



HAL
open science

Contribution au projet d'aménagement de la plaine de Tananarive (Madagascar) : étude de 3 sites de barrages

Jean Rene Ratsimbazafy

► To cite this version:

Jean Rene Ratsimbazafy. Contribution au projet d'aménagement de la plaine de Tananarive (Madagascar) : étude de 3 sites de barrages. Géologie appliquée. Université de Grenoble, 1970. Français. NNT : . tel-00760582

HAL Id: tel-00760582

<https://theses.hal.science/tel-00760582>

Submitted on 4 Dec 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

205 142
1970
1408
Dufle

Doctorat de 3e cycle
N° d'ordre ...

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE
FACULTÉ DES SCIENCES

205142
1970
1408

THESE

présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE 3e CYCLE
spécialité : Sciences de la terre
mention : Géologie appliquée

par

Jean René RATSIMBAZAFY

CONTRIBUTION AU PROJET D'AMENAGEMENT
DE LA PLAINE DE TANANARIVE (MADAGASCAR)

ETUDE DE 3 SITES DE BARRAGES

Soutenue le 1970 devant la Commission d'examen

MM. R. BARBIER Professeur Président
R. MICHEL Professeur Examineurs
P. GIRAUD Professeur
G. NOIZET Docteur-ès-Sciences invité

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

Doctorat de 3e cycle
N° d'ordre ...

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE
FACULTÉ DES SCIENCES

205142
1970
1408

THESE

présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE 3e CYCLE
spécialité : Sciences de la terre
mention : Géologie appliquée

par

Jean René RATSIMBAZAFY

CONTRIBUTION AU PROJET D'AMENAGEMENT
DE LA PLAINE DE TANANARIVE (MADAGASCAR)

T. 71/2

ETUDE DE 3 SITES DE BARRAGES

Soutenue le 1970 devant la Commission d'examen

MM. R. BARBIER Professeur Président
R. MICHEL Professeur Examineurs
P. GIRAUD Professeur
G. NOIZET Docteur-ès-Sciences invité

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE



AVANT-PROPOS,

Avant d'entamer l'exposé de ce mémoire qui marque la fin de mes études universitaires, il m'est très agréable d'exprimer ici ma gratitude envers les personnes qui ont contribué à sa réalisation, soit par leur enseignement, soit par leurs conseils et encouragements, soit encore par leur collaboration technique.

Ma plus vive reconnaissance va d'abord à Monsieur R. BARBIER, Professeur à la Faculté des Sciences et à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble, membre du Comité Technique Permanent des Barrages, qui est le promoteur de cette thèse. Son enseignement et ses conseils m'ont été des plus profitables et m'ont initié aux problèmes géologiques relatifs à la construction des grands ouvrages.

Cette reconnaissance s'étend également à Monsieur P. GIRAUD, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, qui a montré beaucoup de bienveillance à mon égard. Ayant beaucoup d'expérience sur les problèmes géologiques de Madagascar, il a suivi avec intérêt l'évolution de mon travail, ne ménageant ni son temps ni ses conseils, tout en restant affable. Il est pour moi plus qu'un Professeur.

Je remercie très vivement :

- Monsieur J. A. ZAFIMAHOVA, Directeur des Mines de Madagascar, qui a bien voulu accepter de me prendre en stage au cours de mon séjour à Tananarive.

- Monsieur A. RAZAFINIPARANY, Chef du Service Géologique de Madagascar qui m'a beaucoup encouragé à suivre cette voie. Il a tout fait pour que mon travail sur le terrain s'effectue dans les meilleures conditions en me fournissant en particulier les moyens pour sa bonne réalisation.

- Monsieur G. NOIZET, Ingénieur Géologue principal au Service Géologique de Madagascar, qui a accepté sans hésitation de diriger mon

travail sur place et qui m'a fait bénéficier des résultats de ses études sur le vaste projet d'aménagement de la Plaine de Tananarive.

Mes remerciements vont également à Monsieur J. RASOAMAHENINA, Ingénieur Géologue principal au Service Géologique de Madagascar, qui m'a le premier initié au métier de Géologue. Les conseils amicaux qu'il m'a donnés ont été particulièrement fructueux.

Je tiens aussi à remercier :

- Monsieur M. MALA, Ingénieur, Directeur adjoint du Laboratoire des Bâtiments et des Travaux Publics de Tananarive,

- Monsieur J. COEUR-BIZOT, Ingénieur Délégué de la Direction Générale de la SOGREAH - Grenoble.

Monsieur J. SAVATIER, Ingénieur attaché à la Direction de la SOGREAH, Grenoble.

Ils m'ont communiqué aimablement toute la documentation sur l'"Aménagement de la Plaine de Tananarive" et ont donné tous renseignements et conseils souhaitables.

Je ne saurais pas oublier non plus pour leur aide, leurs conseils ou leur collaboration technique le personnel du Laboratoire de l'Institut Dolomieu de Grenoble ainsi que le personnel du Laboratoire du Service Géologique de Madagascar.

Enfin j'adresse un cordial "veloma" (au revoir) à mes camarades du 3^e cycle de la Faculté des Sciences de Grenoble.

TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>INTRODUCTION</u> -----	1
<u>CHAPITRE I - CADRE GEOGRAPHIQUE</u> -----	2
I. A - <u>GENERALITES SUR MADAGASCAR</u> -----	2
I. B - <u>LA ZONE DES HAUTES-TERRES A LA LATITUDE</u> <u>De TANANARIVE</u> -----	3
1. Régions naturelles -----	3
2. Climat -----	4
3. Hydrographie -----	4
4. Economie -----	5
<u>CHAPITRE II - CADRE GEOLOGIQUE</u> -----	6
II. A - <u>GENERALITES SUR MADAGASCAR</u> -----	6
II. B - <u>APERCU SUR LE SOCLE CRISTALLIN</u> -----	6
1. Systèmes de base -----	7
2. Séries schisto-quartzo-calcaires -----	7
3. Complexe granitique de 450-550 MA -----	8
II. C - <u>GEOLOGIE DE LA REGION DE TANANARIVE</u> -----	8
1. Série paragneissique du Système du Graphite -----	8
2. Le complexe migmatito-granitique -----	8
3. Intrusions et coulées basiques -----	10
4. Tectonique -----	10
II. D - <u>GEOLOGIE DE LA ZONE DES SITES</u> -----	11
1. Situation géologique -----	11
2. Migmatites granitoïdes et granite migmatitique -----	11
3. Structure -----	13
<u>CHAPITRE III - LES LATERITES ET LES LAVAKA</u> -----	14
III. A - <u>LES LATERITES</u> -----	14
1. Définition -----	15
2. Phénomène d'altération -----	16
3. Les latérites de la zone des sites -----	16
4. Caractères spécifiques des latérites structurées -----	19
III. B - <u>LES LAVAKA</u> -----	19
1. Condition de formation -----	20
2. Formes et dimensions -----	20
3. Genèse -----	20
4. Evolution -----	22
5. Stabilisation naturelle -----	23
6. Les lavaka dans la zone des sites étudiés -----	23

	Pages
<u>CHAPITRE IV - PROJET D'AMENAGEMENT DE LA PLAINE DE TANANARIVE</u>	25
IV. A - DONNEES GEOGRAPHIQUES	25
IV. B - DONNEES GEOLOGIQUES	27
IV. C - PROBLEMES DE LA PLAINE DE TANANARIVE	27
1. Mauvais drainage	27
2. Les risques d'inondation	28
IV. D - PROJET D'AMENAGEMENT	28
IV. E - SOLUTIONS ENVISAGEES	29
1. Zone aval	29
2. Zone amont	30
 <u>CHAPITRE V - SITE D'ANDRANOMANGA SUR LA SISAONY</u>	 33
V. A - ETUDE GEOLOGIQUE	35
1. Etude pétrographique	35
1-1. Etude pétrographique des différents faciès rencontrés	36
1-2. Modes d'affleurement	40
2. Etude structurale	40
2-1. Mode opératoire	41
2-2. Exposé des résultats	41
3. Conclusion	44
V. B - ETUDE GEOTECHNIQUE	45
1. Vue d'ensemble	45
2. Etude des appuis	47
2-1. Appui rive gauche	47
2-2. Appui rive droite	53
3. Zone centrale du barrage	68
4. Cuvette de retenue	71
5. Dérivation provisoire	72
6. Evacuateur de crues	72
7. Zone d'emprunt	73
8. Conclusion	75
 <u>CHAPITRE VI - SITE DE MANANTSOA SUR L'ANDROMBA</u>	 77
VI. A - ETUDE GEOLOGIQUE	78
1. Pétrographie	78
1-1. Variétés pétrographiques de l'ensemble migmatitique	78
1-2. Différents types d'association sur le terrain	81
2. Structure et tectonique	87
2-1. Etude des différents secteurs	87
2-2. Etude synthétique	94
3. Conclusion	95

VI. B - ETUDE GEOTECHNIQUE	97
1. Etude des appuis	97
1-1. Appui rive gauche	97
1-2. Appui rive droite	103
2. Zone centrale (thalweg)	106
3. Cuvette de retenue	107
3-1. Rive gauche	107
3-2. Rive droite	107
3-3. Etude de la colline de Manantosa	107
4. Conclusion	113
 <u>CHAPITRE VII - SITE D'ANTARAMNA SUR L'IKOPA</u>	 115
VII. A - ETUDE GEOLOGIQUE	116
1. Constitution géologique	116
2. Pétrographie	118
2-1. Les formations non granitisées	118
2-2. Les formations granitisées	120
2-3. Les formations intrusives récentes	121
3. Structure	122
3-1. Les formations non granitisées	122
3-2. Les migmatites	123
3-3. Les formations recoupantes	123
4. Tectonique	125
4-1. Secteur sud ouest	126
4-2. Secteur nord	126
4-3. Secteur du village d'Ambatobe	129
5. Conclusion	129
VII. B - ETUDE GEOTECHNIQUE	130
1. Vue d'ensemble	130
2. Etude des appuis	132
2-1. Appui rive gauche	132
2-2. Appui rive droite	137
3. Cuvette de retenue	139
3-1. En rive gauche	140
3-2. En rive droite	140
4. Zone centrale du barrage et zone d'emprunt	140
5. Conclusion	143
 <u>CONCLUSION GENERALE</u>	 144
Site d'Andranomanga sur la Sisaony	144
Site de Manantsoa sur l'Andromba	145
Site d'Antaramanana sur l'Ikopa	146
ANNEXE	147
A. Méthodes de travail et d'analyses	147
B. Résultats	155
 BIBLIOGRAPHIE	 153

LISTE DES FIGURES

n°	pages
1-Vue d'ensemble de la Plaine de Tananarive	9
2-Latérite argileuse à débris de quartzite allochtone	17
3-Latérite argileuse à débris de quartzite autochtone	17
4-Représentation schématique d'un lavaka classique	21
5-Plaine de Tananarive : localisation	26
6-Situation géographique des 3 sites étudiés	32
<u>Site d'Andranomanga sur la Sisaony</u>	
7-Géologie	34
8-Projection stéréographique de diaclases	43
9-Topographie	46
10-Projection stéréographique : étude comparative des diaclases	48
11-Evolution de la latéritisation au niveau des boules	50
12-Coupes géologiques : appui rive gauche et appui rive droite	51
13-Courbe granulométrique de R. 7947	55
14-Emplacement des pénétromètres et sondages	58
15-Courbes granulométriques : R. 7914 et 7910	60
16-Bloc diagramme de l'appui rive droite (côté amont)	62
17-Allure du substratum sain (appui rive droite)	65
18-Carte d'altération	67
19-Résultat graphique des pénétromètres, puits et sondages	69
20-Résultat graphique des pénétromètres P3 et P4	70
21-Bloc diagramme axonométrique du site (zone du barrage)	74
<u>Site de Manantsoa sur l'Andromba</u>	
22-Bloc diagramme à main levée d'un lavaka	82
23-Géologie	86
24-Colline de Manantsoa : coupe géologique	88
25-Schéma de l'interprétation tectonique du site	90
26-Projection stéréographique (diaclasses et schistosité du côté appui rive gauche)	92
27- Etude de la continuité des bancs de part et d'autre de l'Andromba (à l'emplacement du barrage)	96
28-Courbe granulométrique de R. 7957	98
29-Colline de Manantsoa : topographie	102
30-Bloc diagramme à main levée de l'appui rive droite	104
31-Colline de Manantsoa : morphologie	108
32-Processus de "lavakisation"	112
<u>Site d'Antaramanana sur l'Ikopa</u>	
33-Ouvrage de restitution et évacuateur de crues	
34-Géologie (dépliant)	124
35-Tectonogramme du site	131
36-Environs immédiats du barrage	138
37-Bloc diagramme à main levée	141
38-Carte des formations superficielles (dépliant)	
39-Profil du socle rocheux	141
40- Coupe des sondages S2 et S3	142
<u>Annexe</u>	
41-Cartographie à partir des photographies aériennes	148
42-Construction graphique	149
43-Essai de perméabilité à charge variable	152

INTRODUCTION

Le présent mémoire est destiné à présenter la constitution géologique et les problèmes qui en dérivent de 3 sites de barrages en amont de la Plaine de Tananarive dont le projet d'aménagement est en cours d'étude.

La première partie comporte surtout des pages documentaires. Il s'agit de données générales qui serviront de références pour les études suivantes. Elle comprend :

- une vue très rapide sur la géologie d'ensemble de Madagascar et sur celle des sites ;
- une étude sur les latérites et les "lavaka" qui sont des faits régionaux et qui posent de sérieux problèmes quant à la valeur des sites ;
- une vue d'ensemble sur le projet d'aménagement de la Plaine de Tananarive. Elle permettra de comprendre l'importance du rôle que jouent ces sites dans l'aménagement.

La deuxième partie expose nos observations personnelles détaillées sur les sites étudiés. Elle se compose pour chacun des sites d'une étude géologique détaillée et d'un aperçu sur leurs caractères géotechniques.

Enfin les latérites et les "lavaka" constituant pour une bonne partie de Madagascar des terrains dont le comportement du point de vue géotechnique est loin encore d'être connu nous avons jugé bon de rassembler en une troisième partie de ce mémoire les résultats d'analyses et les renseignements relatifs aux échantillons prélevés.

De la sorte dans la deuxième partie, en ce qui concerne les latérites, ne traiterons-nous que le nécessaire. Les références seront données pour permettre au lecteur de trouver les résultats analytiques complémentaires dans la troisième partie.

CHAPITRE I

CADRE GEOGRAPHIQUE

I. A. - GENERALITES SUR MADAGASCAR

Située à 300 km à l'Est de la côte africaine, Madagascar constitue une île de 590 000 km² de superficie, avec 1 600 km du Nord au Sud, sur 600 km d'Est en Ouest au maximum.

Entre 12° 5 et 25° de latitude sud, elle est comprise en majeure partie dans la zone intertropicale. Cette situation confère à la grande île un climat à caractère tropical, mais l'existence très proche du continent africain à l'Ouest, de l'Océan Indien à l'Est, le relief tourmenté de l'île qui présente une surélévation de la zone centrale jusqu'à 2 800 m (point culminant), le passage du tropique du Capricorne à la hauteur de Tuléar : tout cela contribue à créer des conditions climatiques variées.

En fait, les principaux facteurs météorologiques réagissant sur Madagascar sont :

- l'anticyclone des Mascareignes (entre 30° et 33° de latitude sud), engendrant l'alizé du Sud Est ;
- les basses pressions équatoriales au Nord, engendrant la mousson du Nord Ouest qui atteint Madagascar par intermittence en été ;
- une circulation d'Ouest en Est de l'anticyclone mobile en provenance de l'Atlantique sud qui intervient sur la région sud de l'île.

Ainsi l'Est, exposé à l'alizé, connaît une humidité relativement forte, avec plus de 3 000 mm par an de précipitation. La saison sèche est peu marquée.

L'Ouest, abrité de l'alizé par la zone des Hautes-Terres, subit l'influence de la mousson du Nord Ouest. Moins arrosé, avec plus de 2 000 mm de précipitation par an, il présente une saison sèche très marquée.

Au Sud et au Sud Est sévit un climat semi-aride, avec une faible pluviosité (400 mm par an), mais régulièrement répartie dans l'année.

La zone des Hautes-Terres possède un climat tropical de montagne. Située entre la limite de la zone influencée par l'alizé et la mousson, elle connaît 2 saisons bien marquées : une saison sèche et une saison humide (précipitation inférieure à 2 000 mm par an). Elle est caractérisée par des températures nettement plus basses que dans le reste de l'île (les minima absolus peuvent descendre en dessous de 0°).

Du point de vue économique, Madagascar est un pays à tendance nettement agricole. Le riz est une culture traditionnelle et vient en tête de la production (43 % de la valeur totale). Comme principales zones productrices, nous citons : la région d'Alaotra, la Plaine de Marovoay, la Plaine de Tananarive, la région sud des Hautes-Terres. Comme culture d'exportation, on a surtout : le café (14 %), la canne à sucre (6 %), le manioc (5 %), puis viennent le vanillier, le cacaoyer, le tabac, les essences à parfums (Ylang-ylang et lemon Grass), ...

Madagascar ne manque pas d'espace pour son développement agricole futur. On estime que les cultures, jachères comprises, couvrent actuellement entre 1/4 et 1/3 seulement des terres aménageables par des procédés immédiatement applicables.

L'élevage a une vocation pastorale. Le cheptel bovin vient en premier lieu, suivi du porc et de l'ovin. L'importance de l'élevage varie suivant les régions, le Sud arrivant en tête.

Les ressources minières sont variées, mais la production n'est pas prépondérante dans l'économie du pays actuellement. On exploite surtout le graphite, le mica, l'urano-thorianite, la chromite. Comme autres ressources, nous citons : le quartz, le grenat, le nickel, l'or, le béryl industriel, les phosphates, ...

La population malgache est essentiellement rurale. En 1967, environ 8 % de la population vit dans des agglomérations de plus de 20 000 habitants, et on estime à 86 % la population qui vit dans les villages. La densité moyenne est voisine de 12 hab./km². La répartition dans les diverses régions de l'île est pourtant inégale. En général, c'est la riziculture irriguée qui entretient les plus fortes densités humaines.

I. B. - LA ZONE DES HAUTES-TERRES A LA LATITUDE DE TANANARIVE

I. B. 1 - Régions naturelles

A la latitude de Tanarive, on peut distinguer 3 régions naturelles. De l'Est vers l'Ouest, on a :

- une zone forestière, marquant la ligne de partage des eaux Océan Indien - Canal de Mozambique ;

- puis vient une zone presque dénudée, formée de collines latéritiques aux formes molles. Souvent les flancs de celles-ci sont marqués de larges entailles de formes diverses, dénommées "lavaka", tandis qu'à leur sommet, il n'est pas rare de voir des boules plus ou moins dégagées ;

- enfin on arrive à la Plaine de Tananarive proprement dite. Autrefois, elle était entièrement marécageuse. Mais l'implantation de digues le long de l'Ikopa, commencée au temps du roi Andrianjaka et de ses fils (fin XVIIe - début XVIIIe siècles), et étendue sous le règne du roi Andrianampoinimerina (1787-1810), l'a aménagée en vaste rizière.

Généralement, l'altitude baisse d'Est en Ouest et du Sud au Nord. En moyenne, elle varie entre 1 200 m et 1 300 m avec des sommets atteignant 1 600 m.

I. B. 2 - Climat

Il est plutôt influencé par le régime de la mousson. Une saison sèche et une saison de pluies alternent nettement, respectivement de mai à octobre, et de novembre à avril.

La pluviométrie annuelle est de 1 380 mm avec 1 200 mm au cours de la saison des pluies (17 jours de pluie par mois en moyenne) et 180 mm au cours de la saison sèche (7 jours de pluie par mois en moyenne).

La température varie entre 8° et 25°.

I. B. 3 - Hydrographie

L'Ikopa (qui rejoint la Betsiboka plus en aval pour se jeter dans le canal de Mozambique) et ses affluents desservent la majeure partie de cette zone. Formé de son cours supérieur par la réunion de la Varahina nord et de la Varahina sud, ses affluents principaux sont :

- rive droite : Ivovoka, Ampasimbe, Mamba ;
- rive gauche : Sisaony, Andromba.

Compte tenu du climat, leur régime est très irrégulier : presque à sec au cours de l'époque d'étiage, ces rivières grossissent rapidement au moment des grands orages. Ainsi, l'Ikopa, à la sortie de la Plaine de Tananarive, n'a eu comme débit que 30 m³/s en novembre 1966 (étiage), alors qu'elle a atteint 350 m³/s en mars 1967 (saison des pluies).

Des aménagements ont déjà été réalisés sur certains de ces cours d'eau (chute de Mandraka, barrage d'Antelomita). Ils assurent l'alimentation en électricité de la capitale. Deux barrages réservoirs ont été créés sur le haut Ikopa pour réguler

lariser son débit en période de crues et alimenter les installations d'Antelomita pendant la saison sèche.

I. B. 4 - Economie

La région est essentiellement agricole. A part le riz qui demeure une culture traditionnelle importante (le rendement s'élève à 3 tonnes/ha en moyenne, avec des pointes allant jusqu'à 7 à 9 tonnes/ha), les autres cultures se trouvent intensifiées par suite de la proximité de la capitale.

Ainsi, les cultures maraîchères et fruitières trouvent leur place dans les petites vallées encaissées environnant Tananarive. A celles-ci s'ajoutent les cultures vivrières telles que manioc, patates, arachides, cannes à sucre. Du point de vue tonnage, le manioc vient après le riz.

On ne fait pas d'élevage intensif. A part le zébu que l'on utilise surtout comme animal de trait, le développement des porcins, ovins, et volailles est activé également par la proximité de la capitale.

La forêt fait partie des principales richesses de la partie est. L'eucalyptus prédomine dans la zone boisée. On l'exploite comme bois de chauffage, charbon ou bois d'oeuvre. Les conifères ont été introduits récemment et sont utilisés dans les zones comme éléments de reboisement.

Quelques industries se sont implantées dans les environs de la capitale : rizeries, tanneries, papeteries, briqueteries, scieries. Mais la majeure partie des industries se trouvent concentrées dans la zone urbaine et suburbaine de Tananarive même.

La production minière est pratiquement inexistante actuellement. A part l'exploitation d'or d'Ankadivoribe (une dizaine de kilomètres au Sud de Tananarive), les autres exploitations d'or et de graphite ont été abandonnées. Par contre les carrières pour matériaux de construction et d'empierrement se multiplient activement. Des sables sont extraits du lit de la Sisaony et de l'Ikopa, alors que les dépôts fluvio-lacustres de la Plaine de Tananarive fournissent les matières premières de la briqueterie.

CHAPITRE II

CADRE GEOLOGIQUE

II. A. - GENERALITES SUR MADAGASCAR

Une carte géologique d'ensemble de Madagascar met en évidence 2 parties bien distinctes : un socle cristallin prédominant qui constitue l'ossature centrale de l'île, et, sur ses bordures, des formations sédimentaires particulièrement développées le long de la côte ouest.

Le socle cristallin comprend des formations d'âge précambrien. Quant aux terrains sédimentaires, leur base est représentée par le groupe de la Sakoa lequel fait partie de l'ensemble Karoo malgache.

II. B. - APERCU SUR LE SOCLE CRISTALLIN MALGACHE

Nous nous contenterons ici de faire un commentaire très succinct de la carte géologique au 1/1 000 000 établie par H. BESAIRIE, 1964.

Trois grandes subdivisions du socle malgache y ont été faites.:

- d'abord les trois systèmes de base : ANDROYEN, du GRAPHITE et du VOHIBORY qui appartiennent à une même orogénèse datée des alentours de 2 600 MA ;
- au-dessus, séparées par une discordance, les séries schisto-quartzo-calcaires datées d'environ 600 MA ;
- enfin le complexe de granites, migmatites et pegmatites de 450 à 550 MA.

Rappelons que les "systèmes" sont des unités à valeur stratigraphique et zonéographique. Ce sont des ensembles présentant une série de faciès pétrographiques étroitement associés et présentant un degré de métamorphisme identique ou voisin.

Les systèmes se décomposent eux-mêmes en "groupes" qui ont une valeur régionale.

II. B. 1. - Systèmes de base

Autrefois on admettait la succession suivante, de bas en haut : Androyen, du Graphite, du Vohibory. Vers 1955 - 1957, il a été démontré que le Vohibory était l'équivalent latéral, mais moins métamorphique, de l'Androyen.

a/ Système Androyen : il est caractérisé par l'abondance de leptynites, de pyroxénites, de cipolins et de charnockites. Le degré du métamorphisme est celui du faciès granulite.

b/ Système du Vohibory : les faciès caractéristiques sont très différents de ceux du Système Androyen. On a un grand développement de roches amphiboliques associées à des gneiss à biotite et amphibole, à des micaschistes et parfois à des cipolins. Le degré du métamorphisme est essentiellement celui du faciès amphibolite.

c/ Système du graphite : comme son nom l'indique, il est caractérisé par la présence du graphite dans des micaschistes, des gneiss ou des leptynites. S'y associent souvent des quartzites. Comme minéraux caractéristiques de ceux-ci et des gneiss, citons le grenat et la sillimanite. Le grade métamorphique est variable selon les régions. Les paragneiss peuvent être caractéristiques soit du faciès granulite, soit de l'un des subfaciès du faciès amphibolite.

Ces différents systèmes auraient été affectés par une même orogénèse fixée grossièrement à 2 500 MA - 2 600 MA. En fait on a des âges qui s'échelonnent entre 3 020 MA et 450 MA. Leur signification n'est pas encore clairement établie.

II. B. 2 - Séries schisto-quartzo-calcaires

Leur individualisation a été faite dans le centre de Madagascar. Il s'agit d'un ensemble de cipolins, micaschistes, amphibolo-pyroxénites et quartzites. Le degré de métamorphisme est variable ; ainsi certains quartzites renferment de la muscovite alors que d'autres sont riches en sillimanite.

