sols sont souvent développés sur les argiles de décalcarification plus ou moins décalcifiées. Ces argiles forment des poches et amas qui remplissent les fissures, vasques, joints de stratifications, fonds de lapiez... Ce sont des "sols fersiallitiques" à kaolinite et illite, brun-rougeâtres, de 50 à 80 cm d'épaisseur, argileux, généralement très bien structurés, souvent assez riches en matière organique (3-5 %).

• *Sur calcaires marneux tendres, crayeux ou gréseux*, les sols peuvent être des *sols bruns calcaires*, des *sols bruns vertiques* "ou des *vertisols*". Ces sols sont de teinte brune à jaunâtre, très argileux (60 % d'argile), à structure fortement exprimée, relativement "riches" chimiquement : pH de 7 à 8, pourvus en "calcaire actif", à forte capacité d'échange (présence d'argiles gonflantes) et à complexe saturé. A la base, peut se former une croûte calcaire, qui affleure en plaques quand l'érosion a décapé les sols.

• *Les fonds des dépressions et dolines* sont occupés par des *argiles hydromorphes* plus ou moins vertiques.

• *Mais la plupart du temps les sols ont été décapés par l'érosion et la surface laisse affleurer*

des chicots calcaires lapiazés blanchâtres, des *pavages de cailloux ou débris de croûte calcaire* au dessus du calcaire marneux.

- *Les Tsingy* à “lames de couteaux” verticales cannelées ne portent pas de sols.

#### 4.3.2 - LE JURASSIQUE SUPÉRIEUR MARNEUX ET GRÉSO-MARNO-CALCAIRE

Ces séries marines (bathonien à kimmeridgien) de mer peu profonde (épicontinentale) du Jurassique supérieur s’observent surtout dans le bassin de Morondava-Tuléar, sur une bande de 5 à 30 kilomètres, entre la Tsiribihina au Nord et l’Onilahy au Sud. La partie Nord (Berevo-Ankilizato-Mandabe) est essentiellement marneuse (“marnes jaunes d’Ankilizato”). La partie Sud, (Mandabe à Betioka) est plus variée, avec alternances de marnes, calcaires, grès et argiles, les grès calcaires étant dominants : cette partie est affectée par des faisceaux de failles d’âge tertiaire (faisceaux du Sikily et de Manja) orientés NNE-SSW. Des placages de “sables roux” pliocènes remaniés, souvent peu épais (1 à 3 mètres) au dessus du substrat Jurassique, sont nombreux.

Climatiquement, nous sommes dans la zone sub-aride, avec une pluviométrie annuelle de 1000 mm au Nord, 600 mm au Sud, et 7 à 8 mois “secs” (à moins de 50 mm).

La végétation est le plus souvent une savane graminéenne, pure, arbustive ou arborée, à *Hétéropogon*, *Loudetia*, *Panicum*, *Hyparrhenia*, *Aristida*. Les arbres, isolés ou en bosquets, sont essentiellement *Poupartia* (Sakoa), *Albizia* (“bonara”), *Stereospermum*, *Diocoma*, *Tamarindus* (Kily). Sur les sols vertiques (Ankilizato) apparaissent des épineux : *Acacia* et *Ziziphus*. Les massifs du Sikily, au Sud du Mangoky et à l’Ouest d’Ankazoabo montrent encore quelques belles forêts sèches (forêt de Hera) à *Adansonia*, *Diospyros*, *Dalbergia*, *Flacourtia*, *Rhopalocarpus*, *Albizia*, *Commiphora*, *Protorhus*, *Sideroxylon*, *Delonix*, *Givotia*.

#### ◆ Géomorphologie et pédologie

##### • *Les marnes jaunes (d’Ankilizato)*

Ces formations tendres forment une bande étroite (moins de 10 kilomètres) relativement déprimée (“gouttière”) à l’Est et au pied de l’escarpement (cuesta ou faille) gréseux du crétaé. L’érosion y est très active sur les pieds et revers des micro-cuestas marno-calcaires des escarpements de faille, avec des ravins denses et hiérarchisés aboutissant à des paysages de “bad-lands”. Il existe des zones plus stables, soit modelées en glacis coiffés de sables allochtones et affectés d’une érosion en nappe intense, soit en position dépressionnaire à *sols vertiques* et *sols hydromorphes*, plus ou moins inondables.

En règle générale, les sols très argileux sont à dominance de *vertisols* et de *sols bruns vertiques* (présence d’argiles gonflantes) de couleur brun-grisâtre à olivâtre, très argileux, fortement fissurés en saison sèche. Les concrétions calcaires sont abondantes et épandues en surface par l’érosion.

##### • *Les grès marno-calcaires (de Mandabe à Mahaboboka)*

Le Jurassique est ici davantage gréso-calcaire que marneux. Mais des couches (tendres et “fluantes”) d’argiles à gypse et de marnes sont intercalées avec les bancs de grès calcaires massifs. Il forme en particulier les massifs du Sikily, sur la rive gauche du Mangoky dans le prolongement NE du Massif de l’Analavelona (point culminant de la région à 1321 mètres)

et à l'Est du plateau crétaé du Mikoboka.

Dans cette zone, le Jurassique a été haché par une tectonique cassante tertiaire qui a formé une série de horsts (plateaux), de grabens (fossés) et de blocs monoclinaux allongés, délimités par des escarpements de faille (boisés en partie), l'ensemble étant orienté NE-SW. Ces plateaux, larges de 1 à 10 km, longs de 20 à 50 kilomètres, sont à peu près déserts et supportent un certain nombre de lambeaux forestiers surtout sur les points hauts, les escarpements de faille et certains ravins (forêts galeries) ; ils sont étagés entre 300 et 800 mètres d'altitude, avec des dénivellations (failles) de 50 à 300 mètres de haut.

Les grands versants, d'origine tectonique ou de dissection (flancs des grandes vallées) montrent souvent, en plus des gradins étagés dus à la lithologie différentielle des strates, une morphodynamique particulière avec mouvements de masse de grande ampleur (de l'ordre de 200 à 800 mètres), vastes glissements en marches d'escalier et coulées boueuses. On observe bien ces processus sur les flancs Sud et Sud-Est du Massif de la Manamana au Sud d'Ankazoabo. L'origine des glissements est la présence de niveaux marno-gypseux en profondeur.

Les sols ne sont pas partout formés directement sur les matériaux grésocalcaires Jurassiques. Car des placages et accumulations de sables roux "allochtones" sont très fréquents, spécialement dans les points bas du modelé et les fossés d'effondrement. On a alors *des sols ferrugineux tropicaux peu ou non lessivés*, rougeâtres, à caractères d'hydromorphie en profondeur (drainage ralenti).

Sur grès calcaires on observe des "*sols fersiallitiques*" rouge vif, décalcifiés et plus ou moins décalcifiés. Ils présentent une épaisseur variable en fonction de la dissolution du substrat (lapiez couverts à vasques arrondies). La distinction entre sols fersiallitiques et ferrugineux tropicaux, du fait de l'incertitude sur le matériau (autochtone ou allochtone ou mélangé) est difficile à faire.

En position de drainage médiocre, apparaissent des caractères vertiques et d'hydromorphie sur matériau colluvial "colmaté". Les zones décapées de leur "couverture rouge ancienne", développent des sols jeunes : *sols bruns eutrophes, bruns calcaires, bruns vertiques, vertisols* peu épais, à pH élevé (7 à 8), saturés en calcium et à concrétions calcaires fréquentes.

#### 4.4 - LE CRÉTAÉ CONTINENTAL OU MARIN

Les "assiettes" crétaées du sédimentaire s'étendent du hauterivien au danien. S'y intercale un important épisode de volcanisme basaltique effusif (dont nous parlerons plus loin), qui se place au début du crétaé supérieur.

Il faut signaler également une série crétaée à faciès mixtes, peu étendue sur le littoral oriental.

On peut ainsi distinguer :

- *le crétaé anté-basaltique* (crétaé inférieur et moyen : hauterivien à céno-manien) : il est à dominance de *faciès continentaux gréseux* (grès siliceux et grès glauconieux), à stratifications entrecroisées ; mais on y trouve quelques imbrications marneuses (faciès

marins peu profonds) et argileuses. L'assiette du bassin de Majunga est ainsi typiquement gréseuse ; celles du Bassin de Morondava-Tuléar sont mixtes, gréseuses au Nord, devenant grés-marno-calcaires au Sud.

- *les basaltes du début du crétacé supérieur*

- *le crétacé post-basaltique* (crétacé supérieur : surtout maestrichien et danien), à l'intérieur duquel se différencient les faciès suivants :

- *les marnes (faciès marins peu profonds) de l'Ouest et du Nord-Ouest,*
- *les calcaires et marno-calcaires (faciès marins peu profonds) du Sud-Ouest,*
- *les grès et grès argileux (faciès continentaux du Nord-Ouest),*
- *les grès marno-calcaires (faciès mixtes) de la Côte Est.*

Il faut rappeler que toutes les formations de l'Ouest ont été plus ou moins recouvertes au pliocène par des "sables roux". Ces sables roux ont été en majeure partie éliminés au quaternaire par l'érosion, mais subsistent un peu partout à l'état remanié, en placages résiduels sur lesquels se trouvent les sols actuels.

#### 4.4.1 - LE CRÉTACÉ INFÉRIEUR ET MOYEN, GRÉSEUX

➡ Les grès siliceux dominants du Bassin de Majunga forment une très vaste auréole en recouvrement des calcaires du Jurassique moyen (lacune au jurassique supérieur). Ce sont les "grès d'Ankarafantsika". Ils possèdent cependant des étages argileux ou marneux.

➡ On les retrouve, peut-être un peu plus argileux, en situation comparable, dans le bassin de Morondava à l'arrière et au Sud du plateau Jurassique du Bemaraha (Besalampy-Antsalova-Ankilizato),

➡ Dans le bassin de Tuléar, les grès s'enrichissent en calcaire (grès "silico-calcaires") et s'intercalent avec des marno-calcaires. Ce sont les grès calcaires du massif de l'Analavelona et de son prolongement au Sud du Fieheranana.

#### ◆ Géomorphologie

Les plateaux gréseux sont "monoclinaux" avec un léger pendage vers l'Ouest et une cuesta d'érosion regardant vers l'Est dominant les formations jurassiques (exceptée la gouttière Besalampy-Antsalova de 20 kilomètres de large, encadrée et dominée à l'Est par le Bemaraha, à l'Ouest par les basaltes supérieurs). Mise à part la région soulevée de l'Analavelona au Sud, le modelé des plateaux est assez régulier. Les reliefs les plus marquants sont les petites cuestas et zones déprimées soulignant les différences lithologiques (cuestas pour les grès durs, dépressions pour les zones marneuses). Les cuestas, échancrées, à buttes-témoin, sont profondément ravinées, entaillant les zones plus tendres sous-jacentes. Partout l'érosion en nappe est importante.

Le massif de l'Analavelona, chapeauté par des plateaux basaltiques, est façonné dans des grès calcaires épais, des grès ferrugino-siliceux et des marnes gypseuses. Les intercalations basaltiques sont nombreuses. L'ensemble a été affecté par une tectonique et du volcanisme basaltique au début du Crétacé Supérieur, puis par une nouvelle période de fracturation et de soulèvement à la fin du tertiaire. Il en a résulté une surrection de l'ensemble du Massif Bara (Crétacé et Jurassique) dont le sommet, dans l'Analavelona, est à 1321 mètres

d'altitude. Des escarpements de faille et des grands versants de dissection, en font un massif pluri-tabulaire à flancs montagneux ravinés ou à grands glissements de masse, dus aux couches marno-gypseuses intercalées (photo 42).

#### ◆ La végétation

Les sols sableux sur grès portent le plus souvent une savane plus ou moins arborée, composée de graminées (*Hétéropogon*, *Hyparrhenia*, *Loudetia*) sujette aux feux, et d'arbres composés de palmiers (*Medemia nobilis*, *Hypphaene shatan*), *Ziziphus*, *Poupartia*, *Stéerospermum*, *Tamarindus*, *Flacourtia*, *Commiphora*, *Gymnosporia*, *Dicoma*... Existente de très belles forêts sèches, telles celle d'Ankarafantsika dans le bassin de Majunga (réserve forestière et réserve naturelle intégrale).

#### ◆ Les sols

Sur les formations à dominance gréseuse (la majorité) du Nord et du Centre, on observe des sols *ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés*, de 1 à 3 mètres d'épaisseur, sableux en surface, argilo-sableux en profondeur, à pH de 5,5 à 6. Ils sont très comparables aux "sables roux" sur "carapace sableuse" des épandages pliocènes ; d'ailleurs la distinction entre les deux matériaux est souvent difficile. Dans le bassin de Majunga, avec une pluviométrie annuelle de 1500 à 1600 mm, les ferrugineux tropicaux passent à des *sols ferrallitiques appauvris*, à pH plus acides (5 à 5,5) reposant sur une zone d'altération épaisse (jusqu'à 10 mètres), bariolée ("plinthite"), à nappe phréatique fluctuante.

Dans le Sud, sur grès calcaires, à altitude plus élevée (600-1300 mètres), on observe une association de *sols ferrugineux tropicaux* sableux à argilo-sableux à structure massive, de *sols fersiallitiques* argileux plus ou moins décalcifiés à structure polyédrique, et de *sols ferrallitiques reliques*.

#### 4.4.2 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR MARNEUX

Les marnes dominantes, de couleur grise, verdâtre ou jaunâtre (faciès marin peu profond) du crétacé supérieur (maastrichtien et danien essentiellement) forment une zone étroite relativement déprimée de 5 à 20 km en contrebas et à l'Est de la cuesta calcaire éocène dans le bassin de Majunga (Soalala, Mitsinjo, Majunga, Antonibe) et dans le bassin de Morondava (Bekopaka-Berevo, Mahabo, Manja...), toujours à moins de 250 mètres d'altitude.

Ces zones sont caractérisées par une érosion ravinante importante (souvent en "bad-lands") et la présence de nombreuses dépressions marécageuses où viennent s'abreuver les troupeaux. La végétation est une savane arbustive peu couvrante avec, comme graminées surtout *Hétéropogon* et *Chloris*, et comme ligneux, selon les endroits, *Ziziphus*, *Gymnosporia*, *Acacia*, *Cryptostegia*, *Physena*, *Tamarindus*.

Les sols sont toujours très argileux, à pH élevés (7,5 à 8,5), généralement non rubéfiés, de teinte plutôt sombre (noirâtre, grisâtre, brunâtre, olive), riches en calcaire actif, à amas et concrétions calcaires fréquents. Ce sont des *sols vertiques riches en montmorillonite* : *bruns vertiques*, *vertisols*, *vertisols hydromorphes* (cuvettes) . Ces sols se fissurent fortement en saison sèche.

Dans les positions les mieux drainées on observe des *sols bruns calcaires* avec une teinte moins sombre (brun-rougeâtre). Un encroûtement calcaire peut se situer à la base (entre 50

à 100 cm de profondeur).

Comme toujours, les marnes peuvent localement être "polluées" par des placages de "sables roux" remaniés, à sols ferrugineux tropicaux, ici à caractères d'hydromorphie.

#### 4.4.3 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR CALCAIRE ET MARNO-CALCAIRE

Ces formations sont ici franchement marines. Elles caractérisent le crétacé supérieur du Sud-Ouest, entre le Mangoky et l'Onilahy où elles constituent un plateau à une altitude de 300 à 600 mètres, d'une largeur de 5 à 25 kilomètres, représenté par les plateaux de Vineta et une partie de l'Ankoboka. Les calcaires reposent sur les basaltes du début du crétacé supérieur qui les limitent à l'Est. A l'Ouest, ils sont bordés par les calcaires éocènes relativement en continuité. La roche est formée de calcaires jaunâtres clairs microcristallins plus ou moins purs, en bancs massifs ou lités. Ils forment des strates à pendages léger (5-10°) vers l'Ouest. Des failles tertiaires Nord-Sud ont relevé la bordure Est du plateau (escarpement de l'Andrambo) augmentant son pendage vers l'Ouest. Les zones dépressionnaires et parfois les parties inférieures des longs glacis-versants sont comblées le plus souvent de "sables roux" (moins de 10 mètres d'épaisseur) qui cachent les calcaires. C'est le cas de la zone agricole d'Andranovory.

La végétation est essentiellement celle d'une savane à *Hétéropogon* piquetée de *Poupartia* (Sakoa), *Tamarindus* (Kily), *Ficus* (Adabo), parfois baobabs ; ce paysage ouvert tranche avec le fourré dense des calcaires éocènes occidentaux.

Le modelé est constitué de longs versants, de revers structuraux et ondulations à pentes de 3 à 6 %.

Le plateau calcaire de Vineta comporte des figures karstiques visibles quand le voile de sables roux est peu présent.

Les calcaires massifs, les plus courants, montrent essentiellement des lapiez plus ou moins enfouis par les résidus de décalcarification ou les sables roux (karst "couvert" ou karst "découvert"). Il y a peu de dolines (sinon enfouies sous les sables roux). Les lapiez exhumés de calcaire jaune clair montrent des formes à chicots et cavités émoussés (non ciselés), ovoïdes, jamais très hautes (moins de 50 cm), émergeant (en forme de "pseudo-pavage" caillouteux) d'une argile rouge vif de décalcarification généralement décalcifiée. Les analyses (Sourdat, 1977) ont montré que ces "argiles rouges" étaient de nature mixte, d'origine calcaire à la base, d'origine plus siliceuse (grains de quartz) au sommet, donc mi-autochtone mi-allochtone, avec une pollution par les sables roux détritiques pliocènes. Les formes émoussées des lapiez formés sous couverture sableuse pliocène peuvent s'expliquer par l'acidité originelle de ces sables roux ayant activé et régularisé la dissolution du calcaire sous-jacent.

Les sols "polygéniques" et "polyphasés" (Sourdat, 1977) sont donc difficiles à classer ; suivant l'importance de l'influence de la nappe sableuse antérieure on aura une association de sols ferrugineux tropicaux épais, sableux à argilo-sableux (à kaolinite et hématite), rougeâtres, de structure massive, de pH 5,5 à 6, et de sols fersiallitiques ("terra rossa") rouge vif, argileux (à halloysite, métahalloysite, parfois à montmorillonite), bien structurés, plus ou moins décalcifiés, à pH 6 à 7.

Sur les calcaires marneux à débit en plaquettes, on n'observe pas de figures karstiques, les

sols sont moins rouges (bruns rougeâtres à bruns foncés), peu épais, plus riches en calcaire, à croûte calcaire sub-affleurante. Ce sont des sols *bruns calcaires* et des *sols bruns vertiques*.

#### 4.4.4 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR GRÉSEUX ET GRÉSO-ARGILEUX

Ces formations sédimentaires à faciès continental sont localisées en affleurement dans le Bassin de Majunga, entre "l'assiette marneuse" (voir ci-dessus) au Nord et "l'assiette basaltique" (voir plus loin) au Sud. Elles peuvent aussi être présentes dans le bassin de Morondava, mais dans ce cas, enfouies sous une forte épaisseur de "carapace sableuse" à sables roux. Ces grès sont célèbres pour leurs gisements de Dinosauriens.

Au niveau de la morphologie, de la morphodynamique et des paysages, nous renvoyons à l'exposé précédent concernant le crétacé inférieur et moyen, gréseux anté-basaltique. Les caractéristiques sont les mêmes. Peut être y a-t-il ici davantage de placages résiduels de "sables roux" pliocènes, mais de toute façon les sols sur grès sont très semblables aux sables roux, aussi a-t-on des *ferrugineux tropicaux lessivés* ou des *ferrallitiques appauvris*.

#### 4.4.5 - LE CRÉTACÉ SUPÉRIEUR GRÉSO-MARNO-CALCAIRE DE LA CÔTE EST

Le crétacé du littoral Est forme une bande discontinue et étroite, inférieure à 15 kilomètres, à l'arrière des cordons littoraux et des lagunes, entre Fenoarivo (Foulpointe) au Nord et Manantenina au Sud. La pluviométrie annuelle est de 2000 à 3000 mm. Il n'y a pas de mois sec. Le faciès sédimentaire est variable : plutôt continental (grès, sables, argiles) au Nord de Mahanoro, plutôt marin peu profond (marnes, calcaires, grès) au Sud de Mahanoro.

Ces formations sont couvertes d'une "savoka" à Ravenales et fougères, *Philippia* et *Helichrysum*, ou d'une savane herbeuse mal couvrante à *Aristida* et *Imperata*. Le modelé est formé d'une succession de collines convexes en "demi-oranges", attaquées par une érosion importante : glissements, "pieds de vache", parfois ravinements et lavakas. Les sols sont des *ferrallitiques jaune/rouge ou rouges tronqués*, de 1 à 3 mètres reposant sur l'altérite argilo-sableuse marmorisée.

### 4.5 - L'EOCENE CALCAIRE

L'éocène marin (et très localement le miocène) achève la série d'assiettes sédimentaires de l'Ouest Malgache.

Les calcaires éocènes forment une série de plateaux délimités par des escarpements (cuestas ou failles) depuis l'extrême Sud jusqu'à l'extrême Nord, interrompus par l'érosion, par les recouvrements de sables roux, par les grandes vallées alluviales, ou par le découpage de la côte en rias et estuaires (Nord et Nord-Ouest).

On a ainsi, du Sud au Nord, le chapelet de plateaux suivant :

- Mahafaly (photo 40) : 10 000 km<sup>2</sup> ; P = 400 mm ; 8 mois secs,
- Belomotra (photo 41) : 1000 km<sup>2</sup> ; P = 450 mm ; 8 mois secs,
- Manangetaheta : 1500 km<sup>2</sup> ; P = 450 mm ; 8 mois secs,
- Mikoboka : 1500 km<sup>2</sup> ; P = 750 mm ; 8 mois secs,

- Manja-Soaserano : 1000 km<sup>2</sup> ; P = 700 mm ; 8 mois secs,
- Mahabo : 1000 km<sup>2</sup> ; P = 900 mm ; 8 mois secs,
- Mitsinjo : 400 km<sup>2</sup> ; P = 1400 mm ; 7 mois secs,
- Katsepy : 500 km<sup>2</sup> ; P = 1400 mm ; 6 mois secs,
- Mariarano : 1000 km<sup>2</sup> ; P = 1400 mm ; 6 mois secs,
- Narinda-Antonibe (photo 32) : 800 km<sup>2</sup> ; P = 1500 mm ; 6 mois secs,
- Isthme du Courrier : 10 km<sup>2</sup> ; P = 1100 mm ; 6 mois secs,
- Montagne des Français : 80 km<sup>2</sup> ; P = 1200 mm ; 6 mois secs.