Cette série fait l'objet d'une controverse. Pour les uns, elle est discordante sur un socle représenté ici par les formations des Systèmes du Graphite et du Vohibory. Pour d'autres, cette série ne constituerait qu'une variation de faciès au sein du Système du Vohibory.

Toujours est-il que cette série est recoupée par un complexe intrusif daté de 550 MA. Il comprend des venues granitiques, pegmatitiques (450 MA) et gabbroïques.

II. B. 3. - Complexe granitique de 450-550 MA

Il s'agit d'un phénomène d'une ampleur considérable. Sa genèse est encore obscure. Il est très gênant pour la reconstitution de l'histoire géologique du socle malgache car il a oblitéré les structures anciennes et a rajeuni toutes les formations au sein desquelles il s'est développé.

Il pourrait semble-t-il se décomposer en plusieurs phénomènes :

- a/ granitisation stratoïde à 550 MA ;
- b/ activité pegmatitique à 500 MA ;
- c/ rajeunissement à 460 MA affectant en particulier les biotites de l'ensemble des formations cristallophylliennes.

II. C. - GEOLOGIE DE LA REGION DE TANANARIVE (fig. 1)

La région de Tananarive, située en plein centre du socle cristallin, est constituée par plusieurs ensembles :

II. C. 1. - Série paragneissique du Système du Graphite

Au sein des migmatites et granites migmatitiques qui seront vus au paragraphe suivant subsistent des lambeaux plus ou moins importants de schistes cristallins topochemiques : il s'agit d'une alternance de bancs de micaschistes, de gneiss, de quartzites et d'amphibolites. Dans le faciès silico-alumineux le graphite est fréquent.

II. C. 2. - Le complexe migmatito-granitique

Les formations du Système du Graphite, qui ont vraisemblablement été affectées après la phase orogénique majeure de 2 600 MA par divers épisodes métamorphiques et tectoniques, ont subi d'importants phénomènes de granitisation des alentours de 500 MA.

On a eu ainsi la formation d'une grande variété de migmatites et de granites. Certains de ceux-ci sont caractérisés par leur gisement en lames, en gros concordantes à la foliation des gneiss encaissants.

D'autres constituent de véritables massifs. Ainsi en est-il de celui de Carion. Il s'agit d'un massif subcirculaire de 10 x 20 km de granite porphyroïde, encaissé dans un ensemble migmatito-granitique.

L'antériorité de l'un par rapport à l'autre est discutée.

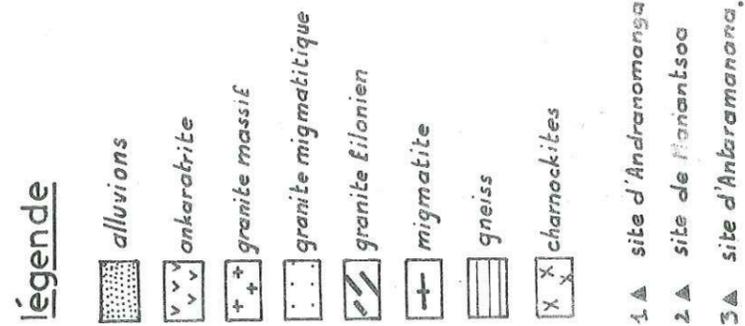
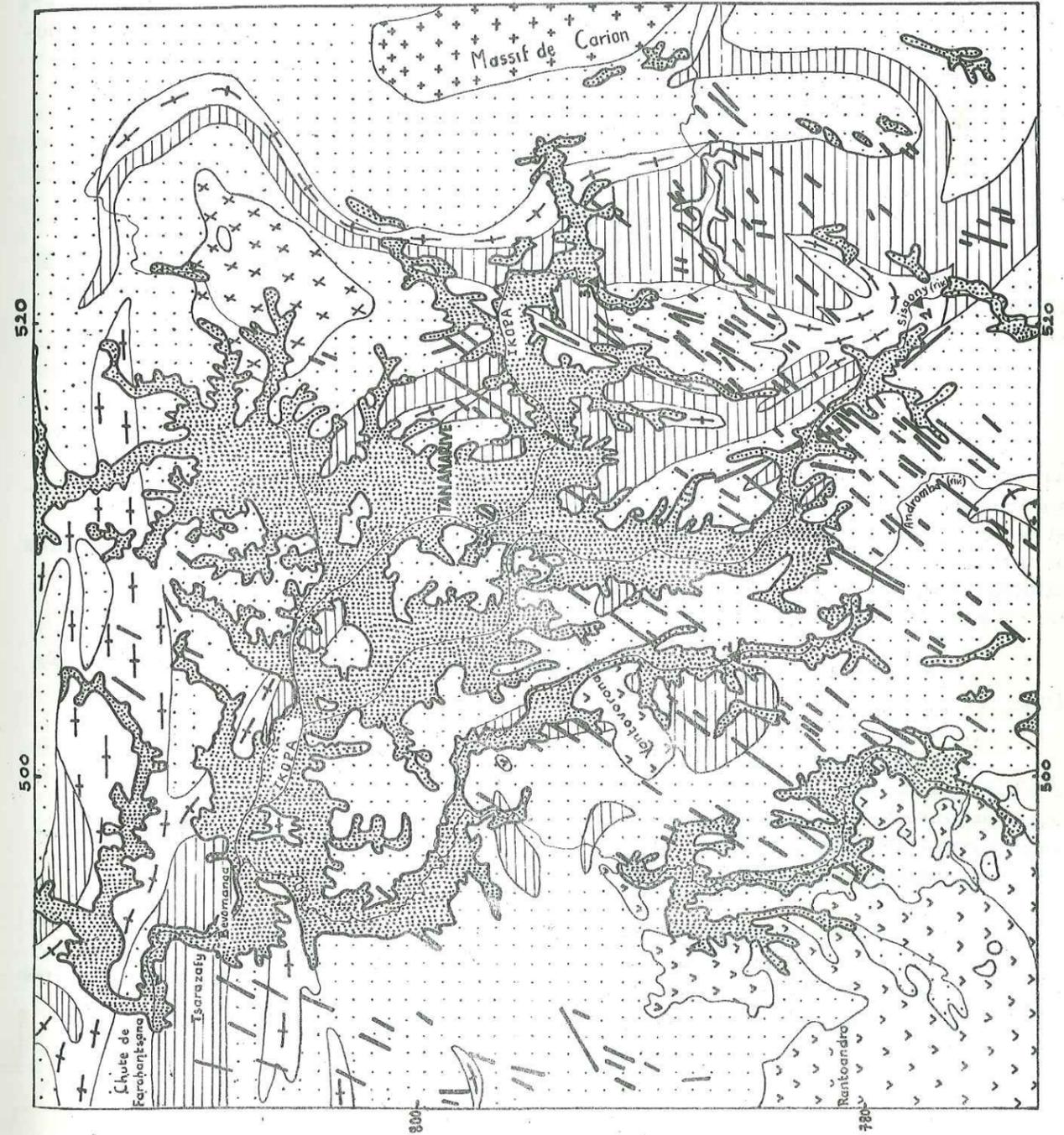


fig.1
vue d'ensemble
de la PLAINES
de TANANARIVE



Le mont Iharanandriana de composition également granitique est considéré par les uns comme un batholite intrusif (L. LAPLAINE, 1952) alors que d'autres n'excluent pas l'hypothèse qu'il s'agisse d'une lame granitique en position de synclinal perché (G. DELUBAC; 1962).

Comme d'autres roches liées au phénomène de granitisation de 500 MA, on peut également citer les charnockites dont un important massif s'individualise au Nord Est de Tananarive, et les filons de granite d'Ambatomiranty. Ces derniers seraient, d'après L. DELBOIS, 1957, d'anciens filons de diorite ou de gabbro recoupant les formations préexistantes et qui auraient été par la suite granitisés. On aurait la succession suivante : fracturation du socle, mise en place de diorites, granitisation le long des fractures des diorites et de leurs épontes.

II. C. 3. - Intrusions et coulées basiques

Si pour cette région les intrusions basiques récentes sont rares, par contre, à une vingtaine de kilomètres au Sud Ouest de Tananarive, commencent à apparaître les coulées volcaniques de l'Ankaratra qui s'étendent plus au Sud sur une surface de 100 x 40 km.

II. C. 4. - Tectonique

Du point de vue de la structure d'ensemble, cette région de Tananarive est située à l'intérieur de la grande virgation qui s'individualise à peu près à mi-hauteur de l'île. Un peu au-dessus de la latitude de Tananarive, les couches, aussi bien de gneiss que de migmatites et de granites, qui ont au Sud une direction subméridienne s'incurvent brusquement vers l'Ouest (sur une distance de quelques kilomètres) et deviennent franchement est-ouest. La signification de cette virgation n'est pas encore parfaitement claire.

En ce qui concerne la tectonique cassante, on peut citer H. BESAIRIE, 1968 :

"Depuis l'époque de la dernière orogénèse affectant Madagascar (orogénèse pré-Karoo de 255 MA), aucune tectonique tangentielle ne s'est manifestée, mais on observe, à plusieurs reprises, une importante tectonique verticale qui fait souvent rejouer des accidents du vieux socle comportant 3 directions majeures correspondant à : N20E, N160E, et dans le Sud, N120E.

" Parmi les phénomènes tectoniques subactuels, on note en particulier, les mouvements verticaux récents, responsables de la formation de plusieurs zones lacustres qui furent plus ou moins comblées par les alluvions actuelles : tel est le cas de la Plaine de Tananarive. "

II. D. - GEOLOGIE DE LA ZONE DES SITES

Les sites étudiés se trouvent dans un rayon d'une trentaine de kilomètres au Sud de Tananarive. La structure d'ensemble est complexe et sujette à bon nombre d'interprétations. Le plus récent levé a été effectué en 1962 par G. DELUBAC, W. RAKOTOARISON, M. RANTOANINA (feuille Tananarive-Manjakandriana au 1/100 000).

II. D. 1. - Situation géologique (fig. 1)

On se trouve dans une zone où s'interpénètrent les formations paragneissiques appartenant au Système du Graphite, métamorphosées au cours de la première orogénèse majeure (2 600 MA) et les granites migmatitiques et migmatites granitoïdes associés au cycle de 500 MA.

Au Nord Est domine le massif du Carion, subcirculaire, constitué de granite porphyroïde.

Au Nord et au Nord Ouest s'étend la Plaine de Tananarive, considérée comme le produit de comblement fluvio-lacustre d'un lac d'origine tectonique récente.

Au Sud Ouest, on a la terminaison nord des coulées volcaniques de l'Ankaratra composées de basalte et d'ankaratrite.

Au Sud apparaît le mont Iharanandriana (connu encore sous le nom de casque de Behenja). Il s'agit d'un granite leucocrate à gros éléments.

Enfin mentionnons les filons granitisés du type Ambatomiranty que l'on rencontre en grand nombre dans cette zone. Ils constituent des faisceaux relativement serrés orientés généralement N40E.

Les sites eux-mêmes sont localisés sur le socle précambrien : celui d'Antaramanana sur l'Ikopa se trouve ancré sur des quartzites de l'ensemble non migmatisé ; celui d'Andranomanga sur la Sisaony se situe au sein de formations migmatisées ; enfin le site de Manantsoa sur l'Andromba est implanté sur des granites migmatitiques et migmatites granitoïdes associés.

II. D. 2. - Migmatites granitoïdes et granites migmatitiques

Ces formations occupant pour les trois sites une large part, il convient de voir quelle est leur signification.

Les termes de migmatite granitoïde et de granite migmatitique ont été appliqués pour la première fois à Madagascar en 1950. Ils ont été définis sur des roches types affleurant à une quarantaine de kilomètres de Tananarive.

Ce sont des faciès de granitisation, mais ils ne se rapprochent pour ainsi dire pas du terme ultime du métamorphisme qui est le granite d'anatexie. Celui-ci semble-t-il ne se rencontre presque jamais.

La différenciation entre migmatite granitoïde et granite migmatitique est basée sur des caractères observés au niveau des affleurements. L'analyse chimique et la composition minéralogique dénotent une identité pour les deux types de roches et l'étude au microscope révèle la même texture. Seulement à l'oeil nu, les migmatites granitoïdes montrent un net alignement des éléments ferromagnésiens qui soulignent ainsi une certaine schistosité ; les granites migmatitiques en sont généralement dépourvus. Néanmoins, pour ces derniers, les éléments ferromagnésiens gardent une certaine orientation mais elle n'est pas toujours décelable au premier coup d'oeil. De ce fait on tend à les prendre facilement pour du granite ordinaire.

En fait sur le terrain, la distinction n'est pas toujours aisée. D'où l'utilisation fréquente de l'expression "migmatite granitoïde et granite migmatitique associés." En effet, on les rencontre souvent en bancs plus ou moins étroitement alternés, leur épaisseur variant du centimètre à plusieurs mètres. Leur cartographie séparée devient impossible, surtout à l'échelle du 1/100 000 couramment utilisée actuellement.

En intercalations, on peut avoir :

- soit des migmatites rubanées classiques, avec alternance de lits ferromagnésiens et de lits quartzo-feldspathiques (cas rencontré au niveau du site d'Andranomanga) ;
- soit des migmatites ocellées (site de Manantsoa).

En général ces formations possèdent des directions et plongements bien définis.

Pour conclure, nous donnerons quelques extraits d'études effectuées sur ces roches :

"Ces roches sont caractérisées par un faciès hétérogène très feldspathisé, de grain variable allant des formes porphyroïdes à des formes à grain fin, avec une foliation nette ... Ces migmatites granitoïdes et granites migmatitiques se présentent en batholites, en coupole, mais aussi en feuillets et en lames d'épaisseur très variable ..." (H. BESAIRIE, 1952).

Du point de vue microscopique, "... la composition la plus courante est : quartz, microcline, albite, oligoclase, biotite (hornblende). La structure est migmatitique avec corrosion et remplacement d'un plagioclase ancien par le microcline avec formation de veinules de quartz tardif. Perthites et mymékites abondent ..." (J. GUIGUES, 1952).

Du point de vue chimique, "... il s'agit le plus souvent d'un quartzite calco-alcalin à prédominance monzonitique, pouvant passer très rapidement à des granites akéritiques ou même à des diorites quartzitiques ..." (L. LAUTEL, 1953).

II. D. 3. - Structure

Les sites d'Antaramanana sur l'Ikopa et d'Andranomanga sur la Sisaony sont implantés d'après la carte au 1/100 000 de la région, dans la série des paragneiss et migmatites associés en bordure du massif de Carion (fig. 1). On a là un faisceau de plis très serrés, de direction générale nord-sud, s'ennoyant vers le Nord à la latitude de Tananarive (voir lever géologique au 1/100 000 de Tananarive Manjakandriana et notice correspondante). Pris séparément, ces plis semblent converger en un endroit précis situé à 5 km à l'Est de Tananarive. Une vue d'ensemble permet de constater qu'ils dessinent un arc incurvé tendant à suivre la bordure ouest du massif du Carion.

Plus précisément, le site d'Antaramanana sur l'Ikopa est situé dans un synclinal orienté nord sud dont les flancs sont constitués par les formations paragneissiques du Système du Graphite, le fond étant migmatisé.

Pour le site d'Andranomanga sur la Sisaony, le rattachement à une unité structurale bien définie est moins net. Signalons simplement dès maintenant que les formations migmatitisées constitutives possèdent une direction NNW-SSE, plongeant constamment vers l'Est.

Le site de Manantsoa sur l'Andromba par contre est localisé dans la zone largement granitisée de la région de Tananarive. On a une association étroite de migmatites granitoïdes et de granites migmatitiques. L'interprétation structurale demeure assez vague, mais au niveau du site même, les formations plongent vers l'Ouest en gardant une direction structurale subméridienne.

CHAPITRE III

LES LATERITES ET LES LAVAKA¹

Les lavaka constituent l'un des principaux facteurs qui risquent de menacer tout type d'ouvrage. Aussi leur présence ou la possibilité de leur formation aux environs d'un site doivent conduire à beaucoup de prudence et à prendre des mesures préventives nécessaires.

On sait que les lavaka résultent d'un phénomène d'érosion "accélérée" affectant les latérites. Nous allons d'abord voir les principaux caractères et les divers types de latérite rencontrés à Madagascar.

III. A. - LES LATERITES

Plusieurs auteurs ont étudié les latérites et le phénomène de latéritisation, et on émis des hypothèses plus ou moins controversées.

Ainsi A. LACROIX (1934) distingue :

- une zone de concrétion superficielle ;
- une zone de départ en contact avec la roche saine.

Cette deuxième zone comporte à sa base une nappe phréatique plus ou moins importante. Les fluctuations de cette nappe, dans une région à alternance de saisons sèches et pluvieuses, créeront une zone limitée où se produiront des mouvements successifs ascendants et descendants du sol, et des conditions successivement réductrices et oxydantes du milieu. Par la suite on a une concentration et une pectisation des solutions riches en hydroxydes constituant la zone superficielle.

H. et G. TERMIER (1960) soulignent l'importance de l'intervention biochimique mise en évidence par Th. HOLLAND pour qui : "... l'énergie néces-

1. En malgache, grammaticalement le substantif est invariable ; seuls les déterminatifs qui peuvent évoquer le nombre sont variables. Aussi, dans ce mémoire, garderons-nous l'écriture du substantif "lavaka", terme purement malgache, tel quel.

saire à la libération de l'alumine pourrait provenir directement ou indirectement des réactions biochimiques qui s'accomplissent sous climat chaud".

Pour ERHART (1967), une distinction entre latéritisation primaire et secondaire est avant tout capitale. La première s'effectue en terrain exondé, la seconde en terrain amphibie. Celle-ci conduit en fait à la bauxitisation.

Il insiste sur le rôle géochimique de la forêt qui sépare la "phase migratrice soluble" (entraînement des éléments en solution) de la "phase résiduelle" (éléments restant sur place). Ces derniers ne seront exportés qu'à la suite d'une déforestation.

En fait, ce qui nous intéresse surtout ici, ce sont les caractères physiques et mécaniques des latérites plutôt que leur mode de formation.

III. A. 1 - Définition

Les latérites résultent de l'altération en zone tropicale de roches cristallophylliennes feldspathiques, plus ou moins riches en éléments ferromagnésiens.

La coupe classique montre :

- un horizon supérieur rouge, compact ;
- un horizon inférieur généralement plus clair, friable, gardant la structure originelle de la roche, et qui se trouve en contact avec la roche saine.

Cependant ce contact ne s'effectue pas directement. On a une zone à boules où celles-ci se trouvent de moins en moins enveloppées de latérite à mesure que l'on s'approche de la roche saine.

Pour avoir une idée de l'importance de ces horizons, nous citerons quelques chiffres pour Madagascar :

- l'horizon supérieur peut aller jusqu'à 15 m dans la région du lac Alaotra (P. BRENON) ;
- l'horizon inférieur structuré peut atteindre 100 m dans la région est (ERHART).

Dans la région des sites étudiés ici, le premier ne dépasse guère 6 m ; le second peut atteindre 30 m sur la partie observable, mais l'altération réelle descend nettement plus bas (cas du site d'Antaramanana sur l'Ikopa). La zone à boules varie largement suivant le terrain, mais le maximum observé oscille entre 15 et 20 m pour les migmatites granitoïdes.

III. A. 2. - Phénomène d'altération

De façon générale, les éléments feldspathiques et ferromagnésiens s'altèrent sous l'imprégnation d'eau et donnent naissance à des produits argileux. Le quartz lui, inaltérable, garde sa forme primitive.

Plus précisément, l'imbibition d'eau entraîne la libération de la silice et des hydroxydes des éléments feldspathiques et ferromagnésiens. "Les bases alcalines et alcalino-terreuses (Ca, Mg, K, Na), ainsi que toute la silice des silicates autres que la kaolinite sont exportées" (ERHART, 1967) (entraînées par l'eau à l'état de solution). Il reste sur place : du quartz (sous sa forme primitive), de la kaolinite, des hydroxydes de fer et d'alumine.

III. A. 3. - Les latérites de la zone des sites

Il y a autant de variétés de latérites que de roches cristallines susceptibles de leur donner naissance. Dans notre secteur d'étude, on arrive à en identifier un certain nombre qui se différencient soit par leur structure, soit par leurs constituants. Elles possèdent cependant des caractères communs qu'il est important de souligner dès maintenant.

L'exposé qui suit comporte une vue générale sur l'ensemble des latérites que nous avons pu observer. Quelques variétés nettement représentatives vont être citées brièvement à titre indicatif. L'étude de détail sera effectuée lorsque nous traiterons des sites eux-mêmes.

a/ Latérite argileuse

Elle représente l'horizon supérieur compact de la coupe classique : peu épaisse, on la rencontre presque partout. Rarement, elle dépasse 2 m.

Des grains de quartz et des débris de quartzite de dimensions variées (généralement petites), constituent les seuls éléments discernables à l'oeil nu. Le reste comprend des éléments argileux ocres, rougeâtres ou noirâtres, intimement associés à des restes de radicule. Les teneurs respectives en Ti, Mn et Fe contribuent à la variation de la couleur.

Les débris de quartzite varient tant en quantité qu'en dimension. Leur présence est fonction de la nature pétrographique de la formation intéressée, ou de la constitution pétrographique de l'environnement. Ils peuvent en effet être autochtones ou allochtones.

1er cas : débris de quartzites autochtones : c'est le cas d'une formation particulièrement riche en niveaux de quartzites ou en filonnets quartziteux. Ceux-ci s'accumulent sur place et donnent des éluvions (fig. 3). Ce cas

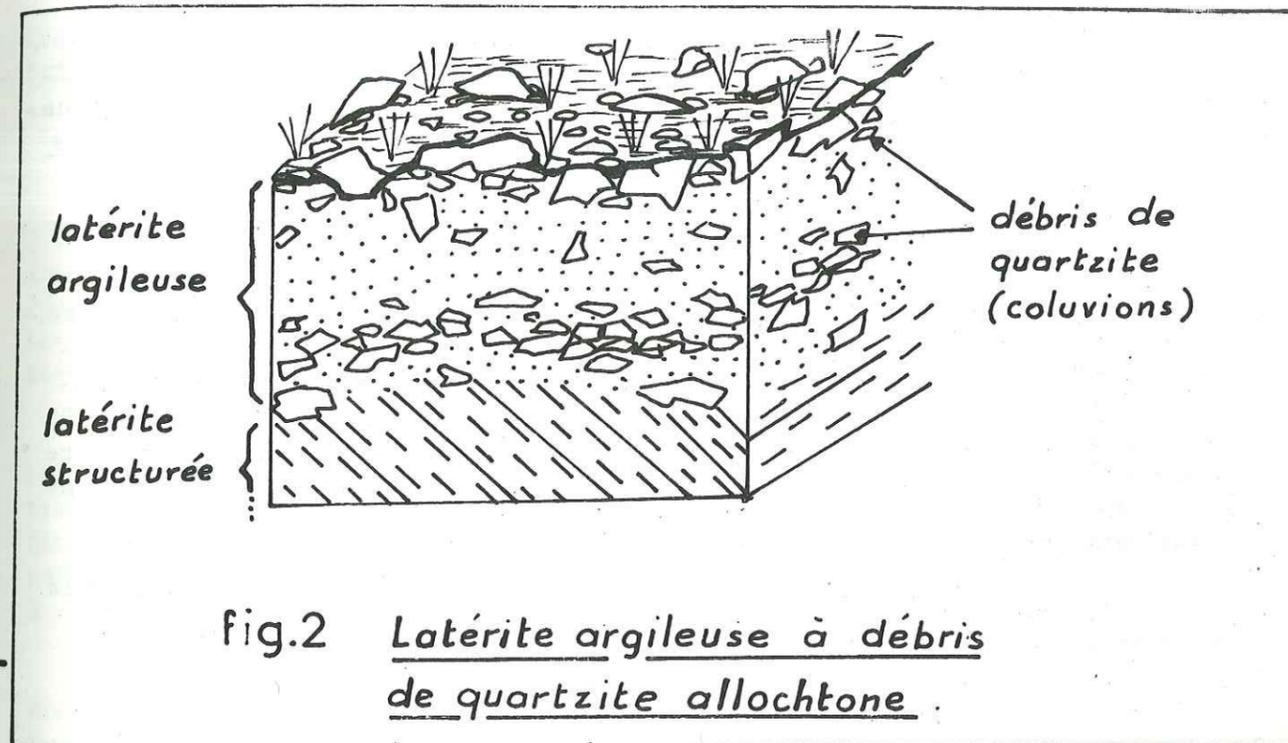


fig.2 Latérite argileuse à débris de quartzite allochtone.

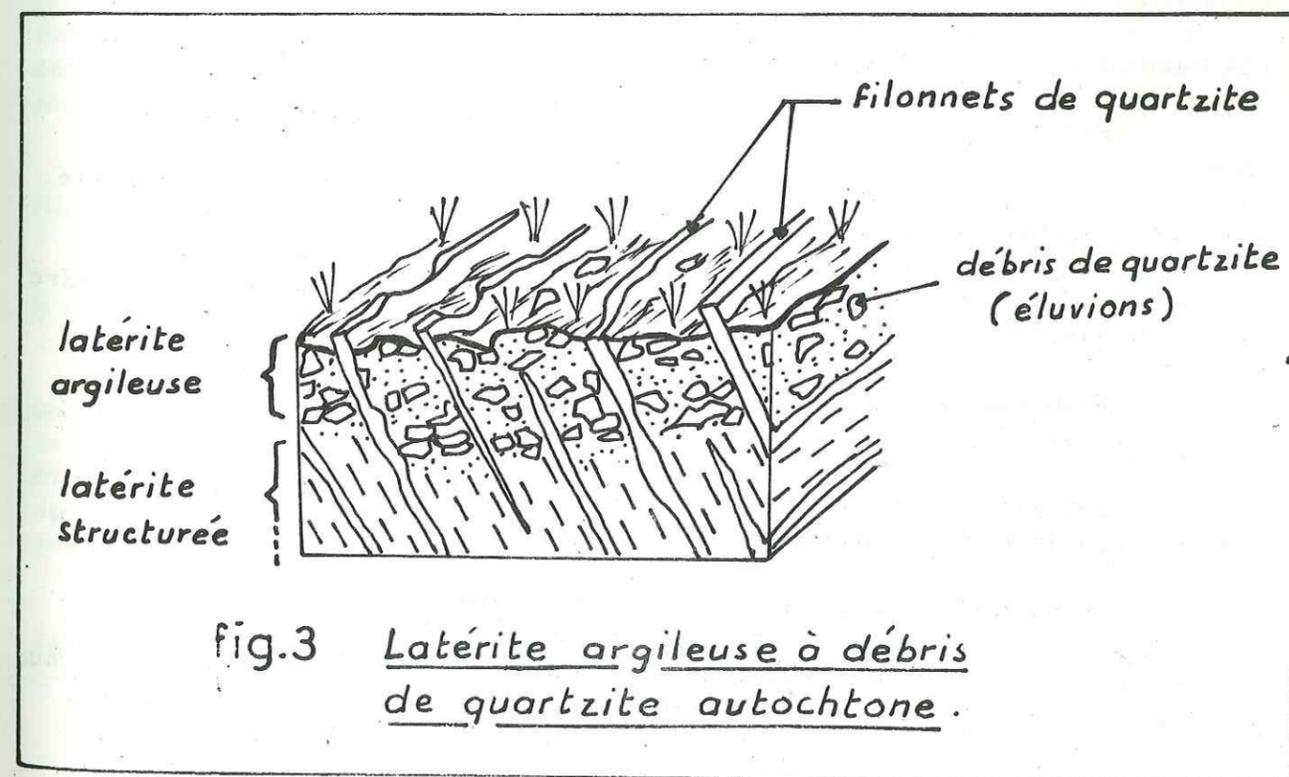


fig.3 Latérite argileuse à débris de quartzite autochtone.

est rencontré dans le prolongement de l'appui rive droite du site d'Andranomanga.

- 2e cas : débris de quartzites allochtones : ce cas est plus courant. Les fragments de bancs de quartzite ou de filonnets de quartz peuvent être entraînés par ruissellement et se rencontrer dans des latérites dont la roche saine sous-jacente ne renferme aucun élément quartzeux. On a à faire alors à des colluvions (fig. 2). Ce cas est typique du site d'Antaramanana.

b/ Latérite structurée

Elle représente l'horizon inférieur de la coupe classique. Plus épaisse, elle est de teinte bigarrée, allant du rouge violacé au blanc jaunâtre selon la nature des minéraux altérés. On reconnaît facilement la structure de la roche originelle. Aussi, pour notre part, préférons-nous utiliser le terme de LATERITE STRUCTUREE pour la distinguer de la précédente. Ce terme reflète le caractère distinctif de cet horizon (conservation de la structure originelle de la roche saine correspondante).

En fait, il existe une grande variété de latérites structurées suivant la roche d'origine.

Ainsi pour les migmatites rubanées du site d'Andranomanga sur la Sisaony, on a :

- roche saine : alternance de bandes quartzo-feldspathiques claires (grisâtres) et micacées sombres (noirâtres). Séquence de 0,5 à 3 cm ;
- latérite structurée correspondante : alternance de bandes claires (blanc sale) et sombres (rougeâtres). Séquence : de 0,5 à 3 cm également.

Pour les migmatites ocellées du site de Manantsoa sur l'Andromba on a :

- roche saine : trame à grain moyen (voisin de 1 mm), de teinte gris clair, enchassant des yeux de feldspath blanc de 1 à 3 cm de dimension.
- latérite structurée correspondante : trame blanc jaunâtre, tachée de traînées rouge noirâtre, enchassant des yeux blancs kaoliniques d'ordre centimétrique.

Pratiquement, parmi ces latérites structurées, on peut différencier des formations "TENDRES" et des formations "DURES".

Les latérites structurées "tendres" forment la partie supérieure qui a subi une altération plus poussée.

Les latérites structurées "dures" se rencontrent au voisinage de la roche saine. Elles sont assez résistantes et plus représentatives encore de la roche d'origine car les minéraux sont à peine altérés. Elles résonnent au choc du marteau, sans donner pour autant des débris tranchants comme la roche saine.

Il importe de mentionner cette différence car elle conditionne la morphologie du terrain et la forme des lavaka. En réalité, le passage du "tendre" au "dur" s'effectue d'une façon progressive avec intercalation de la zone à boules.

III. A. 4. - Caractères spécifiques des latérites structurées

a/ La direction originelle des bancs est respectée : le joint entre 2 bancs latéritisés présente une face lisse parfaitement mesurable. Pour la valeur exacte, il est possible qu'une légère variation se soit manifestée (par exemple par fauchage). Cependant les mesures effectuées sur les latérites structurées permettent d'affirmer si le banc de roche saine correspondante plongeait faiblement ou fortement, vers l'Est ou l'Ouest, était subvertical ou subhorizontal.

b/ La schistosité est conservée : les formations micaschisteuses latéritisées au niveau du site d'Antaramanana, par exemple, présentent une schistosité encore nette. Elle est marquée par les restes non entièrement altérés de biotite. Ici aussi, on peut s'attendre à une légère variation, mais selon toute probabilité, elle est due au déplacement de l'ensemble du banc latéritisé et non pas à celui des micas au sein de la latérite.

c/ La dimension des grains d'origine est reconnaissable : on arrive par exemple à différencier aisément les latérites structurées correspondant à des pegmatites (grains de 2 à 5 mm de diamètre) des latérites structurées correspondant à un granite à grain moyen (voisin de 1 mm). En pratique, cette différenciation peut être faite surtout avec les quartz, qui non altérés, maintiennent fidèlement leur dimension primitive. Pour les feldspaths, leur contour devient assez flou car ils sont tous en voie d'altération, ce qui fausse un peu les dimensions originelles.

III. B. - LES LAVAKA

Le mot "LAVAKA" est un terme malgache qui désigne une excavation à paroi abrupte sur le flanc d'une colline latéritique.

Le mécanisme de formation et d'évolution des lavaka suscite encore beaucoup de discussions. Certains auteurs, comme P. BRENON et J. RIQUIER, se sont penchés sur l'étude du phénomène de "lavakisation" en se basant sur de multiples faits et constatations sur le terrain même. Ils ont ainsi dégagé les données objectives sur les lavaka en général, et émis des hypothèses sur leur genèse, leur évolution et leur stabilisation.

Cependant ces études sont très générales et l'explication du phénomène est loin encore d'être établie scientifiquement.

Dans ce chapitre, nous cherchons simplement à présenter l'aspect

physique des lavaka et à évoquer la conception actuelle sur leur formation. Ceci permettra au lecteur d'apprécier dès maintenant le danger offert par les lavaka pour les ouvrages. Les données suivantes sont inspirées des travaux de P. BRENON, 1952, et de J. RIQUIER, 1954.

III. B. 1. - Condition de formation

Les lavaka se développent en présence d'un sol rouge compact plus ou moins durci (correspondant à notre latérite argileuse), surmontant une zone d'altération de la roche, épaisse et friable (correspondant à notre latérite structurée).

III. B. 2. - Formes et dimension

Le type classique comporte :

- une cavité en forme de cirque, creusée dans le flanc d'une colline latéritique et encombrée d'éboulis ;
- un orifice en goulot étroit, en bas de pente, qui relie la cavité à une vallée de sortie ; cet orifice n'est qu'une rigole profonde empruntée par l'eau d'évacuation de la cavité ;
- un cône de déjection très plat à l'aval du goulot.

En fait les lavaka se présentent sous des formes très variées. Il y en a qui sont nettement allongés (cas observable sur le site d'Antaramanana), d'autres sont disposés en éventail (cas observable sur le même site et sur le site de Manantsoa). Parfois le lavaka est très ouvert sur la vallée et possède la forme d'un demi-cercle, le goulot étroit étant éliminé (cas observable sur le site d'Antaramanana).

Pour P. BRENON, l'excavation débutante est de l'ordre de 100 m^3 et pourrait aller jusqu'à quelques centaines de milliers de mètres cubes. Le lavaka moyen a une profondeur de 30 à 40 m, une largeur de 100 à 120 m et une longueur de 150 à 250 m (fig. 4). Toutefois la profondeur dépasse rarement 100 m à l'exception en particulier de la région du lac Alaotra.

III. B. 3. - Genèse

L'horizon supérieur compact constitue un manteau protecteur pour l'horizon inférieur structuré. Toute cause qui entame ce manteau risque de provoquer un lavaka.

Se basant sur ce principe, J. RIQUIER étudie d'une façon systématique les causes, naturelles ou artificielles, externes ou internes pouvant endommager le manteau.

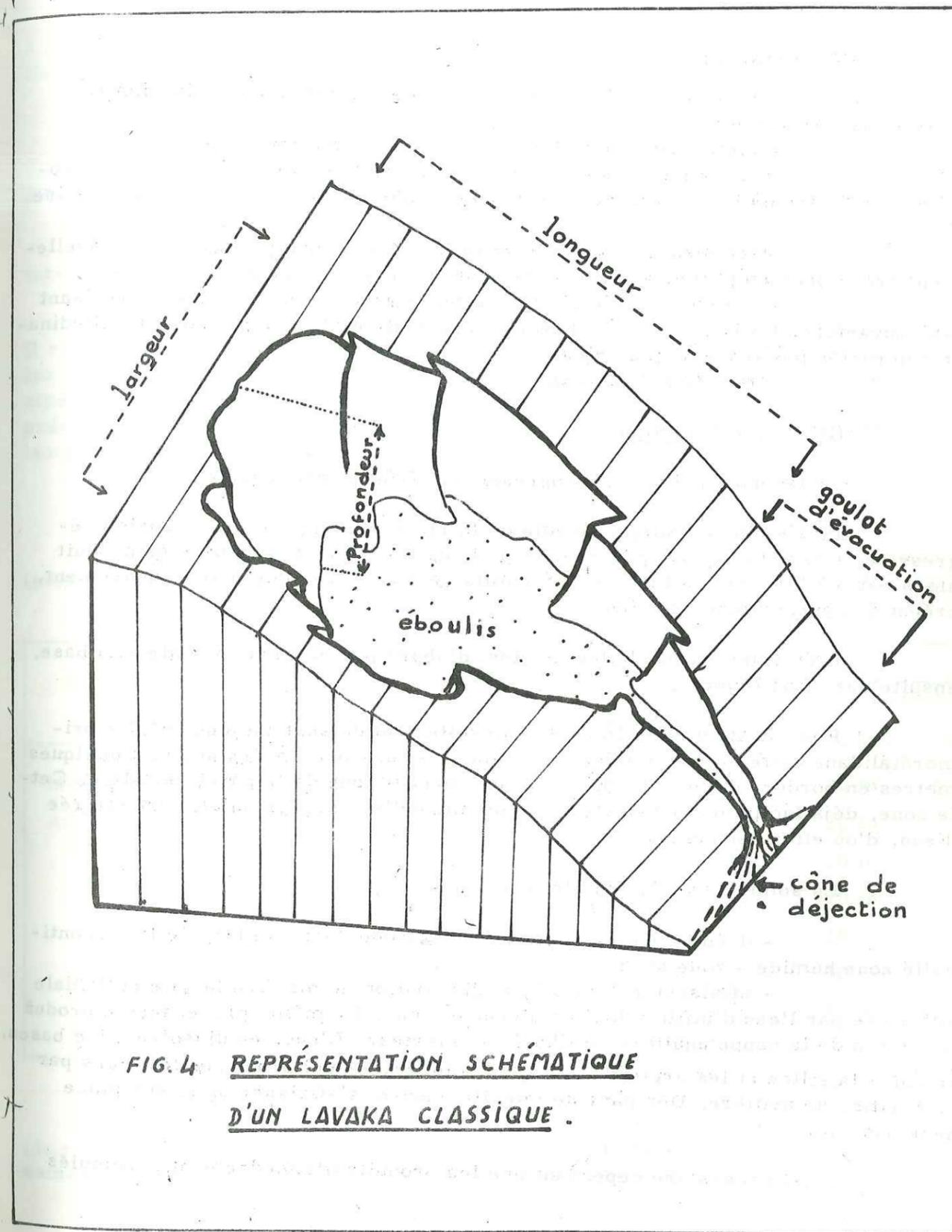


FIG. 4. REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE
D'UN LAVAKA CLASSIQUE.

Nous citons :

- le phénomène d'érosion en nappe qui dégénère en érosion, en rigole, puis en ravin ;
 - glissement ou effondrement de terrain à mi-pente ;
 - un fleuve ou une rivière sapant les latérites à leur base, provoquant ainsi la formation d'un abrupt où la zone friable (latérite structurée) est mise à nu ;
- les fossés artificiels entourant les anciens villages, ou nouvellement créés pour empêcher les ruissellements de se déverser sur les routes ;
- les chemins de piétons et les passages des zébus, en détruisant les couvertures herbacées, contribuent à la formation d'une dépression longitudinale empruntée par les eaux pluviales. ;
- les talus des routes.

III. B. 4. - Evolution

Le lavaka ainsi formé progresse par érosion remontante.

P. BRENON souligne le rôle de la rigole interne qui, par érosion régressive, libère la nappe aquifère de l'horizon inférieur. L'évolution se produit alors par affouillement à la base des profils déjà raides et qui, par effondrement, créent des parois subverticales.

L'élargissement s'effectue ainsi d'abord par érosion normale à la base, ensuite par affouillement.

Pour J. RIQUIER, l'eau de ruissellement de surface joue un rôle primordial dans cette évolution par infiltration dans une fente préexistante à quelques mètres en bordure des lavaka ou par écoulement le long de la paroi verticale. Cette zone, déjà facilement érodable, est entraînée d'autant plus qu'elle est saturée d'eau, d'où effondrement.

En somme, l'évolution s'effectue par :

- décollement successif d'une plaque de sol le long de la discontinuité zone humide - zone sèche ;
- affaissement causé par disparition de matière (argile colloïdale entraînée par l'eau d'infiltration) au niveau du mur. Le même processus se produit au niveau de la nappe aquifère de l'horizon inférieur. L'eau, en dissolvant les bases, entraîne la silice et les argiles à l'état de solution, ce qui provoque des vides par disparition de matière. Des pans de latérite peuvent s'affaisser ainsi sur place sans basculer.

Il est nécessaire cependant que les produits d'effondrement accumulés

à l'intérieur soient enlevés pour que l'évolution puisse continuer. Ce travail est l'oeuvre d'une érosion active lors de la période des pluies.

III. B. 5. - Stabilisation naturelle

Ce stade est atteint lorsque le déblaiement des éboulis ne peut plus se reproduire. Ceux-ci, par leur présence même, empêchent d'autres éboulements.

Cet arrêt d'exportation peut s'expliquer par l'établissement d'une couverture végétale sur les éboulis et même sur les parois.

Par la suite, tous les angles s'arrondissent, les abrupts disparaissent. Il reste finalement une vaste dépression. Pratiquement, selon J. RIQUIER, toutes les dépressions en cirque sont d'anciens lavaka. Elles peuvent elles-mêmes participer à d'autres cycles de "lavakisation" si les causes naturelles ou artificielles précitées se manifestent. Divers cycles de "lavakisation" sont ainsi visibles sur les pénéplains.

III. B. 6. - Les lavaka dans la région des sites étudiés

En nous référant aux études précédentes, il s'agit pour notre région de lavaka moyens. Voici à titre indicatif les dimensions de quelques-uns d'entre eux.

Site	Lavaka		
	longueur	largeur	profondeur
Manantsoa sur l'Andromba	100 m	40 m	10 m
Antaramonana sur l'Ikopa	100 m	50 m	20 m
"	120 m	20 m	30 m
"	75 m	25 m	30 m
"	120 m	45 m	30 m
"	180 m	75 m	30 m
"	200 m	45 m	40 m

D'une façon générale, le site d'Andranomanga ne présente pas de lava ka (du moins la zone couverte par notre carte). On a plutôt des boules et des roches saines subaffleurantes. La zone latéritique reste mince et très localisée.

Le site de Manantsoa comporte un certain nombre de lavaka récents. Leur situation et leur forme sont fonction de la nature et de la disposition structurale des bancs originels. On y rencontre également, sous forme de dépressions, quelques empreintes d'anciens lavaka.

Quant au site d'Antaramanana, les lavaka y abondent. En effet, les zones riches en formations gneissiques sont profondément latéritisées de telle sorte que les lavaka trouvent un terrain de choix pour s'établir. Formes ovoïdes, allongées ou en éventail, interférence de 2 lavaka, évolution par affaissement ou par écroulement : tous ces aspects sont rencontrés au voisinage de ce site (voir carte).

En général, on ne rencontre pas de lavaka en pleine évolution aux environs immédiats des appuis des barrages considérés, car ils auraient constitué un critère d'élimination pour le site au cours du tri préliminaire. La possibilité de leur apparition lors du fonctionnement de l'ouvrage n'est cependant pas à exclure, et ce problème sera examiné avec soin lors de l'étude de chaque site.

CHAPITRE IV

AMENAGEMENT DE LA PLAINE DE TANANARIVE

IV. A. - DONNEES GEOGRAPHIQUES

Située grosso modo entre Y = 430 à 490 et X = 780 à 820 dans la zone des Hautes-Terres, la Plaine de Tananarive couvre environ une surface de 30 000 ha dont 20 400 ha posent encore des problèmes d'aménagement.

La rivière principale qui la traverse est l'Ikopa (fig. 5).

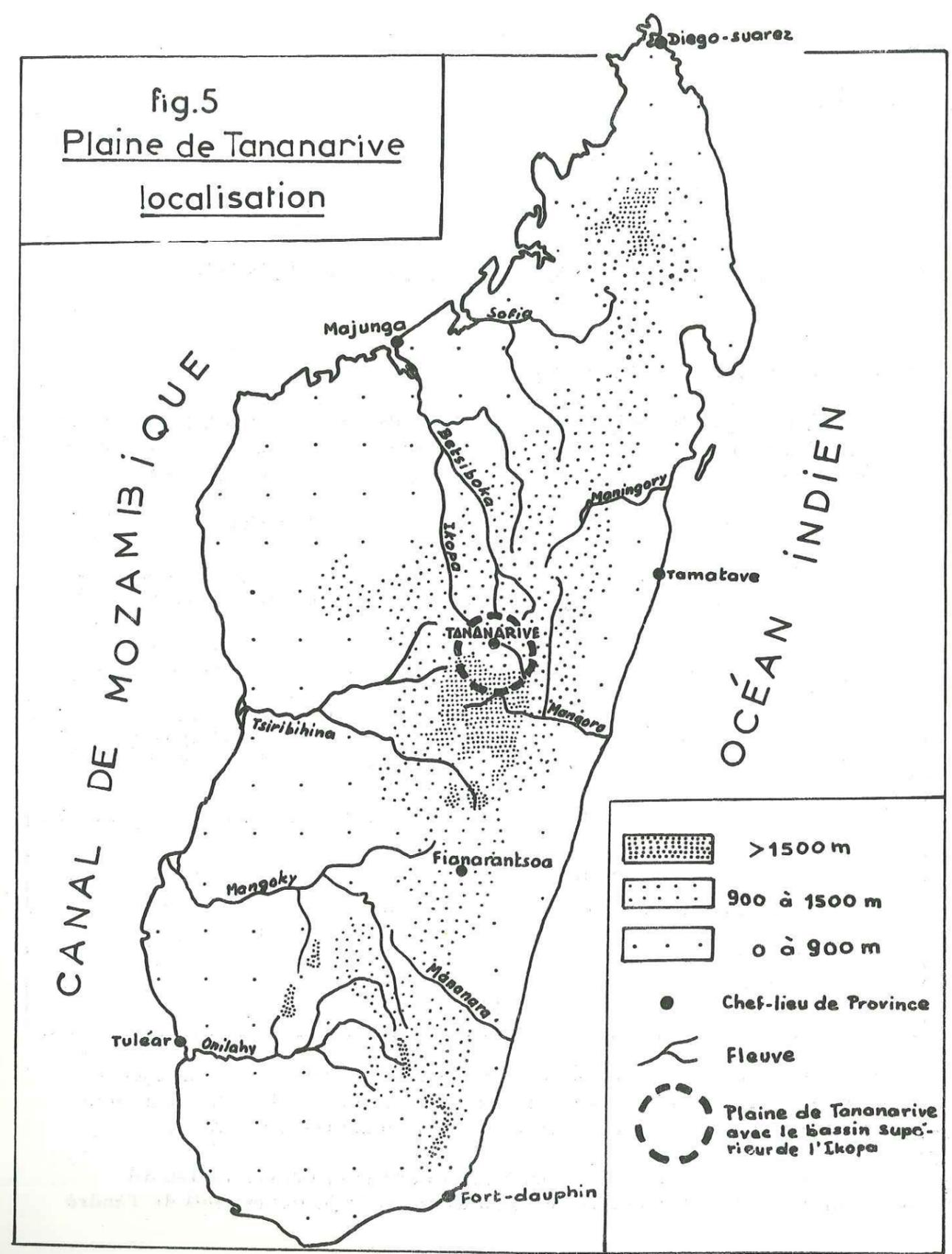
Ci-dessous, nous présentons un tableau qui donne les débits des rivières importantes. Il a été tiré des documents de la SOGREA (avril 1968).

Rivière	Débit en m ³ /s	
	en période d'étiage	en période de crues
Ikopa avant les confluences	26	225
Ikopa après les confluences	30	350
Sisaony	1	110
Andromba	3	100

Ces rivières décrivent de nombreux méandres, ce qui indique une vitesse d'écoulement lente avec une large sédimentation. Les débits solides sont importants vu la nature latéritique des terrains traversés.

La plaine alluviale se retrécit nettement au niveau du lieu dit Beyomanga. De là l'Ikopa se fraie un passage étroit jusqu'au seuil de Tendro

fig.5
Plaine de Tananarive
localisation



pour aboutir aux chutes de Farahantsana. De Bevomanga à l'aval des chutes, la distance à vol d'oiseau est de 7 000 m et la dénivelée de 55 m (fig. 1).

IV. B. - DONNEES GEOLOGIQUES

Comme nous l'avons indiqué au chap. II "Cadre géologique", la Plaine de Tananarive est comprise dans le Système du Graphite à fond généralement migmatitique.

Les éléments structuraux de l'ensemble restent mal définis. De nombreux replis existent mais leur identification s'avère très confuse par suite du manque d'affleurement de roches saines.

Du point de vue tectonique, une possibilité de rejeu d'anciennes failles est mentionnée dans plusieurs ouvrages, C'est ainsi que P. BRENON, en mai 1952, présume qu'une surélévation tectonique, résultant d'un rejeu de vieilles fractures (paléozoïques ou précambriennes) lors des dernières émissions volcaniques de l'Ankaratra (Quaternaire) a affecté un panneau du Système du Graphite au niveau de Tsarazafy-Ambohimanoa (fig. 1). Ce panneau se serait mis en travers de la vallée de l'Ikopa et aurait donné naissance à un lac de barrage d'origine tectonique.

R. BARBIER et G. NOIZET (1967) demeurent cependant sceptiques sur cette interprétation. Compte tenu de la surface assez régulière de cette région, ainsi que de la latéritisation étendue jusqu'au niveau de la rivière sans laisser décoller de massifs rocheux nets sur les versants (résultats de rajeunissement de relief), cette surélévation "n'a pas eu lieu, ou a été de très faible amplitude et non décelable par les déformations des surfaces" (R. BARBIER, mai 1967).

IV. C. - PROBLEMES DE LA PLAINE DE TANANARIVE

L'état de comblement encore imparfait de la Plaine de Tananarive entraîne des conséquences néfastes telles que le mauvais drainage de la plaine et les risques d'inondations en période de crues, ce qui pose de sérieux problèmes d'aménagement.

IV. C. 1. - Mauvais drainage

Le seuil de Bevomanga constitue le niveau de base de la Plaine de Tananarive.

Pour éviter la dévastation des rizières et des zones basses par l'eau en période de crues, les rivières ont été endiguées. Cependant une érosion active et intense continue à s'effectuer en amont, et la rupture de pente, marquée par les

chutes de Farahantsana, est plus que propice à une rapide sédimentation.

Ceci entraîne une surélévation notable des lits des rivières, si bien que par endroits, ils dépassent de quelques mètres la cote moyenne de la plaine.

Ainsi le drainage s'effectue très mal, comme en témoigne l'abondance des marais (sur les 20 400 ha à aménager, il y a 6 700 ha de marais, soit un tiers). En outre pour certains points bas, le drainage ne peut être obtenu continuellement dans l'année, à cause des crues. A l'aval du marais de Laniera par exemple, il faudrait pouvoir drainer à la cote 1246,0, alors qu'on obtient actuellement une cote de 1248,5 dans la même zone, dans l'Ikopa pendant plus de 30 jours par an.

IV. C. 2. - Les risques d'inondation

En saison des pluies, et plus particulièrement pendant les périodes cycloniques, l'unique sortie trop étroite du seuil de Bevomanga ne suffit plus à évacuer convenablement l'eau.

De ce fait, le niveau des rivières monte considérablement. Il suffit alors qu'il y ait débordement ou que des brèches soient ouvertes au niveau des digues sous l'effet de la pression et de l'affouillement pour que l'eau envahisse la plaine.

D'autre part il y a aussi le problème d'accumulation des eaux pluviales pendant la période où le niveau de l'Ikopa ne permet pas le drainage gravitaire.

IV. D. - PROJET D'AMENAGEMENT

L'extension des faubourgs de la capitale vers les zones basses et le rôle économique important que joue la Plaine de Tananarive en tant que zone agricole nécessitent un assainissement judicieux et une protection efficace contre les inondations.

Plusieurs aménagements ruraux ont été réalisés mais les résultats s'avèrent très insuffisants. On a pensé ainsi à procéder à un aménagement de grande envergure.