#### ◆ Géologie et géomorphologie

A l'affleurement, les matériaux, affectés d'un pendage Ouest faible, sont le plus souvent soit des calcaires francs, compacts, parfois dolomitiques, à alvéolines, algues, nummulites, milioles ou coraux (éocène moyen), soit des calcaires marneux à huitres donc à faciès plus littoraux (éocène supérieur).

Comme pour les calcaires jurassiques, on observe suivant les endroits, divers faciès (calcaire franc, dolomitique, gréseux, marneux), cristallins ou non, et diverses consistances (marneuse, crayeuse, compacte, très dure), des bancs de différentes épaisseurs. Les intensités de dissolution et les formes de karstification en dépendent, ainsi que du degré de fracturation des plateaux, et de la disposition litho-stratigraphique (présence ou non de plancher imperméable).

- *Les calcaires éocènes du Nord-Ouest*, de Soalala à la baie de Narinda, montrent différentes formes karstiques à buttes (Rossi, 1980) : soit une succession désordonnée de croupes (20 à 40 mètres de haut) en buttes ou coupoles surbaissées de 50 à 300 mètres de diamètre, convexes ou convexo-concaves, à affleurements de blocs déchaussés et lapiez ; il s'agit alors de "Kuppenkarst" ; soit des tours (20 à 60 mètres de haut), à sommets lapiazés, à versants sub-verticaux rocheux cannelés, à raccordement brutal avec le plancher (souvent argileux, hydromorphe et inondable) ; il s'agit cette fois de "mogotes", qui se prolongent en mer et forment des îlots dans la baie de Morambo. Les collines karstiques sont couvertes de bosquets de forêt sèche.

Localement le "cachet" karstique est donné par la densité, la hauteur et la forme des buttes et des "couloirs" basaux. Le "plancher" est composé soit de sables roux soit de résidus de décalcarification, d'où peuvent dépasser des chicots de lapiez.

- *Le plateau du Mahafaly*, au Sud de l'Onilahy, montre des figures karstiques bien différentes (Battistini, 1964) : entre une cuesta NNW-SSE de 50 à 120 mètres de dénivelée à l'Est et un escarpement de faille ("faille de Tuléar") sub-rectiligne à l'Ouest et de même direction, le plateau Mahafaly, couvert en majeure partie par un fourré épineux dense et impénétrable ("bush"), montre les formes suivantes :

- au Nord Ouest du plateau sur une bande NNW-SSE de 5-10 km de large, correspondant à un palier effondré : un champ d'une centaine d'avens à bords verticaux, de 50 à 500 mètres de diamètre, profonds de 40 à 100 mètres (photo 40),

- au Centre du plateau et à l'Est de la zone précédente (sur la plus grande partie du plateau) : une zone de dolines à fonds argileux de 75 à 150 mètres de diamètre, commandées par la présence d'un faisceau fracturé,

• à l'Est du plateau : le bush s'éclaircit en vastes clairières correspondant à de larges dépressions sinueuses et couloirs fermés ("ouvalas") à argiles rouges ou jaunes de décalcification, enfoncées de 2 à 5 mètres (effondrement et dissolution dans des conduits souterrains). Un certain nombre de couloirs et vallées sèches plates, témoignent d'un réseau hydrographique fossile,

- *le plateau de Belomotra-Manangetaheta*, entre Onilahy et Fiherenana, couvert d'une forêt sèche ou d'un fourré-dense à *Alluaudia*, ne présente pas de modelé karstique spectaculaire (peu de dolines et de lapiez), sinon des "kuppen" (dômes) surbaissés et boisés. Il est entaillé par un réseau dense surimposé de canyons profonds à reculées et méandres (photo 41). Des placages de sables roux forment des buttes ou remplissent les zones effondrées (petits grabens). Les calcaires marneux lités donnent des sols rouges encroûtés qui, après décapage, exposent la croûte calcaire dont les débris jonchent la surface.

- *le plateau du Mikoboka*, situé entre le Fiherenana et le Mangoky, en grande partie déforesté, très fracturé (failles NNE-SSW) avec compartiments basculés, abaissés ou surélevés, présente des modelés karstiques d'une grande richesse (Salomon, 1986) :

- des zones à lapiez "banaux" et à croûtes calcaires affleurantes, sur calcaires tendres lités,

- des zones à trains de dolines extrêmement denses et reliefs résiduels de dissolution. Les dépressions sont de type dolines (en "verre de montre" ou en entonnoirs), "ouvalas", poljés, et avens. On trouve aussi un nombre impressionnant de hautes tours, buttes et lanières soit à parois verticales rocheuses ciselées (mogotes, hums), soit convexo-concaves en coupoles ("kuppens") ou, plus redressées, en cônes ("kegels"). Sur l'escarpement Ouest du plateau (faille de Tuléar), existe une ligne d'exurgences à l'aval de cette zone (bassin de la Manombo).

- des lapiez géants acérés et cannelés, du type "tsingy", au Nord du plateau (Nosy Ambositra),

- des vallées sèches très denses et hiérarchisées et des canyons à fonds-plats, orientés vers l'Ouest,

- un réseau souterrain très important ouvert sur des avens et dolines en entonnoirs,

- *les plateaux et buttes de Manja-Soaserana* : à l'Ouest de Manja, la dissolution et l'évolution karstiques ont été activées par un faisceau de failles NNE-SSW découpant le plateau en multiples buttes en lanières étroites (en "dos de baleine"), séparées par des couloirs de sables roux.

Le plateau de Soaserana, moins tectonisé, est en partie couvert de sables roux, mais criblé de grandes cuvettes de dissolution des calcaires (dolines en "verres de montre") ou de suffosion des sables roux par évacuation profonde des colloïdes dans la nappe. Elles présentent des fonds larges, plats et argileux. On observe aussi des "poljés" de l'ordre du kilomètre.

- *les dômes entre la Maharivo et la Tsiribihina* (au Sud de Mahabo) : l'éocène forme des buttes peu marquées (moins de 20 mètres de haut) qui s'ennoient sous les sables roux. Les calcaires sont marno-gréseux et ne montrent pas de figures karstiques particulières.

#### ◆ Les sols

Comme déjà indiqué, deux types de "matériaux superficiels" peuvent exister ou coexister en mélange :

- les argiles de décalcarification des calcaires,
- les "sables roux" des épandages pliocènes.

Les premiers, *de type "fersiallitique"*, sont rouges, argileux, bien structurés, encore plus ou moins calcaires (décalcarification plus ou moins avancée), à pH neutres ou basiques. Les seconds, *de type "ferrugineux tropical"*, plus épais, sont brun-rougeâtres ou ocres, sableux, massifs, à pH plutôt acides. Les sables roux sont souvent prédominants dans les zones planes ou dépressionnaires et dans les couloirs et glacis situés entre les buttes en cônes et coupoles, sans cailloux et où n'affleurent pas de chicots calcaires de lapiez. Les fersiallitiques sont présents sur les topographies lapiazées en poches rouge vif sur les flancs des formes karstiques en buttes, coupoles et cônes ou redistribués en colluvions argilo-caillouteuses à leur base.

Les zones endoréiques ou mal drainées, planchers de mogotes ou fonds de dolines ou de poljés, sont comblées de colluvions sableuses et d'argiles de décalcarification inondables ou noyées par une nappe phréatique temporaire (photo 32), qui prennent des *caractères d'hydromorphie ou des caractères vertiques*, avec des couleurs grise, jaune, noirâtre, marmorisée. Dans les karsts du bassin de Majunga (Narinda, Mariariana, Katsepy) ces zones sont particulièrement riches en peuplements de palmiers (*Medemia nobilis*).

Les zones marneuses, marno-calcaires, marno-gréseuses, à litage fin, lorsqu'elles ne sont pas couvertes de sables roux, donnent naissance à des sols calcaires peu épais avec des pH élevés (7 à 8) : *bruns calcaires* plus ou moins ferrugineux, ou *bruns vertiques* et *vertisols* en zones basses. Mais l'érosion ravinante peut y être importante. Ces zones ne présentent pas de figures karstiques. Dans les régions du Sud-Ouest, plus sèches, la zone d'altération peut se compacter et se concentrer en calcaire par les eaux d'imprégnation et évoluer en *croûte calcaire* (zonée, de teinte crème à rosée). L'érosion décape facilement les sols bruns-calcaires ou bruns calciques peu épais du dessus et fait affleurer la croûte fragmentée en blocailles et plaquettes qui forment un pavage jonchant alors la surface. Un tel pavage est très fréquent sur les plateaux Mahafaly et les plateaux de Belomotra et Manangetaheta à l'arrière de Tuléar. Parfois un véritable encroûtement secondaire continu, héritage pédologique, peut mouler la surface.

#### 4.6 - LE PLIOCENE DETRITIQUE GRESO-SABLEUX A "SABLES ROUX"

##### ◆ Mode de mise en place

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 (voir précédemment). 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 non détaillée. 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 argilifié (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 gréseuse et grésos-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 grésos-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 (photo 32). 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" (voir plus loin).

#### ◆ Les sols

La rubéfaction quasi générale du sommet de la "carapace sableuse" que l'on observe du Nord au Sud de l'île, 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, formées 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 Sud-aride (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 quarzeux (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 10 à 13 mé % en surface (0-10 cm), de 7 à 10 mé % jusqu'à 40 cm,

- la somme des bases échangeables est, pour les mêmes profondeurs, de 6 à 11 mé % (saturation : 60 à 90 %) et de 4 à 6 mé % (saturation : 40 à 80 %) ; elle est composée en

surface de 3 à 10 mé de  $\text{Ca}^{++}$ , 0,4 à 2,0 mé de  $\text{Mg}^{++}$  et 0,2 à 0,5 mé de  $\text{K}^+$ ,

• 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 ne passent pas ; 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 précises 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-quartzeux.

**- 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 tâchetés 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*, *Ziziphus* ("mokonazy"), *Medemia* ("satrabe"), *Hyphaene* ("satra"). Ces deux derniers sont des palmiers qui affectionnent les zones sableuses hydromorphes (photo 32).

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" (photo 33). 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 (photo 34). Ces cuvettes représentent un modèle de "suffosion", affaissement activé par un soutirage profond de matières 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.

#### 4.7 - LES SYSTEMES DUNAIRES LITTORAUX QUATERNAIRES

Au quaternaire, des alternances d'avancées et de retraits marins d'une part, la dynamique éolienne d'autre part, ont conduit à la construction de "systèmes dunaires" (après régression marine et exondation d'une partie du plateau continental livré aux vents) à fréquent soubassement et "coeur" grésocalcaires (transgressions marines à dépôts gréseux peu profonds et grésification d'une partie des dunes). Les causes de ces fluctuations sont l'eustatisme (variation du niveau marin en relation avec les grandes glaciations quaternaires) ou, de façon moins importante pour le quaternaire, l'isostasme (soulèvement de l'île). Les géomorphologues (Battistini, Sourdat, Rossi) ont mis les transgressions/régressions marines en relation étroite, mais avec décalage (temporels), avec respectivement des périodes "pluviales" et "displuviales" (plus sèches). Ainsi les vieux ensembles dunaires ont été rubéfiés ou "jaunifiés" pendant les périodes plus humides qui ont suivi.

C'est dans le Sud de l'île que ces systèmes dunaires du quaternaire littoral ont été les mieux reconnus et caractérisés (Battistini, 1964), puis dans la région de Tuléar (Sourdat 1977). Dans le Nord et le Nord-Est, plus tardivement (Rossi, 1980) on a trouvé des équivalents et des spécificités ; dans l'Est, seules des reconnaissances ont été faites (Battistini, 1965 et 1978 ; Kilia, 1968), de même que dans l'Ouest (Battistini, Guilcher, Marec, 1970)

L'ensemble du Quaternaire marin du Sud postérieur aux sables roux pliocènes, à grès calcaires et sables marins et dunaires est qualifié d'"Aepyornien" par Battistini (1964) car riche en débris d'oeufs d'*Aepyornis*, ratite fossile. L'Aepyornien est constitué de l'ensemble des "bourrelets dunaires" successifs souvent grésifiés et plus ou moins rubéfiés du Sud de l'Androy (et de la plaine Côtière Mahafaly, qui reposent sur les "sables roux" détritiques pliocènes ou les calcaires marins éocènes. Le bombement Aepyornien fait jusqu'à 50 kilomètres de large vers l'intérieur. Son altitude maxima est de 371 mètres à 6 km du rivage.

Dans le Sud, Battistini a différencié trois systèmes dunaires quaternaires fondamentaux qui se recouvrent en partie les uns les autres :

- le système dunaire dit "Tatsimien" (grésifié) ou "grande dune" rouge
- le système dunaire dit "Karimbolien" (grésifié) ou "petite dune" jaune
- le système dunaire récent-actuel dit "flandrien" (non grésifié)

#### 4.7.1 - LE SYSTÈME DUNAIRE DU TATSIMIEN (QUATERNAIRE ANCIEN OU "AEPYORNIEN INFÉRIEUR")

Cet ensemble dunaire grésifié a été défini et reconnu sur une grande superficie dans l'Androy et le Mahafaly littoral (pluviométrie annuelle de 300 à 500 mm). Sur la côte Ouest il ne semble pas qu'on l'ait observé de façon claire. Rossi (1980) pense en avoir trouvé l'équivalent dans le Nord et le Nord-Est de Madagascar.

En général la "grande dune" a été altérée et "rubéfiée" sur une épaisseur de 50 cm à plusieurs mètres au dessus du grès calcaire, avec formation de sols ferrugineux tropicaux non lessivés, assez comparables aux sables roux des formations détritiques continentales pliocènes de la région. Une croûte calcaire peut exister au contact grès calcaire-sol rouge ; elle affleure lorsque l'érosion a décapé le sol.

La végétation est un bush xérophyte plus ou moins dense ou dégradé, à *Euphorbia laro* et *Alluaudia*. Sinon il s'agit d'une savane plus ou moins arbustive à *Aerva*, *Panicum* et *Cynodon*. L'arbuste *Psidia altissima* ("Jira") signale un état de dégradation avancé.

##### ◆ Localisation

D'Est en Ouest du littoral du Grand Sud, la grande dune Tatsimienne s'observe :

- *De Fort-Dauphin au Mandrare* : c'est le pays "Tatsimo", qui a donné son nom à ce vieil ensemble dunaire. D'est en Ouest, les massifs dunaires Tatsimiens, de tailles assez réduites, et qui culminent de 130 à 180 mètres, sont :

- le massif de l'ankovy (Ouest de Fort-Dauphin)
- le massif de l'Iforiana prolongé au Nord par le glacis de Marovato
- le cap Andrahomana
- le massif de l'Ankihy
- le massif de l'Andringy (Nord du Lac Anony).

Tous ces massifs (sauf une partie de l'Ankihy) sont séparés de la mer par la "petite dune jaune" karimbolienne et les dunes flandriennes.

- *Du Mandrare à la Menarandra* (extrême Sud de l'Androy). D'Est en Ouest, le Tatsimien constitue les massifs dunaires suivants :

- les plateaux du Bassin d'Ambovombe, entre les rivières Mandrare et Manambovo, d'une largeur vers l'intérieur de 50 km, et d'altitude maxima 371 mètres,
- le plateau Karimbola, entre les rivières Manambovo et Menarandra, d'une largeur de 30 km et d'altitude maxima 233 mètres.

A l'Est du Cap Saint-André, ces massifs sont séparés de la mer par les massifs dunaires Karimboliens.

- *Dans le Pays Mahafaly littoral* (de la Menarandra au niveau du village de

Bemananteza), le Tatsimien est formé de massifs dunaires plaqués sur les calcaires marins éocènes du Mahafaly et fossilisant en partie leur faille littorale (NW-SE). Du Sud vers le Nord on distingue les massifs suivants :

- le Tsiripahalo,
- l'Embere (alt. : 215 m),
- le Sambatio (alt. : 230 m),
- l'Ambohitsabo,
- le Malangiriaky,
- le Vohitampitse (alt. : 125 m).

- *Plus au Nord* : des lambeaux s'observent jusqu'au Fiherenana, en bordure du plateau calcaire éocène (Sourdat, 1970). Le dôme de "sables roux" du secteur de la forêt des Mikea pourrait être en partie d'origine dunaire Tatsimienne.

#### ◆ Géomorphologie

##### - *Matériau constitutif*

- La base du Tatsimien dunaire est constitué d'un "Tatsimien" marin littoral de plage à base de poudingues, lumachelles et grès coquilliers calcaires de couleur rosâtre. Ces grès calcaires sont en général très durs et recristallisés. Cette plage "tatsimienne" ne dépasse pas 4 mètres d'altitude au dessus des plus hautes mers actuelles.

- Au dessus se trouvent les grès calcaires dunaires proprement dits, blanchâtres à jaunâtres, plutôt tendres, souvent à stratifications entrecroisées, de 40 à 200 mètres d'épaisseur. Ils contiennent des fossiles continentaux, en particulier des mollusques et des débris d'oeufs d'*Aepyornis*.

##### - *Modelé.*

La "grande dune" forme de gros bourrelets de 100 à 300 mètres d'altitude et de 5 à 50 kilomètres de large, séparés du littoral, soit par le bourrelet Karimbolien chevauchant (voir ci dessous) et les cordons flandriens, soit par un "glacis" côtier (Lavanono). Ces bourrelets, avec leur base marine, reposent soit sur les épandages détritiques pliocènes, soit sur le socle (Sud de l'Androy), soit sur les calcaires marins éocènes (littoral Mahafaly).

On ne reconnaît plus les formes dunaires originelles. On devine seulement parfois (région d'Ambovombe) des grands sillons interdunaires Est-Ouest soulignés par des chapelets de dépressions.

Les gros bourrelets du Sud de l'Androy ont eu pour conséquence de bloquer le drainage des glacis détritiques pliocènes en créant de vastes dépressions endoréiques à "sables blancs" (Beloha, Ambondro, Ampamolora) lavés par les nappes phréatiques anciennes, développées sur colluvions de dégradation de la Dune Aepyornienne et sables roux.

La "dégradation" du complexe Tatsimien a pris plusieurs formes :

- sur le littoral, à l'Ouest du Cap Sainte-Marie jusqu'à la Menarandra, le plateau karimbola est entaillé par un grand escarpement sur près de 60 km, qui représente un front d'érosion régressive dominant d'une centaine de mètres une plaine côtière (Plaines de Lavanono et de Tsihava). Cette plaine de piemont est formée d'un glacis d'épandage

couvert de produits de démantèlement sablo-gréseux plus ou moins rubéfiés, de la grande dune,

- sur les calcaires Mahafaly, les grès calcaires coquilliers de la Grande dune sont, sur certains massifs, entaillés par un réseau serré de ravins, aussi bien côté plaine côtière qu'en arrière du front dunaire. Cette érosion régressive inactuelle a été activée par la Linta. Les produits grés-sableux de démantèlement de l'ensemble dunaire d'origine a donné des glacis d'épandage eux-mêmes rubéfiés. Les sommets des bombements, intacts, sont protégés par une croûte calcaire déblayée de ses sables roux,

- à l'arrière (vers l'intérieur) de nombreux bombements Tatsimiens, se trouvent des glacis d'épandage sablo-gréseux, anciens puisque rubéfiés au même titre que les grès calcaires coquilliers en place.

#### ♦ Les sols et la morphodynamique actuelle

- Lorsque l'érosion "post-tatsimienne" n'a pas été trop intense, les grès calcaires coquilliers à relief mollement vallonné et à longues pentes ont été altérés et rubéfiés sur 1 à 5 mètres en moyenne (localement 10 mètres).

Cette altération a eu lieu pendant la période humide qui a suivi la mise en place du complexe dunaire, que Battistini (1964) a appelé "Pluvial Ambovombien".

Le sol, de couleur rouge vif à rouge-brunâtre, très homogène, est sableux (moins de 10 % d'argile + limon) à sables quartzeux, massif en profondeur tout en restant assez friable. Le contact avec la roche-mère est ondulé, souvent en poches. Ces sols ont été décalcariés ; un encroûtement calcaire zoné, dur, marque généralement la base du profil et le sommet du grès calcaire coquillier.

Ces sols, sans être calcaires (composés exclusivement de quartz), ont des pH assez élevés (autour de 7). Minéralogiquement, par rapport aux grès calcaires originels riches en calcite, chlorite, attapulgite, illite, montmorillonite et (plus ou moins) quartz (Sourdat, 1977), il y a eu disparition (hydrolyse ou dissolution puis lessivage) de ces minéraux "primaires", avec néoformation de kaolinite, d'hématite, d'hydroxydes de fer amorphes et très fort enrichissement relatif en quartz, constituant les sables, donc 90-95 % de la masse totale.

Ces sols ont une faible couverture végétale. Ils sont damés par l'érosion en nappe.

Si on doit classer ces sols, on peut en faire des *sols fersiallitiques* ou des *sols ferrugineux tropicaux non lessivés*, assez comparables aux "sables roux" des sédiments détritiques continentaux pliocènes. Certains auteurs parlent même pour ces sols de "sables roux dunaires" ce qui élargit encore ce concept.

Remarquons d'ailleurs que certaines formations dunaires (surtout dans leurs parties supérieures) résultent d'une reprise éolienne autant des sables calcaires marins (balayage éolien d'une plate-forme marine exondée après régression) que des sables et grès du pliocène continental. Cela peut expliquer parfois l'épaisseur des sols rubéfiés sablo-quartzeux qui en résultent et leur convergence vers des "sables roux".