1/ En aval : par abaissement du niveau de base de l'Ikopa afin de donner au lit des rivières la possibilité d'atteindre un niveau permettant le système de drainage naturel par érosion régressive. Il faut pouvoir abaisser la cote des basses eaux de l'Ikopa de 3 m environ dans toute la zone de la Basse Ikopa, de la Basse Sisaony et de la Basse Andromba pour éviter les submersions prolongées des points bas ;

- par élargissement de la sortie pour faciliter l'évacuation des eaux en période de crues ;

2/ En amont : par la création de barrages sur les rivières responsables des crues pour assurer :

- une meilleure irrigation de la plaine en saison sèche,
- un meilleur laminage des crues,
- le besoin futur en eau de Tananarive.

IV. E. - SOLUTIONS ENVISAGEES

IV. E. 1. - Zone aval

Parmi les solutions proposées, nous citerons :

- la solution tunnel
- la solution chenal.

a/ Solution tunnel

Elle consiste à creuser un tunnel sur 7,5 km de long, partant en amont du seuil de Bevomanga. Il aurait une section circulaire de 7 m de diamètre avec une pente de 7 ‰.

Mais depuis 1967, après des études géologiques préliminaires effectuées successivement par G. NOIZET et R. BARBIER, les promoteurs ont abandonné cette solution compte tenu de l'aspect trop aléatoire de la réalisation.

En effet, les affleurements de roches saines sont rares et les collines trop latéritiques pour que l'on puisse faire une prévision géologique valable en profondeur concernant le passage de la galerie. Beaucoup de reconnaissances appropriées s'avèrent encore nécessaires. Toutefois, tant du point de vue perforation que de la stabilité des parois, des difficultés restent à prévoir par suite de l'épaisseur de la couverture latéritique qui, par sa nappe aquifère, apporterait une charge considérable au niveau des roches décomposées et du tunnel.

b/ Solution chenal

Il y a vingt ans, on a tenté d'effectuer un déroctage partant de Farahantsana pour abaisser le niveau de base de l'Ikopa. La solution fut abandonnée car trop onéreuse.

Actuellement on a adopté une solution par creusement d'un chenal pilote selon un tracé évitant une superposition au lit actuel, ce qui permettrait ainsi un travail à sec. Elle consiste à creuser fortement à l'aval jusqu'à la zone où

le lit rocheux s'enfonce suffisamment pour n'être plus gênant, et à l'amont de cette zone à laisser se creuser naturellement le lit de la rivière par érosion régressive dans les alluvions meubles" (A. REY, décembre 1968).

Cette solution semble plus facile à réaliser. En effet, contrairement à la solution tunnel, on cherche ici à éviter le plus possible le bed rock pour ne pas avoir recours à trop de déroctage. "Les problèmes pour la solution précédente, tels que le manque d'affleurements de roches saines et l'épaisseur de la couverture latéritique, deviennent un avantage pour le choix du tracé du chenal" (R. BARBIER, 1967).

En outre cette solution bénéficie de la rentabilité des sondages géophysiques et des essais au pénétromètre (G. NOIZET, 1967). Le Service Géologique de Madagascar et le L. B. T. P.¹ ont contribué à l'étude préliminaire de cette solution. "Plusieurs profils de vallée ont déjà été étudiés et les résultats sont satisfaisants dans leur grande ligne" (G. NOIZET, 1967).

En définitive il n'y a que le seuil de Tendro qui nécessite un déroctage total car il est constitué de migmatites charnockitiques peu altérées. Le reste, à l'exception de quelques déroctages modérés sur certains points, ne présente pas de difficultés énormes.

IV. E. 2. - Zone amont

Pour la zone amont, il n'y a que la solution barrage à prendre en considération.

La décision a été prise de faire étudier un certain nombre de sites possibles sur les rivières responsables des crues, à savoir : l'Ikopa, la Sisaony, l'Andromba.

Un tri préliminaire, pour des raisons autres que géologiques a été effectué avant l'arrivée sur place de R. BARBIER. Celui-ci a opéré en mai 1967, un second tri pour des raisons géologiques cette fois. Il a été surtout conditionné par la qualité des appuis.

En général, l'élimination des sites initialement proposés a été due

1. Laboratoire des Bâtiments et des Travaux publics.

à la nature trop latéritique des roches et à la présence de lavaka à proximité des appuis. Parfois aussi les roches saines n'affleurent pas franchement ; elles sont plus ou moins associées à des boules noyées dans de la latérite.

Toutefois, aucune reconnaissance géologique préliminaire complète n'avait été faite sur la plupart de ces sites à l'opposé de la zone aval.

Après la visite de R. BARBIER, un certain nombre de barrages ont été présumés réalisables :

- sur l'Ikopa : le site d'Antaramanana ;
- sur la Sisaony : le site d'Andranomanga ;
- sur l'Andromba : le site de Manantsoa.

(Voir leur emplacement sur la fig. 6).

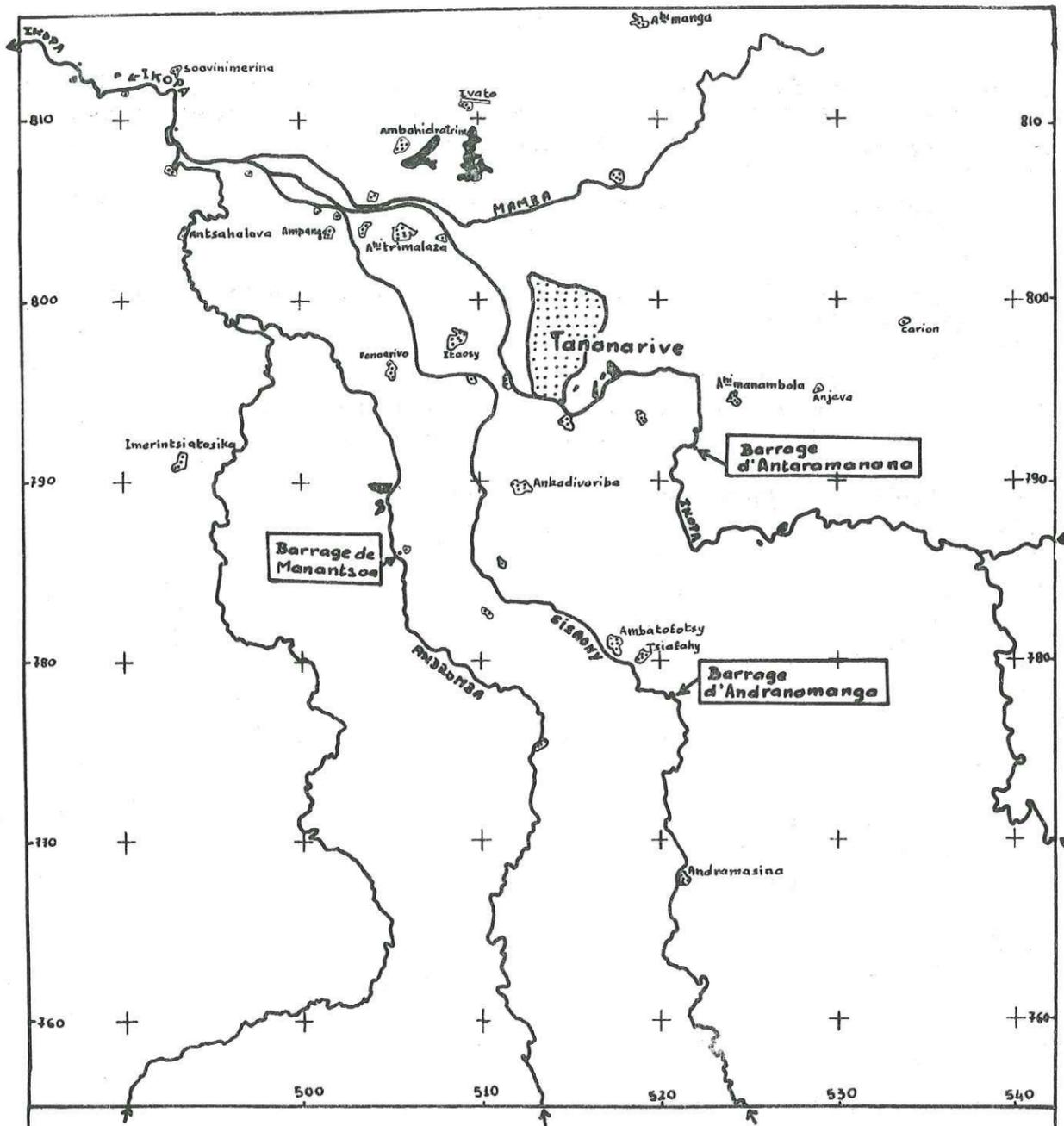


fig.6
situation géographique des 3 sites étudiés

-  les principales rivières
-  les principales agglomérations
-  les principaux lacs



Docu. SOGREAH - 68

CHAPITRE V

SITE D'ANDRANOMANGA SUR LA SISAONY

Géographiquement le site d'Andranomanga est situé sur la rivière Sisaony, à 3,5 km environ du village de Tsiáfahy, en $x = 777,85$ et $y = 520,85$. Partant d'Ambatofotsy, à une vingtaine de kilomètres de Tananarive, la route Tsiáfahy-Anosibe le domine à l'Est.

Connu encore sous l'appellation de site n° 4, il se trouve assez en amont sur la Sisaony (fig. 6). A cet endroit, celle-ci coule à 1 276 m d'altitude, soit une différence de niveau de 31 m pour une distance de 33 km à vol d'oiseau. Sa largeur moyenne est de 30 à 40 m au niveau du site. Le limnigraphe (à 5 km en aval) indique un débit d'étiage de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ mais il peut atteindre un plafond de $95 \text{ m}^3/\text{s}$ en période de crue.

Diverses visites du site ont été faites par G. NOIZET (avril 1967) et R. BARBIER (mai 1967). L'ensemble de leurs travaux, présenté dans le rapport SOGREAH R. 9312-1 sur l'Aménagement de la Plaine de Tananarive, nous a permis de concentrer notre étude sur certains points particuliers.

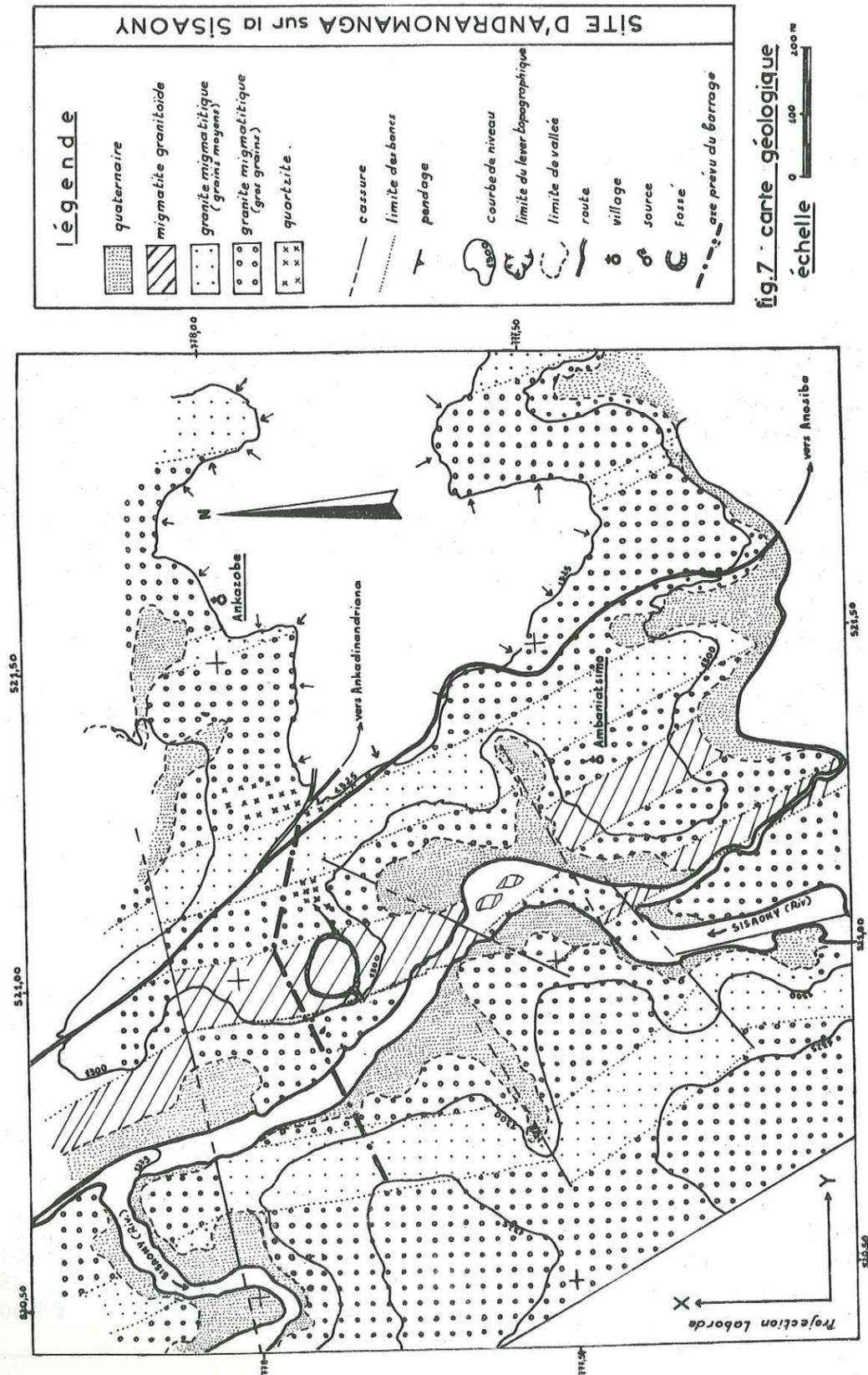
Des essais au pénétromètre et sondages à la tarière ont été effectués par le L. B. T. P. en matière de reconnaissance.

L'axe du barrage a déjà été indiqué. La formule de barrage en terre a été préférée à celle du barrage poids proposée initialement.

Notre travail a consisté à effectuer une étude géologique approfondie de l'emplacement du barrage lui-même et de son environnement de façon à délimiter les problèmes géotechniques qui se posent. Un fond topographique au 1/5 000 nous a été fourni gracieusement par le L. B. T. P.

Donnons d'abord quelques caractéristiques de l'aménagement projeté :

- volume de la retenue au déversoir : en millions de mètres cubes 204
- cote des PHE : en mètres 1 318,20
- cote d'arase de la digue : " 1 321,20
- hauteur maximale de la digue : " 45
- volume de la digue : en milliers de mètres cubes 1 130



Pour l'étude qui va suivre, nous allons voir en premier lieu les caractères géologiques du site avant de dégager les conséquences qui en découlent sur le plan technique.

V. A. - ETUDE GEOLOGIQUE (fig. 7)

Le site d'Andranomanga sur la Sisaony comporte une alternance de bancs de migmatites granitoïdes et de granite migmatitique. Ils sont subaffleurants le long de la rivière, tandis que sur les 2 flancs de la cuvette de retenue, de même que pour la zone d'appui, on ne voit souvent que des boules éparses qui ne sont pas toujours en place, mais qui témoignent néanmoins de la proximité du substratum sain.

De direction générale N168, ces bancs plongent constamment vers l'Est de 20° à 40°. Aucun passage de fracture importante n'est décelé au niveau du site. Quelques petites cassures tout à fait locales affectent les bancs suivant une direction générale est-ouest, c'est-à-dire transversalement par rapport au cours de la Sisaony.

V. A. 1. - Etude pétrographique

A l'étude géologique des feuilles Tananarive-Manjakandriana au 1/100 000 (1962) est jointe la carte la plus récente publiée officiellement sur les environs de Tananarive.

La zone du site d'Andranomanga sur la Sisaony y est considérée comme constituée de "migmatites" (fig. 1). Les auteurs ont précisé que dans ce terme furent rassemblées :

- les migmatites lit par lit,
- les migmatites ocellées,
- les migmatites granitoïdes, intimement associées aux granites migmatitiques.

Nous trouvons ce regroupement judicieux car à l'échelle de 1/100 000 la différenciation est quasiment impossible.

A l'échelle où nous avons travaillé (1/ 5 000), cette différenciation devient non seulement possible, mais indispensable car, en majeure partie, les problèmes du site en dépendent.

Aussi allons-nous traiter séparément :

- les différents faciès rencontrés,
- leur mode d'affleurement,

V. A. 1. -1. Etude pétrographique des différents faciès rencontrés

Nous avons pu différencier au niveau du site :

- des migmatites lit par lit,
- des migmatites granitoïdes du type grain fin,
- des granites migmatitiques.

Ce dernier faciès se subdivise encore en :

- . type à grain moyen (\emptyset \neq 1 mm)
- . type à gros grain (\emptyset variant de 2 à 5 mm)

a/ Les migmatites lit par lit

Elles se présentent en bancs d'épaisseur variable. On les rencontre rarement au niveau du site, et toujours en interpénétration avec les migmatites granitoïdes à grain fin.

La dimension des grains varie autour de 1 mm. Le litage est bien marqué par l'alternance de bandes ferromagnésiennes et quartzo-feldspathiques grossièrement parallèles. Celles-ci dessinent de faibles ondulations très continues. Les parties quartzo-feldspathiques (pauvres en mica) sont de nature granitique. La séquence est variable mais souvent d'ordre millimétrique.

Aspect au microscope (lame mince R. 7945). - La lame comporte une bande riche en minéraux ferromagnésiens, avec, des deux côtés, une partie de bandes quartzo-feldspathiques.

- bande ferromagnésienne (trame) : peu de quartz ; l'orthose est relativement importante, avec beaucoup de fissures. Présence fréquente de myrmékite ; plagioclase rare.

La biotite se présente en petites plages corrodées ; l'orientation des minéraux est visiblement dérangée mais toutefois décelable.

Le sphène constitue un minéral accessoire.

La texture¹ est granoblastique cataclastique.

- bandes quartzo-feldspathiques : les parties observables révèlent les mêmes constituants minéralogiques, mais de dimensions plus grosses. En outre la rareté de la biotite, par rapport à la bande précédente, est remarquable.

Latérite structurée correspondante : l'aspect général est rouge bariolé

1. Par texture nous entendons l'arrangement des minéraux à l'échelle de la lame mince.

de blanc jaunâtre, ce qui souligne le litage de la roche originelle.

Les bandes ferromagnésiennes présentent une teinte rouge à rouge violacé sombre, parfois noirâtre. En les étalant sur la paume de la main, des restes de biotite se dégagent en petites paillettes noires, brunes ou dorées suivant leur degré d'altération.

Les bandes quartzo-feldspathiques présentent une teinte blanc jaunâtre ou brunâtre. C'est l'argile kaolinique, issue de l'altération des feldspaths, qui prédomine ici. On observe des restes d'orthose, plus ou moins durs, enrobés de leur produit d'altération kaolinique. Les quartz, inaltérables, demeurent intacts.

La séquence du litage est d'ordre millimétrique, comme celle de la roche saine. Les faibles ondulations se remarquent également ici. Les cassures et les diaclases sont soulignées par des enduits jaune rouille.

b/ Les migmatites granitoïdes (type à grain fin)

Elles sont également rares pour ce site. On les rencontre en association si étroite avec les migmatites lit par lit précédemment décrites qu'il a été impossible de les individualiser cartographiquement.

Elles se distinguent des migmatites lit par lit par la disparition de l'alternance des bandes quartzo-feldspathiques et ferromagnésiennes. Ce sont des roches leucocrates, à grain fin difficilement décelable à l'oeil nu. Les éléments noirs se trouvent alignés suivant une orientation nettement définie. Les quartz sont parfois aplatis (section allongée parallèle à l'orientation des éléments noirs). Leur longueur avoisine alors 1 mm et ils se dégagent nettement de l'ensemble (échantillon R. 7932).

On remarque également au niveau de l'affleurement quelques traînées quartzo-feldspathiques, larges de 1 cm, non continues mais toujours disposées parallèlement à la schistosité. Enfin, des filonnets pegmatitiques, larges de 2 à 4 cm, recoupent ces migmatites suivant des directions variées.

Aspect au microscope (lame mince R. 7948)

Minéraux :

- quartz à extinction roulante ;
- feldspaths : beaucoup de microcline, peu d'orthose, pas de perthite. Présence de myrmékite, plagioclase rare ;
- biotite en petites plages alignées, à orientation nette ;
- minéraux accessoires : zircon, sphène.

La texture est granoblastique engrenée, moins cataclastique que la précédente.

Latérite structurée correspondante : elle possède une teinte généralement rouge. Les grains sont difficilement discernables car noyés dans leur produit d'altération. Les zones quartzo-feldspathiques se dégagent pourtant de l'ensemble en constituant des traînées blanches d'argile kaolinique. Elles permettent alors de repérer la direction de la schistosité sur les parois latéritiques fraîchement décapées.

c/ Granites migmatitiques à grain moyen

Moyennement fréquents, ils constituent des bancs de puissance généralement faible (30 à 60 m).

La roche est généralement leucocrate. La dimension des grains varie autour de 1 mm.

On ne voit plus ni le litage ni la schistosité caractéristiques des migmatites. En masse la roche présente plutôt une structure grenue. Toutefois, les éléments noirs sont encore relativement alignés et orientés suivant une direction déterminée. Mais cette schistosité est fruste et s'estompe fréquemment de sorte que la roche se rapproche beaucoup plus des granites que des migmatites.

Des filonnets quartzo-feldspathiques, parallèles et discontinus, la sillonnent parfois. D'autre part certains affleurements présentent quelques rares enclaves. Au Nord du village d'Ambaniatsimo par exemple, nous avons trouvé 2 enclaves de micaschistes sur une même boule. Leur surface est petite (quelques dizaines de centimètres carrés), le contact est franc.

Aspect au microscope (lames minces R. 7940, R. 7949, R. 7967)

Minéraux : - quartz à extinction roulante, dimension petite par rapport aux feldspaths,

- feldspaths dominants : il s'agit d'orthose et d'oligoclase en quantité équivalente. Ils se présentent en grandes plages brisées, sillonnées de nombreuses fissures. Pas de perthite. Présence de myrmékite.

- ferromagnésiens : biotite et hornblende verte coexistent en quantité équivalente. Les minéraux sont corrodés, déchiquetés, avec des morceaux entraînés partout. Il semble que les ferromagnésiens ont été de même taille que les feldspaths, mais qu'ils ont été morcelés par suite d'une cataclase.

- minéraux accessoires : beaucoup d'apatite et de zircon ; sphène rare. Présence d'hématite.

Caractéristique de l'ensemble :

- prédominance des éléments quartzo-feldspathiques ;
- l'alignement originel des éléments ferromagnésiens se trouve manifestement dérangé ;

- Texture subgrenue à résidus granoblastiques, parfois nettement cataclastique.

Ce type de formation n'a pas donné ici de latérite structurée. L'altération a en effet dégagé la zone à boules.

d/ Granite migmatitique à gros grain

C'est le faciès le plus fréquemment rencontré au niveau du site.

La teinte générale de la roche est plutôt sombre du fait de l'importance des minéraux noirs qui se rassemblent en amas de 1 à 5 mm de diamètre. Cette disposition est celle aussi des minéraux felsiques. En fait les contours des minéraux ne sont pas bien nets. Les éléments noirs ne présentent aucun alignement à vue d'oeil. La structure apparaît grenue.

Au Nord du village d'Ankazobe (x = 778,02 ; y = 521,42), nous avons rencontré des enclaves de roche litée de taille centimétrique.

Aspect au microscope - (lame mince R. 8006)

- Minéraux :
- quartz : relativement rare, à extinction roulante ;
 - feldspaths : orthose en phénocristaux, souvent maclée Carlsbad ; plagioclase (oligoclase) existant en phénocristaux également. Présence de myrmékite, absence de perthite ;
 - ferromagnésiens : biotite et amphibole associées, avec prédominance de cette dernière. Elles sont particulièrement broyées et déchiquetées, avec des débris entraînés partout ;
 - minéraux accessoires : apatite et zircon.

Caractéristique de l'ensemble : porphyroblastes d'orthose et de plagioclase dans une mésostase. Les éléments feldspathiques prédominent. L'ensemble est de nature cataclastique.

Latérite structurée correspondante : la roche initiale étant très feldspathique, on a une latérite blanchâtre (riche en kaolin) mouchetée de noir ou de rouille. Les grains en voie d'altération, surtout les feldspaths, sont détachables un à un avec les doigts. En fait, on ne voit que très rarement au niveau du site de la latérite structurée "tendre" (à l'ouverture du fossé artificiel côté rive gauche par exemple), et elle n'atteint pas une profondeur considérable (d'ordre métrique). On rencontre plutôt des "dures" (cf. III. A. 3b).

V. A. 1.-2. Modes d'affleurement

a/ Les migmatites lit par lit et les migmatites granitoïdes à grains fins ; on les voit affleurer :

- soit en bancs de 5 à 20 m de puissance tronçonnés par des diaclases ;
- soit en boules : celles-ci sont toujours petites (0, 50 à 3 m), émiettées, sans forme propre mais présentant au moins une face plane, lisse, correspondant à la surface structurale. Les autres faces ne possèdent pas de section franche (fig. 8) ;
- soit sous leur forme latéritique (cas de l'appui rive droite où la latéritisation affecte profondément la roche.

b/ Les granites migmatitiques à grain moyen

Ils affleurent presque toujours en boules qui sont de taille variable mais généralement plus grande que les précédentes (2 m à 6 m de dimension). De forme arrondie ou ovale, elles ne présentent pas de face particulière pouvant matérialiser une schistosité. Elles sont nettement dégagées partout où elles affleurent sauf en rive gauche (endroit prévu de l'appui) et au Sud du village d'Ambaniatsimo, où elles sont presque enfouies sous la latérite argileuse.

c/ Les granites migmatitiques à gros grain

On les rencontre souvent en affleurements massifs ou en boules de taille très variable ; ils ne donnent que très rarement une latérite structurée.

V. A. 2. - Etude structurale

Comme nous l'avons déjà signalé dans le cadre de la Géologie régionale, la structure d'ensemble de la région de Tananarive demeure encore très complexe (cf. II. C.).

La zone du site d'Andranomanga se trouve à :

- 30 km environ au Sud Ouest du grand massif granitique de Carion dont l'origine demeure encore controversée ;
- 40 km au Nord Est des épanchements volcaniques de l'Ankaratra qui datent du Quaternaire ;
- 20 km au Nord Est du "casque de Behenjy" considéré comme un batholite granitique.

Les phénomènes responsables de ces diverses formations ont pu étendre leur influence jusqu'au niveau du site. Par ailleurs, situé en bordure sud est de la Plaine de Tananarive, il n'a pas pu échapper aux effets du rajeunissement de vieilles fractures que l'on considère être à l'origine de cette plaine.

A l'échelle du 1/100 000, où l'on est obligé de rassembler un certain nombre de faciès, et où seules les grandes lignes structurales peuvent être définies, il est évident que la structure de détail qui nous intéresse ne se dégage pas (carte Tananarive-Manjakandriana). Malheureusement, à grande échelle (1/5 000), sa mise en évidence a été rendue difficile en raison du manque d'affleurements. Par la suite, nous avons dû exploiter les renseignements fournis par les boules et les latérites, par rapprochement aux roches saines subaffleurantes, pour déterminer les divers éléments structuraux.

V. A. 2.- 1. Mode opératoire

Les seuls endroits où affleurent des bancs de roches saines, en place, et où peuvent être effectuées de bonnes études pétrographiques ainsi que des mesures de direction et de pendage des couches et des cassures, se situent au niveau de la rivière Sisaony, aux abords du petit affluent droit de cette dernière et au Sud du village d'Ambaniatsimo.

C'est à partir des observations et des mesures faites à cet endroit que, de proche en proche, les éléments structuraux des abords du site ont été déterminés en examinant avec soin les boules et les latérites structurées.

Les boules peuvent, dans certains cas, fournir des indications de direction par exemple quand elles sont alignées. En outre certaines offrent à l'affleurement des faces où des mesures peuvent être faites (cf. V. A. 1.-2.). En comparant celles-ci à celles effectuées sur des roches subaffleurantes, on peut déterminer, sinon la valeur réelle du pendage de la roche sous-jacente, du moins son sens.

Les latérites structurées peuvent donner, elles aussi, des indications précieuses aussi bien sur la nature de la roche saine située en dessous que sur sa direction et son pendage. Malheureusement dans ce secteur de la Sisaony il n'existe que peu d'entailles naturelles dans ces latérites et nous avons été fréquemment obligés de faire creuser des puits ou effectuer des décapages pour les mettre au jour.

V. A. 2-2. Exposé des résultats

La direction majeure des bancs de migmatite (et aussi vraisemblablement des granites migmatitiques) est de N170, soit sensiblement perpendiculaire à l'axe du barrage.

Le plongement de valeur faible de 20° à 40° est constamment vers l'Est.

Des variations de direction ont été observées. Ainsi en rive droite, le banc de migmatite granitoïde à grain fin a fourni les mesures suivantes :

- N160. 40E (au Nord du thalweg aval)
- N168. 30E (partie subaffleurente juste à l'amont du barrage)
- N150. 20E (partie subaffleurente au niveau de la confluence du petit affluent de droite de la Sisaony).

Ces variations sont, à notre avis, dues au jeu de fractures transversales. Les compartiments isolés par celles-ci ont subi des déplacements de l'ordre de 10° au maximum.

En rive gauche on a pu observer les faits suivants (voir fig. 7) : en se déplaçant du Nord au Sud à partir de l'appui rive gauche on suit facilement un alignement de boules de granite migmatitique à grain moyen selon N168 jusqu'à un thalweg. Mais quand on franchit ce dernier, selon la même direction, on rencontre des boules de granite migmatitique à gros grain et non à grain moyen. C'est seulement plus à l'Ouest qu'on retrouve le granite à grain moyen. On peut donc raisonnablement avancer que le thalweg correspond à une véritable faille orientée N65 avec un rejet de l'ordre d'une cinquantaine de mètres (le compartiment sud étant décalé vers l'Ouest).

Une autre cassure particulièrement nette s'observe en rive gauche de la Sisaony. A l'inverse de la précédente qui est sensiblement perpendiculaire à la direction de la foliation, cette seconde fracture est orientée N170. Elle ne fait donc un angle que de l'ordre d'une vingtaine de degrés par rapport à la foliation. Elle se matérialise de diverses façons :

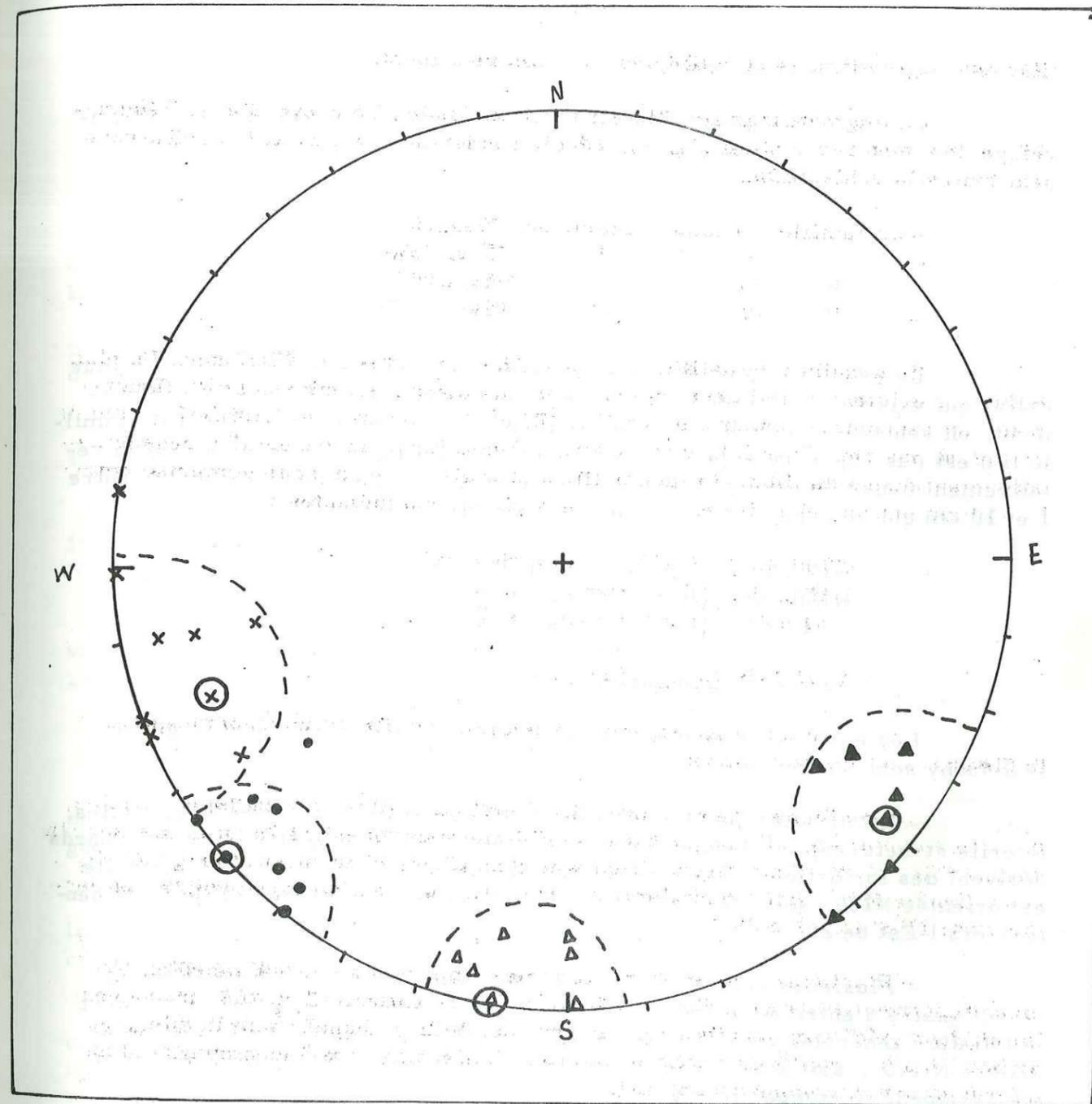
- en $x = 777,15$ et $y = 521,00$, soit à 800 m en amont de l'axe du barrage, on voit en période d'étiage un contact anormal entre deux granites migmatitiques : l'un à grain moyen l'autre à gros grain. Il s'agit d'une brèche tectonique constituée d'un mélange confus d'éléments des 2 granites. ;

- en outre, au même endroit, on peut suivre sur plusieurs mètres, en ligne droite, parallèlement à la Sisaony, une paroi abrupte de 1 à 2 m au-dessus du niveau de l'eau qui correspond vraisemblablement à un miroir de faille. Le compartiment inférieur (est) n'est pas visible car noyé sous la rivière. Il y a eu sans doute effondrement de ce compartiment.

Enfin trois autres fractures ont été relevées en amont de l'axe du barrage (N45, N60 et N65) et une autre en aval (N80).

Du point de vue de la fracturation intime des différents types de formation, nous n'avons pu effectuer une étude de détail que sur les beds rocks du lit de la Sisaony, à quelques mètres en amont de l'axe du barrage. On a là un contact franc, sans joint apparent, entre une migmatite granitoïde (côté est) et un granite migmatitique à gros grain (côté ouest).

Ces deux formations, outre leur différence pétrographique, se distinguent également l'une de l'autre par l'importance relative des diaclases et des



▲	famille I	⊕	Valeur fréquente dans la famille I
●	famille II	⊙	" " " " II
×	famille III	⊗	" " " " III
△	famille IV	⊕	" " " " IV

FIG. 8 Projection stéréographique de diaclases (affleurement type)

filonnets pegmatitiques et aplitiques qui les recoupent.

La migmatite granitoïde est très diaclasée. La projection stéréographique des mesures prises (fig. 8), révèle l'existence de 4 familles qui recourent toutes la schistosité.

- La famille I tourne autour de N40.70E
- " II " " N140.85W
- " III " " N160.80W
- " IV " " N100.80W

Le granite migmatitique ne possède pas toutes ces diaclases. En plus celles qui existent constituent un réseau moins dense. Au niveau de l'affleurement, on rencontre surtout les familles III et IV, rarement la famille I (la famille II n'est pas représentée). Par contre, on note ici la présence d'un réseau relativement dense de filonnets (pegmatites et aplites) d'épaisseur comprise entre 1 et 10 cm qui se répartissent selon les 3 directions suivantes :

- N100.40 W (5 à 10 cm d'épaisseur)
- N150.90 (1 cm d'épaisseur)
- N10.90 (1 cm d'épaisseur)

V. A. 2-3. Conclusion

Les caractères géologiques essentiels du site d'Andranomanga sur la Sisaony sont les suivants :

- les divers types de produits d'altération (latérite argileuse, boules, latérite structurée) qui occupent l'essentiel de la surface du site et de ses abords dérivent des formations migmatitiques et granitiques dont la foliation générale est orientée N160, soit sensiblement perpendiculaire au barrage projeté, et penchée vers l'Est de 20° à 30°.

- Plusieurs accidents relativement importants ont été décelés. En amont quatre d'entre eux, dont l'orientation varie entre N45 et N65 recoupent la foliation générale, tandis qu'un cinquième, le long duquel coule la Sisaony, orienté N 170, soit à peu près parallèle à la Sisaony, a été accompagné d'un effondrement du compartiment est.

En aval un autre orienté N80 recoupe la foliation.

Enfin divers réseaux de diaclases ont été relevés dans chacune des formations.

V. B. - ETUDE GEOTECHNIQUE

Des diverses études préliminaires effectuées avant nos levés de détail, on peut citer les conclusions essentielles suivantes :

- l'appui rive gauche du barrage d'Andranomanga étant constitué de boules présumées en place, le substratum sain doit se localiser non loin de la surface ;

- l'appui rive droite, compte tenu de sa nature très latéritique, pourrait réserver quelques difficultés, voire constituer un obstacle dans le cas où la latéritisation descendrait très bas en dessous du niveau de la rivière ;

- le thalweg central ne pose pas de problème particulier car le substratum sain subaffleure au niveau de la rivière ;

- par mesure de précaution, le projet de barrage poids est rejeté et remplacé par un projet de barrage souple qui pourrait atteindre une hauteur maximum de 45 m si l'appui rive droite le permet ;

- l'emplacement de l'évacuateur de crue et de la dérivation provisoire est indiqué avec une certaine réserve vu le manque de reconnaissance géologique complète du site.

V. B. 1 - Vue d'ensemble

Des caractères géologiques exposés dans le paragraphe précédent, on peut déjà annoncer les problèmes majeurs qui vont se poser du point de vue géotechnique.

- Problème des boules : sur ce site c'est le mode d'altération le plus important; Il faut donc savoir si elles sont en place et si elles se trouvent proches du substratum sain.

- Problème de la latérite structurée : sa présence est réduite. Elle ne connaît un développement intense qu'au niveau des migmatites lit par lit et migmatites granitoïdes à grain fin associées. Nous verrons que la présence d'un réseau de diaclases très serré jointe à leur structure rubanée et schisteuse explique ce développement.

Dans cette zone la possibilité de formation ultérieure des lavaka est donc limitée. Par contre il y a lieu de connaître les caractères mécaniques de cette latérite structurée car elle servira de sol de fondation à une partie du barrage.

- Problème de la latérite argileuse : le problème majeur qui se pose

est celui de son épaisseur. Il convient pourtant de connaître la nature du terrain sous-jacent (latérite structurée, boules ou substratum sain ?) et son niveau d'apparition.

Nous allons étudier ces problèmes pour les trois parties du barrage à savoir les 2 appuis et la zone centrale.

V.B.2 - Etude des appuis

Rappelons la situation générale de la zone du barrage : les bancs des diverses roches migmatitiques et granitiques étant orientés presque parallèlement à la rivière Sisaony (V. A. 2-2), l'axe du barrage leur est disposé en travers. De la sorte le barrage prendrait appui sur des roches de nature et de propriétés différentes.

Remarquons qu'aucune cassure importante n'a été relevée ni à la hauteur des appuis ni à celle de la zone centrale.

V. B. 2-1. Appui rive gauche

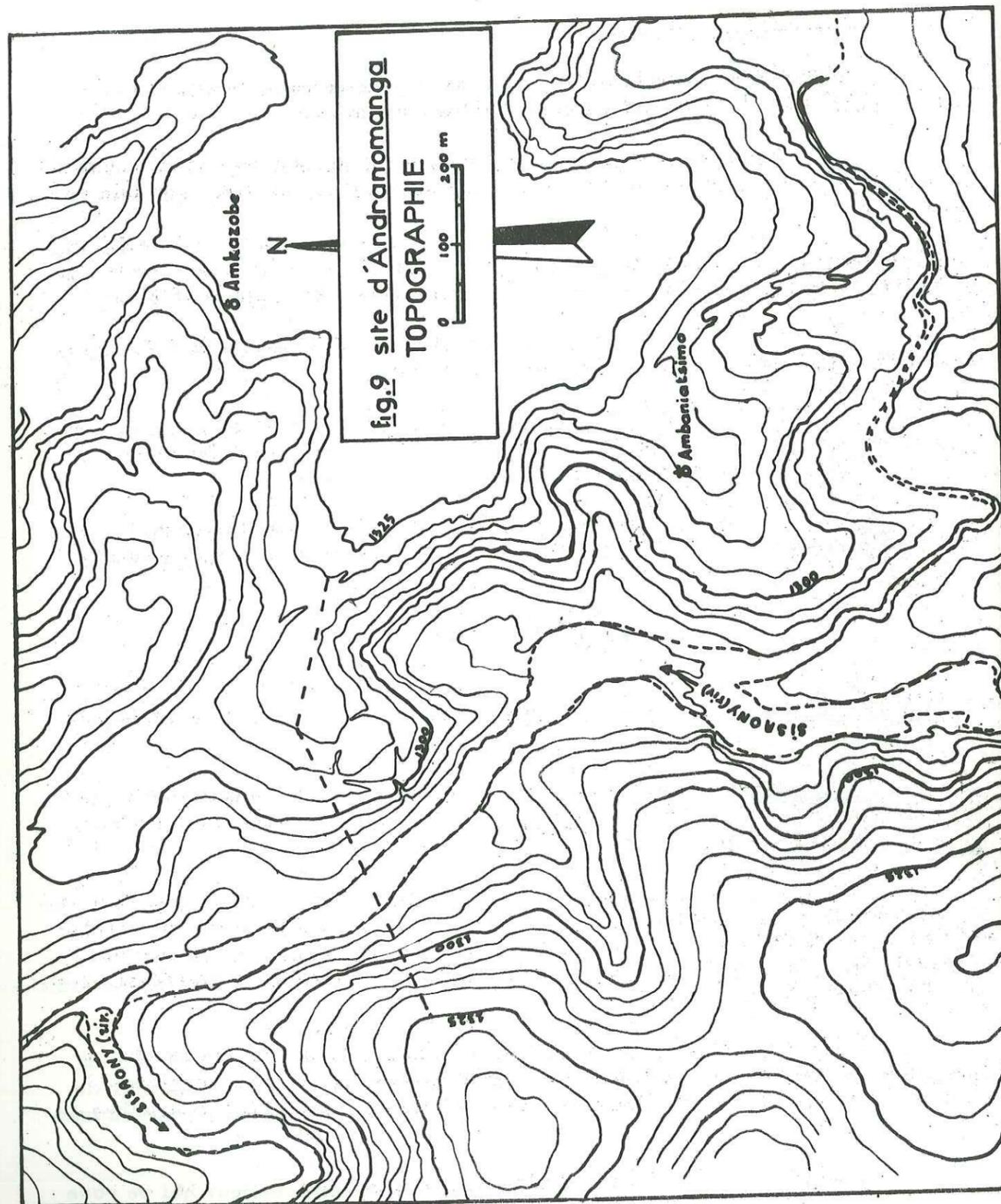
1a/ Du point de vue topographique : l'appui rive gauche est constitué d'une colline haute d'une cinquantaine de mètres dont la pente est assez forte (35 %). Elle se termine à sa base par une petite terrasse alluviale (lit majeur exceptionnel de la rivière). Ce profil de la colline correspond en gros à la surface structurale des bancs, et ce sur une distance de plus de 100 m de part et d'autre de l'axe du barrage, ce qui est un facteur favorable pour un appui de barrage souple (fig. 9).

1b/ Du point de vue géotechnique : la colline rive gauche est formée de granites migmatitiques soit à gros grain, soit à grain moyen.

Le premier affleure sur la partie ouest. Il est massif et ne comporte pas de zone latéritisée (latérite structurée). Il s'agit d'une roche de très bonne tenue : pas de grandes fissures ni de réseau de diaclases important. On a simplement de très grosses boules (5 à 10 m) tout à fait superficielles qui se rattachent presque au substratum affleurant (d'après une observation faite sur une carrière ouverte sur la face nord de la colline).

Le second, à grain moyen, est largement représenté sur la partie est. Il affleure en boules. C'est lui qui doit recevoir en premier lieu le barrage. En elle-même, cette roche ne présente pas d'inconvénance majeure pour un appui de barrage. Avec une structure subgrenue, elle est compacte et résistante. C'est plutôt sa présentation en boules qui pose certains problèmes : les boules sont-elles en place, et le substratum est-il à une profondeur telle qu'un décapage important soit à craindre ?

Il faut d'abord remarquer trois choses :



- les boules sont 'enracinées', c'est-à-dire qu'une grande partie reste enfouie sous les latérites argileuses ;
- leur surface affleurante est souvent très large (5 x 5 m²) ;
- la plupart d'entre elles sont étroitement disposées les unes contre les autres sans toutefois être chaotiques.

Néanmoins quelques-unes (rares) sont nettement dégagées en surface.

Tentons maintenant de répondre aux deux questions énoncées au paragraphe précédent.

i) A quelques exceptions près, les boules sont en place. En effet, une mesure systématique de leurs faces avec projection stéréographique, a été faite dans le but de déterminer leur orientation générale. On constate alors (fig. 10) que les valeurs trouvées tournent autour de trois familles de direction principale :

- N40
- N100
- N160.

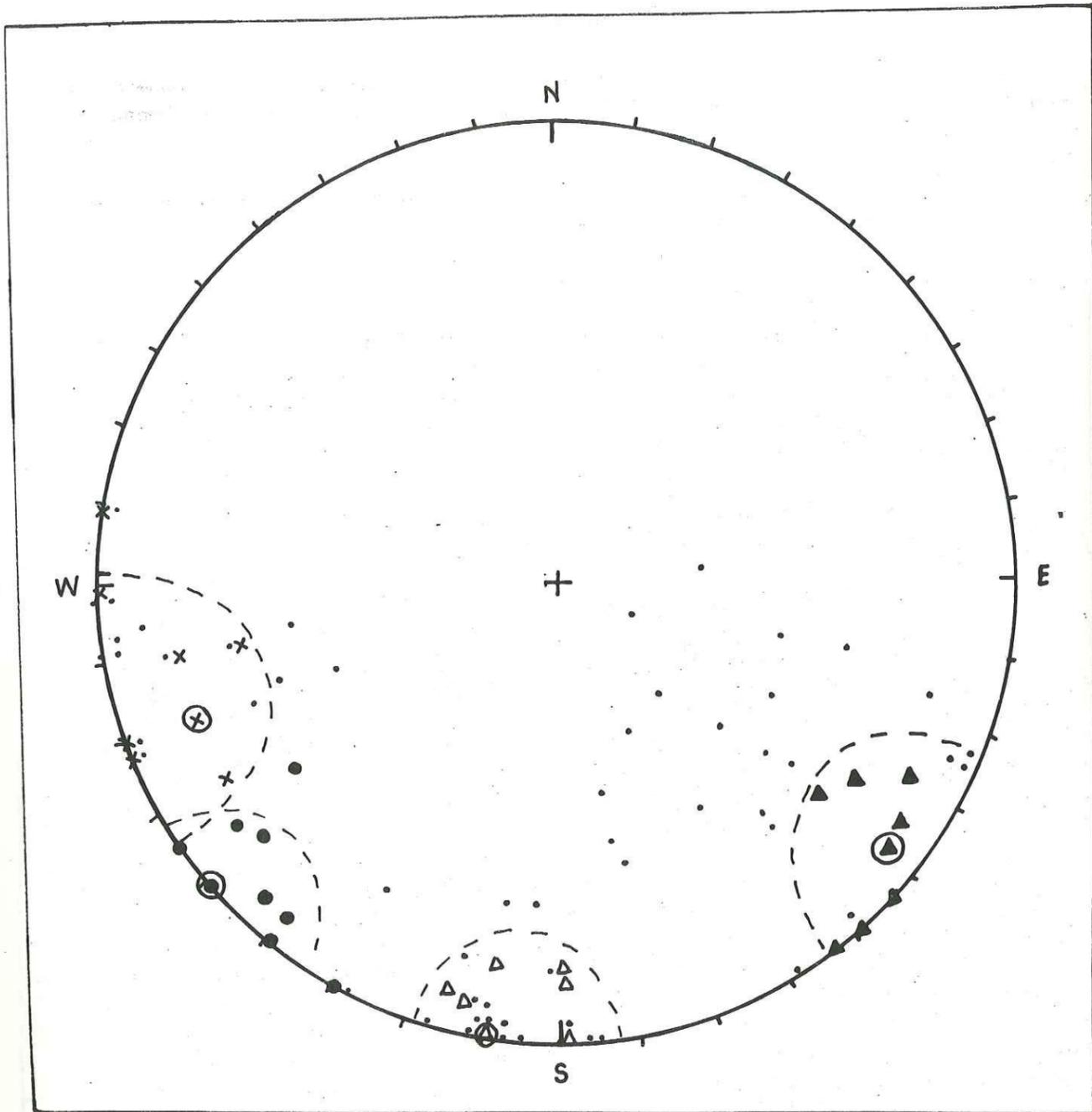
Or on peut remarquer les points suivants :

- les faces d'une boule représentent, avec une certaine approximation, les diaclases du banc originel ;
- les trois familles indiquées correspondent à trois des quatre familles de diaclases rencontrées au niveau de l'affleurement type (cf. V. A. 2-2), lequel se situe non loin de l'appui considéré. Comme aucune cassure n'a été observée entre elles, on peut conclure que ces boules sont bien en place : leurs faces (représentatives des diaclases) possèdent les mêmes directions que les diaclases du substratum sub affleurant.

Les points éparpillés reportés sur la figure de projection représentent les surfaces de certaines boules permettant des mesures appréciables. Il est normal qu'elles varient largement tant en direction qu'en plongement car elles supportent directement l'attaque érosive des agents atmosphériques externes. Toutefois, on peut constater que la direction générale varie entre N140 et N170, ce qui n'est pas loin de la direction générale de la foliation des roches en place à proximité du site.

ii) Le substratum sain se situe à quelques mètres de la surface.

Le fait que les boules restent en place n'entraîne pas nécessairement l'idée de la proximité du substratum sain. En effet, en étudiant le processus d'altération au niveau des boules, on constate que plus elles sont distantes du substratum sain, plus l'altération les affecte largement, et plus les roches saines représentatives (les vraies boules) se trouvent éloignées les unes des autres.