- Lorsque l'érosion a décapé les sols des bombements Tatsimiens, la croûte calcaire qui

constituait la base de ces sols au contact avec les grès, affleure. Elle "épigénise" le grès calcaire coquillier, sans limite nette. Cette croûte est souvent feuilletée ou zonée, blanchâtre, compacte et très dure. On la trouve disseminée un peu partout sur certains plateaux et versants décapés, en particulier à l'extrémité Ouest du plateau Karimbola et sur les sommets des dômes qui coiffent le rebord du plateau Mahafaly (Embere, Sambatio, Vohitampitse).

La morphodynamique est à la fois hydrique et éolienne. Même avec une pluviométrie annuelle très faible (300 à 500 mm), les pluies, tombant en averses violentes sur un sol très mal couvert avec des pentes sensibles (2 à 10 %), occasionnent un ruissellement en nappe considérable. Le vent (alizés ESE-WNW) reprend localement le matériau sablo-gréseux et ses sols rubéfiés et construit des dunes vives. Mais cela reste peu important par rapport aux dunes karimboliennes et surtout flandriennes (voir ci-dessous).

#### 4.7.2 - LE SYSTÈME DUNAIRE DU KARIMBOLIEN (QUATERNAIRE MOYEN OU "AEPYORNIEN MOYEN")

C'est le deuxième grand ensemble dunaire défini dans l'Androy littoral par Battistini (1964) et qui vient en partie recouvrir ("fossiliser") le système Tatsimien précédent. Il constitue l'Aepyornien moyen, car encore riche en débris d'oeufs d'*Aepyornis*. Ces dunes sont également grésifiées (grès marins coquilliers). Par rapport au système Tatsimien, elles présentent des formes éoliennes bien reconnaissables, leur altération est moins poussée et leur couleur moins rouge vif (jaune, ocre, rouge clair...).

Dans le Sud où elles sont les plus abondantes, la pluviométrie annuelle est comprise entre 300 et 500 mm, avec 8 à 11 mois secs. La végétation originelle (bush dense à *Euphorbia laro* et *Alluaudia*) a pratiquement disparu, remplacée par une savane à *Aerva*, *Panicum* et *Cynodon*.

##### ◆ Localisation

On trouve les dunes karimboliennes essentiellement depuis Fort Dauphin jusqu'au delta du Mangoky. Leurs plus beaux développements sont dans le Sud de l'Androy et dans la plaine côtière Mahafaly où elles se situent, sur 3 à 15 km de large, en avant des dunes Tatsimiennes qu'elles recouvrent en partie. Les dunes Karimboliennes occupent la majeure partie de la plaine cotière Mahafaly puis, plus au Nord, des plaines de Tuléar et du littoral Mikea jusqu'à Morombe. A partir du Mangoky et jusqu'au Cap-Saint André, la dune jaune Karimbolienne s'observe de façon discontinue dans les plaines littorales et deltas de certains fleuves : plaines du Mangoky, de Maintirano, de Tambohorano, de Besalampy.

##### ◆ Géomorphologie

###### - Matériau constitutif

La base du complexe dunaire Karimbolien est constitué, du moins dans sa partie littorale, d'une "semelle" de grès de plage, de poudingues, de lumachelles et de grès coquilliers marins (mollusques) parfois de grès coralliens. Il s'agit de la formation de la transgression Karimbolienne que l'on ne trouve qu'au dessous de 4 mètres d'altitude (par rapport aux hautes mers actuelles). L'âge de cette "semelle marine" serait de 100.000 à 150.000 ans.

Le matériau dunaire proprement dit provient en partie de la déflation éolienne d'une plateforme marine exondée lors de la régression qui a suivi la transgression karimbolienne et en partie de la déflation de sédiments détritiques pliocènes (carapace sableuse).

Il est constitué de grès calcaires siliceux et jaunâtres, plus ou moins consolidés, à mollusques continentaux et débris d'oeufs d'*Aepyornis*, à stratifications entrecroisées. Ces grès sont parfois lapiazés. Une croûte calcaire feuilletée ou concretionnaire les surmonte.

Dans les plaines côtières situées aux pieds de l'escarpement Mahafaly et de la faille de Tuléar, et au pied du "talus" de Lavanono (Androy), les grès de la dune karimbolienne sont mélangés ou recouverts de matériaux colluviaux bréchiques anciens, reconsolidés et à encroûtement calcaire superficiel, qui résultent du démantèlement soit de la falaise calcaire éocène, soit du complexe dunaire Tatsimien du plateau Karimbola. Battistini (1964) parle de "pluvial Lavanonien" pour cette phase de colluvionnement bréchiq.

#### - *Modèle*

Le système dunaire Karimbolien a, la plupart du temps, conservé sa morphologie éolienne originelle, que l'on constate particulièrement bien en survol aérien. Il est constitué d'un empilement de longues "dunes paraboliques" élémentaires (de 200 à 1000 mètres de long) qui se regroupent en ensembles plus vastes que Battistini appelle "ensembles linguiformes", pouvant avoir 10 kilomètres d'allongement.

Ces formes dunaires sont allongées dans le sens des vents de l'époque : ESE-WNW pour l'Androy, SE-NW pour le Sud de la plaine Côtière Mahafaly, puis SSE-NNW plus au Nord.

Au sol, le paysage se présente comme un ensemble de petites collines de 20 à 30 mètres de dénivellation, avec des pentes atteignant 10 à 20 %. Ces collines sont orientées en petits chaînons sub-parallèles qui correspondent à la coalescence des branches des dunes paraboliques.

Les dunes Karimboliennes ont chevauché les bombements dunaires Tatsimiens. Dans l'Androy (Ambovombe), ce "front de déferlement" est très net ; il est marqué par un talus de 10 à 40 mètres de haut. Par contre, toujours dans l'Androy, les dunes Karimboliennes n'ont pu escalader le "talus lavanonien" et sont restées confinées dans la plaine côtière de Lavanono.

Les dunes ont souvent été "reprises" et estompées en glacis et glacis-versants à pentes de quelques %. Dans le Sud, le système dunaire Karimbolien correspond à l'Androy "utile", région la plus peuplée et la plus cultivée (champs à haies vives de type "vala"). Le fourré xérophite originel y a pratiquement disparu.

#### ◆ Sols et morphodynamique actuelle

- *En règle générale*, l'altération a été moins "poussée" (rubéfaction moins marquée) que sur l'ensemble Tatsimien.

Cette altération a été le fait d'une période plus humide, postérieurement au dépôt des dunes, que Battistini (1964) a appelé "pluvial lavanonien".

La roche-mère sablo-gréseuse mi-calcaire mi-siliceuse (quartz) a été totalement

décalcarifiée, (comme pour le système Tatsimien). Les minéraux primaires, excepté le quartz, ont été presque totalement dissous ou hydrolysés puis éliminés par lixiviation. Une partie du calcaire dissous se retrouve souvent à la base du profil ou dans le grès-calcaire sous forme de concrétions (amas ou poupées calcaires) ou de croûte calcaire feuilletée souvent très dure. La coloration des sols est jaune, ocre, rousse ou rougeâtre (sauf exceptions, jamais rouge très foncé). C'est pourquoi Battistini parle de "dune jaune" par rapport à la "dune rouge" Tatsimienne.

Cependant, Sourdat (1977), qui a étudié en détail la Plaine de Tuléar, pense que le Karimbolien de cette région peut être dédoublé en deux sous-ensembles dunaires, le premier étant davantage rubéfié que le premier.

Minéralogiquement, ces sols (du moins au Sud du Fiherenana), contrairement aux sols rouges des dunes Tatsimiennes, ne contiennent pas que de la kaolinite, des oxydes de fer et du quartz. On y observe aussi des traces de minéraux primaires tels que attapulgite et chlorites (Sourdat, 1977). Le fer y est présent sous forme d'amorphes et de goethite, et non plus d'hématite.

Les sols, beige ou rouge-clair, ont une épaisseur de 1 à 3 mètres au dessus de la croûte ou du grès calcaire. Ils sont toujours très sableux quartzeux (90 % de sable). De structure massive, ils sont souvent plus friables que les sables rouges sur Tatsimien. En profondeur des amas, granules, ou "poupées" calcaires peuvent être présents. Le pH est plutôt alcalin (7 à 8).

Ces sols "évolués" sont plutôt à classer parmi les *sols fersiallitiques*.

- Dans les régions décapées, les sols jaunes ou rouges précédents sont associés à des affleurements de croûte calcaire dure ou de grès calcaires plus friables, qui deviennent alors dominants. De nombreux endroits de la plaine de Tuléar, puis plus au Sud de la Plaine Côtière Mahafaly, ne sont que des champs de croûte calcaire démantelée. On trouve aussi des affleurements importants de croûte calcaire sur le littoral Mikea.

Sur la dune Karimbolienne, l'action éolienne actuelle sur la remise en mouvement des sables gréseux ou le recouvrement par des dunes flandriennes réactivées, est localement importante, avec formation de dunes vives (*nebkas, barkhanes, dunes paraboliques*).

Les secteurs les plus touchés sont : tout le littoral Tatsimo et Androy (direction des dunes ESE-WNW), la plaine côtière Mahafaly, le littoral Mikea (dunes vives rouges, reprenant des "sables roux" d'origine continentale et dunaire).

#### **4.7.3 - LE SYSTÈME DUNAIRE FLANDRIEN DE LA CÔTE SUD ET DE LA CÔTE OUEST (AEPYORNIEN OU QUATERNAIRE RÉCENT)**

Les "dunes flandriennes" sont contemporaines et postérieures à la transgression flandrienne (plages à + 1 à 2 mètres), observée mondialement, qui est la conséquence de la fonte de la dernière glaciation quaternaire (Wurm) il y a 10.000 ans.

Les dunes flandriennes sont donc holocènes (quaternaire récent) et leur formation s'étale entre -10.000 ans et la période actuelle.

Dans le Sud de Madagascar, Battistini (1964) intègre les dunes flandriennes dans l'Aepyornien (terminal) car elles contiennent encore des débris d'oeufs d'*Aepyornis*.

Les dunes flandriennes bordent pratiquement tout le littoral malgache. Ces dunes ne sont pas grésifiées, contrairement aux dunes Karimboliennes et Tatsimiennes. Elles ne sont pas rubéfiées non plus. Dans l'Ouest, le Sud-Ouest et le Sud elles sont de couleur beige. Elles n'ont pas été décalcarifiées. Leurs sols sont donc plus ou moins riches en calcaire. Elles présentent des formes dunaires très fraîches, soit fixées (le plus souvent) soit vives. Le Sud et le Sud-Ouest malgaches présentent le maximum d'extension des dunes flandriennes, et celles-ci y sont très souvent encore en mouvement (nebkas, barkanes, dunes paraboliques, simples cordons...). Ceci est dû à un vent dominant d'alizé constant (tous les jours) sub-parallèle au rivage, à un climat sec (300 à 600 mm annuels) et à une végétation ouverte peu couvrante : *Euphorbia stenoclada* ("famata"), *Euphorbia laro* ("laro"), *Poupartia minor*, *Zigophyllum depauperatum*, *Eordia*, *Ipomea pescaprae*, *Carnivalia*, *Filaos*...

Les plus beaux développements de dunes flandriennes s'observent près des embouchures (deltaïques ou non) des fleuves (sources de matériaux meubles mobilisables par le vent), spécialement leurs rives situées "sous le vent".

Elles recouvrent alors soit des alluvions, soit des mangroves (photo 53), soit des dunes plus anciennes, soit des sables roux des glacis pliocènes.

Dans le Sud les plus vastes ensembles sont ceux alimentés par les alluvions de la Linta, de la Menarandra, de la Manambovo et du Mandrare. L'ensemble flandrien pénètre 10 kilomètres à l'intérieur des terres dans la plaine côtière de Lavanono jusqu'au grand "talus" du plateau Karimbola qu'il grimpe en partie. Les dunes peuvent avoir dans cette zone jusqu'à 40 à 170 mètres d'altitude.

#### 4.7.4 - LES SYSTÈMES DUNAIRES FLANDRIENS ET PLUS ANCIENS DE LA CÔTE EST

##### - Les dunes flandriennes

Ce sont les "sables blancs" (podzols de nappe) omniprésents qui bordent la quasi-totalité du littoral oriental et qui régularisent cette côte.

Ces dunes, contrairement à ce que l'on voit dans le Sud et le Sud-Ouest, ne montrent pas de formes éoliennes élémentaires, mais des cordons parallèles (qui sont autant de rivages successifs) séparés par des sillons hydromorphes ou inondés. Les multiples cordons et sillons de la Pointe à Larrée (photo 29) sont tout à fait caractéristiques de cette morphologie. Ces cordons ont une origine mi-marine, via les courants marins qui mobilisent, concentrent, trient et rabattent sur le littoral les sables des sédiments des fleuves arrivant en mer, et mi-éolienne par déflation des plages orientées selon les courants, avec transport des sables sur une très faible distance, juste à l'arrière des plages successives.

Les cordons flandriens isolent, à l'arrière, des lagunes allongées (photos 28, 30, 54), alimentées par l'arrivée des fleuves dont la sortie en mer est gênée ou déplacée sur de longues distances par ces mêmes cordons. C'est une caractéristique des embouchures des fleuves de la côte Est ("vinany") : les fleuves ne "sortent" pas en mer à l'endroit de leur arrivée, mais alimentent lagunes et marais littoraux parallèles au rivage.

Les cordons flamandais de la côte-Est portent des "sables blancs" classés *podzols de nappe*. Ce sont des sols totalement "lavés" par la nappe phréatique et où il ne reste plus que le squelette quartzique nettoyé de ses oxydes de fer. Le pH est généralement très acide (4 à 5). La base du profil (50 à 100 cm) montre un "alios" humo-ferrugineux à consistance de carapace, correspondant au niveau le plus bas de la nappe phréatique. En surface se trouve un horizon humifère noirâtre alimenté par la végétation forestière qui couvre souvent les cordons sableux, et dont les acides fulviques "chélatent" les oxydes métalliques et les font migrer à la base du profil, dans l'alios.

#### - Les systèmes dunaires plus anciens

Souvent sur la Côte Est, à l'arrière des cordons flamandais et à l'arrière des lagunes, se trouvent des matériaux sableux anciens, ferrallitisés (rouges) ou lavés (sables blancs), marmorisés en profondeur, parfois grésifiés (Nord-Est), qui témoignent d'anciennes dunes.

Rossi (1980), qui a étudié en détail le Nord et le Nord-Est de Madagascar (jusqu'à Vohémar) a défini dans cette région et pour le quaternaire six séquences de "transgression (dépôts de plage) - régression (déflation éolienne)" dont deux d'entre elles pourraient correspondre aux Tatsimien et Karimbolien de Battistini dans le Sud de l'île. Ces six systèmes sont les suivants :

- ◇ transgression-régression du Tatsimien : plages ou récifs gréseux et "grande (ou vieille) dune rouge grésifiée (sauf au Sud de Vohémar)",
- ◇ transgression-régression de l'Antsiranien : plages ou récifs et "vieille dune jaune grésifiée (sauf au Sud de Vohémar)",
- ◇ transgression-régression de l'Ivovonien : plages ou récifs et "dune blanche grésifiée (sauf au Sud de Vohémar)",
- ◇ transgression-régression du Karimbolien : plages ou récifs et "dune jaune non grésifiée",
- ◇ transgression-régression de l'Irodien : plages ou récifs et "dune grise"
- ◇ transgression-régression du flamandais à l'actuel : plages ou récifs et "dune blanche actuelle".

Les témoins de ces systèmes dunaires, définis autour de Diego, sont bien visibles au Nord et Nord-Est de l'île jusqu'à Vohémar où certains atteignent 70 à 90 mètres de haut. Ils sont séparés par des dépressions interdunaires.

Au Sud de Vohémar et sur la Côte Est, ces systèmes dunaires n'ont pas été validés dans le détail. Mais des cartographes (Battistini, Kilian...) ont repéré la présence de séries de vieilles dunes, jusqu'à 8-15 mètres d'altitude, derrière les cordons flamandais. Ces vieux cordons, larges parfois de 500 mètres à 2 kilomètres, sont généralement profondément ferrallitisés, sableux. Ils sont parfois aussi "lavés" par la nappe et, ainsi, ressemblent aux cordons flamandais. Ces ensembles, s'ils sont bien visibles au Nord, s'estompent à l'Est et il est difficile de les reconnaître dans le paysage, par rapport aux collines ou plateaux ferrallitiques sur cristallin ou crétacé.

## **5 - MORPHOPEDOLOGIE DU DOMAINE VOLCANIQUE**

Madagascar a vu plusieurs grands épisodes de volcanisme :

- le volcanisme crétacé
- le volcanisme tertiaire (et pleistocène ancien)
- le volcanisme quaternaire moyen
- le volcanisme quaternaire récent.

### **5.1 - LE VOLCANISME CRETACE**

C'est au crétacé que Madagascar s'est séparé définitivement du "Continent du Gondwana" qui réunissait l'Inde et l'Afrique. Cette dislocation, marquée par les grandes failles de la Côte Est, a été suivie, d'une part par le soulèvement des Hautes Terres telles un énorme "horst", d'autre part, consécutivement à la fracturation N-S, par des épanchements volcaniques fissuraux à dominance basaltique, très étendus et abondants sur toute la périphérie de l'île et une partie du Centre Nord des Hauts-Plateaux.

Ce volcanisme date du début du Crétacé supérieur. On peut y distinguer 5 grands ensembles de planèzes à caractères morpho-pédologiques distincts :

- ◇ les planèzes basaltiques des Tampoketsa du Centre Nord
- ◇ les planèzes basaltiques et rhyolitiques de la Côte Est
- ◇ les planèzes basaltiques du Nord-Ouest
- ◇ les planèzes basaltiques de l'Ouest et du Sud-Ouest
- ◇ les planèzes basaltiques et rhyolitiques de l'extrême Sud.

#### **5.1.1 - LES PLANÈZES BASALTIQUES DES TAMPOKETSAS DU CENTRE-NORD**

Ce sont les basaltes qui "sous-tendent" une partie des Tampoketsa (surface fini-crétacée) du Kamoro (1300 mètres d'altitude), du Beveromay (1200 mètres d'altitude) et de l'Analamaitso (1200 mètres). Ces basaltes sont, sur une centaine de mètres, imbriqués avec des grès argileux arkosiques à bois silicifiés. Ils forment des plateaux vallonnés, à sols ferrallitiques argileux, fortement désaturés, de couleur rouge sombre. La végétation est une savane ou pseudo-steppe à *Heteropogon*, *Ctenium*, *Loudetia*, *Aristida*.

#### **5.1.2 - LES PLANÈZES BASALTIQUES ET RHYOLITIQUES DE LA CÔTE EST**

Les basaltes crétacés forment des plateaux parallèles au littoral, larges de 10 à 30 km et 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 Vatomandry et Manambondro (au Sud de Vangaindrano). Ils appartiennent au domaine per-humide de l'île (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 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.

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 souvent 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.

### 5.1.3 - LES PLANÈZES BASALTIQUES DU NORD-OUEST

Elles constituent un vaste rebord d'assiette intercalée entre les séries sédimentaires gréseuses du crétacé du bassin de Majunga (entre le sénonien et l'albien) depuis Nosy Radama au Nord-Est à Soalala au Sud-Ouest. Ces plateaux (dont le plus vaste est celui d'Antanimena, large d'environ 25 km) sont généralement bordés par une "cuesta" au Sud et à l'Est. Ces plateaux sont arrosés par 1500 à 1800 mm annuels et leur altitude est inférieure à 200 mètres. Ils sont couverts par une savane graminéenne (*Heteropogon* et *Hyparrhenia*), arbustive ou arborée (*Poupartia*, *Gymnosporia*, *Cryptostegia*, *Ziziphus*, *Tamarindus*, *Sterospermum*, *Commiphora*, *Medemia*, *Nobilis*, *Hyphaena Shatan*).

Le modelé est constitué d'une alternance de plateaux résiduels (à lambeaux forestiers) à *sols ferrallitiques rouges* et de longs glacis-versants à sols remaniés, tronqués ou érodés par un ravinement et une érosion en nappe. Les plateaux résiduels montrent localement (au Nord et au Sud d'Analalava en particulier), dans leur manteau d'altération, une érosion ravinante profonde en "cirques" (photo 48) terminant les branches amont du chevelu hydrographique.

Les sols ferrallitiques sont moyennement à faiblement désaturés avec des pH relativement élevés de 6 à 7. La capacité d'échange est élevée (20 mé %) et le degré de saturation atteint 60 %. En conditions non érodées la teneur en matière organique est assez élevée (8 % sous

forêt, 3 à 5 % sous savane).

Les glacis de démantèlement de la surface ferrallitique originelle sont couverts de sols plus jeunes et moins épais : *sols ferrugineux tropicaux*, *sols fersiallitiques*, *vertisols*.

Des placages de sables-roux ou de "sables blancs" sur "carapace sableuse" pliocène remaniée peuvent être abondants, surtout dans les zones déprimées.

#### 5.1.4 - LES PLANÈZES BASALTIQUES ÉRODÉES DE L'OUEST ET DU SUD-OUEST

Dans l'Ouest et le Sud-Ouest, les basaltes créacés couvrent 3 grands ensembles, qui sont du Nord au Sud :

- ⇨ la région de l'Ambongo, à l'Est de Besalampy (1500 mm de pluies, 7 mois "secs"),
- ⇨ la région Maintirano-Antsalova, entre les fleuves Ranobe et Manambolo (1200 mm de pluie, 8 mois "secs"),
- ⇨ la région de l'Analavelona-Andrambo, entre les fleuves Mangoky et Onilahy (600-700 mm de pluies, 8 mois "secs").

Par rapport aux basaltes du bassin de Majunga, ceux de l'Ouest et du Sud-Ouest sont beaucoup plus érodés et leur couverture ferrallitique originelle n'existe plus qu'à l'état de relique sur quelques plateaux couverts de forêt.

Les Basaltes de Maintirano-Antsalova portent une association de petits plateaux boisés à *sols ferrallitiques* épais, entaillés en "bads-lands" en périphérie, de glacis d'épandages colluviaux, à matériaux ferrallitiques remaniés, de glacis d'érosion sur altérite tronquée ou directement sur basalte, à *vertisols*, *bruns eutrophes* et *lithosols*. Les *vertisols*, bruns et noirs peu épais, sont abondants dans cette région, ils sont caractérisés par une couleur sombre, un micro-relief gilgai, des crevassements importants, des pavages de cailloux et concrétions de silice amorphe (calcedoine...) ou de débris de géode de quartz (pouvant passer à l'améthyste). Ces *vertisols* ont des pH de 7 à 8, une forte teneur en argile (60 à 80 %), un taux de matière organique de 25 % sur 30 cm, une très forte capacité d'échange (80 mé %). En profondeur, les faces de glissement sont très larges. Des concrétions et amas calcaires sont fréquents vers 60 cm de profondeur et sont souvent remontés en surface.