▲ } diaclases de référence
 ● }
 x }
 Δ }

⊙ } valeurs fréquentes des diaclases de référence
 ⊗ }
 ⊕ }

∴ faces des boules de l'appui rive gauche

Projection Stéréographique :
étude comparative des diaclases

FIG.10

fig.11 Evolution de la latérisation au niveau des boules

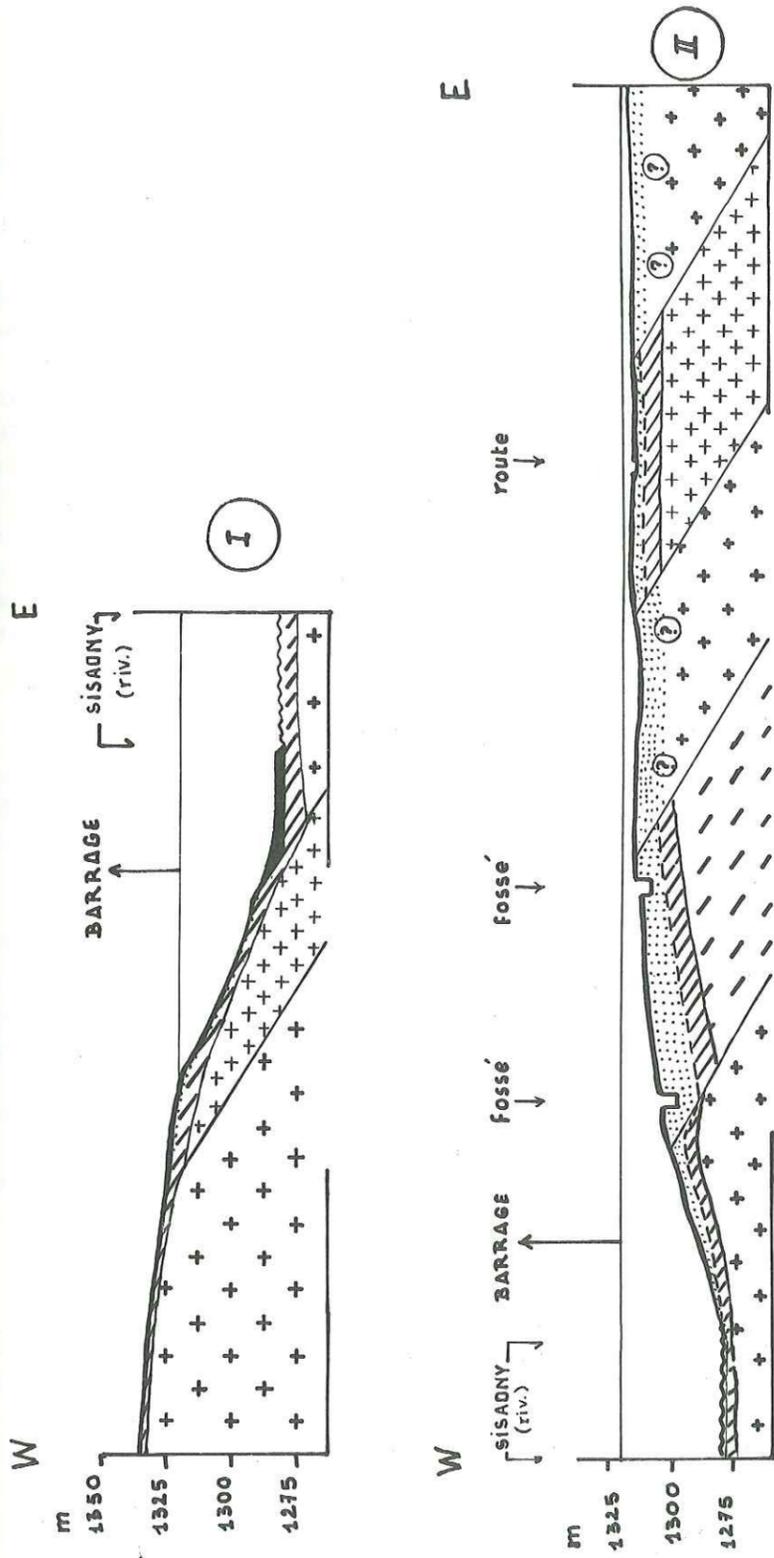
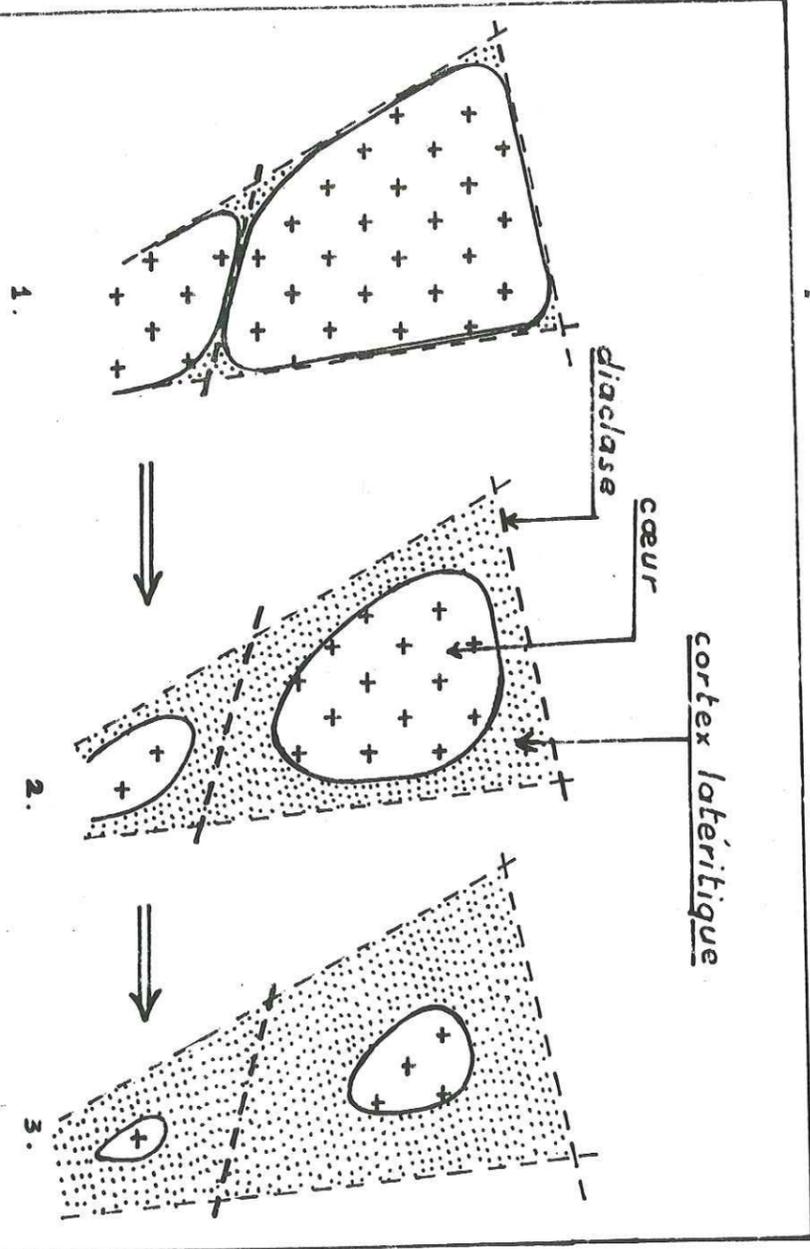


fig.12 coupes

I Appui rive gauche

II Appui rive droite

Echelle : 0 50m

- | | | | |
|--|------------------------------|--|---|
| | dépôt quaternaire | | migmatite lit par lit et migmatite granitoïde associées |
| | niveau à laterite structurée | | granite migmatitique (grains moyens) |
| | niveau à boules | | granite migmatitique (grains gros) |

Ceci se comprend aisément car l'altération s'effectue à partir des fissures vers le coeur des boules (fig. 11). Des observations directes peuvent être faites d'ailleurs à maints endroits, et plus particulièrement dans la zone du site d'Antaramanana sur l'Ikopa où les parois du lavaka montrent des boules en place, bien enchâssées dans de la latérite, et qui se situent entre 3 et 5 m les unes des autres. Au fur et à mesure que l'on descend en profondeur, plus les boules sont énormes plus elles sont rapprochées.

Le cas de l'appui rive gauche du site d'Andranomanga est, comme nous le verrons par la suite, nettement représentatif. Les boules sont énormes et presque accolées les unes aux autres. D'autre part les parties latérales présentent souvent des faces encore mesurables. Or compte tenu de la structure subgrenue des granites migmatitiques, plus l'altération est poussée, plus les formes tendent à s'arrondir pour ne plus laisser apparaître de face plane (cf. V. A. 1-2b).

Il est donc probable que l'effet de l'altération s'atténue rapidement en profondeur et que les boules se réduisent à des roches saines délimitées simplement par des diaclases.

Ainsi, d'Ouest en Est, on a pour cet appui (fig. 12) :

- du granite migmatitique à gros grain, massif de bonne tenue (à peine en boules, faiblement diaclasé) ;

- du granite migmatitique à grain moyen, sous forme de nombreuses boules individualisées, mais en majeure partie en place, et surmontant de quelques mètres le substratum sain.

1c/ Valeur de l'appui

Cet appui rive gauche est constitué de 2 bancs de type pétrographique différent. Leur disposition structurale fait que le granite migmatitique à gros grain, nettement plus massif et plus épais à l'Ouest, soutient le granite migmatitique à grain moyen plus diaclasé et plus mince à l'Est. Cette disposition ne peut être que favorable pour la stabilité du barrage.

La pente de 35 % est assez forte pour que les boules, dégagées de la latérite argileuse dans laquelle elles sont enchâssées, puissent subir une attraction gravitaire vers la retenue ou vers le barrage. Il y aura lieu de prendre des mesures préventives pour éviter leur chute.

V. B. 2-2. Appui rive droite

2a/ Aspect de l'appui : l'appui rive droite possède une pente plus faible que le précédent (20 % suivant l'axe prévu du barrage). La surface ne montre que de la latérite argileuse couverte de "bozaka" et de rares petites boules de 1 à 3 m de diamètre. Celles-ci deviennent de plus en plus fréquentes à mesure que l'on descend vers le Sud de la croupe. En outre un fossé circulaire, profond de 4 à 6 m, creusé entièrement dans de la latérite structurée, s'ouvre du côté de la rivière à la cote 1300 (fig. 9).

2b/ Aspect géotechnique

2b-1/ Rappel géologique : l'appui rive droite correspond au passage de trois bancs de nature pétrographique différente, orientés N168. On a un banc de migmatite granitoïde, fortement latéritisé, compris entre 2 bancs de granite migmatitique à gros grain moins altérés. L'extrémité est du barrage sera implantée sur un banc de granite migmatitique à grain moyen. L'ensemble plonge vers l'Est de 32°.

2b-2/ Le substratum sain

- Les bancs de granite migmatitique à gros grain, avec leur structure subgrenue et leur aspect faiblement diaclasé, offrent une meilleure tenue que toutes les autres formations du site. Signalons cependant une particularité concernant le banc supérieur : la présence de lentilles quartzieuses étroites, serrées, et parallèles. Leur extension en profondeur est vraisemblablement faible ;

- en ce qui concerne le banc de granite migmatitique à grain moyen, sa structure subgrenue et ses grains relativement petits contribuent à donner également à la roche une bonne tenue. Remarquons cependant que ce banc présente un réseau de diaclases plus dense que celui rencontré précédemment ;

- le banc de migmatite lit par lit et migmatite granitoïde associées, plus schisteux, ne peut avoir qu'une tenue moins satisfaisante. En outre les diaclases d'orientation variée (4 familles) sont non seulement serrées (maille décimétrique), mais aussi très profondes.

2b-3/ Le niveau altéré

A chaque faciès de substratum sain correspond un faciès d'altération particulier (latérite structurée, parfois associée à des boules), avec des caractéristiques propres. Il conditionne en majeure partie la valeur de l'appui. Aussi allons-nous étudier successivement : le niveau altéré correspondant au passage du granite migmatitique à gros grain et le niveau altéré correspondant au passage du banc de migmatite granitoïde.

i) niveau altéré du granite migmatitique à gros grain

- présentation sur le terrain

L'ouverture du fossé circulaire, à la cote 1300, montre une zone à latérite blanche dont les grains altérés, gros de 3 à 5 mm, peuvent être différents. Dans sa partie superficielle se trouvent incluses quelques petites boules (2 à 3 m de dimensions) de granite migmatitique à gros grain.

En réalité, on se trouve ici déjà dans la partie proche du substratum, car, à 50 cm de la partie affleurante au niveau de la brèche d'ouverture (soit à 4 m de la surface et dans le sens du plongement des bancs), on rencontre de la latérite structurée "dure". Ce n'est pas de la roche saine encore, mais l'"angady" n'arrive plus à la traverser et laisse entendre une certaine résonance au contact (cf. III. A. 3b). Elle s'étend sur une surface de 5 m de large à l'affleurement, mais il est probable qu'elle se continue plus bas vers la Sisaony car le lit de celle-ci, à 30 m vers l'Ouest, montre le même type de roche sous forme de boules.

- Caractéristiques

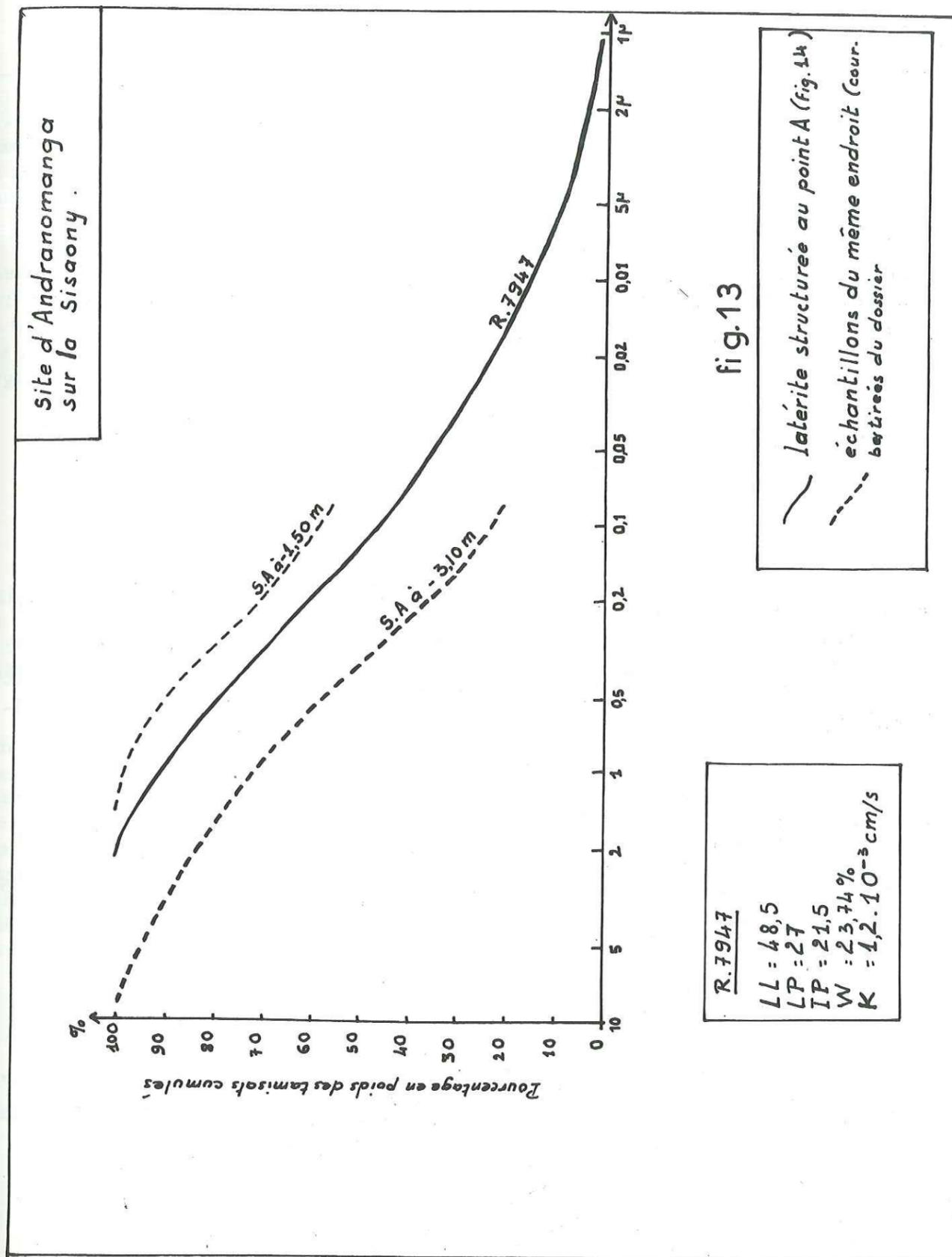
- Latérite structurée "tendre". Une observation à l'oeil nu et à la loupe des grains montre des restes non altérés de micas enrobés de produits d'altération ocre jaune ou dorés ; l'ensemble se trouve intimement associé à des produits kaoliniques blancs dont le passage aux restes à peine altérés de feldspath est difficile à préciser car ceux-ci paraissent très friables. Ils constituent pourtant un noyau dur et palpable. Le quartz est rare et généralement petit (1 à 2 mm).

La courbe granulométrique est présentée sur la fig. 13 (R. 7947). Remarquons tout de suite que, par suite de leur friabilité, les éléments feldspathiques, qui sont normalement de grandes dimensions et visibles sur l'échantillon en place, se trouvent facilement morcelés lors de l'analyse. Par la suite la courbe est moins représentative de la granulation réelle en place. C'est ainsi que nous pouvons expliquer l'absence des éléments supérieurs à 2 mm. Ceci explique également l'allure très régulière de la courbe qui, à notre avis, est normale : les produits émiettés des feldspaths compensent ici la dépression qui devrait se produire entre 1 mm et 0,05 mm.

Toutefois les produits fins résultant de l'altération restent représentatifs. Les éléments inférieurs à 5 μ représentent seulement 10 % en poids de l'ensemble, ce qui est très faible par rapport à ceux des latérites argileuses (≥ 40 %).

Remarquons en outre qu'avec $1,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s comme perméabilité

1. Angady = pelle droite, longue et étroite.



(mesure effectuée au perméamètre C. B. R.), ce type de latérite est parmi les plus perméables.

-Latérite structurée "dure" : elle ne présente plus qu'un mince interstice argileux entre les grains, et ceux-ci demeurent cohérents et encore résistants. Seuls des sondages appropriés, orientés dans le sens du plongement des bancs, permettront d'apprécier son épaisseur.

Ainsi plus on descend en profondeur, moins on a d'éléments fins et plus la granulation originelle se confirme. L'analyse granulométrique effectuée par le L. B. T. P. au même endroit, et à des niveaux différents (fig. 13) justifie cette constatation. En effet, on a :

<u>profondeur en m</u>	<u>élé sup. à 0,2 mm</u>	<u>élé. sup. à 1 mm</u>
1,50	28 % en poids	2 % en poids
3,10	64 % " "	27 % " "

La diminution du pourcentage d'éléments fins, dans cette latérite structurée, peut suggérer ainsi l'approche du "dur" (vérifié sur l'affleurement), et par la suite le substratum sain.

- Les bancs supérieurs de granite migmatitique à gros grain qui renferment des niveaux lenticulaires quartziteux (que l'on appellera quartzite) méritent une attention particulière.

Au niveau du passage de l'axe du barrage, on ne trouve en surface que de la latérite argileuse avec de nombreux débris de quartzite. Sur le flanc amont de la colline d'appui, à partir de la cote 1305 (fig. 7), on a des éluvions de quartzite qui deviennent de plus en plus importantes à mesure que l'on se dirige vers le sommet. Entre les cotes 1310 et 1315 en $x = 521,08$ et $y = 777,85$, on finit par apercevoir une lame de quartzite tordue, visible sur quelques mètres seulement, avec au moins 1 m d'épaisseur, et en partie noyée dans de la latérite argileuse.

Près de la bifurcation de la route vers Ankadinandriana, à 170 m vers l'Est de la lame précédente, le même faciès réapparaît, mais cette fois en plusieurs lames foliées, minces, serrées, légèrement ondulées. De direction N10, l'ensemble s'étend sur plusieurs mètres d'épaisseur. Noyé par endroits sous de la latérite argileuse, il se prolonge vers le Nord jusqu'aux abords du thalweg situé à l'Est de l'appui rive droite, où il disparaît totalement. A ce niveau les lames de quartzite sont réduites à de minces lentilles de 1 à 3 m de long sur 2 à 6 cm d'épaisseur, toujours parallèles, sillonnant étroitement des formations de latérite structurée à gros grain, la latérite argileuse devenant

plus mince, voire inexistante en bas de pente.

Il est important de signaler ce mode particulier de gisement que l'on rencontre seulement de ce côté du site. Si ces lentilles de quartzite se continuaient en profondeur jusqu'à atteindre la roche saine non latéritisée, ce qui est fort probable, on aurait exactement comme présentation celle schématisée sur la fig. 3.

Au passage de l'extrémité est du barrage lui-même, on ne peut rien observer sinon de la latérite argileuse riche en débris de quartzite. Par contre vers le Sud et vers l'Est immédiat on peut mettre en évidence l'existence de quartzites en tant que formation, et leur mode de gisement. On peut donc suggérer que le même gisement se rencontre à la partie terminale est du barrage, sous la latérite argileuse.

ii) Le niveau altéré de migmatites granitoïdes et migmatites lit par lit associées

- Présentation sur le terrain

C'est le niveau où l'on rencontre le fossé circulaire (voir carte fig. 7). Celui-ci, profond de 3 à 6 m, creusé entièrement dans de la latérite, témoigne de l'importance de l'altération dans cette zone. Les parois montrent 0,80 m à 1,50 m de latérite argileuse, surmontant de la latérite structurée de teinte rougeâtre, à grain fin (cf. V. A.1 -1).

Le puits M₁(fig. 14) pratiqué à partir du fond du fossé qui se trouve à 5 m de la surface, descend verticalement jusqu'à 3,50 m (soit à 8,50 m de la surface) dans la même latérite structurée rouge. Au fond du puits cependant, on remarque la présence de quelques boules "dures" de migmatite granitoïde à grain fin, entourées de latérite structurée "tendre", kaolinique, à gros grain. Les boules ont 10 à 20 cm de diamètre. Manifestement, elles se situent en intercalations dans les latérites structurées à gros grain, comme c'est le cas à l'ouverture du fossé vers la Sisaony. Cette apparition n'a rien d'anormal. Elle confirme au contraire la zone de passage du banc de granite migmatitique à gros grain au banc de migmatite granitoïde à grain fin (fig. 12).

- Caractéristiques

La même constatation peut se faire en ce qui concerne les grains : quartz intacts, feldspaths et ferromagnésiens plus ou moins altérés, enrobés de leurs produits d'altération (cf. V. A. 1-1a). Ils sont petits : il suffirait que l'altération

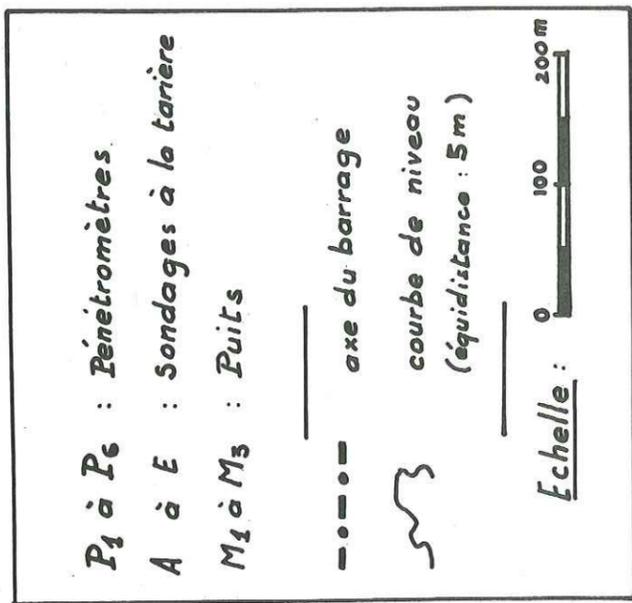
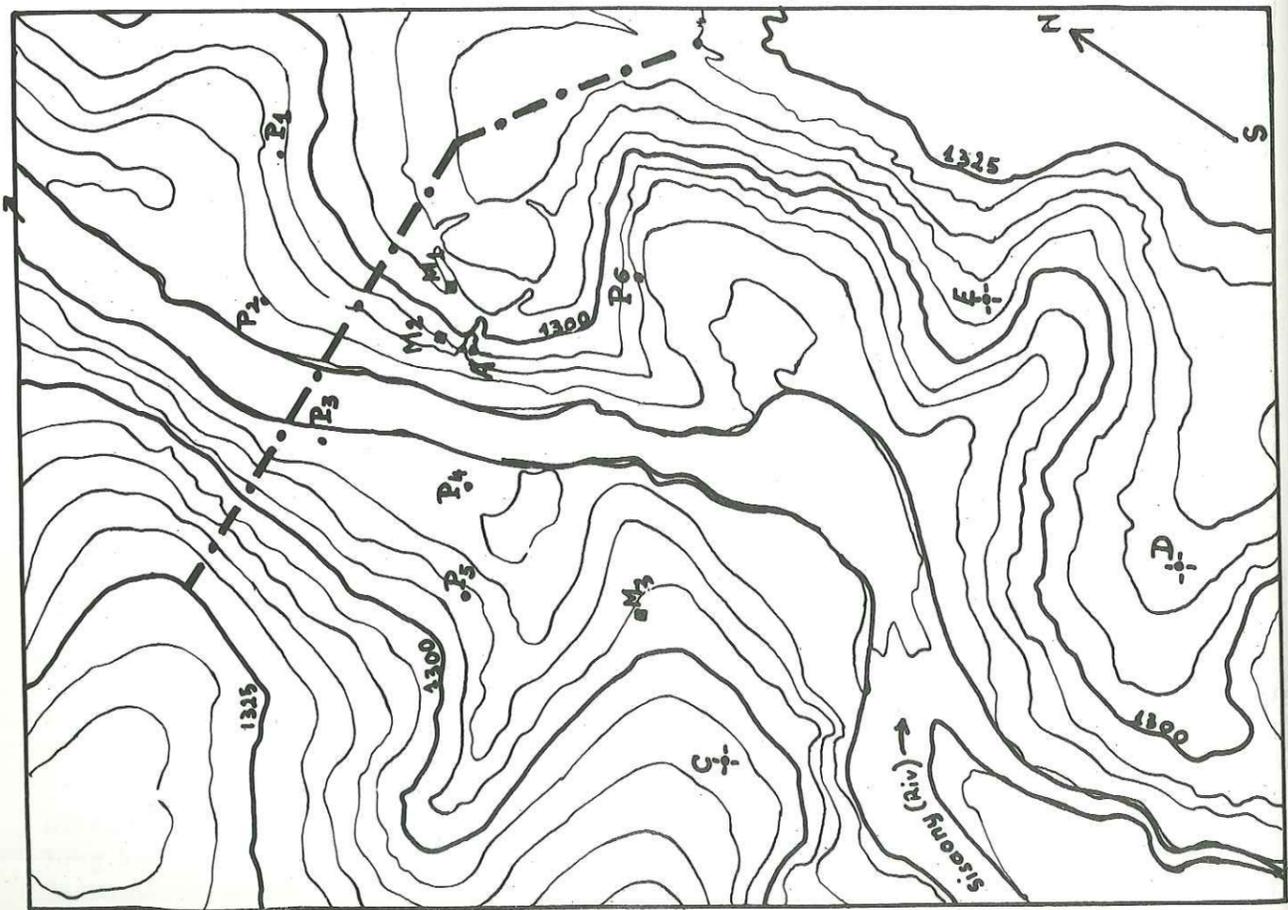


Fig. 14 Emplacement des Pénétromètres,
Puits et Sondages.