Les sols ferrallitiques (paléosols reliques sur plateaux) sont rouge vif. D'une épaisseur de 2 à 4 mètres, ils reposent sur une zone d'altération violacée ou marmorisée. Le pH est de 6 à 6,5 ; la capacité d'échange est de l'ordre de 11 mé % ; le sol est plus riche en Mg (5 à 6 mé) qu'en Ca (3 à 4 mé). Le taux de matière organique est de 1,5 %.

Une érosion très importante, en ravins (sur couverture ferrallitique ou *vertisols*) et en nappe, affecte ces vieilles planèzes basaltiques.

Dans le Sud-Ouest : l'Analavelona ne montre plus que quelques rares reliques ferrallitiques. Les basaltes sont alternés avec des calcaires créacés (au dessus) et des grès calcaires créacés (en dessous). Ils portent des *sols vertiques*, des *sols bruns eutrophes* et des sols fersiallitiques sur matériaux colluvial mixte calcaro-basaltique (Sourdat, 1977).

### 5.1.5 - LES PLANÈZES BASALTO-RHYOLITIQUES DE L'EXTRÊME SUD

Il s'agit du massif volcanique de l'Androy (bassin du Mandrare), situé en zone aride avec 600 mm de pluies annuelles et 7 à 8 mois "secs". C'est une énorme "galette" ovale à pendages vers l'intérieur (morphologie pseudo-synclinale) de 50 à 80 km de diamètre, culminant à 904 mètres d'altitude au Vohitsiombe, délimitée par des escarpements de 150 à 300 mètres de hauteur relative, exceptionnellement jusqu'à 600-750 mètres sur la bordure orientale du massif.

Le massif est constitué d'un empilement de coulées rhyolitiques (acides) et basaltiques (basiques). Les assises rhyolitiques les plus épaisses et les plus "dures" constituent des escarpements sub-verticaux (750 mètres de dénivellée pour le Vohitsiombe) et des plateaux perchés. Les nappes de basalte donnent plutôt des glacis de piemont ("pédiments") ou des zones dépressionnaires. Le massif est parcouru par un réseau important de fractures dont certaines ont un remplissage filonien (dykes de microgranites, de rhyolites, de dolérites ou de basaltes).

- *Sur rhyolites* : les sols de plateaux sont pratiquement inexistantes : altération sableuse de couleur crème, jonchée de blocaille (pseudo-reg). Les affleurements rocheux en place sont nombreux, sous forme de chicots ou de gros blocs plus ou moins arrondis.

- *Sur basaltes* : contrairement aux rhyolites, les basaltes sont couverts d'un manteau d'altération relique qui cache la roche en place saine. Les glacis sont jonchés de "pseudo-galets" noirs basaltiques de 10 à 30 cm de large qui résultent du dégagement de l'intérieur sain des "boules" à altération en "pelures d'oignons".

Le sol est brun-rougeâtre, argilo-limoneux sur 50 à 100 cm d'épaisseur. En dessous se trouve la zone d'altération en boules gris-verdâtres à auréoles de desquamation brunes.

Ces sols contiennent kaolinite, montmorillonite et hydroxydes de fer ; des caractéristiques vertiques (faces de glissement) peuvent s'observer.

On a donc une association de *sols fersiallitiques plus ou moins vertiques et de vertisols* (dans les zones basses).

### 5.2 - LE VOLCANISME TERTIAIRE (et début pleistocène)

Il s'agit des massifs volcaniques de l'Ankaratra et de la Montagne d'Ambre. Après la grande phase tectonique du Crétacé (fracturation Gondwaniennne) c'est au milieu et à la fin du Tertiaire que le soulèvement, le bombement et la fracturation des Hauts-Plateaux ont repris de l'ampleur, toujours selon une direction sub-méridienne. Il s'en est suivi un volcanisme intense qui a commencé il y a 7 millions d'années dans l'Ankaratra et il y a 9 millions d'années dans la Montagne d'Ambre.

#### ◆ Géologie

- *L'Ankaratra* (photos 43, 44, 45) : Il s'agit d'un strato-volcan linéaire (fissure N-S) qui a vu successivement un volcanisme "ancien" (mio-pliocène et début pleistocène), un volcanisme assez "récent" (moins de 100.000 ans) et un volcanisme très récent, holocène

(moins de 10.000 ans). Nous n'aborderons ici que le volcanisme ancien. Les volcanismes plus récents seront traités plus loin.

#### *- Mise en place du volcanisme mio-pliocène*

Les fissures ouvertes pendant la phase tectonique qui a débuté fin miocène ont livré passage à d'énormes quantités de laves, émises à la fin du miocène et au pliocène (7 millions d'années environ).

- Les premières laves émises ont été de type acide : trachytes et trachy-phonolites. Ces laves sont sorties à l'état visqueux sous la forme de dômes, de "galettes", de pitons et d'empilements de coulées courtes et épaisses s'étalant peu. Elles forment des massifs bien circonscrits à parois le plus souvent escarpées. Ce type d'émission est localisé essentiellement dans la partie Occidentale de l'Ankaratra à proximité des cuvettes de Faratsiho et de Vinaninony.

- Mais la plus grosse partie du volcanisme mio-pliocène est constituée de basaltes effusifs très fluides ("trapps") sortis par la grande fracture subméridienne. Il s'agit de la "série basique ancienne". Ces émissions basaltiques semblent avoir commencé légèrement après les émissions acides trachy-phonolitiques. Les nappes basaltiques, alternant coulées massives et coulées scoriacées à allure de tufs, se sont étalées sur des étendues considérables pour former le "premier Ankaratra". Elles ont fossilisé les surfaces d'aplanissement antérieures du socle cristallin: la surface fini-crétacée a été recouverte au centre, à l'Ouest et au Sud-Est ; la surface méso-tertiaire au Nord et à l'Est.

Le système de l'Onive qui coulait vers l'Ouest, bloqué par le barrage volcanique ainsi construit, a alors formé une immense étendue endoréique où se sont accumulés les sédiments volcano-lacustres et fluviaux. C'est le bassin d'Antanifotsy, relié à la grande cuvette d'Ambohimandroso.

#### *- Phases d'effondrements volcano-tectoniques*

Les émissions considérables de laves au mio-pliocène et le bombement continu du socle ont eu pour conséquences au pliocène des réajustements tectoniques qui se sont traduits par des effondrements le long de lignes de fractures antérieures :

- la faille du Betampona,
- la faille du Mandray,

- des cuvettes intra-montagnardes : des fractures situées à l'Ouest de celles du Betampona et au Nord-Est du massif granitique des Vavavato, évoluent en failles qui cisailent le socle cristallin, avec rejets vers l'Est isolant ainsi de petits bassins remplis d'alluvions fluviales dont les principaux sont ceux de Faratsiho, de Vinaninony et d'Ambohibany-Sambaina

#### *- les venues de volcanisme acide consécutives aux effondrements*

La tectonique d'effondrements a occasionné l'émission de laves acides (trachytes et trachy-phonolites) probablement issues de la "fonte" du socle cristallin (riche en silice) effondré. Au plio-pléistocène, des extrusions visqueuses sont sorties en de nombreux endroits, jalonnant un certain nombre de fissures du socle. Comme pour la phase initiale de

volcanisme acide, il s'agit de dômes et pitons à formes encore bien reconnaissables.

*- les épanchements d'ankaratrites*

Au début du pléistocène, la fracture principale sub-méridienne livre à nouveau passage à un volcanisme basique fissural. Il s'agit de la "série basique moyenne" par opposition avec la "série basique ancienne" mio-pliocène. Elle est constituée d'épanchements fluides d'ankaratrites qui achèvent la construction du massif de l'Ankaratra. L'âge de ces émissions a été attribué à environ 3 millions d'années. Il n'y a pas eu une grande interruption entre les deux séries basiques. Actuellement les ankaratrites constituent la crête sommitale déchiquetée de l'Ankaratra à plus de 2200 mètres d'altitude.

Au Tsiafajavona (2643 mètres), sommet de l'Ankaratra, l'empilement de laves basiques au dessus du socle atteint 1000 mètres d'épaisseur.

*- Mise en place des andésites d'Ambatondradama*

Cet épisode, dont on attribue un âge compris entre 1,7 et 1,4 millions d'années, est également d'origine fissurale (N-S). Les andésites forment une vaste étendue sub-horizontale, vers 2000 mètres d'altitude ("plateau d'Ambatondradama"). Les laves ont occupé une large gouttière située entre les basaltes mio-pliocènes et dominée par des massifs trachytiques.

**• La montagne d'Ambre**

C'est un édifice ovoïde de 2800 km<sup>2</sup>, construit comme l'Ankaratra en plusieurs phases :

- au miocène : nappes "acides" ignimbrtiques (rhyolites) formant la base du système (volcan bouclier surbaissé),
- au pliocène : édification d'un strato-volcan basaltique, sur des fractures méridiennes,
- au pleistocène ancien : épanchement d'énormes masses de basaltes en vastes planèzes,
- au quaternaire moyen : longues coulées de vallées et projections coiffant la partie sommitale du massif.

Du point de vue morpho-pédologique, à cette échelle peu détaillée, nous avons subdivisé le volcanisme tertiaire et début pléistocène de l'Ankaratra et de la Montagne d'Ambre en 3 grands ensembles :

- les hauts sommets de l'Ankaratra (plus de 2200 mètres d'altitude),
- les hautes planèzes et restes d'édifices disséqués basalto-trachytiques de l'Ankaratra (1800-2200 mètres d'altitude),
- les planèzes basaltiques de l'Ankaratra et de la Montagne d'Ambre.

Les phases volcaniques postérieures (quaternaires moyen et récent) seront abordées dans les chapitres suivants.

### 5.2.1 - LES HAUTS SOMMETS DE L'ANKARATRA

C'est le domaine des *andosols perhydratés mélaniques* (sols noirs) entre 2200 et 2643 mètres d'altitude (sommet de l'Ankaratra au Tsiafajavona, photo 44). Ils représentent une superficie d'environ 50.000 hectares. Ils prennent peu à peu le relais des "sols ferrallitiques bruns" (voir plus loin) par augmentation du taux de matière organique et de l'épaisseur de l'horizon humifère qui en même temps s'assombrit.

#### ◆ Situation et environnement

A ces altitudes, la température moyenne annuelle est comprise entre 9°C (Tsiafajavona) et 14°5 (2000 mètres). La pluviométrie est de 2000 à 2500 mm. La saison sèche est peu marquée (Juin à Août).

La plupart du temps le substratum est composé de roches basiques anciennes (ankaratries, basaltes). Mais on trouve aussi des sols noirs sur roches acides (dômes trachytiques). La roche mère influe assez peu sur la morphologie et les propriétés de ces sols. Il n'est pas impossible que ce matériau ait subi, au cours du quaternaire des remaniements d'origine périglaciaire (gélifraction, reptation, cryoturbation) comme le laisse penser l'aspect souvent fragmenté des formations superficielles des versants.

Les pentes sont généralement fortes, sauf dans les larges vallons, cuvettes, têtes de vallées évasées en amphithéâtres et plateaux ondulés, mal drainés, encastés entre des versants pentus.

*La végétation naturelle* est une prairie steppique pseudo-alpine à éricacées en forme de coussinets ou de touffes globuleuses et à graminées en touffes ou en petit gazon ras, associées à des mousses et lichens ; les milieux mal drainés sont occupés par des cyperus (*Cyperus madagascariensis*), carex (*kyllinga*) et des plantes endémiques variées car non touchées par les feux : *Sacciolepis*, *Tylostigma*, *Brachypodium*, *Poa*. Sur les zones pentues et rocailleuses, à sols andiques peu épais, dominent les *Helichrysum*, *Aloe*, *Kalanchoe*, des petites cactées. On y trouve de nombreuses plantes endémiques : *Nicodemia*, *Pimpinella*, *Pencedanum*, *Kniphofia*, *Habenaria*. La forêt naturelle (si elle a jamais existé) a disparu.

Les sols noirs ne sont pratiquement pas cultivés. Ils sont utilisés le plus souvent comme paturages pendant la saison sèche.

Cette accumulation de matière organique est surtout le fait d'une diminution des températures, peu favorable à l'activité biologique.

#### ◆ Les sols

• *L'horizon organique supérieur* est épais de 20 à 40 cm. Sa couleur est noire. Il montre un enchevêtrement dense de racines et présente souvent un aspect de tourbe spongieuse. En conditions naturelles, il est toujours humide. La porosité est toujours très forte. La teneur en matière organique, très élevée, est comprise entre 20 et 30 % ; le rapport C/N est élevé, de l'ordre de 20. L'horizon a un toucher limoneux, mais la texture est argileuse (50 à 60 % d'argile, 25 à 40 % de limon, 10 % de sable). La capacité d'échange est forte (30 à 45 mé %), mais l'horizon est très fortement désaturé (saturation inférieure à 1 %). Le pH est acide, compris entre 4,5 et 5. La teneur en phosphore total est assez élevée (2000 à 3000 ppm) mais celle en phosphore assimilable est faible (100 à 200 ppm).

• *L'horizon organique inférieur*, de 20 à 50 cm d'épaisseur, est de couleur brune à brun-foncé. On y trouve encore de nombreuses racines, mais pas de feutrage. Cet horizon, comme l'ensemble du profil, est constamment humide et non structuré. Il présente une faible densité apparente (0,5). La dessiccation du matériau est irréversible, c'est à dire qu'une fois desséché, il ne se réhumecte plus ; il donne alors des agrégats polyédriques fins très durs. A l'état naturel, hydraté, du fait de sa forte teneur en eau (jusqu'à 200 %), il possède des propriétés thixotropiques (le "test au couteau" marche très bien). La teneur en matière organique est élevée (10 à 15 %) ; le rapport C/N est de l'ordre de 22. La texture est argileuse (40 à 60 % d'argile, 30 à 40 % de limon, 10 à 12 % de sable). La capacité d'échange est élevée (20 à 40 mé/100 g de sol) mais le complexe absorbant est très désaturé ( $V < 1$  %). Le pH est acide (4,5 à 5). Le phosphore total est en forte quantité (2000 à 4000 ppm), mais la teneur en phosphore assimilable est faible (moins de 150 ppm).

• *L'horizon B* a une épaisseur de 30 à 70 cm. Il est de couleur brun-rougeâtre, ocre ou brun-jaunâtre (suivant la richesse en fer de la roche-mère), sans taches. Le matériau possède un toucher savonneux, non collant, toujours humide (perhydraté) ; il ne montre pas de structure, mais est très poreux. Desséché artificiellement, il se fragmente en petits agrégats polyédriques anguleux durs. Il présente des propriétés thixotropiques très nettes. La texture est argileuse (50 % d'argile, 30 à 40 % de limon, 10 à 20 % de sable). La teneur en matière organique est encore relativement élevée (2 à 6 %). Le rapport C/N est égal à 20. Le complexe absorbant a une capacité d'échange comprise entre 20 et 30 mé %. Il est toujours fortement désaturé ( $V < 1$  %) ; le pH est acide, de l'ordre de 5. On note une forte quantité de phosphore total (3000 à 5000 ppm).

• *L'horizon d'altération* est généralement peu épais (20 à 50 cm). La roche "pourrie" où on reconnaît quelques cristaux très altérés, est de couleur jaunâtre à brune, généralement plus claire que celle de l'horizon B. Cet horizon, comme l'horizon B, est toujours perhydraté, très léger, poreux, thixotrope et à toucher limoneux.

• *La roche mère* : basalte ou ankaratrite noirâtre, ou trachyte massif plus clair ; il s'agit parfois de projections cendreuses ou ponceuses litées trachytiques (SSE de Vinaninony).

Les andosols de l'Ankaratra possèdent un mélange de produits amorphes et de produits cristallisés : la teneur en silice amorphe est très faible (moins de 3 % de la silice totale) dans les horizons non organiques et augmente vers la surface (3 à 10 % de la silice totale), en liaison avec l'augmentation du taux de matière organique peu minéralisée. L'aluminium amorphe quant à lui représente 35 % de l'aluminium total. Les teneurs en fer amorphe sont élevées (45 % du fer total).

En dehors du fer, les produits amorphes sont donc des allophanes fortement aluminiques, pauvres en silice (imogolites ?).

Parmi les minéraux secondaires cristallisés, le fer est essentiellement à l'état de goethite. On trouve une quantité assez importante de kaolinite et de gibbsite.

### **5.2.2 - LES HAUTES PLANÈZES ET RESTES D'ÉDIFICES BASALTO-TRACHYTIQUES DE L'ANKARATRA**

Il s'agit de la tranche d'altitude 1800-2200 mètres. C'est le domaine des sols ferrallitiques "bruns" humifères.

### ◆ Situation et environnement

Cette altitude est caractérisée par une pluviométrie de 1500 à 2000 mm. Les températures y sont déjà fraîches et favorisent l'accumulation de la matière organique. La température moyenne annuelle est comprise entre 14°5 et 15°5.

Les sols ferrallitiques bruns occupent les parties moyennes des vastes coulées de basaltes anciens ; le modelé est celui de planèzes dégradées (photos 43 et 45), découpées en plateaux et lanières inclinés limités par de profondes vallées radiales avec des versants en pentes fortes. La pente générale est plus élevée que sur les parties terminales des coulées occupées par les sols rouges (voir plus loin). Le modelé des versants est affecté de vastes mouvements de masse en glissements étagés via les altérites épaisses. Les sols bruns couvrent aussi une grande partie du "plateau" andésitique d'Ambatondradama. Enfin ils occupent une partie des massifs trachytiques entre 1800 et 2000 m d'altitude.

### ◆ Les sols

Ces sols prennent le relais progressif des "sols rouges" (situés en dessous de 1800 mètres d'altitude). Ils forment une superficie d'environ 78.000 hectares. On les trouve tout autour du massif de l'Ankaratra et sur le plateau de Soanindrariny, jusque vers 2200 mètres. Au-dessus, ils passent aux sols andiques (voir précédemment). Les sols bruns peuvent donc être considérés comme intermédiaires entre les ferrallitiques rouges et les ferrallitiques andiques.

• *L'horizon humifère*, épais de 30 à 50 cm (plus développé que sur les "sols rouges") est de couleur brun-foncé à brun-noirâtre. Il est souvent très riche en racines qui forment un feutrage épais. A l'état sec la consistance est cendreuse et friable. Le taux de matière organique, compris entre 8 et 15 %, est d'autant plus élevé que l'on se trouve en altitude. Le rapport C/N est compris entre 12 et 14 (supérieur à celui des sols rouges). Le pH est de l'ordre de 4,8 à 5. La capacité d'échange est élevée (20 à 30 mé %), mais le taux de saturation est toujours très bas (1 à 4 %). La texture est toujours argileuse (60 à 75 % d'argile). Les réserves en phosphore total sont élevées (2000 à 5000 ppm) et le phosphore assimilable (Olsen) est en faible quantité (175 ppm) mais cependant 10 fois plus élevée que dans les "sols rouges".

• *L'horizon B*, de 50 cm à 2 mètres d'épaisseur (donc moins épais que sur les sols rouges), est de couleur brun-ocre à brun-rougeâtre. Il est toujours argileux (55 à 70 % d'argile, 15 à 30 % de limon, 5 à 15 % de sable). La structure, polyédrique anguleuse moyenne à grossière, est toujours bien développée. On n'observe pas de taches d'hydromorphie ni concrétions. Le taux de matière organique reste encore appréciable (2 à 4 %, C/N = 12) jusqu'à 60 cm de profondeur. Il est inférieur à 1 % en dessous.

La capacité d'échange est encore élevée (10 à 20 mé %). Le taux de saturation est très faible (moins de 2 %). Le pH est acide (4,7 à 5,1). Les réserves sont élevées (3000 à 5000 ppm) en phosphore total, mais faibles (100 à 300 ppm) en phosphore assimilable.

• *La zone d'altération* apparaît vers 75-200 cm de profondeur. Elle est épaisse de 1 à plusieurs mètres. Par rapport à l'horizon B, ce matériau est plus compact et moins structuré. On y voit un mélange d'argile rouge et de résidus de basalte altéré de teintes violacée, brunâtre et grisâtre.

• *La roche saine* est composée soit de basalte (le plus souvent), soit d'andésite (Ambatondradama), soit de trachyte. Les caractères morphologiques et analytiques des sols ne montrent pas de différences significatives suivant la roche-mère. Les sols sur roches basiques sont plus rougeâtres en général que les sols sur roches acides, moins riches en fer.

L'hydrolyse des minéraux est totale. Aucun minéral primaire ne subsiste dans l'horizon B où le rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  est toujours inférieur à 2. On y trouve de la gibbsite, de la kaolinite et des hydroxydes de fer, formés essentiellement de goethite. La kaolinite est moins abondante que la gibbsite à la base, mais domine en proportion vers le sommet du profil.

Une certaine proportion (de l'ordre de 10 %) d'éléments amorphes alumino-siliceux (allophanes) existent dans l'horizon B et l'horizon A, associés étroitement à la matière organique. Par rapport aux sols rouges (voir ci-dessous), la cristallisation des minéraux secondaires semble donc un peu entravée par la richesse en matière organique et l'état d'humidité du sol, plus prolongé. L'aspect fréquemment "cendreuse" de l'horizon humifère lorsque celui-ci est sec, provient de la teneur relativement faible en éléments phylliteux cristallisés, de la présence presque exclusive de matière organique et de gibbsite, à l'état finement particulaire.

### 5.2.3 - LES PLANÈZES BASALTIQUES DE L'ANKARATRA ET DE LA MONTAGNE D'AMBRE

#### ◆ Situation et environnement

Ce type de milieu occupe de vastes superficies : 150.000 ha pour l'Ankaratra, 200.000 ha pour la Montagne d'Ambre (photo 47). Les tranches d'altitude et les latitudes sont différentes pour les deux massifs :

- *Ankaratra* : 1450-1800 mètres d'altitude, 19° de latitude. Température moyenne annuelle = 16°, pluviométrie moyenne annuelle = 1300 à 1500 mm,

- *Montagne d'Ambre* : 0-1000 mètres d'altitude, 12°5 de latitude. Température moyenne annuelle = 22°, pluviométrie moyenne annuelle = 1300 à 2200 mm et 6 mois "secs" à l'Ouest, 3000 mm et 0 mois sec à l'Est.

C'est le domaine des *sols ferrallitiques rouges ou brun-rouges* sur "vieux basaltes mio-plio-pleistocènes". Ces anciennes planèzes forment actuellement de vastes plateaux et lanières (inversion de relief) périphériques et radiaux, peu accidentés, à pentes moyennes à faibles. Les basaltes anciens sont profondément altérés et sont très rarement observables en affleurements sains.

Dans l'Ankaratra (à part la forêt relique de Manjakatempo) et une grande partie de la Montagne d'Ambre, la végétation des planèzes dégradées est, à perte de vue, une savane herbeuse steppique, à *Ctenium*, *Trachypogon*, *Heteropogon*, *Hyparrhenia*, *Aristida*. De rares boqueteaux d'Eucalyptus et des fourrés à mimosa (*Acacia decurrens*) et *Helichrysum* sont disséminés.

La Montagne d'Ambre possède de grands lambeaux forestiers (réserve naturelle) à *Gluta tourtour*, *Diospyros* (ébène), *Canarium*, *Terminalia* (Mantaly), *Dalbergia* (palissandre), *Ficus*, *Ocotea*, *Dracoena*. On y trouve une grande quantité de lianes et d'épiphytes (surtout

*Asplenium nidus*).

Ces sols, rouge à brun-rouge, sont assez peu cultivés. Ce sont surtout les flancs pentus des entailles des planèzes qui sont mis en valeur : les sols de ces versants (de couleur plus brune) y sont tronqués, parfois jusqu'à la zone d'altération et sont donc rajeunis ; c'est pourquoi ils sont vraisemblablement plus riches que les sols rouges des plateaux.

La couleur de ces sols rouges sur basaltes est généralement plus sombre et plus vive que celle des sols développés sur socle cristallin (dans les rose) ; c'est un critère de reconnaissance aisé entre socle et basalte, lorsque les roches saines ne sont pas visibles.

#### ◆ Les sols

• *L'horizon humifère*, brun-rougeâtre foncé est assez bien développé ; d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, il comporte un enracinement graminéen assez dense. Le taux de matière organique est assez élevé (3 à 6 %) malgré la teinte vive du sol ; le rapport C/N est de 11 à 13. La texture est lourde, argileuse (50 à 60 % d'argile, 30 % de limon, 10 à 20 % de sable). La structure est polyédrique fine.

Le pH est acide, compris entre 4,8 et 5,1. La capacité d'échange est comprise entre 10 et 20 mé%, plus élevée qu'en dessous du fait de la richesse en matière organique. Le taux de saturation est cependant inférieur à 5 %. La teneur en phosphore total est relativement élevée (1000-1200 ppm), mais la teneur en phosphore assimilable (Olsen) est très faible (10 à 12 ppm).

• *Les horizons B*, de couleur rouge foncé, homogènes, peuvent faire 1,5 à 3 mètres d'épaisseur. Ils montrent parfois un horizon intermédiaire avec l'horizon humifère, brun rouge, de 30 à 50 cm d'épaisseur. Les horizons B sont toujours bien structurés, avec une structure polyédrique moyenne anguleuse ; leur consistance est friable et leur perméabilité d'ensemble est très bonne. La teneur en matière organique est encore assez élevée jusqu'à 50 cm de profondeur (2 à 4 %) ; elle est inférieure à 1 % en dessous de 1 mètre. La texture est très argileuse (50 à 70 % d'argile, 15 à 20 % de limon, 7 à 15 % de sable). Le pH est assez acide, compris entre 5 et 5,4. La capacité d'échange est comprise entre 2 et 10 mé % ; elle diminue avec la profondeur en même temps que le taux de matière organique. Le pourcentage de saturation du complexe absorbant est toujours très faible (1 à 2 %). La teneur en phosphore total est de 1000 à 1500 ppm, contre 10 à 100 ppm de phosphore assimilable (Olsen).

Parfois une "stone line" de basalte pourri et de résidus d'altération gibbsitiques, sépare l'horizon B rouge de l'horizon d'altération sous-jacent en place. Contrairement aux sols sur socle cette "stone-line" est souvent difficile à voir en raison de l'absence de filons de quartz.

• *La zone d'altération* montre généralement des teintes bigarrées, dans les mauve, rouge, violacé, grisâtre, brunâtre. Des noyaux farineux grisâtres représentent des restes de roche en place ; on y reconnaît encore la structure de certains minéraux, en particulier les minéraux sombres, ferro-magnésiens.

• *La roche saine* n'apparaît qu'à grande profondeur (10 à 30 mètres). Il s'agit généralement de basalte noir massif ou bulleux.

Les sols des planèzes, surtout sur la façade Est de l'Ankaratra, montrent localement une induration ferrugino-bauxitique de 50 à 100 cm d'épaisseur observable sur les ruptures de pente.

Dans l'horizon B rouge, le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est compris entre 1,5 et 1,8. La fraction argile comprend essentiellement une grosse quantité de gibbsite (40 à 50 %) et de la kaolinite (20 à 25%). Le taux de kaolinite augmente en profondeur où elle domine alors sur la gibbsite, dont la teneur augmente au contraire du bas vers le haut du profil. La présence abondante de cet élément dans les sols est caractéristique des vieux sols ferrallitiques très lixiviés en silice (et en bases). La richesse en gibbsite d'un sol traduit généralement le déficit en silice et un excès en alumine, donc l'intensité des évacuations par les eaux de drainage de produits de dégradation et de dissolution de la métahalloysite puis de la kaolinite elle-même.

Le fer est individualisé sous forme de goethite à la base du profil, et plutôt sous forme d'hématite dans la partie supérieure.

L'horizon B montre une absence totale de minéraux résiduels non ou peu altérés.

Ces caractères physiques, chimiques et minéralogiques nous conduisent à classer ces sols rouges profonds parmi les *sols ferrallitiques fortement désaturés "typiques" gibbsitiques*.

### 5.3 - LE VOLCANISME DU QUATERNAIRE MOYEN

Il s'agit du volcanisme dont l'âge est inférieur à 400.000 ans (pléistocène récent) et que l'on trouve, du Nord au Sud de l'île dans les régions suivantes :

- partie sommitale de la Montagne d'Ambre,
- Ouest de Nosy Be,
- planèzes du Sud du Tsaratanana,
- Vakinankaratra - région d'Antsirabe.

Composées de coulées, de cônes stromboliens, de "maars" et de volcanisme "hyaloclastique" (phréato-magmatique), ces formes sont encore bien conservées et parfaitement reconnaissables.

Nous ne détaillerons pas le volcanisme du Nord de Madagascar (voir à ce sujet, Rossi, 1980). Signalons simplement qu'il est complexe au niveau des formes et des âges. Nous englobons dans le quaternaire moyen dominant (à altération déjà ferrallitique), des sorties multiples de volcanisme du quaternaire récent (surtout des édifices stromboliens à formes très fraîches) sans altération ferrallitique.

De même nous nous bornerons à signaler les planèzes (à édifices stromboliens) du Sud du Tsaratanana : ce sont d'une part, au Nord de l'Ankaizina les plateaux d'Antsahabe (basaltes), de Bemanevika (basaltes), de Maroangoaka (basaltes) et d'Ambondrona (rhyolites), d'autre part au Sud de l'Ankaibe, le plateau d'Ankasimbelo (basaltes). Tous ces plateaux diversement perchés (les plus élevés étant les plateaux d'Ambondrona à 1800-2400 mètres et de Maroangoaka à 1800 mètres) portent des sols ferrallitiques brun-jaunes, brun-rouges ou rouges, fortement gibbsitiques, dont certains, comme sur le Bemanevika (1300-

1800 mètres d'altitude) sont localement cuirassés par une cuirasse ferrugino-bauxitique.

Nous insisterons ici davantage sur le volcanisme du Vakinankaratra.

#### ◆ Situation et géomorphologie

Les sols "chocolat" occupent la plus grande partie du Vakinankaratra c'est à dire la région comprise entre Antsirabe, Bétafo, Tritriva et Vinaninkarena, où est localisé le volcanisme quaternaire du Sud du massif de l'Ankaratra. L'ensemble de ce volcanisme représente une superficie de 18.000 hectares dont l'altitude est comprise entre 1500 et 1850 mètres ; les zones les plus élevées étant situées dans la partie Nord. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1400 à 1500 mm. La température moyenne annuelle varie en fonction de l'altitude, entre 17°C et 15,5°C. Ces sols affectent les basanites (roches basiques) de la phase volcanique datée d'environ 100.000 ans. On y trouve une vingtaine de cônes de scories ayant émis de grandes coulées scoriacées saupoudrées souvent de projections cendro-scoriacées. La roche mère est donc toujours basique poreuse et perméable.

Ce volcanisme prend les formes de cônes centraux encore assez bien conservés, de coulées et de nappes de projections couverts de sols rouge sombre. Une partie (au Sud de Belazao surtout) est composée de volcanisme "classique" en milieu aérien ; une autre partie, plus originale (jamais signalée jusqu'à présent dans cette région), s'est passée en milieu lacustre ou phréatique. De telles conditions de mise en place des projections ont donné des matériaux "volcano-lacustro-phréatiques" (à petites scories et sables cinéritiques durcis finement lités) appelés "hyaloclastites" et ont construit de petites calderas, larges par rapport à leur faible hauteur, à anneaux circulaires surbaissés. Cette morphologie est particulièrement visible dans la région de Talata. Les alluvions lacustres argileuses et les hyaloclastites y sont imbriquées. Les cônes de projections les plus élevés (Ivohitra, Amboniloha, Ambohitsokina), affranchis du milieu sub-lacustre, présentent des formes "normales", à cratères sommitaux plus ou moins égueulés. Ce volcanisme assez récent a émis quelques grandes coulées qui ont été canalisées par des vallées préexistantes ; les plus spectaculaires sont celles de Fiadanana (au Nord de Betafo) et de Fananana-Vinaninkareny.

Le modelé n'est relativement accidenté (mais toujours régulier et peu entaillé) que sur les édifices de scories donc sur des superficies limitées et bien circonscrites. La plus grande partie présente une topographie d'ondulations à pentes faibles (inférieures à 10 %) sans formes d'érosions importantes.

#### ◆ Les sols

Ces sols "chocolat" se différencient des sols rouges sur basaltes anciens par leur teinte un peu plus sombre (brun-rougeâtre) due à un taux élevé de matière organique, leur structure mieux développée, leur profondeur moindre. Enfin ils sont toujours intensément cultivés.

• *L'horizon humifère* est généralement bien développé (20 à 30 cm), de couleur brun-rougeâtre foncé ("chocolat"). Il est riche en nombreuses racines fines (toujours cultivé). La structure de cet horizon est toujours faiblement développée. A l'état sec la consistance est cendreuse et friable. La texture est argilo-limoneuse à limono-argileuse. Le taux de matière organique est élevé (10 à 18 %). Le rapport C/N est de l'ordre de 15-16. Le pH est compris entre 5 et 5,5. La capacité d'échange élevée (comprise entre 20 et 30 mé %), est due à la richesse en matière organique (elle diminue rapidement en dessous de l'horizon humifère). Le taux de saturation est bas, de l'ordre de 5 à 7 %.

• *L'horizon intermédiaire*, de 20 à 40 cm d'épaisseur, est encore riche en matière organique (5 à 10 %) ; il est de couleur brun-rougeâtre ("chocolat"). La structure est peu développée (polyédrique moyenne émoussée). La consistance est friable. La texture est argileuse (50 à 60 % d'argile). Le pH est compris entre 5 et 6. La capacité d'échange est comprise entre 3 et 7 mé %. Le taux de saturation est bas (5 à 10 %).

• *L'horizon B* est peu épais (50 à 100 cm) ; il est de couleur plus vive (rouge sombre) que les horizons supérieurs et très homogène jusqu'à la roche mère. Il possède une structure polyédrique anguleuse moyenne bien développée, avec une sous-structure polyédrique fine. La consistance est friable. La texture est argileuse. La teneur en matière organique est inférieure à 2 %. Le pH est compris entre 5 et 6. La capacité d'échange est inférieure à 3 mé %. La saturation du complexe absorbant est inférieure à 8 %.

• *L'horizon d'altération* est toujours très peu épais (10 à 30 cm). On passe rapidement de l'horizon B à la roche basaltique scoriacée non altérée. Cette zone d'altération est composée d'un mélange de blocs scoriacés noirâtres et de terre rouge identique à celle de l'horizon B.

• *La roche mère* est la plupart du temps, soit la coulée basaltique scoriacée, soit des projections de scories, soit des cinérites hyaloclastiques.

Du point de vue minéralogique, ces sols ont été bien étudiés par Zebrowski (1975) dont les conclusions sont les suivantes : dans l'horizon B, le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , particulièrement faible, est compris entre 0,1 et 0,3. Les analyses montrent qu'il n'existe pas de produits amorphes dans le profil, ni siliceux ni alumineux et ferrugineux. Parmi les produits cristallisés on trouve toujours une quantité très importante de gibbsite à tous les niveaux du profil. Le fer est à l'état d'hématite en quantité importante qui donne sa coloration rouge au sol. Il n'y a pratiquement pas de goéthite contrairement aux "sols de montagne" (sols bruns ferrallitiques humifères et andosols) pour lesquels l'absence de dessiccation (saison sèche peu accentuée) explique cet état hydraté du fer. Les sols "chocolat" à plus faible altitude, sont soumis à une saison sèche bien marquée. En plus de l'hématite s'observent des traces de magnétite.

Une caractéristique originale de ce type de sol est la quasi absence de minéraux phylliteux ; on ne trouve que des traces de métahalloysite. Cette absence d'argile phylliteuse de néoformation s'explique par une forte lixiviation de la silice, particulièrement intense dans les sols formés sur roches volcaniques très filtrantes comme les coulées scoriacées, les projections de scories ou de cendres. Cette silice serait évacuée dès les premiers stades de l'altération avant que les alternances d'humectation et de dessiccation puissent engendrer la néoformation de minéraux phylliteux secondaires.

Ces sols sont constitués essentiellement de gibbsite et d'hématite, à l'état finement particulaire (on n'observe pas de concrétions gibbsitiques). On a affaire, à une véritable "bauxite terreuse". L'absence d'argiles phylliteuses explique sans doute le manque de structuration des horizons humifères. Ceux-ci, du fait de l'absence de complexe argilo-humique stable, prennent fréquemment un aspect cendreau. En fait, il ne s'agit généralement pas de cendres (bien que localement on puisse avoir des "rajeunissements" par recouvrement de cendres très récentes du volcanisme holocène) mais d'un mélange de particules très fines de gibbsite et de matière organique.

L'horizon humifère de ces "sols chocolat" ressemble donc beaucoup à celui des sols andiques (richesse en matière organique, friabilité, aspect cendreau, absence de structure).

Il se forme un complexe gibbsite-matière organique stable qui favorise le maintien et l'accumulation progressive de cette matière organique.

Pour cette raison, nous proposons de nommer ces sols : "*sols ferrallitiques fortement désaturés humifères andiques*" sur roche volcanique très filtrante : Zebrowski (1975) propose le terme de "*ferrallitique allitique*" pour insister sur l'absence d'argile phylliteuse et la dominance de "*gibbsite terreuse*".

#### 5.4 - LE VOLCANISME DU QUATERNAIRE RECENT (HOLOCENE)

On en trouve quelques édifices à Nosy Be et dans la Montagne d'Ambre. Mais c'est surtout l'Itasy et le Vakinankaratra (Bétafo et Tritriva) qui sont significatifs des points de vue intérêt agronomique et superficie. Leurs sols sont certainement les meilleurs de Madagascar. Nous ne parlerons donc ici que de ces régions.

##### ♦ Situation générale et géomorphologie

Ces sols, les plus fertiles de Madagascar, se rencontrent sur les projections volcaniques (cendres et scories) très récentes, sans doute moins de 10.000 ans (holocène), essentiellement basiques. Ce volcanisme occupe 3 régions principales :

- *le Vakinankaratra occidental* (régions de Bétafo et de Tritriva) qui représente environ 5800 hectares. Il s'agit d'émissions basiques ("*basanites*") comprenant des cônes de scories (une dizaine), des coulées rugueuses et chaotiques (sans sols) dont la plus étendue est celle qui a rempli la vallée de l'Iandratsay, et enfin des projections cendro-scoriacées qui ont saupoudré les alentours des cratères.

Il y a trois nappes principales de projections, situées autour de 3 ensembles de cônes : les projections de Bétafo (environ 1400 hectares), les projections de Ialalo (550 hectares) entre Bétafo et Tritriva, et les projections de Tritriva (1200 hectares).

L'altitude de ces régions est comprise entre 1400 (Bétafo) et 1750 mètres (Tritriva). Elles sont toujours intensément cultivées.

- *La région de l'Itasy* qui occupe une superficie de l'ordre de 30.000 hectares. Cette région est parsemée de très nombreux cônes de projections basiques (environ 150) et de quelques gros dômes extrusifs trachytiques (photo 46). Aux pieds de ces édifices s'étendent des coulées basaltiques rugueuses et sans sols et des nappes de saupoudrages cendro-scoriacées basiques (basanites). Il n'y a pratiquement pas de projections acides trachytiques. Les zones cultivables occupent la partie orientale du volcanisme de l'Itasy suivant une bande N-S de moins de 5 km de long, passant par Analavory, Ampefy, et Soavinandriana. Leur altitude est comprise entre 1150 mètres au Nord et 1450 mètres au Sud. C'est une région qui est "chaude", surtout la région d'Analavory. La température moyenne annuelle à Soavinandriana est de 17°8.

- *Les projections trachytiques de l'Ambohimadinika* : situées 20 à 25 km au Nord d'Antsirabe, ces cendres et ponces acides holocènes, identifiées par Zebrowski et Mottet (1974) occupent environ 8500 hectares. Elles saupoudrent les formations volcaniques antérieures disséquées. Le recouvrement est variable (50 cm à 3 mètres) suivant les endroits, et, semble t'il, suivant l'éloignement du massif récent de l'Ambohimadinika qui serait à

l'origine des projections.

Ces projections occupent une zone d'altitude comprise entre 1800 et 2200 mètres. Le modelé est généralement accidenté car les projections recouvrent un relief de volcanisme ancien déjà très disséqué. Les sols andiques qui s'y sont développés sont toujours très cultivés.

#### ◆ Les sols

##### *- Les andosols peu différenciés sur projections basiques*

Les sols jeunes développés sur cendres et scories mélangées ou alternées, sont de couleur sombre dans leur partie supérieure : noirs et tachants à l'état humide, gris et cendreaux à l'état sec. Cet horizon humifère a une épaisseur de 20 à 60 cm. Cette épaisseur dépend de la position topographique : faible dans les parties hautes, importante dans les bas de pentes ; il présente une texture limoneuse ; des petits graviers de scories sont encore présents ; le taux de matière organique est élevé (10 à 15 %) ; celle-ci présente un rapport C/N de 14 à 16. La structure polyédrique émoussée est fragile ; la consistance est très friable et la porosité élevée ; la densité apparente est de l'ordre de 0,9.

En-dessous de l'horizon organique qui en fait forme le sol andique proprement dit, on passe assez rapidement au matériau volcanique peu altéré formé de scories plus ou moins fines et litées ; on trouve d'abord une zone de transition (horizon B) de 20 à 40 cm d'épaisseur de couleur brune à brun-jaune, de texture limono-sableuse (sables très fins), et de consistance très friable. Puis on passe, vers 1 mètre de profondeur, aux scories altérées de couleur jaunâtre (enduits humo-ferrugineux) d'aspect sablo-gravillonnaire, avant d'arriver aux scories litées non altérées, de couleur plutôt noirâtre souvent assez compactes et peu pénétrables aux racines.

Ces sols présentent une capacité d'échange élevée, de l'ordre de 30 mé % dans l'horizon humifère (complexe saturé à 20 % en moyenne) et de 15 à 20 mé % dans l'horizon jaune sous-jacent. Le pH est de 5,5 à 6 dans l'horizon humifère et de 6 à 6,5 en dessous. Ces sols ont de bonnes réserves minérales, sauf en phosphore (forte carence).

##### *- Les andosols peu différenciés sur projections acides*

Les projections très récentes des alentours du volcan Ambohimadinika, contrairement à celles du Vakinankaratra et de l'Itasy, sont trachytiques acides.

Les sols qui s'y sont développés sont en fait assez semblables aux sols décrits précédemment : présence en surface d'un horizon sombre (gris-noirâtre) d'aspect cendreaux, de 20 à 50 cm d'épaisseur, de texture limoneuse à limono-sableuse et très friable ; la teneur en matière organique est élevée (de l'ordre de 10 %) ; le pH est de 5,5 ; la capacité d'échange est élevée (20 à 30 mé %) et la saturation est de 15 à 20 %. Ces sols possèdent donc une bonne fertilité, malgré la carence habituelle (comme pour les autres sols) en phosphore.

Sous l'horizon humifère, sur 20 à 50 cm d'épaisseur, on trouve les lits de ponces trachytiques plus ou moins grossières (sables, graviers) peu soudées, de couleur jaunâtre (enduits humo-ferrugineux). En dessous, les projections trachytiques plus grossières, blanchâtres, ne sont pas altérées. Très souvent les projections récentes reposent directement sur un paléosol rouge ferrallitique développé sur basalte plus ancien.

L'aspect minéralogique de tous ces sols andiques a été étudié par Zebrowski (1971).

- *Les sols sur projections basiques* ont des teneurs importantes en produits amorphes: la silice amorphe représente 20 à 30 % de la silice totale dans l'horizon C ; elle diminue vers le haut du profil où elle n'est plus que de 8 % au sommet de l'horizon B et inexistante dans l'horizon A. Le fer amorphe représente 40 à 55 % du fer total ; cette valeur est stable dans tout le profil.