ANDRANOMANGA SUR LA SISAOHY



soit facilitée par quelques fissures pour qu'elle évolue rapidement. Ce qui se produit justement ici : la nature schisteuse du banc, jointe à la forte densité des diaclases et leur entaille profonde activent la latéritisation.

Les grains de faible dimension se trouvent alors plus ou moins rapidement transformés en produits argileux. Il est aisé de comprendre que, en même temps, la latéritisation est beaucoup plus poussée à son niveau qu'à celui du granite migmatitique à gros grain où la structure subgrenue, la dimension des grains et le réseau lâche des diaclases constituent des facteurs défavorables à son développement.

L'analyse granulométrique donne une courbe régulière avec une forte prédominance des fins par rapport à la latérite structurée du granite migmatitique à gros grain.

Remarquons que pour une latérite de roche originelle donnée, l'effet de l'altération est fonction de la profondeur. Ainsi prélevés du même puits M1 mais à des niveaux différents, le R. 7910 et le R. 7914 (fig. 15) ne possèdent pas le même pourcentage en poids des différents éléments. On constate (tableau suivant) une prédominance d'éléments fins pour le niveau supérieur (R. 7910), et également une régression de pourcentage pour un diamètre équivalent.

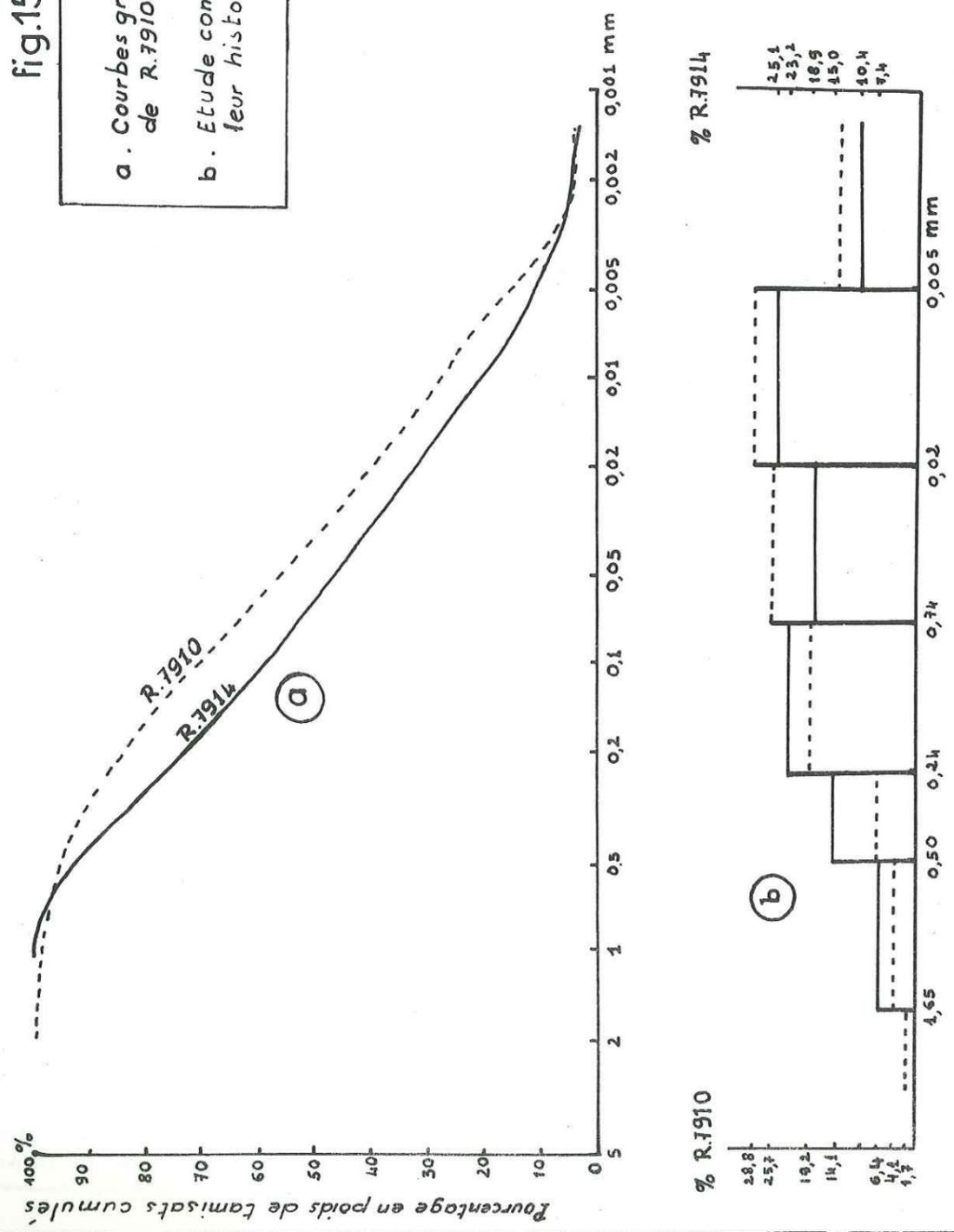
échant.	profondeur	> 0,5 mm	0,5 à 0,05 mm	0,05 à 0,005 mm	< 0,005 mm
R. 7910	0,80 m	5,8 %	39 %	41 %	16 %
R. 7914	3,50 m	7,4 %	47 %	36 %	10 %

On peut dire que la partie superficielle est la plus atteinte. Ainsi plus on s'écarte de la roche saine plus la proportion d'éléments fins argileux augmente au détriment des gros éléments.

En pratique ceci entraîne une variation des propriétés mécaniques de la latérite en fonction de la profondeur (tassement, résistance mécanique, perméabilité ...), mais il faut souligner que plusieurs facteurs contribuent à accentuer plus ou moins cette différence d'altération suivant les niveaux, à savoir : la composition minéralogique de la roche originelle, la dimension des grains, la densité des fissures, la texture de la roche, la position structurale, le couvert végétal, la préexis-

fig.15

a. Courbes granulométriques de R.7910 et R.7914
 b. Etude comparative de leur histogramme



tence de lavaka, etc.

Du point de vue perméabilité, l'essai au perméamètre C. B. R. a donné $6.6.10^{-4}$ cm/s pour R. 7914.

2b-4. Limite en profondeur de la zone altérée

Il est difficile de chiffrer exactement cette limite sans effectuer des sondages. Toutefois on peut donner une idée de la profondeur maximale que pourrait atteindre l'altération au niveau de l'axe du barrage à partir des données géologiques et de certaines observations sur le terrain.

i) Au niveau du banc inférieur de granite migmatitique à gros grain (voir fig. 12 et 16)

La latérite structurée "tendre" s'étend de 3 à 4 m à partir de la surface et dans le sens du plongement des bancs avant d'atteindre la zone à boules. On peut faire une mesure directe au niveau de l'ouverture du fossé.

Quant aux boules, on les voit aussi affleurer vers le Sud de la colline d'appui à partir de la cote 1295. Elles sont de plus en plus enracinées à mesure qu'on descend la berge pour affleurer en masse au niveau de la rivière (partie subaffleurante). Vers le Nord les eucalyptus empêchent une observation directe, mais en bordure du thalweg aval, dans le prolongement structural des boules précédentes (N168), on rencontre des boules de même faciès entre les cotes 1285-1290.

Compte tenu de l'association étroite des boules aux latérites structurées dures (ouverture du fossé), il semble que cette zone n'est pas très épaisse et que le substratum proprement dit se situe non loin en profondeur.

ii) Au niveau des migmatites

Aucune partie dure n'est visible ni aux alentours de l'axe du barrage, ni sur les parois du fossé circulaire.

Cependant si on suit le banc à partir de sa partie subaffleurante à l'amont du barrage (fig. 7) et en remontant la croupe suivant la direction structurale, on a :

- au niveau de la Sisaony (cote 1275) le substratum subaffleurant ;
- jusqu'à la cote 1285 : des boules témoins plus ou moins en place (fig. 16) ;
- au-delà de la cote 1285 on ne voit plus que de la latérite argileuse en surface.

Ceci s'observe jusqu'au fossé du sommet dont le fond (cote 1300) est constitué de latérite structurée (cf. échant. R. 7910 et R. 7914).

Plus au Nord un bosquet d'eucalyptus empêche toute détermination.

De ces diverses observations, on peut déduire les points suivants :

. le niveau d'existence du substratum sain se situe autour de la cote 1280 de l'extrait du plan au 1/5 000 ;

. le domaine des "dures" et des boules va jusqu'à la cote 1290, soit 10 m au-dessus du précédent ;

. le domaine de la latérite structurée occupe le reste, soit au maximum 18 m à partir de la surface au niveau de l'axe du barrage.

Remarques

Les cotes indiquées doivent être considérées comme des valeurs maximales. Il se pourrait en effet que la limite d'altération se situe plus haut car il n'a pas été tenu compte dans notre estimation des cassures déterminées en amont et en aval de la zone d'appui (fig. 7) et qui peuvent avoir été à l'origine, dans ces zones de bordure, d'un développement plus prononcé des boules.

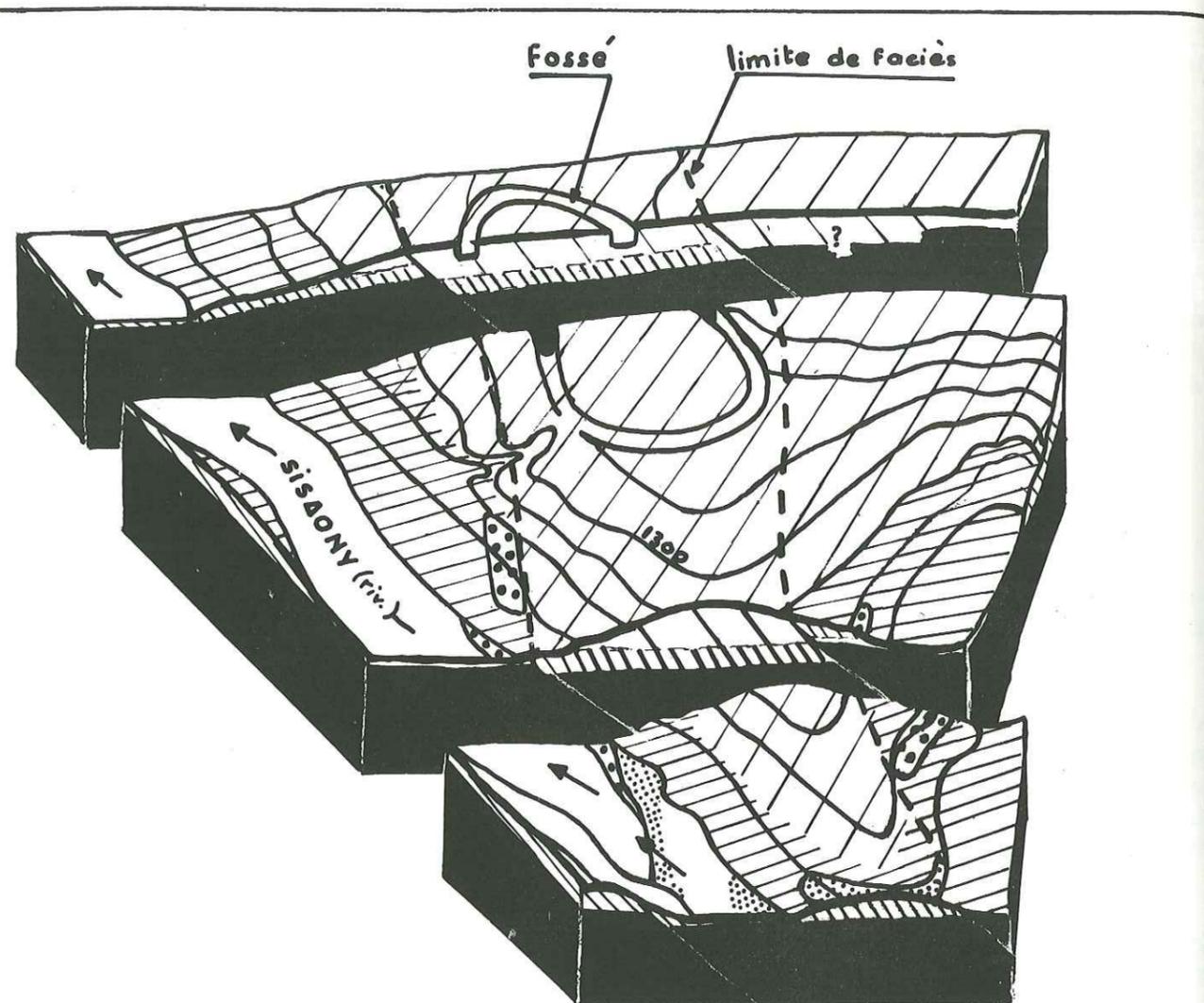
- Nous n'avons pas tenu compte du plongement vers l'Est de l'ensemble des bancs et il est donc possible qu'à l'Est le substratum remonte au niveau d'une même formation (fig. 12).

En tout cas l'existence des boules seulement en bas de pente, l'épaisseur de la latérite structurée déterminée dans le fossé circulaire et le puits M1, la possibilité d'une altération profonde de ce banc de migmatite sont des données suffisantes pour dire qu'on ne devrait pas s'attendre à trouver la zone à boules à moins de 10 m de la surface et le substratum sain à moins de 15 m de la surface, ceci le long de l'axe du barrage.

iii) Partie sommitale de la colline d'appui rive droite

Il est pratiquement impossible de prévoir, avec une approximation valable, la limite de l'altération en profondeur. Le faciès pétrographique même est déjà sujet à discussion. Rappelons que nous avons présumé sa constitution comme identique à celle du banc plus à l'Est (granite migmatitique à gros grain lardé de quartzites lenticulaires). En général, le granite migmatitique à gros grain est plus résistant à la latéritisation, mais ici, il est probable que la présence de ces quartzites, en intercalations étroites, favorise l'activité de l'altération par ses diaclases. On devrait donc s'attendre à trouver un niveau d'altération plus poussé aussi dans ce secteur.

Quant au banc de granite migmatitique à grain moyen, l'évaluation exacte de l'épaisseur de la zone altérée est là aussi difficile. On peut noter toute-



-  latérite structurée
-  boules affleurantes de granite migmatitique
-  boules affleurantes de migmatite granitoïde
-  zone à boules + latérite structurée dure
-  substratum sain

Equidistance : 5m
Echelle ~ 1/5000

fig.16 appui rive droite
coté amont

fois que la zone à boules vient directement sous la latérite argileuse. En effet, plus au Sud, en regard du premier thalweg, à partir de la cote 1305, apparaissent des boules dégagées de ce granite. Comme il n'existe pas de fracture majeure dans ce secteur, il est permis de penser que dans la partie orientale extrême du barrage on doit retrouver la même disposition.

2c/ Valeur de l'appui rive droite

La valeur de la colline rive droite en tant qu'appui est essentiellement fonction de la disposition structurale des bancs et de leur degré d'altération, ces deux facteurs étant d'ailleurs liés l'un à l'autre.

2c-1/Le substratum sain

Se trouve à une profondeur variable selon la nature pétrographique des différents bancs. Ainsi son profil n'est pas régulier et présente en particulier une dépression au passage du banc de migmatite lit par lit et migmatite granitoïde associées (fig. 17).

La partie saine du banc inférieur de granite migmatitique à gros grain remonte assez haut vers l'Est (cote 1295) au niveau de l'ouverture du fossé soit 10 à 15 m au-dessus de la rivière, puis il redescend suivant le pendage pour rejoindre la partie saine du banc suivant.

Cette dernière étant fortement diaclasée, on doit s'attendre à traverser entre -10 et -20 m dans le sens du pendage une certaine épaisseur de zone à boules avant d'aboutir au substratum encore profondément fissuré.

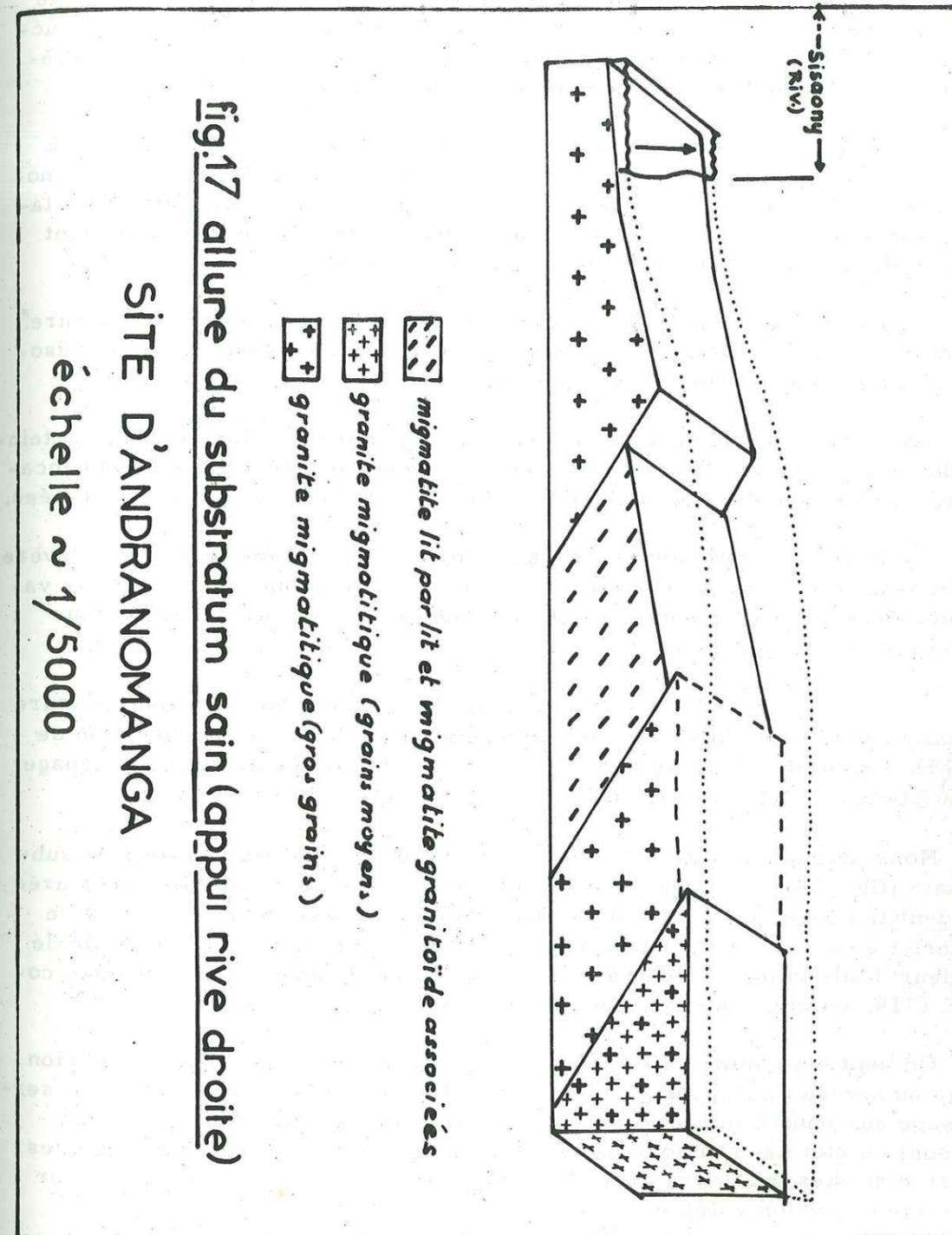
Le niveau du substratum, pour les bancs supérieurs de granite migmatitique à gros grain, reste aléatoire pour l'instant. Il faut remarquer que si la roche se latéritisait assez bas, les niveaux de quartzite poseraient certains problèmes : trop minces, lenticulaires et diaclasés, on ne pourrait pas se fier à eux comme soutien (dans la perspective éventuelle d'un barrage poids surtout). En outre leur décapage n'est pas aussi facile que celui des latérites simples.

2c-2/ La disposition des bancs

Leur direction est perpendiculaire à l'axe du barrage et leur pendage est constamment vers l'Est. La disposition joue un double rôle :

- c'est un avantage par le fait qu'elle offre une large surface d'appui, surtout dans l'optique d'un barrage en terre ;

- par contre les différentes modalités d'altération de chaque banc entraînent certains inconvénients qui méritent d'être indiqués :



i) N'étant pas comprimées naturellement au cours de leur formation (comme par exemple les schistes ou les grès) les latérites structurées supporteraient mal le poids et la pression du barrage, et plus particulièrement ici où l'on prévoit une hauteur de digue de 45 m.

En effet avec une légère pression du doigt, les grains durs tendent à se rapprocher en expulsant l'argile molle, ce qui provoque déjà un tassement notable. Ce tassement est encore accentué par la structure plutôt poreuse de la latérite structurée où les minces filets d'eau se frayent un passage en emportant avec eux les éléments très fins et les parties dissoutes (cf. III. A).

Ce phénomène n'est pas aussi notable avec la latérite structurée "dure". Celle-ci demeure bien résistante ; le choc du marteau produit une certaine résonance au lieu d'un son étouffé comme avec les "tendres".

Ainsi si on cherchait à appuyer le barrage sur de la latérite sans atteindre le substratum sain, on devrait s'attendre à une possibilité de tassement localisé au passage du banc de migmatite lit par lit et migmatite granitoïde associées.

Notons que la détermination d'une valeur moyenne du tassement s'avère impossible pour les latérites. On doit avoir une variation continue de cette valeur en fonction de la profondeur, et ce pour chaque banc de nature géologique déterminée (cf. V. B. 2-2b/3ii).

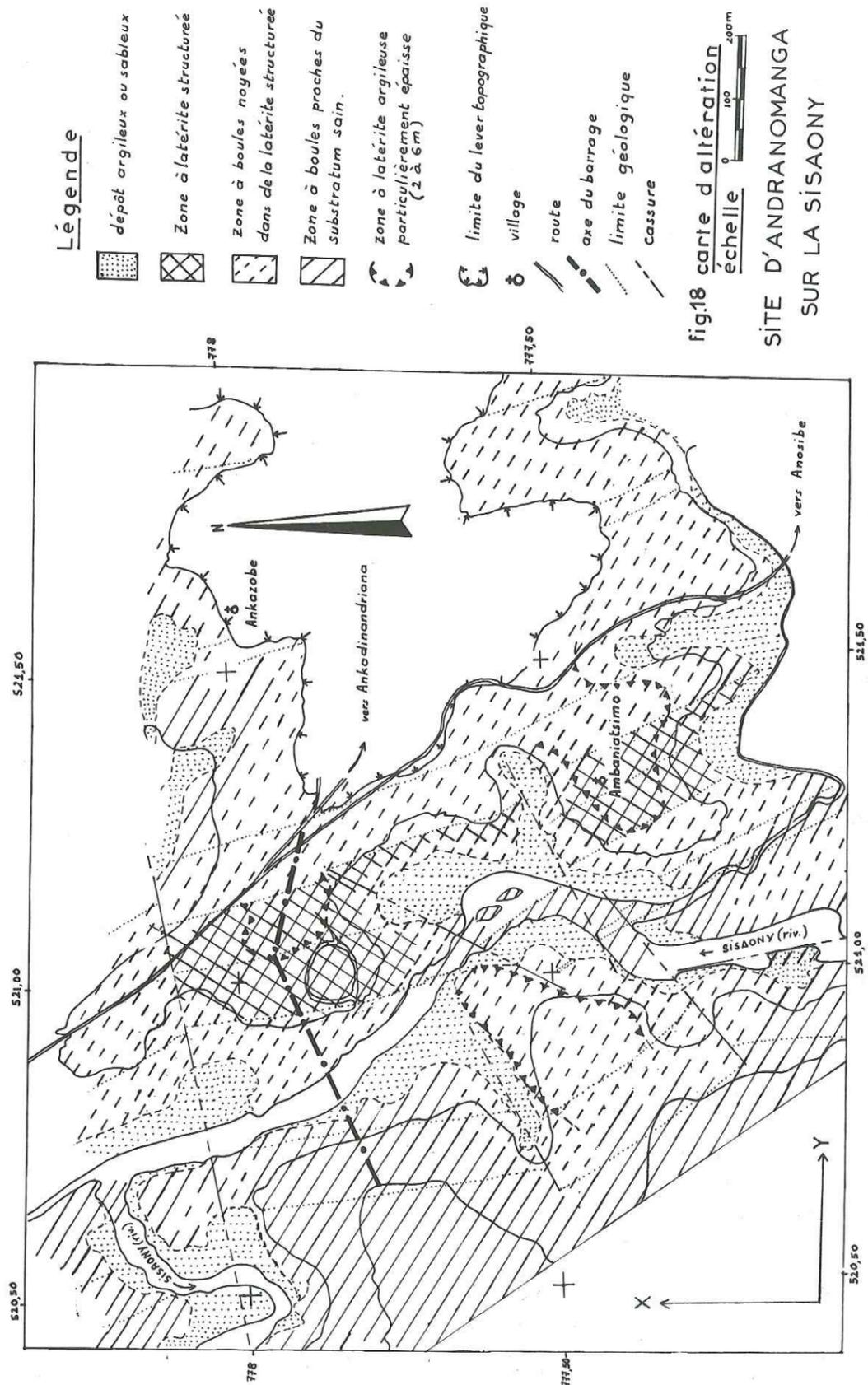
ii) La profondeur de l'altération variant avec la nature pétrographique des bancs favoriserait une canalisation de l'eau d'infiltration de l'amont vers l'aval sous l'aile droite du barrage, dans la mesure où le décapage total de la latérite structurée "tendre" n'aurait pas été exécuté.