Enfin la teneur en aluminium amorphe est de 40 à 55 % de l'alumine totale et est relativement constante dans le profil.

La silice amorphe (comme les autres éléments amorphes) est un héritage des scories. En effet, dans les scories inaltérées elle représente 33 % de la silice totale. Il s'agit donc de "silice amorphe primaire". La diminution de celle-ci dans le haut du profil peut s'expliquer en partie par un lessivage (intense dans ces sols très filtrants) et en partie par son intégration dans des complexes silico-organiques ou allophano-organiques, et ainsi difficilement dosable.

Les minéraux cristallisés sont en faible quantité. On observe des traces de gibbsite et de kaolinite (ou métahalloysite), qui sont d'autant plus nettes que le sol est plus "évolué", c'est à dire que son horizon B jaunâtre est plus épais.

- *Les sols sur projections acides* sont encore plus riches en silice mais par contre un peu moins riches en fer que les sols sur scories basaltiques. Cela reflète les différences de composition chimique des 2 types de projections.

La richesse de tous ces sols en produits amorphes, en grande partie des "amorphes primaires" issus directement des scories, la richesse en matière organique, la faible densité apparente, ainsi que leur faible épaisseur, nous conduisent à classer ceux-ci parmi *les andosols peu différenciés désaturés mélaniques*. Il s'agit de sols jeunes, qui, contrairement aux andosols perhydratés d'altitude sur roches volcaniques anciennes (voir précédemment), subissent naturellement une dessiccation annuelle en saison sèche. Ces sols évolueront vraisemblablement peu à peu vers des "sols chocolat" (voir précédemment), à très fort lessivage en silice, empêchant la néoformation de minéraux phylliteux, et où seul resteront en place la gibbsite et le fer.

## 6 - MORPHOPEDOLOGIE DU DOMAINE ALLUVIAL

Le domaine alluvial comprend le lacustre, le fluvio-lacustre, le fluvial et le fluvio-marin.

Pour ce qui est ancien, nous ne mentionnerons que les ensembles d'une certaine ampleur, à savoir les alluvions lacustres et fluvio-lacustres pliocènes.

### 6.1 - LES ALLUVIONS LACUSTRES ET FLUVIO-LACUSTRES PLIOCENES

Ce sont les sédiments qui se sont déposés aux fonds de lacs ayant une origine tectonique ou volcano-tectonique fini-tertiaire. Cette époque a été, on le sait, une période particulièrement active du point de vue de la fracturation du socle cristallin, en liaison avec son soulèvement isostatique.

Le remplissage pliocène concerne 3 grands ensembles qui sont, du Nord au Sud :

- le bassin Alaotra-Mangoro,
- les bassins Onive-Antanetibe-Antsirabe (Est Ankaratra),
- le bassin de la Ranotsara,

Mais les alluvions lacustres sont visibles ailleurs, de façon moins étendue, entre autres :

- à Ivato (plaine de Tananarive),
- en bordure de certaines plaines du Haut-Bassin de la Mananara (Mangamila, Betsimizara).

#### ♦ Géologie - Géomorphologie

##### - *Le bassin lacustre Alaotra-Mangoro*

Ce bassin, allongé Nord-Sud, est subdivisé en deux ensembles :

- la partie Sud du Lac Alaotra (appartenant au Bassin du Maningory),
- l'Ankay-Mangoro (appartenant au Bassin du Mangoro).

Le Bassin du Mangoro est bordé à l'Est par une faille de jeu récent, la faille Andaingo-Moramanga.

À l'Ouest, au pied de l'escarpement de l'Angavo, il comprend plusieurs sillons (Marevitsika, Beparasy), eux mêmes sans doute des sous-bassins d'effondrement allongés, séparés par des dômes du socle cristallin.

Le bassin du Mangoro-Ankay correspond donc à un effondrement de type "rift", régulier à l'Est, irrégulier à l'Ouest. Il s'est rempli de sédiments sur une cinquantaine de mètres, montrant une alternance d'argiles kaoliniques blanchâtres ou marmorisées et de sables quartzueux parfois à stratifications entrecroisées. On trouve aussi localement des marnes

verdâtres et des grès phosphatés.

Les alluvions lacustres forment une topographie de plateaux sub-horizontaux défoncés par un réseau de vallées et bas-fonds à fonds plats marécageux. Ces plateaux sont souvent en continuité topographique avec la surface d'aplanissement fini-tertiaire qui arase les altérites du socle cristallophyllien de sorte qu'en l'absence de coupe naturelle on ne distingue pas toujours aisément les deux matériaux.

**- Les bassins Onive-Antanetibe-Antsirabe (Est Ankaratra)**

On peut y différencier trois sous-ensembles :

- la plaine du Haut-Bassin de l'Onive (Ambatolampy-A<sup>HI</sup>Mandroso-Antsampandrano-Antanifotsy),
- la plaine d'Antanetibe (faille du Betampona),
- le bassin d'Antsirabe (faille du Mandray).

- *Le Haut-Bassin de l'Onive* (environ 20.000 hectares à 1600 mètres d'altitudes) est rempli de sédiments stratifiés fluviolacustres d'où émergent des collines surbaissées de socle granito-gneissique. Les alluvions anciennes sont "perchées" au dessus du réseau de vallées "fonctionnelles". Deux niveaux peuvent être distingués : un niveau supérieur (10 à 12 mètres au dessus du niveau actuel) à sols ocre-rouge et un niveau inférieur (2 à 3 mètres au dessus des vallées fonctionnelles) un peu plus hydromorphe, à sols beige-jaunâtres. Certaines zones sont déprimées par "suffosion" et possèdent des *sables blancs*. L'épaisseur de ces alluvions est de 10 à 60 mètres, elles sont constituées d'une alternance de niveaux argileux bariolés et de niveaux plus grossiers. Dans la région d'Antanifotsy se trouve des couches de lignite.

Ce système lacustre s'est formé à l'arrière de la construction de l'Ankaratra, qui a bloqué le drainage préexistant vers l'Ouest. Le système hydrographique, a alors formé une immense étendue endoréique où se sont accumulés les sédiments volcano-lacustre et fluviatiles, produits d'érosion des bassins périphériques. Puis au quaternaire l'Onive s'est frayé un passage vers l'Est (seuil et chutes de Tsinjoarivo), drainant et exondant la cuvette puis incisant les alluvions, qui se sont ferrallitisées.

- *Le Bassin d'Antanetibe-Betampona*, d'environ 18.000 hectares, d'une altitude moyenne de 1550 mètres, est situé au Sud de la cuvette d'Ambohibary-Sambaina, sur une cinquantaine de kilomètres de long et 6 à 12 kilomètres de large. Il s'agit d'un bassin d'effondrement volcano-tectonique limité à l'Est par la grande et longue faille du Betampona. A l'Ouest, il est fermé par les planèzes tertiaires de l'Ankaratra.

Les alluvions sont très épaisses, très argileuses (davantage que les alluvions du Haut-Bassin de l'Onive) ; elles contiennent des matériaux d'origine volcanique (argiles kaoliniques d'altération basaltique, cendres, cinérites, diatomites) et parfois des niveaux à lignite.

Le modelé est sub-horizontale, avec des vallées (réseau de la Manandona) très encaissées et à méandres. Il y a eu enfoncement du réseau par déblocage brutal du niveau de base de la Manandona.

La végétation naturelle est une savane à *Aristida*, *Loudetia* et *Helychrisum*, riche en taillis d'*Acacia decurrens*.

- *Le bassin d'Antsirabe-Mandray*, à 1500 mètres d'altitude, sur 12.000 hectares, est séparé du précédent par la coulée de Manatrika issue de l'Ankaratra. Le bassin est d'origine volcano-tectonique : faille du Mandray à l'Est, piémonts de l'Ankaratra au Nord, volcanisme phréato-magmatique à l'Ouest où les alluvions lacustres se mélangent avec des hyaloclastites. Ce bassin est donc celui où les alluvions ont été les plus alimentées par des cendres volcaniques. Comme le bassin d'Antanetibe il possède quelques rivières à méandres profondément encaissées (20 à 40 mètres).

#### **- Le bassin de la Ranotsara**

Il correspond à un effondrement tectonique ("mini-rift") sans épanchement volcanique selon des fractures orientées NW-SE (et non plus sub-méridiennes). La faille la plus nette est la faille méridionale. L'altitude est comprise entre 600 mètres (SE) et 700 mètres (NW).

La "plaine" de Ranotsara est constituée de plateaux découpés par le réseau hydrographique actuel drainé vers l'Est par la rivière Menarahaka (suite probablement à une capture du réseau qui coulait autrefois vers l'Ouest).

Les sédiments alluviaux pliocènes, d'où émergent des inselbergs granitiques ennoyés, sont relativement sableux (50 à 70 % de sable) avec des strates blanchâtres ou jaunâtres où s'intercalent des graviers quartzeux.

La végétation est une savane à *Heteropogon* piquetée de *Poupartia caffra* ("sakoa"). Le climat est ici de type sub-aride (800 à 1000 mm annuels, 6 mois secs).

#### **◆ Les sols**

Les bassins du Mangoro et de l'Est de l'Ankaratra présentent des sols ferrallitiques argileux assez comparables.

La plaine de Ranotsara, par contre, diffère des régions précédentes plus humides. Les sols y sont plus sableux et moins nettement ferrallitiques.

#### **- Les alluvions volcano-lacustres pliocènes des zones humides**

Ce sont des *sols ferrallitiques* jaune/rouge à jaune (Mangoro), ou ocre à ocre-jaune (Est-Ankaratra), selon la qualité de leur drainage et l'état d'hydratation des oxydes de fer.

Dans les larges dépressions, probablement dues à des actions de suffosion et de soutirage profond dans la zone d'altération, on passe à des sols carrément hydromorphes, tachetés ou gleyifiés, ou même à tendance "podzolique" ("lavage" des argiles et du fer, décoloration dans le haut du profil) avec un horizon supérieur très organique (hydromor, tourbe).

Les sols ferrallitiques non hydromorphes, colorés, toujours très épais, montrent un horizon humifère net de 20 à 30 cm d'épaisseur avec 3 à 6 % de matière organique dans les sols rouges, et 5 à 8 % dans les sols ocres et jaunes. En dessous, l'horizon intermédiaire, brun-rouge à brun-jaune, de 20 à 40 cm d'épaisseur, contient encore 2 à 4 % de matière organique ; puis on passe à l'horizon B, coloré, homogène, avec une structure polyédrique

fine à moyenne très développée. Vers 2 mètres de profondeur on commence à reconnaître la structure alluviale (litation), où s'observe une "argilification" différentielle des couches. Cette zone est souvent marmorisée.

Ces sols ont un pH acide (5,1 à 5,5) dans l'ensemble du profil. La capacité d'échange, relativement élevée dans l'horizon humifère (20 à 30 mé %), n'est que de 6 à 10 mé % dans l'horizon B. Le taux de saturation est toujours faible, inférieur à 10 %.

La fraction argile de ces sols possède un rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 0,6 à 0,8. Elle est riche en minéraux cristallisés de type kaolinite, gibbsite et sesquioxides de fer. Il n'y a pas de produits amorphes. Il s'agit donc d'une altération typiquement ferrallitique. Les caractères analytiques et morphologiques nous les font classer dans les *sols ferrallitiques fortement désaturés gibbsitiques humifères*.

Signalons que localement (Ambohimandroso) on observe une cuirasse ferrugineuse, due à l'induration de la plinthite, zone de fluctuation de la nappe phréatique, après rabattement de celle-ci près des axes de drainage.

#### **- Les alluvions des zones plus sèches (Ranotsara)**

*Les sols sont des ferrallitiques moyennement désaturés (mais à capacité d'échange très faible) appauvris en argile.* La texture est sablo-argileuse (sables grossiers abondants) sur 1 mètre, devenant un peu plus argileuse en profondeur. Ils sont de couleur rouge à orangée. Un niveau de concrétions ferrugineuses de 50 cm d'épaisseur se trouve entre 100 et 300 cm de profondeur, correspondant au niveau supérieur d'une ancienne nappe phréatique. Sous le niveau concrétionné, se trouve une zone tachetée (plinthite) correspondant à la fluctuation de cette ancienne nappe.

## **6.2 -LES SYSTEMES FLUVIO-LACUSTRES DES PLAINES DU NORD ET DES HAUTS-PLATEAUX**

Sont rangées dans cet ensemble, toutes les vastes plaines rizicoles encadrées dans le socle cristallin et l'Ankaratra à haute ou moyenne altitude (plus de 800 mètres) en zone humide ou sub-humide (plus de 1200 mm annuels).

Elles sont toutes intensément rizicultivées et contribuent fortement à la production rizicole du pays ("greniers à riz"). Du Nord au Sud on peut ainsi répertorier :

#### **- Les plaines périphériques du Massif du Tsaratanana :**

- **Plaines d'Andrafainkona :** bassin supérieur de la Fanambana (amont de Vohémar).
- **Plaines de l'Ankaizina :** Bealanana, Mangaindrano, Marotalana, Matsoandakana (bassins supérieurs de la Maevarano, de la Sofia et de l'Antainambalana).
- **Plaines de l'Ankaibe :** cuvette d'Andapa (bassin supérieur de la Lokoho).

- Plaine de Befandriana : 1200 m. d'altitude.
- Plaine de Mandritsara : 1000 m. d'altitude.
- Plaine de Marotandrano : 700 m. d'altitude.
- Plaine d'Andilamena : 900 m. d'altitude.
- Plaine du Lac Alaotra : 800 m. d'altitude.
- Plaine de Didy : 900m. d'altitude.
- Plaines de la Haute Mananara : Ambatomena, Ankazondady, Mangamila, Andranomadio, Betsimizara (Anjzorobe) : 1300 à 1400 m. d'altitude.
- Plaines d'Antanetibe - Ambatomanoïna - Andakana : 900 m. d'altitude (photo 49).
- Plaines de Tananarive : 1250 m. d'altitude.
- Plaine de Sambaina : 1450 m. d'altitude.
- Plaine du Lac Itasy : 1200 m. d'altitude.
- Plaines de l'Ankaratra (bassins tectoniques) :
  - Faratsiho : 1700 mètres
  - Vinaninony : 1870 mètres
  - Ambohibary - Sambaina : 1650 mètres
  - Manalalondo : 1700 mètres
  - Ambatofotsy : 1650 mètres
  - Avaratrakoholahy : 1600 mètres
- Plaines de la Haute-Iandratsay (entre Antsirabe et Betafo) : 1500 mètres d'altitude.

La plupart de ces plaines, ayant eu un drainage bloqué ou ralenti, sont d'origine tectonique, volcano-tectonique ou volcanique (barrage naturel).

- *Les plaines d'origine tectonique sur socle* sont en particulier celles de la périphérie du Tsaratanana (Andrafainkona, Ankaizina, Andapa), du Lac Alaotra, d'Andilamena, de Didy, d'Antanetibe-Ambatomanoïna, de Sambaina, de Tananarive (pour partie).

- *Les plaines d'origine volcano-tectonique* (photo 50) sont les plaines intra-Ankaratra (Faratsiho, Vinaninony, Ambohibary - Sambaina).

- *Les plaines de barrage volcanique* sont celles du Lac Itasy, de la haute Iandratsay.

Au delà de leur diversité (génèse, environnement climatique, altitude, matériaux de remplissage), toutes ces plaines ont comme caractères communs de posséder des sols fortement hydromorphes, argileux, riches en matière organique mal décomposée, souvent

tourbeux. D'autre part, le climat d'altitude ne permet qu'une culture de riz par an sur la même parcelle. Il s'agit d'anciens sols de marais plus ou moins bien drainés, naturellement ou artificiellement. La plupart du temps plusieurs types de milieu y coexistent en proportions variables :

- Des culs de sac, cuvettes et angles morts marécageux et tourbeux sur sédiments très argileux, non drainés ou non drainables.

- Des sédiments de décantation fine, plus ou moins bien drainés artificiellement, aménagés (irrigation-drainage), rizicultivés, inondables, à sols hydromorphes à gley plus ou moins riches en matière organique.

- Des alluvions fluviales, déposées en bourrelets de berge par les rivières traversant les plaines, à sols souvent "légers" (limons, sables micacés), hydromorphes minéraux, mieux drainés, souvent réservés à des cultures "sèches" ou du maraîchage de contre-saison (eau proche).

- Des glaci colluviaux de bordure de plaine, à sols argilo-sableux, hydromorphes (minéraux) ou non.

En bordure des plaines se trouvent la plupart du temps une ou plusieurs terrasses non inondables. Sur socle cristallin, il s'agit souvent d'une terrasse perchée de 2 à 4 mètres, correspondant à un ancien niveau de base de la cuvette avant déblocage naturel d'un seuil. Cette terrasse porte des sols plus ou moins hydromorphes à faible fertilité : sols "jaunes" argilo-sableux à fluctuation de nappe vers 1 à 2 mètres, "sables blancs" podzoliques acides lavés complètement par la nappe.

### **6.3 - LES SYSTEMES FLUVIALES DE LA COTE EST**

Les rivières qui drainent la région montagneuse orientale et le rebord des Hauts-Plateaux, ont une perte de charge importante en arrivant dans les zones côtières. En général, leurs embouchures ("vinany") sont barrées par des flèches et cordons littoraux flamand et actuels à "sables blancs" qui régularisent et "linéarisent" remarquablement la côte (direction NNE-SSW). Les courants marins et le vent oeuvrent ensemble pour construire les cordons. Les fleuves alimentent donc des lagunes d'eau saumâtre et marécages, allongés parallèlement et à l'arrière de ces cordons littoraux avant de pouvoir sortir en mer (photos 28, 30, 54).

En amont, se trouvent des plaines littorales qui peuvent s'étendre jusqu'à 15 kilomètres à l'intérieur des terres. Une trentaine de plaines littorales de 5000 à 50 000 hectares existent ainsi sur la Côte Est, entre Vohémar au Nord et Manambondra au Sud. Les plus importantes sont : Vohémar, Sambava, Antalaha, Maroantsetra, Fénéry, Tamatave, Brickville, Vatmandry, Mananjary, Manakara, Vohipeno, Farafangana, Vangaindrano.

La plupart de ces plaines sont intensément rizicultivées, souvent avec deux cultures annuelles sur les mêmes parcelles. Le climat et la disponibilité en eau s'y prêtent : plus de 2000 mm (jusqu'à 3000 mm), absence de saison sèche, températures moyennes élevées.

Les plaines alluviales orientales sont de type "deltas intérieurs", avec ruptures de pente et de charge brutales aux débouchés des reliefs montagneux ("falaises"). Ces deltas ne peuvent

“sortir” en mer du fait des cordons littoraux qui les verrouillent (Maroantsetra excepté). On a donc des systèmes complexes de rivières principales et de nombreux défluent avec des bourrelets de berges (peu élevés) sablo-limono-miacés, plaines inondables argileuses à anciens lits et méandres abandonnés toujours pleins d’eau, larges cuvettes de décantation marécageuses à digitations entre les collines ferrallitiques, lagunes et marais littoraux allongés derrière les cordons flandriens.

Compte tenu de la pluviométrie, de l’absence de saison sèche et de la difficulté d’évacuation des eaux, l’eau est quasi-permanente et partout. Les sols ne se ressuient pratiquement jamais, excepté sur les bourrelets de berge à cultures annuelles vivrières ou pérennes fruitières.

Les sols sont très argileux, *hydromorphes à gley* (inondés ou à nappe phréatique toujours près de la surface), souvent tourbeux, à pH très acides (4 à 4,5) ou semi-tourbeux (pH 4,5 à 5). Il s’agit souvent d’anciennes zones forestières à Raphias, Pandanus, Ravenales et Niaoulis. Les tourbes peuvent atteindre 3 - 4 mètres d’épaisseur. Seuls les bourrelets de berge à sols drainés, de couleur brune, bien structurés, ont une excellente fertilité.

#### 6.4 - LES SYSTEMES FLUVIATILES DE L’OUEST DU TYPE “BAIBOHO”

On appelle “Baiboho” à Madagascar, les vastes plaines d’alluvionnement récent et actuel des grands fleuves de l’Ouest et du Nord-Ouest situées au contact socle-sédimentaire, recouvertes assez régulièrement par les crues et soumises à une dynamique fluviale changeante (photos 51 et 52). Ces étendues peuvent se cultiver généralement sans irrigation, en saison sèche, après le retrait des eaux des crues; la nappe, par sa remontée capillaire, permet l’alimentation hydrique des plantes.

Les “baibohos” à Madagascar représentent 350 000 hectares.

##### ◆ Localisation

Du Nord au Sud, les plaines à baibohos les plus importantes sont les suivantes :

- Antsohihy : baibohos de la Loza,
- Port Bergé - Mampikony : baibohos de la Sofia, de la Bemarivo, de la Mampikony et de l’Amjombony,
- Tsaramandroso : baibohos de la Mahajamba et du Kamoro,
- Maevatanana et A<sup>2</sup>Boeny : baibohos de la Betsiboka, de l’Ikopa et de la Menavava.
- Kandrehô : baibohos de la Mahavavy
- Ankavandra : baibohos du Manambolo
- Miandrivazo : baibohos de la Manandaza, de la Sakena, de la Mahajilo (système de la Tsiribihina)
- Beroroha : baibohos du Mangoky

##### ◆ Modelé

Il s’agit d’un modelé alluvial fluviale complexe (photo 52). Les fleuves, à leur descente des Haut-Plateaux, ayant surcreusé le sédimentaire tendre (grès, schistes, argiles de la série du

Karoo), déchargent leurs sédiments sableux, micacés et limoneux. On a une imbrication de levées de berge, deltas de rupture de levées, plaines inondables, anciens lits, dépressions et cuvettes latérales à marécages etc...

#### ◆ Conditions climatiques

Les baibohos sont toujours situés à moins de 100 mètres d'altitude. Les cultures strictement de décrue se pratiquent entre mai et octobre; la décrue se fait à partir de fin avril, excepté dans des dépressions latérales ("matsabory") où l'eau stagne très longtemps. Pendant cette période, la température moyenne est comprise entre 22° et 28° (la zone la plus "fraîche" étant celle de Miandrivazo). La moyenne des maxima est toujours inférieure à 35°; l'amplitude journalière est élevée, de 13 à 18°. C'est dans la région de Miandrivazo que l'amplitude est la plus élevée (16 à 18°) pendant la période de mai-août.

Un autre critère climatique fort important en culture de contre-saison est l'évapotranspiration potentielle ; en effet l'alimentation hydrique correcte de la plante par remontée capillaire peut être sensiblement influencée par une forte ETP et ceci d'autant plus "dangereusement" que les sols présentent très souvent des discontinuités texturales brutales. L'ETP dans les baibohos, à cette époque de l'année, est toujours assez élevée du fait d'un ensoleillement important, de vents forts et desséchants dans certaines zones ("Varatraza" des baibohos de la Bemarivo et de la Mampikony).

L'alimentation hydrique sera bien assurée si, à aucun moment, il n'y a de rupture de capillarité. Le bon choix des terrains, de leurs caractéristiques granulométriques et leurs positions topographiques (suivi de la nappe), dera donc l'aspect fondamental à considérer pour une parfaite réussite des cultures en baiboho (coton, tabac, maïs,...).

#### ◆ Conditions hydro-pédologiques

La dynamique fluviale dans les zones de baibohos est caractérisée par un régime d'alluvionnement et un régime hydrique particuliers :

- Les matériaux, rajeunis tous les ans par des alluvions nouvelles, sont caractérisés par deux aspects principaux :

→ l'hétérogénéité, latérale et verticale, conséquence de la brutalité des apports par les crues et des changements fréquents de lits (balayage). Les lentilles sableuses sont fréquentes.

→ la richesse en limons et en micas, caractères qui dérivent directement de la nature cristalline des bassins versants et de l'érosion de leurs altérites.

- Les "sols" sont très peu évolués, c'est-à-dire qu'ils ne diffèrent pratiquement pas des alluvions; la différenciation essentielle qu'il convient de faire concerne leur profil "textural" : c'est-à-dire d'une part l'appréciation de la texture "moyenne" (sable, limon, argile...) sur une épaisseur de l'ordre de 2 mètres et d'autre part la présence éventuelle d'horizons sableux purs qui auront toujours un rôle néfaste sur la remontée capillaire. La nature du sable est également très importante à considérer; un sable excessivement quartzéux (sable granulaire inerte) est beaucoup plus défavorable du point de vue hydrique qu'un sable micacé (sable pailleté).

Les propriétés physiques des sols de baiboho sont généralement excellentes (à condition qu'ils ne soient pas trop sableux) : excellente porosité (densité apparente de 1 à 1,1), structure aérée, bonne perméabilité, bonne capacité de rétention en eau (de l'ordre de 30 % d'humidité équivalente en sol limoneux). En l'absence de lentilles sableuses, ces propriétés sont très favorables à une bonne ascension capillaire à partir de la nappe phréatique.

Du point de vue fertilité chimique, les sols de baiboho sont privilégiés par rapport aux autres sols de Madagascar. Le complexe absorbant est riche en calcium, magnésium et potassium. Il n'y a pas de forte carence en phosphore assimilable. Du fait du régime hydrique particulier de ces sols, le problème essentiel est l'alimentation azotée de la plante. L'engrais azoté doit être enfoui ni trop superficiellement car le sol s'y dessèche assez vite, ni trop profondément car alors la remontée capillaire ne peut pas l'amener au niveau de la masse racinaire.

- **Le régime hydrique** : pour un baiboho donné, il dépend du régime des crues, de la position topographique et de la texture du matériau. Les baibohos "hauts" ne sont pas inondables ; on peut y pratiquer des cultures pluviales ou des cultures de contre-saison en irrigation.

Les baibohos "moyens et bas" sont inondables par débordement des cours d'eau ; il s'agit en fait des véritables baibohos où peut se pratiquer l'agriculture de décrue, sans irrigation. L'arrivée des crues dépend des années et de la pluviométrie sur les bassins versants des Haut-Plateaux ; en général les crues commencent en décembre ; les inondations ont leurs maxima en février-mars. La décrue s'opère à partir d'avril-mai ; l'inondation reste évidemment plus longtemps dans les cuvettes de décantation qui sont parfois des lacs ou marécages permanents. La nappe descend ensuite régulièrement pendant la saison sèche ; les végétaux peuvent donc s'alimenter en eau, au début à partir des réserves laissées dans le sol au retrait de la nappe, puis, à partir de la frange capillaire émise à partir de cette nappe ; la disponibilité pour les plantes de cette eau de capillarité dépend donc de la profondeur de la nappe d'eau libre et des caractères texturaux du sol, en particulier de la présence ou non de lentilles sableuses.

## **6.5 - LES SYSTEMES FLUVIATILES TERMINAUX DE LA COTE OUEST**

Les grandes plaines de niveau de base de l'Ouest sont à dominante très argileuse. Avant la mer, se trouve une zone de mangrove mi-marine mi-fluviale (voir plus loin).

Du Nord au Sud, les plaines principales sont : Ambilobe, Ambanja, Antsohihy, Tsinjomitondraka (Mahajamba), Marovoay, Mitsinjo, Soalala, Besalampy, Berevo, Tambohorano, Maintirano, Antsalova, Bekopaka, Belo-sur-Tsiribihina, Morondava, Befasy, Tanandava.

Dans l'Ouest proprement dit (au Sud du Cap Saint André), les plaines littorales ont tendance à s'avancer en deltas. Au contraire, au Nord-Ouest (bassin de Majunga), les alluvions comblent les fonds d'estuaires. Les deltas convexes réapparaissent entre la presqu'île d'Ampasindava et la Montagne d'Ambre. Certains des fleuves, les plus grands, ont des hauts bassins sur les Hauts-Plateaux. Pour d'autres, plus réduits, les bassins ne concernent que le sédimentaire. Les crues de ces fleuves sont généralement rapides et brutales et d'autant moins amorties que le bassin est réduit et "compact". Les crues des grands fleuves (Betsiboka, Tsiribihina, Mangoky) sont plus étalées. Les fleuves dont les Hauts-Bassins sont sur les Hauts-Plateaux, ont subi, avant d'arriver en zone côtière, une importante perte de

charge dans la dépression périphérique de ces Hauts-Plateaux, avec dissipation d'énergie et dépôts des alluvions les moins fins (sables, limons, micas). Ce sont les zones de baibohos (voir ci-dessus). Les alluvions qu'ils transportent et qu'ils déposent ensuite sont donc plus argileuses. Les lits de ces fleuves sont généralement très larges à nombreux bancs de sables apparents en saison sèche où l'écoulement est réduit.

Les plaines alluviales de la Côte Ouest sont constituées, au delà des larges levées de berge (alternance de sables, limons et argiles), de deltas de rupture de levées, de plaines d'inondation argileuses rizicultivées, d'anciens lits, de larges cuvettes de débordement très argileuses et enfin de dépressions marginales marécageuses ou inondées en permanence, s'appuyant contre le sédimentaire ("Carapace sableuse" à "sables roux" le plus souvent).

Mis à part les marécages permanents, les sols alluviaux occidentaux se drainent et s'oxydent bien en saison sèche (contrairement aux alluvions de la Côte Est et des Hauts-Plateaux).

Ce sont des sols peu évolués d'apport de teinte brune, plus ou moins hydromorphes, jamais tourbeux. Une nappe phréatique fluctue sur 50 à 200 cm, et est plus ou moins profonde en saison sèche en fonction de la position topographique. Ces sols sont plutôt globalement "riches".

A l'approche de la mer et des mangroves, l'influence du sel se fait sentir, la nappe phréatique saumâtre alimente le sol en chlorure de sodium ou en gypse par remontée capillaire.

Des *vertisols* existent souvent dans ces plaines (surtout dans l'Ouest, en particulier au Mangoky), plutôt dans les larges dépressions. On les reconnaît à la plus large fissuration, leur couleur plus sombre (brun foncé à brun-grisâtre).

## 6.6 - LES SYSTEMES FLUVIO-MARINS DE LA COTE OUEST

Les milieux fluvio-marins à mangrove bordent, avec un beau développement, toute la Côte Ouest de Madagascar, d'Ambilobe à Tuléar. Ils forment les fronts deltaïques des embouchures des fleuves mais aussi les littoraux qui sont à l'écart des embouchures.

Les sédiments des fleuves qui se déversent en mer sont repris par les courants littoraux, houles et marées. Leurs sables sont concentrés en barres sous-marines parallèles au rivage, qui peu à peu émergent en rides puis flèches et cordons sableux littoraux qui se succèdent parallèlement les uns aux autres. C'est en effet à l'arrière et à l'abri de ces cordons (photo 53) que sédimentent les vases argileuses fluvio-marines à nombreux chenaux de marée, et qui sont fixées progressivement par des palétuviers, en fonction de l'évolution du gradient de salinité des sédiments, conditionnée par l'antagonisme "crues d'eau douce - marées salées". En deçà d'une certaine salinité (500µmhos) les palétuviers ne remplacent pas la végétation "normale". Mais à l'inverse si la concentration en sel est excessive (par capillarité non équilibrée par un lessivage suffisant) les palétuviers ne peuvent survivre ; c'est ce qui se passe sur les "tannes" (sols nus) sursalés qui sont des zones qui ne sont plus suffisamment lessivées, même par la marée.

On a le zonage théorique suivant, de la mer vers l'intérieur : mer --> cordon littoral --> vase molle nue ("basse slikke") --> mangrove à palétuviers à vase déjà consolidée ("haute slikke") --> tanne vif inondé (encore "haute slikke") --> tanne vif exondé ("schorre" à

efflorescences salines et "moquette" pulvérulente) --> tanne herbacé (encore "schorre").

La végétation des mangroves est composée de *Avicennia officinalis*, espèce la plus répandue et premier colonisateur des vases molles et des bords des chenaux de marée, puis de *Rhizophora mucronata* à racines "échasses". Cette plante se forme plutôt en arrière de *Avicennia* qu'il remplace progressivement au fur et à mesure que le front deltaïque avance. On trouve aussi *Brugiera gymnorrhiza* et *Ceriops boiviniana*, plus rarement *Sonneratia alba* et *Lumnitzera racemosa*.

A l'arrière des mangroves, dans les zones qui subissent une sursalure et un déficit de drainage, les palétuviers disparaissent (*Avicennia* résistant le plus longtemps) et la mangrove est remplacée par un "tanne" (ou "schorre") d'abord nu (trop salé) puis progressivement colonisé par des herbacées : *Salicornia perrieri* et *Arthrocnemum pachystachium* puis *Salsola littoralis* et *Cressa cretica* ("sirasira"), *Salvadora angustifolia*. Un arbuste est assez caractéristique : *Cryptostegia madagascariensis* ("lombiro").

Quand il y a moins de sel on voit apparaître un petit palmier *Hyphaene shatan* ("satrana"), ainsi que *Hibiscus tiliaceus*, *Heritiera littoralis*, *Mimosa asperata* ("roy"), avec des tapis de *Cynodon dactylon*, *Cyperus compactus*, *Scirpus maritimus*, *Sporobolus rhyromatosus*, *Echinochloa sp* ("Ahidrano").

#### **Les sols des milieux fluviaux marins :**

En zone relativement sèche (Ouest) ce sont des *sols salés* avec des pH de 8 à 9 et une conductivité (extrait 1/10 à 25°) de 250 à 5000  $\mu\text{mhos}$  ; en zone plus humide (Nord-Ouest) s'y mêlent des *sols sulfatés acides* dont les pH peuvent descendre à 3,0 en cas de drainage et de dessèchement oxydant les sulfures en sulfates.

Les sols sont toujours très argileux (montmorillonite, kaolinite, illite), gleyifiés ou tachetés en profondeur (nappe phréatique proche), de couleur brun-rougeâtre en surface, brun-jaunâtre en profondeur. Les sols sulfatés acides peuvent être plus sombres, noirâtres en profondeur (sulfures).

Les sols salés à alcalis sont les plus salés (tannes) et dont les pH sont les plus élevés (pH 8 à 9). La surface du sol, crevassée, présente des "prismes bombés" souvent recouverts d'une couche poudreuse limoneuse riche en cristaux de sel (moquette).

**Des zones spécialement riches en montmorillonite présentent des caractères vertiques.**

## 7 - BIBLIOGRAPHIE

BATTISTINI, R. - 1964

L'extrême Sud de Madagascar. Etude géomorphologique. Thèse d'Etat, Cujas, Paris, 630 pages.

BATTISTINI, R - 1978

Observations sur les cordons littoraux pleistocènes et holocènes de la Côte Est de Madagascar. Madagascar, Revue de Géographie, n° 33 - 1978 - pages 9-37.

BATTISTINI, R - 1984

Mise au point sur la terminologie du quaternaire malgache. Madag. Revue de Geogr., n° 45, Juillet-Décembre 1984, pp. 9-25.

BATTISTINI, R.; DOUMENGE, F. - 1966

La morphologie de l'escarpement de l'Isalo et de son revers dans la région de Ranohira (Sud-Ouest de Madagascar), Mad, Rev. Géogr., n° 8, Janv.-Juillet 1966, pp. 67-92.

BESAIRIE, H. - 1957

Considérations sur les gîtes de bauxite et les pénéplaines à Madagascar. Rapp. annuel. Serv. Géol. 1957, pages 83-87 - Tananarive

BESAIRIE, H - 1969

Description géologique du Massif ancien de Madagascar. Vol. III, La Région Centrale, Documentation du Bureau Géologique n° 177 c, Tananarive, 1969.

BESAIRIE, H. - 1966

Bauxite - in "Gites minéraux de Madagascar". Ann. Géol. Mad. Tananarive, 1966, pages 37-53 + 8 planches

BESAIRIE, H - 1972

Géologie de Madagascar. - I. Les terrains sédimentaires. Annales de géologie de Madagascar, fascicule XXXV. - 465 pages

BESAIRIE, H - 1973

Precis de géologie malgache. Annales de géologie de Madagascar. Fascicule XXXVI, 141 p.

BESAIRIE, H.; COLLIGNON, M. - 1971

Géologie de Madagascar. I - Les terrains sédimentaires. Annales Géologiques de Madagascar, fasc. XXXV Tananarive. 1971, 463 pages 89 Figures

BESAIRIE, H; ROBEQUAIN, H. - 1957

Carte géomorphologique de Madagascar. Service Géologique de Madagascar, Tananarive

BIROT, P. - 1963

Contribution à l'étude des "Plateaux" du Centre de Madagascar. Madagascar. Rev. de Géogr. n° 3, Juillet-Déc. 1963, pp. 1-39.

BOSSER, J. - 1969

Graminées des pâturages et des cultures à Madagascar. Paris. ORSTOM, mémoire ORSTOM n° 35, 440 p.

BOURGEAT, F. - 1972

Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire. Thèse d'Etat. Mém. ORSTOM, n° 57, 338 pages.

BOURGEAT, F. ; PETIT, M. - 1966

Les "stones lines" et les terrasses alluviales des Hautes Terres malgaches. Cah. ORSTOM, Pédologie, IV, n° 2, pp. 3-19.

BOURGEAT, F. ; PETIT, M. - 1969

Contribution à l'étude des surfaces d'aplanissement sur les Hautes-Terres Centrales Malgaches. Annales de Géographie, n° 426, pages 158-188. Carte géomorphologique au 1/500'000 publiée par ORSTOM, Tananarive.

DE CASABIANCA, F. - 1965

Problèmes agronomiques de la mise en valeur des sables roux du Sud-Ouest malgache. Doc. IRAM n° 70.; 39 pages.

DE CASABIANCA, F. - 1966

Les sables roux Malagasy entre la désertification et l'expansion agricole. L'alternative de la mise en culture. Résultats 1962-1966. Doc. IRAM n° 85, Tome I synthèse, 67 pages - Tome II : annexes. Juin 1966.

DE CASABIANCA, F. - 1967

Facteurs physiques de fertilité des sols dans le Sud-Ouest malagasy. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive (Madagascar), 19-25 Nov. 1967 : pp. 1540-1546.

DIXEY, F. - 1959

The geology and geomorphology of Madagascar and a comparison with Eastern Africa. Q.J.G.S., n° 463, 1959, pp. 255-268.

FARAMALALA, M.H. - 1981

Cartographie de la végétation de Madagascar avec l'aide du satellite. Toulouse, Thèse de 3° cycle, Université Paul Sabatier.

HERVIEU, J. - 1963

Les plaines de la Zomandao et de Ranotsara. Cahiers ORSTOM, série Pédol. (3), pp. 73-114.

HERVIEU, J. - 1968

Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. Mém. ORSTOM, Paris, 24, 408 pages.

HOTTIN, G. - 1976

Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar, Bull. Brgm 4, pages 117-153

**HUMBERT, H.; COURS DARNE, G. - 1965**

Notice de la carte internationale du tapis végétal - Madagascar - institut Français de Pondichery.

hs, n°6, pp. 46-78.

**KILIAN, J. - 1968**

Les formations littorales marines sableuses de la Côte Est de Madagascar entre Foulpointe et Mahanoro. Aspects morphologiques et pédologiques. 27 pages, 8 cartes - Document IRAM n° 172, TANANARIVE - Novembre 1968.

**LAPAIRE, J.P. - 1973**

La cuvette de Belobaka, une unité régionale du Moyen-ouest aux marges du Bongalava, Madagascar, Rev. de Géogr., n° 23, Juillet-Décembre 1973, pp. 9-59.

**LAPAIRE, J.P.; MOTTET, G. - 1973**

Observations morphologiques dans le moyen-ouest malgache de Ramartina et Mandoto, Madagascar, Rev. de Géogr. n° 23, Juillet-Décembre 1973, pp. 91-108.

**LE BOURDIEC, F. - 1974**

Hommes et paysages du riz à Madagascar. Etude de Géographie Humaine. Janvier 1974. FTM, 648 pages.

**MORAT, P. - 1969.**

Esquisse du milieu et de la végétation du plateau de l'Horombé. Madagascar. Rev. de Géogr., n° 14, janvier-juin 1969, pp. 7-32.

**MORAT, P. - 1973**

Les savanes du Sud-Ouest de Madagascar. Thèse d'Etat. mémoire ORSTOM, n° 68, paris, 235 pages.

**MOTTET, G. - 1971**

Types de reliefs volcaniques à Madagascar. Colloque de Géomorphologie Volcanique. E.N.S. Fontenay aux Roses. pages 91-104, 1 carte

**MOTTET, G. - 1974**

Contribution à l'étude géomorphologique des hautes Terres volcaniques du Centre de Madagascar (Ankaratra, Itasy). Thèse d'Etat. Laboratoire de l'Université de Géographie de Tananarive. 1974

**MOTTET, G.; ZEBROWSKI, C. - 1974**

Sur l'extension d'une phase récente de projections leucocrates acides dans la partie méridionale de l'Ankaratra, 80 pages Multigr. fig. bibliogr. Semaine Géologique, Tananarive.

**ORSTOM - 1968**

Carte pédologique de Madagascar à l'échelle de 1/1 000 000 - 3 cartes échelle 1/1 000 000

**PETIT, M. - 1970**

Contribution à l'étude morphologique des reliefs granitiques à Madagascar. Thèse d'Etat. 307 pages + croquis.

**RAUNET, M. - 1971**

Etude pédologique de la région d'Ambalamanga (Préfecture de Maintirano). Thèse 3è cycle  
- Université de Paris, janvier 1971. 143 pages + cartes 1/50.000.

RAUNET, M. - 1980

Les bas-fonds et plaines alluviales des Hautes Terres de Madagascar. Reconnaissance morpho-pédologique et hydrologique. Aptitudes à la culture du blé de contre-saison. IRAT-MDRRA, 1980, 166 pages + annexes.

RAUNET, M. - 1981

Le milieu physique de la région volcanique Ankaratra-Vakinankaratra-Itasy (Madagascar). Aptitudes à la culture du blé pluvial. IRAT-MDRRA, 1981, 64 pages + annexes.

RAUNET, M. - 1982

Les potentialités écologiques de Madagascar pour le blé et l'orge.  
Agr. Trop. n° 2, XXVII, 1982, pages 131-141

RAUNET, M. - 1984

Région du lac Alaotra (Madagascar) : le milieu physique, aptitudes à la mise en valeur agricole, système et structure. IRAT Montpellier, 226 p. + annexes + 2 cartes.

RAUNET, M. - 1985

Cartographie morpho-pédologique de cinq terroirs rizicoles sur les Hautes Terres de Madagascar. Aptitudes à la culture du blé de contre-saison en rizières.  
IRAT-KOBAMA, 1985, 44 pages, 6 cartes échelle 1/25 000

RAUNET, M. - 1989

Approche systémique appliquée à la cartographie morpho-pédologique du paysage. 1er séminaire franco-africain de pédologie tropicale. ORSTOM-Université du Bénin (Togo), Lomé 6-12 février 1989, 36 pages.

RAUNET, M. - 1993

Structure et fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé sur les Hautes Terres de Madagascar. Actes du séminaire "bas-fonds et riziculture" CIRAD-ORSTOM-FOFIFA-ACCT. Tananarive 9-14 décembre 1991, pp. 99-125.

RIQUIER, J. - 1959

Les sols sur calcaires de la région de Majunga. Mémoires IRSM, Série D.9, pp. 229-237.

ROSSI, G. - 1980

L'extrême Nord de Madagascar. Thèse d'Etat. Edi. Sud, 440 pages.

SALOMON, J.N. - 1978.

Fourres et forêts sèches du Sud-ouest de Madagascar. Madagascar, Rev. de Géogr. Janv.-juin 1978, n° 32, pp. 19-39.

SALOMON, J.N. - 1986

Le Sud-Ouest de Madagascar. Etude de géographie physique. Thèse d'Etat. Aix en Provence. 996 pages.

SEGALEN, P. - 1957

Etude des sols dérivés des roches volcaniques basiques à Madagascar. Mémoires IRSM,

série D, tome VIII, pages 1-182.

**SOURDAT, M. - 1977**

Le Sud-Ouest de Madagascar, morphogénèse et pédogénèse. Thèse d'Etat. Publication ORSTOM, Dijon, 212 pages.

**VOGT, J. - 1965**

Notes de géomorphologie malgache (1ère partie). Mad, rev. Géogr. n° 7, juillet-dec. 1965, pp. 63-91.

**VOGT, J. - 1968**

Notes de géomorphologie malgache (2ème partie), Mad. Rev. Géogr., n° 12, Janv.-juin 1968, pp. 81-101.

**ZEBROWSKI, C. - 1971**

Propriétés des andosols de l'Itasy et de l'Ankaratra. Cah. ORSTOM, série Pédologie, IX, n. 1, pages 83-108.

**PLANCHES**

**PHOTOGRAPHIQUES**

## SOCLE CRISTALLIN : HAUTS-PLATEAUX



Photo 1 : Champ de lavaka au Nord-Nord-Est de Tananarive.



Photo 2 : Champ de lavaka au Sud du lac Alaotra.



Photo 3 : Décapage en nappe généralisé et lavaka sur les tanety convexes (Nord-Est de Tananarive).



Photo 4 : Vaste "langue" de déjection issue d'un lavaka (près de la cuvette d'Andilamena).



Photo 5 : La rivière Betsiboka en saison des pluies.

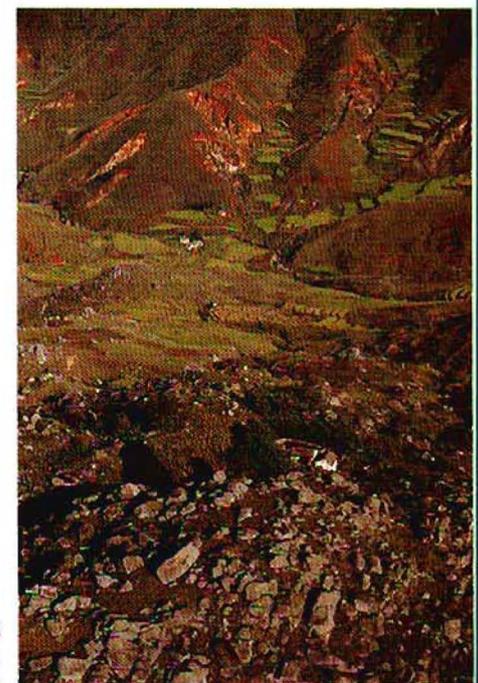
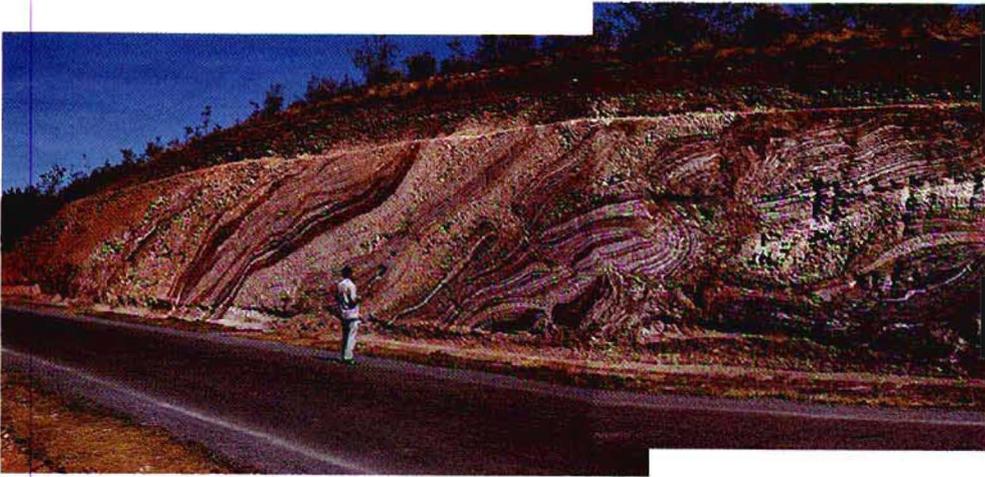


Photo 6 : Région de Bétafo : Reliefs résiduels granitiques à chaos de blocs. A l'arrière plan, collines convexes à lavaka.

## SOCLE CRISTALLIN : HAUTS-PLATEAUX



Photos 7 et 8 : Zone d'altération épaisse de sols ferrallitiques sur granito-gneiss (près d'Antanifotsy, route d'Antsirabé).

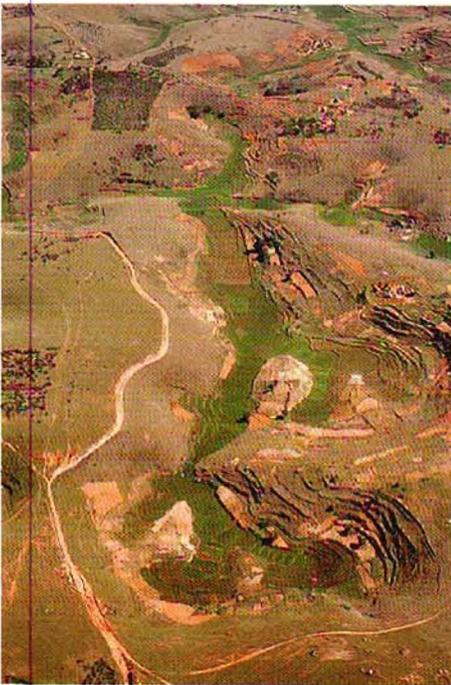


Photo 9 : Bas-fond élémentaire en "bois de renne" encasté dans la surface d'aplanissement fini-tertiaire (région d'Ambohidratrimo).



Photo 10 : Litho-structure anticlinale métamorphique et reliefs appalachiens des rides granitisées (entre Ankazobe et Maevatanana).

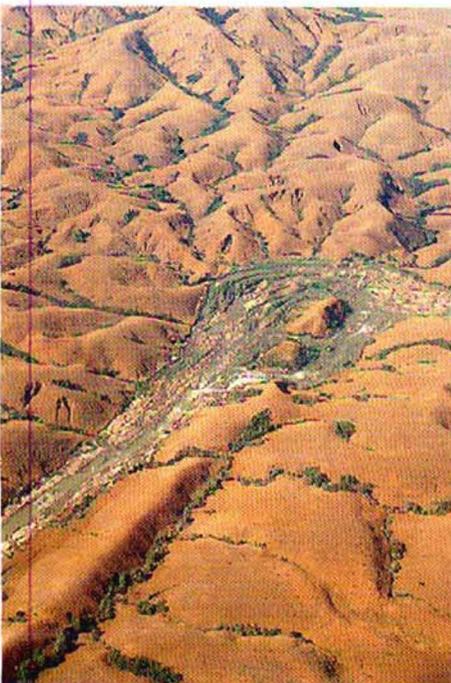


Photo 11 : Rôle de la fracturation du socle sur le réseau hydrographique (l'Ikopa entre Tananarive et Maevatanana).

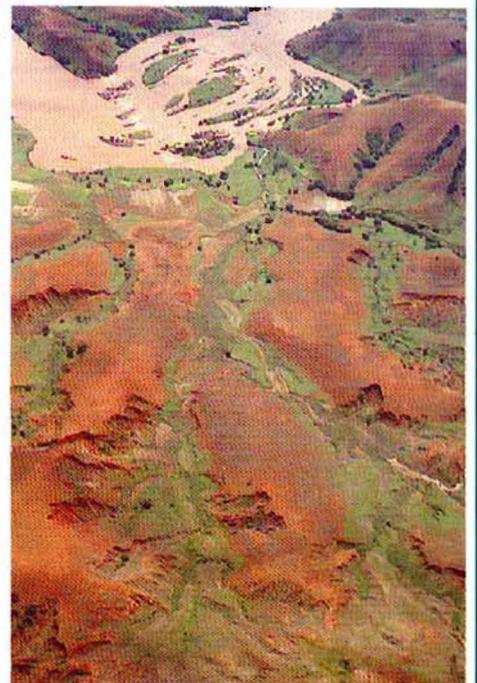


Photo 12 : Lambeaux de glaciés de la surface fini-tertiaire en cours d'érosion (lavaka) à proximité de l'Ikopa (Nord de Tananarive).

## SOCLE CRISTALLIN : HAUTS-PLATEAUX, NORD, EXTREME SUD



Photo 13 : Domes granitiques en cours de dégagement (région d'Ambositra).

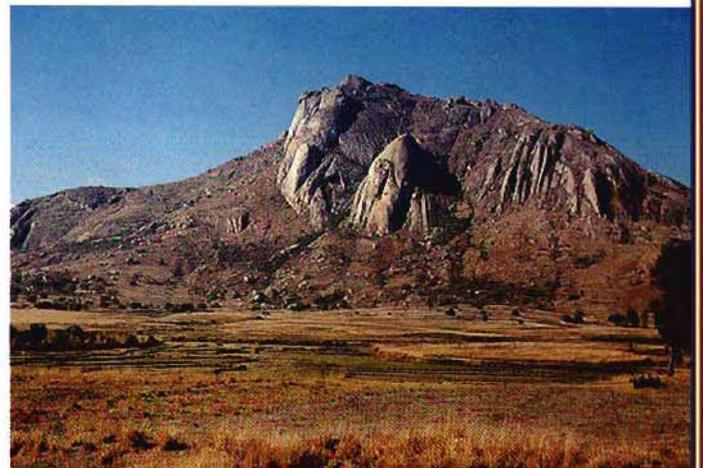


Photo 14 : Inselberg granitique (région de Fianarantsoa).



Photo 15 : Surface d'aplanissement faillée, attaquée par un nouveau réseau hydrographique le long de la dénivelée de faille (Nord-Ouest de Tananarive).



Photo 16 : Le massif montagneux du Tsaratanana : Reliefs polyédriques très accidentés.

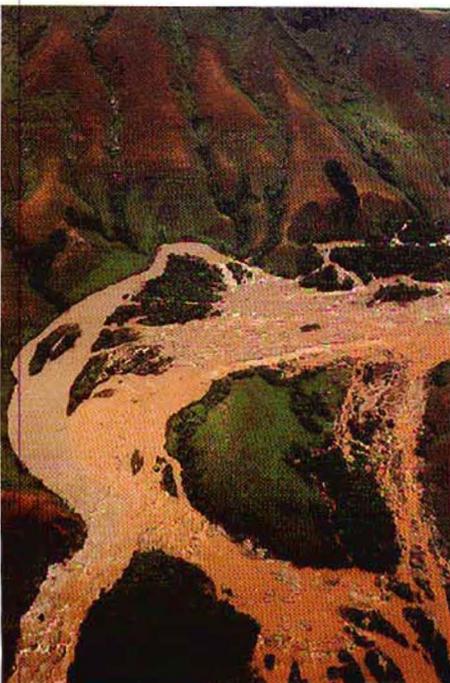


Photo 17 : La rivière Ikopa butant contre des reliefs résiduels granitiques (Nord de Tananarive).

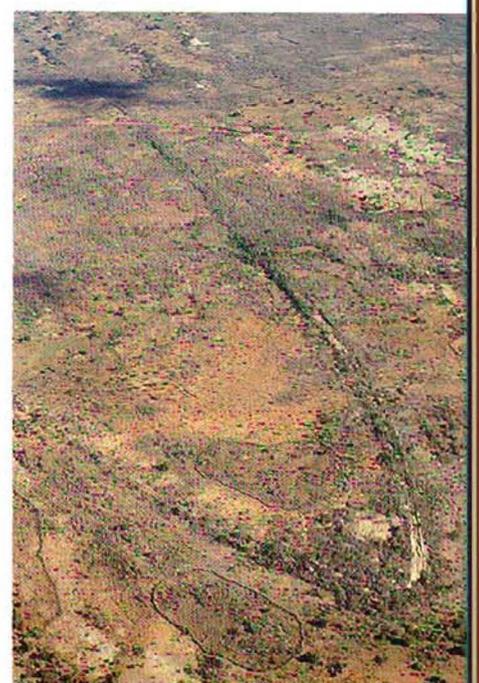


Photo 18 : Pénéplaine Mahafaly-Androy dans l'extrême Sud (Est de Ejeda), sur granito-gneiss. Racines d'une structure anticlinale. Bancs durs, en léger relief ("koppies").

## SOCLE CRISTALLIN : MOYEN-OUEST



Photo 19 : Paysage du moyen-Ouest : Glacis plio-pleistocènes et reliefs résiduels granitiques monoclinaux.



Photo 20 : Surface fini-tertiaire de la région de Mahasolo : Bas-fonds et cuvettes de suffosion.



Photo 21 : Réseau de bas-fonds à forêt-galerie, encastré dans la surface d'aplanissement fini-tertiaire (région Sud de Belobaka).



Photo 22 : Région dominant la bordure des Hauts-Plateaux (Bongolava) : Erosion accélérée généralisée : ravinelements, lavaka, glissements, "pieds de vache"... (région Sud de Maevatanana).



Photo 23 : Région dominant la bordure des Hauts-Plateaux (Bongolava) : Erosion accélérée par ravinelements généralisés. Butte témoin de la surface fini-tertiaire (région Sud de Maevatanana).

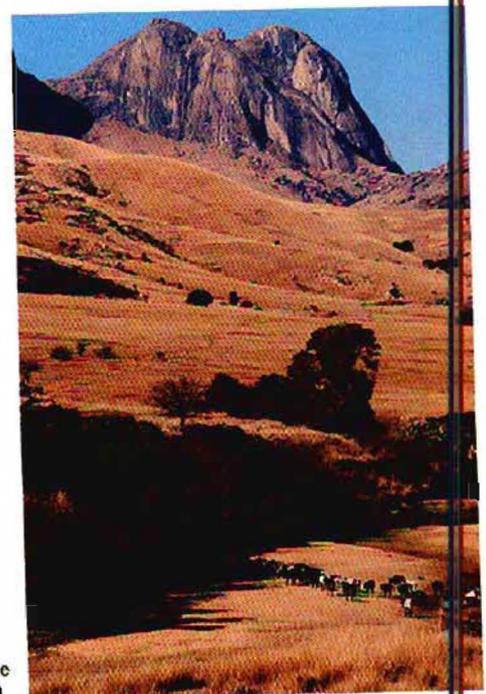


Photo 24 : Inselberg granitique (Ouest d'Ambalavao).

## SÉDIMENTAIRE



Photo 37 : Les grès du Massif de l'Isalo : Armatures de filons siliceux infiltrant les diaclasses (région de Ranohira).



Photo 38 : Karst à "Tsingy" (lapiez géants) du Bemaraha .



Photo 39 : Alternance de calcaire (à lapiez) et de marnes (sols bruns) sur le plateau du Bemaraha.



Photo 40 : Plateau calcaire éocène du Mahafaly : Faille Occidentale Nord-Sud. Bush dense. Présence d'avens.



Photo 41 : Plateaux calcaires éocènes du Belomotra : Rivière Filerenana. Bush dense. Réseau hydrographique fossile, à méandres, surimposé (Est de Tuléar).



Photo 42 : Erosion en glissements de masse étagés sur les grès marno-calcaire à gypses des plateaux situés entre Tuléar et Ankazoabo.

## SOCLE CRISTALLIN : EST



Photo 25 : Reliefs montagneux "polyédriques" de la facade orientale en cours de déforestation (falaise Betsimisaraka).



Photo 26 : Reliefs polyédriques balafrés par des glissements de terrain, sur la facade montagneuse orientale en cours de déforestation (région de Beforoua).



Photo 27 : Cône de déjection torrentiel lors d'une période cyclonique : Région de Ranomafana (falaise Tanala).



Photo 28 : Cordon dunaire flamand isolant une lagune (Sud de la plaine de Maroantsétra).



Photo 29 : La Pointe à Larrée : Faisceau de cordons flandriens et sillons interdunaires inondés.



Photo 30 : Construction d'une flèche sableuse à l'embouchure d'une rivière et isolement d'une lagune à l'arrière. A l'arrière plan, collines basses de rajeunissement de la surface fini-tertiaire ; au loin : reliefs montagneux multifaces de la "Falaise" (région de Fénérive).

## SÉDIMENTAIRE



Photo 31 : Erosion généralisée ("bad-lands") dans les formations gréseuses (Isalo I) du Karoo (Betsiriry, Nord de Miandrivazo).



Photo 32 : Karst "couvert" par des sables rouges sur les calcaires éocènes de la région de la Baie de Narinda : dolines auréolées de *Medemia nobilis*.



Photo 33 : Erosion régressive en ravins ("Sakasaka") dans la carapace sableuse à sables rouges (Nord-Est de Majunga).



Photo 34 : Cuvettes de suffosion ("ranovory") sur carapace sableuse à sables rouges. Savane arborée. Erosion en nappe (Est de Morondava).



Photo 35 : Erosion généralisée dans les grès marno-calcaires du Karoo (Isalo III), dans la presqu'île d'Ampasindava.

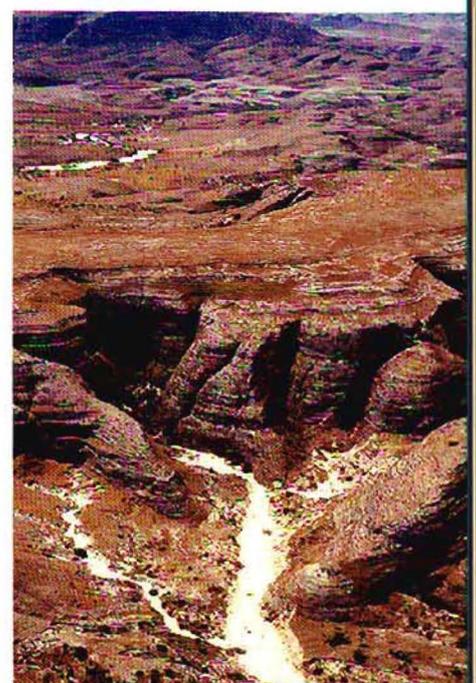


Photo 36 : Les grès du Massif du Makay.

# VOLCANISME



Photo 43 : Massif de l'Ankaratra : Reliefs de dissection des hautes planèzes basaltiques et des massifs trachytiques. Sols ferrallitiques bruns en cours de décapage (Nord de la plaine d'Ambohibary-Sambaina).



Photo 44 : Panorama vu du sommet de l'Ankaratra (2 644 mètres) : Crêtes et versants des hautes planèzes disséquées.



Photo 45 : Massif de l'Ankaratra vers 1 800-2 000 mètres d'altitude : Cultures en "pseudo-terrasses" (pommes de terre) sur sols ferrallitiques bruns.



Photo 46 : Volcans récents (10 000 ans) de l'Itasy.



Photo 47 : Planèzes de la Montagne d'Ambre à sols ferrallitiques (volcanisme tertiaire).



Photo 48 : Planèzes crétaées du Nord-Ouest : Sols ferrallitiques mordus par une érosion en cirque (Nord d'Analalava).

## ALLUVIONS



Photo 49 : Terrasse ancienne ("Sambainienne") à "Sables blancs" sur les Hauts-Plateaux (Cuvette d'Antanetibe) : Le niveau de base actuel (2 à 4 m. plus bas) est riziculturé.

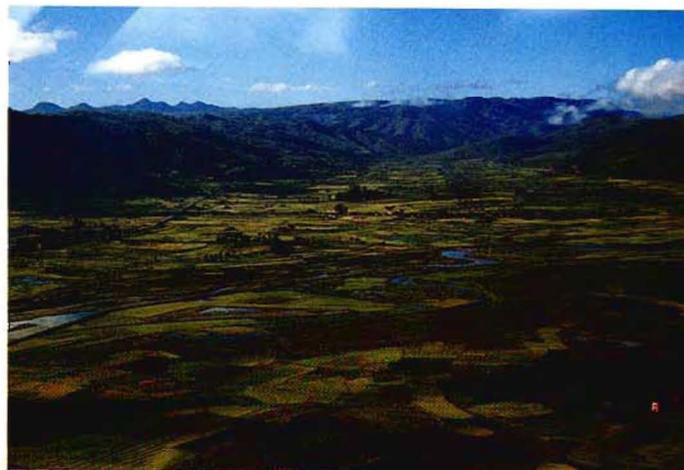


Photo 50 : Plaine de Vinaninony dans l'Ankaratra : Origine volcano-tectonique, 1 850 m. d'altitude.

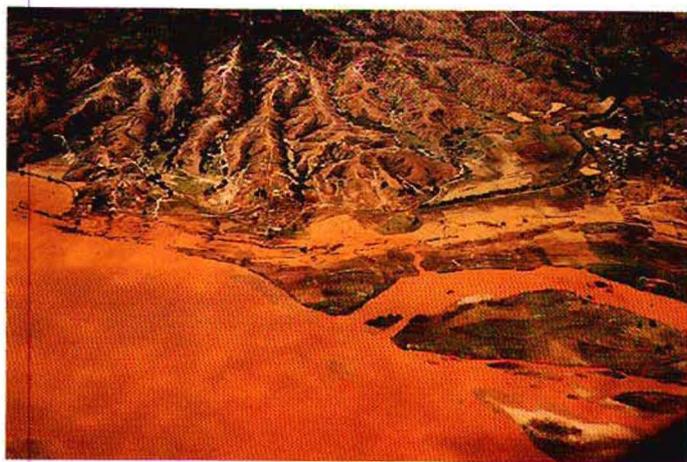


Photo 51 : La rivière Betsiboka à son arrivée dans le sédimentaire : Erosion généralisée dans les formations gréseuse du Karoo (Isalo I) : Plaines d'inondations à "Baïbohos" (environ de Maevatanana).



Photo 52 : "Baïbohos" de la rivière Mahavavy-du-Sud (région de Kandreh), dans la dépression périphérique au socle. Levées de berges, cuvettes latérales de décantation, plaines inondables. Au premier plan, collines érodées de grès du Karoo ("Isalo I").



Photo 53 : Type d'embouchure sur la Côte Ouest : Le delta de la Maharivo (Sud de Morondava). Cordon littoral sableux, mangrove à palétuviers, chénaux de marée, tannes.



Photo 54 : Type d'embouchure sur la Côte Est : Cordon sableux flandrien isolant une lagune derrière laquelle s'accumulent des alluvions (région de Fénérive).

SARL LA GOUTTE D'ENCRE  
34 000 Montpellier - France  
Tél : 04.67.65.30.96