Nous avons en effet noté la présence d'un creux dans le profil du substratum sain (fig. 17); ce creux étant occupé pour l'instant de latérite structurée "tendre" dont le litage, par surcroît, est orienté du Sud vers le Nord, soit de l'amont vers l'aval. En prenant la valeur de 10 m comme minimum probable de la profondeur d'altération au centre du fossé circulaire (cote 1310), avec une cote de PHE 1318, on aura une pression d'eau de 18 kg.

On peut évidemment avancer que le tassement produit par la pression du barrage au niveau de l'appui contribuerait à fermer les pores qui auraient servi de passage aux eaux d'infiltration. Cependant il ne faut pas oublier que ces latérites sont en état de transformation constante au cours du temps, et que des études systématiques sur leurs propriétés mécaniques n'ont pas été faites pour permettre une prévision valable.

2c-3/ Menace de lavaka

Pour l'ensemble du site, la menace de formation de lavaka n'est pra-



tiquement pas à craindre vu l'étendue très faible de la zone profondément latéritisée (fig. 18).

Evidemment cette zone se situe près de l'appui rive droite et on pourrait redouter la formation d'un lavaka en raison de la conjonction des facteurs suivants : bancs latéritisés orientés N168 et pentés 32E, fossé circulaire qui récolte les eaux de pluie, entaille à mi-pente, présence au bas de la pente de la rivière, absence de végétation sur les flancs de la colline (cf. III. B. 3).

En fait un tel risque n'est pas à craindre. D'une part le banc inférieur de granite à gros grain non altéré "remonte" assez haut pour gêner le transport vers la rivière des éléments fins de la zone latéritisée des migmatites associées, d'autre part il empêche le travail de sape de la Sisaony.

V. B. 3. - Zone Centrale du barrage

A l'Ouest elle débute par une petite terrasse alluviale s'élevant à 2m au-dessus du lit de la Sisaony laquelle se rétrécit peu à peu vers le Nord. La rupture de pente qui marque le passage à l'appui rive gauche suit en gros la direction des bancs.

Au niveau de la rivière, on rencontre soit des boules roulées, soit des fragments de bancs subaffleurants. Il nous est impossible de fixer la limite en profondeur de la zone à boules. Les sondages au pénétromètre effectués par le L. B. T. P. au niveau de la vallée donnent comme résultats (fig. 19 et 20) :

<u>Pénétromètre</u>	<u>Cote</u>	<u>Rocher dur</u>
P2	1280,13	-3 m
P3	1279,72	-2,70 m
P4	1280,30	-2,10 m

(Voir leur emplacement sur la fig. 14)

Pour nous, ces résultats correspondent à l'épaisseur de la formation superficielle meuble qui occupe la vallée étroite de la Sisaony. On peut interpréter l'arrêt du pénétromètre par la présence de boules qui ne sont pas toujours en place. Cette terrasse constitue en effet le lit majeur exceptionnel de la Sisaony et il est

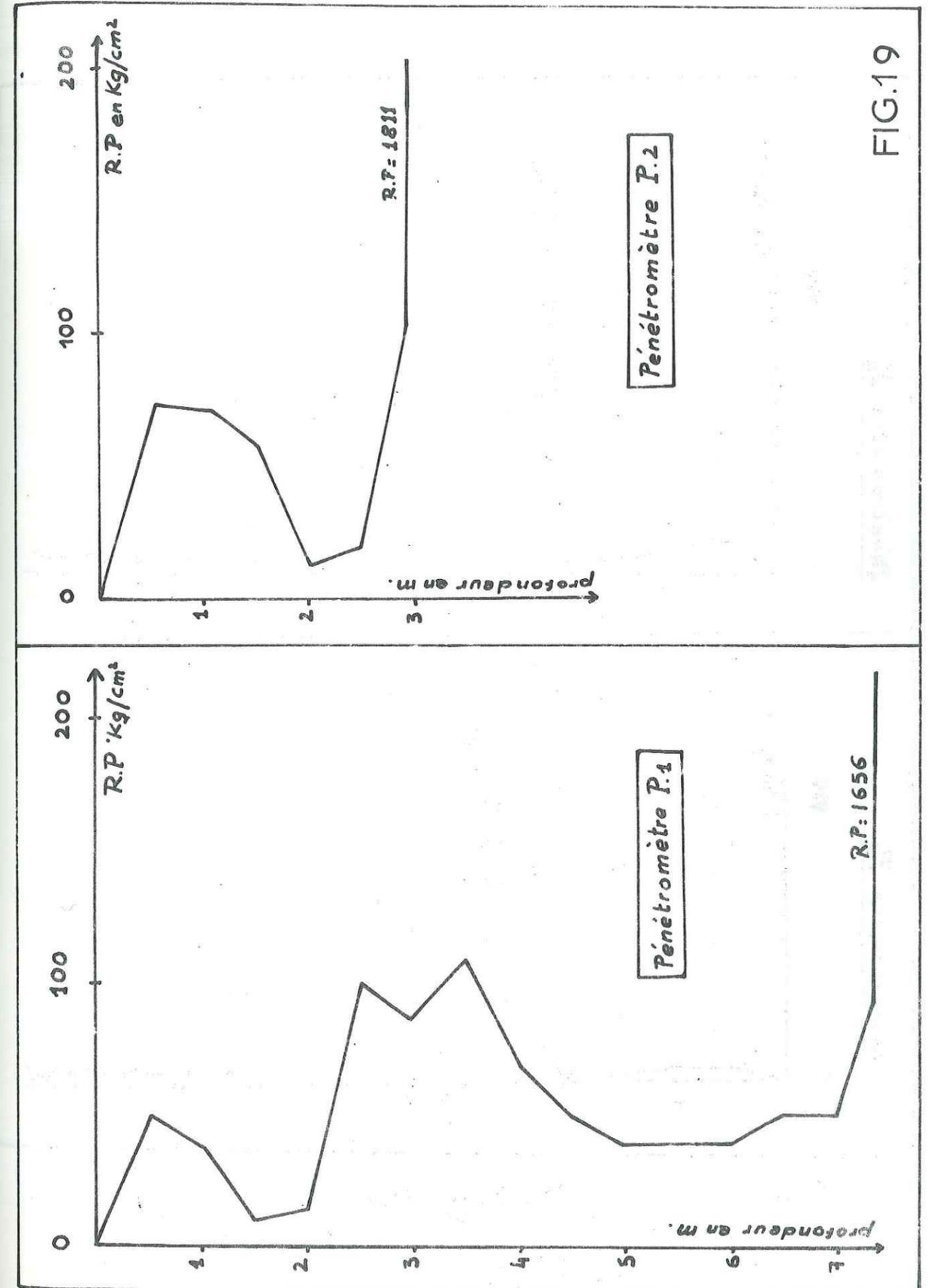


FIG.19

Fig. 20

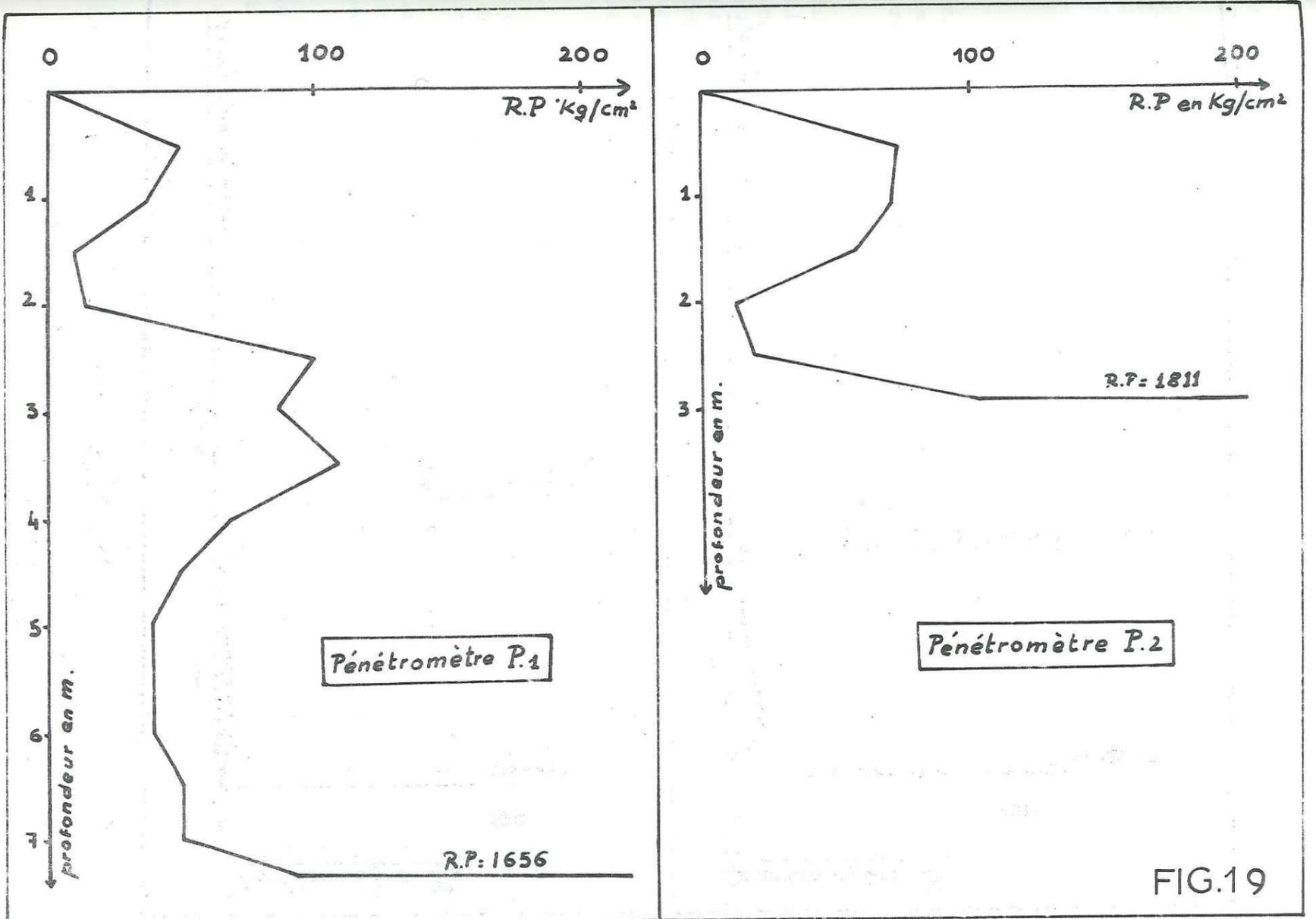
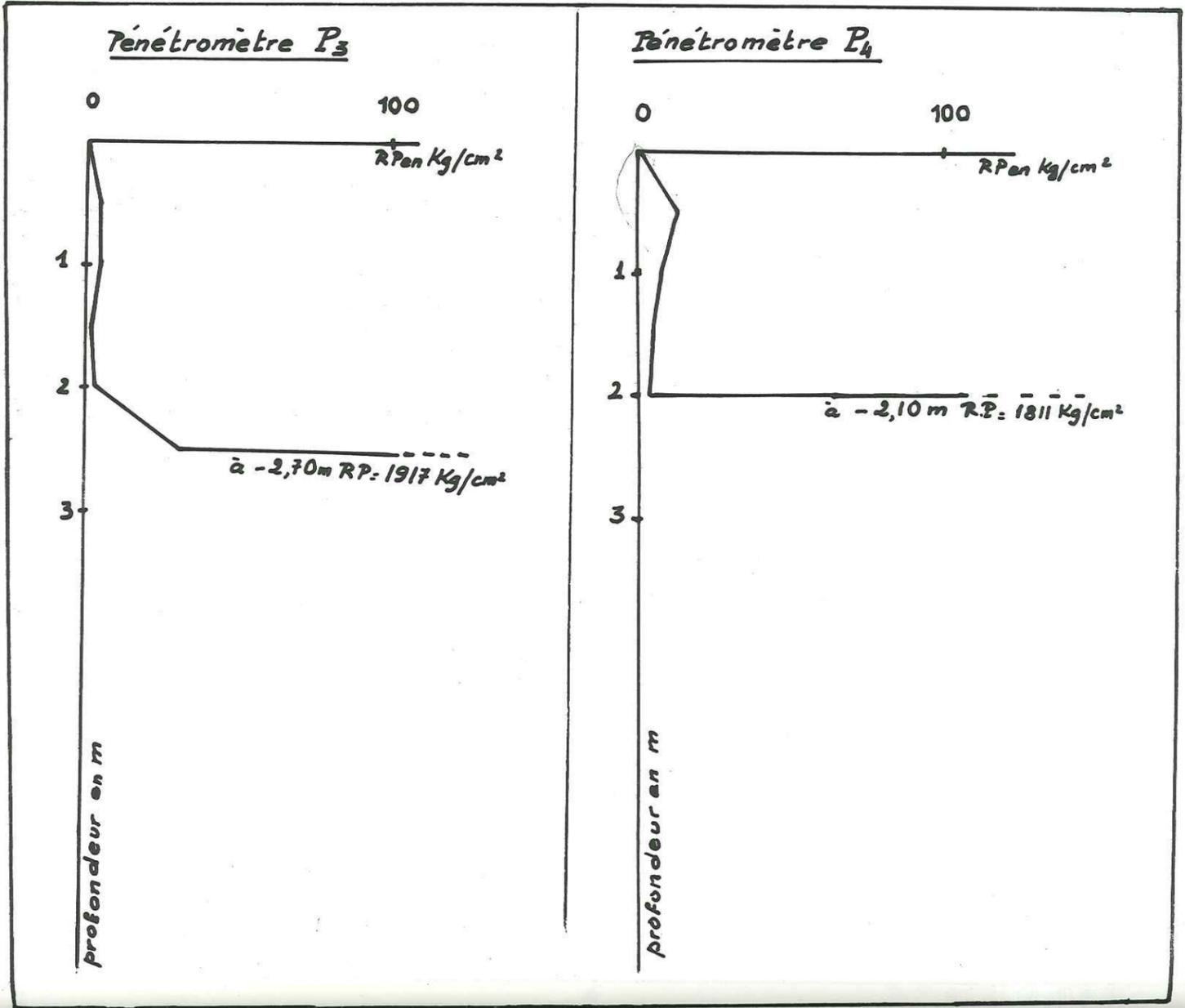


FIG.19

probable que sa base est constituée par des boules entraînées par le courant ou écroulées du flanc rive gauche.

Toujours est-il que nous pensons que le substratum sain se trouve non loin de la surface, soit à 3 m tout au plus en dessous des profondeurs déterminées par les sondages au pénétromètre. Aucune cassure majeure n'affecte en effet cette zone et il ne doit pas y avoir de surprise dans l'interprétation. Remarquons que des roches d'apparence massive apparaissent par endroits sur les deux berges.

V. B. 4 - Cuvette de retenue

Pour la cuvette de retenue il n'y a pas de problème particulier à signaler, du moins dans la portion couverte par notre carte : elle se trouve bien encaissée, les diverses cassures transversales semblent minimales et ne doivent pas réserver de grave danger pour le site.

Cependant la deuxième croupe amont rive gauche mérite une certaine attention : un puits exécuté au point M3 descend jusqu'à plus de 2 m sans rencontrer ni latérite en place ni boules ; on se trouve encore dans de la latérite argileuse. Le sondage C effectué par le L. B. T. P. confirme aussi qu'à -6 m, on a encore de la latérite argileuse (pourcentage des fins supérieur à 59 %). Nous pensons que ce fait est dû soit à l'utilisation de cette zone comme ancien terrain de culture (la structure étagée de cette croupe et les vestiges d'une habitation le confirment), soit aussi au basculement des bancs vers le Nord (en bordure du thalweg) provoqué par la cassure à l'origine de la formation du thalweg lui-même. Toutefois il est certain que la roche saine sous-jacente est constituée de granite migmatitique à gros grain. En effet on en voit des affleurements frais vers le Sud de cette croupe.

La présence d'un écoulement d'eau sans source apparente au fond du premier thalweg amont en rive gauche a été signalée par R. BARBIER. En fait l'eau provient d'un écoulement laminaire ou interstitiel le long de la surface et des fissures du bed rock constituant la partie sommitale de la colline d'appui rive gauche. La pente étant faible, l'eau aboutit au niveau du thalweg par suintement à la surface des boules ou dans leurs interstices. Cette explication est valable au moins pour la bordure nord du thalweg. La bordure sud en effet est trop boisée, avec des fougères inextricables, pour permettre toute observation.

Quant à la percolation de ce côté, on peut reprendre l'avis de R. BARBIER (1967) : "les risques de fuite dans cette partie haute de la retenue où l'eau n'a guère de pression, paraissent à première vue assez restreints".

Longueur de la percolation à la cote	1320	20 m
	"		1315 100 m
	"		1310 155 m.
	"		1305 190 m
	"		1300 280 m.

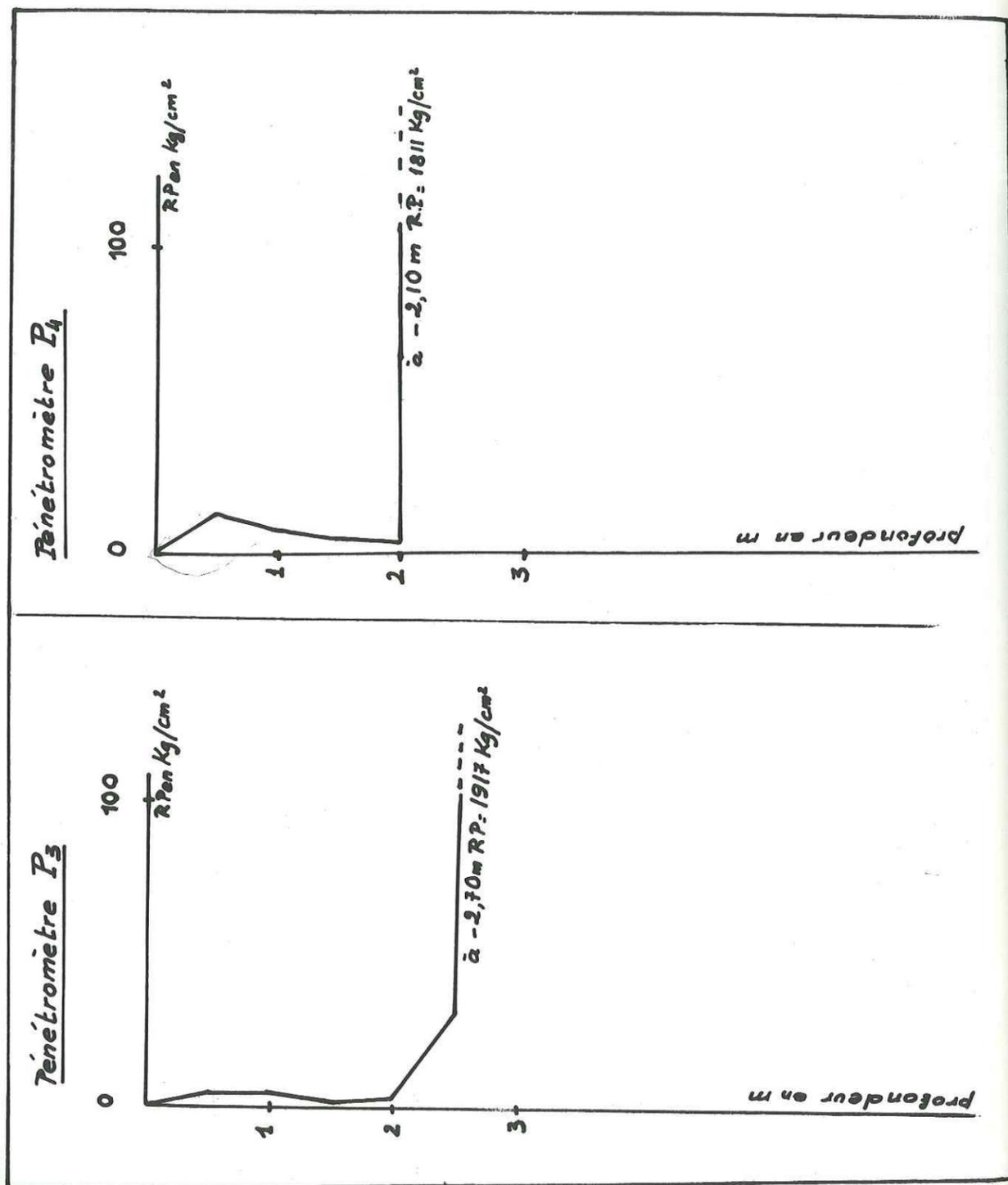


fig. 20

V. B. 5 - Dérivation provisoire

La dérivation provisoire a été prévue en rive droite. Elle passerait par les points P1 -P6 de la fig. 14.

Les essais au pénétromètre donnent les résultats suivants :

<u>Pénétromètre</u>	<u>Cote</u>	<u>Rocher dur</u>
P1	1282,16	-7,50 m
P6	1281,30	-7,20 m.

En se basant sur la Géologie du site, on se trouve ici dans la zone à boules du granite migmatitique à gros grain (compte tenu de l'emplacement indiqué sur l'extrait du plan au 1/5 000 que nous utilisons pour notre cartographie) (cf. V. B. 2-2b-4).

Il est possible que les pénétromètres se soient arrêtés sur des boules après avoir traversé les interstices latéritisés. Les ressauts de la résistance de pointe avant d'atteindre le rocher dur pourraient indiquer latéralement la proximité d'une boule (fig. 19). Toutefois ces résultats indiquent que le substratum sain ne remonte pas assez haut pour permettre le percement d'une galerie de ce côté. Notre étude précédente sur cet appui rive droite montre également que le passage du banc de migmatite granitoïde sera plus dangereux encore car le niveau altéré descend assez bas.

En tout état de cause, les formations de la rive droite s'avèrent inaptes pour les constructions annexes, car même plus à l'Est, on serait gêné par les quartzites lenticulaires.

La meilleure solution serait, comme l'a énoncé R. BARBIER, de creuser une galerie en rive gauche. Mais là encore, on sera gêné par les boules et les diaclases du granite migmatitique à grain moyen.

V. B. 6 - Evacuateur de crues

Cet organe annexe joue un rôle important pour un barrage en terre. Le site d'Andranomanga est sur ce point bien favorisé.

- Conditions morphologiques : la Sisaony, en tournant vers l'Ouest décrit un Z étroit juste quelques mètres en aval du barrage. Cette partie de la rivière est

dominée au Sud par une haute colline qui n'est autre que l'appui rive gauche lui-même. L'emplacement de l'évacuateur de crues est tout indiqué ici (cf. fig.).

- Conditions géologiques : comme nous l'avons déjà indiqué auparavant, cette colline de l'appui rive gauche est constituée en majeure partie de roches de bonne tenue (cf. V. B. 2-1). Le choix est d'autant plus engageant que le meilleur emplacement du déversoir, compte tenu du coude de la Sisaony, est formé par le granite migmatitique à gros grain. Son implantation apparaît, par rapport à la direction et au pendage des bancs, également favorable en ce qui concerne l'affouillement dont les effets devraient être réduits en raison de la disposition structurale des bancs.

Cependant compte tenu de la hauteur de la chute, les observations de R. BARBIER sont à considérer : des précautions pour amortir la chute devront être prises pour éviter l'effet néfaste des affouillements. En effet, une cassure non négligeable a favorisé la bifurcation brusque de la Sisaony vers l'Ouest. Il n'est pas impossible qu'elle étende son influence jusqu'au niveau de l'évacuateur de crues (multiplication des fissures) ce qui faciliterait le débit en blocs de la roche saine. C'est surtout l'affouillement vers l'Est qu'il faudrait protéger car non seulement les affleurements en boules y abondent, mais on se trouve aussi presque sur la zone de contact entre le granite migmatitique à gros grain et celui à grain moyen. La tenue de ce dernier est moins bonne que celle du premier (diaclasses plus étroites) ; en outre il est plus mince et en rapport direct avec le barrage même.

V. B. 7 - Zone d'emprunt

L'étude des sols d'emprunt fera l'objet d'une étude particulière au cours de l'avant projet final. Les reconnaissances effectuées jusqu'ici, jointes à notre étude géologique, permettent d'apporter toutefois quelques précisions.

Des reconnaissances de sols d'emprunt ont été effectuées par le Service du L. B. T. P. au niveau des sondages B, C, D, et E (fig. 14). Nous reproduisons ici les résultats obtenus :

" Entre -0,30 et -6m au niveau de ces sondages, il est prouvé que les sols ont des caractéristiques suffisantes pour une utilisation dans le corps de la digue.

" En général, $14\% < IP < 26\%$
 $42\% < \% \text{ des fines} < 77\%$

(IP = indice de plasticité)

"Il est toutefois vraisemblable que ces sols recouvrent en profondeur des arènes douées d'une cohésion assez nettement plus faible et d'une perméabilité plus grande".

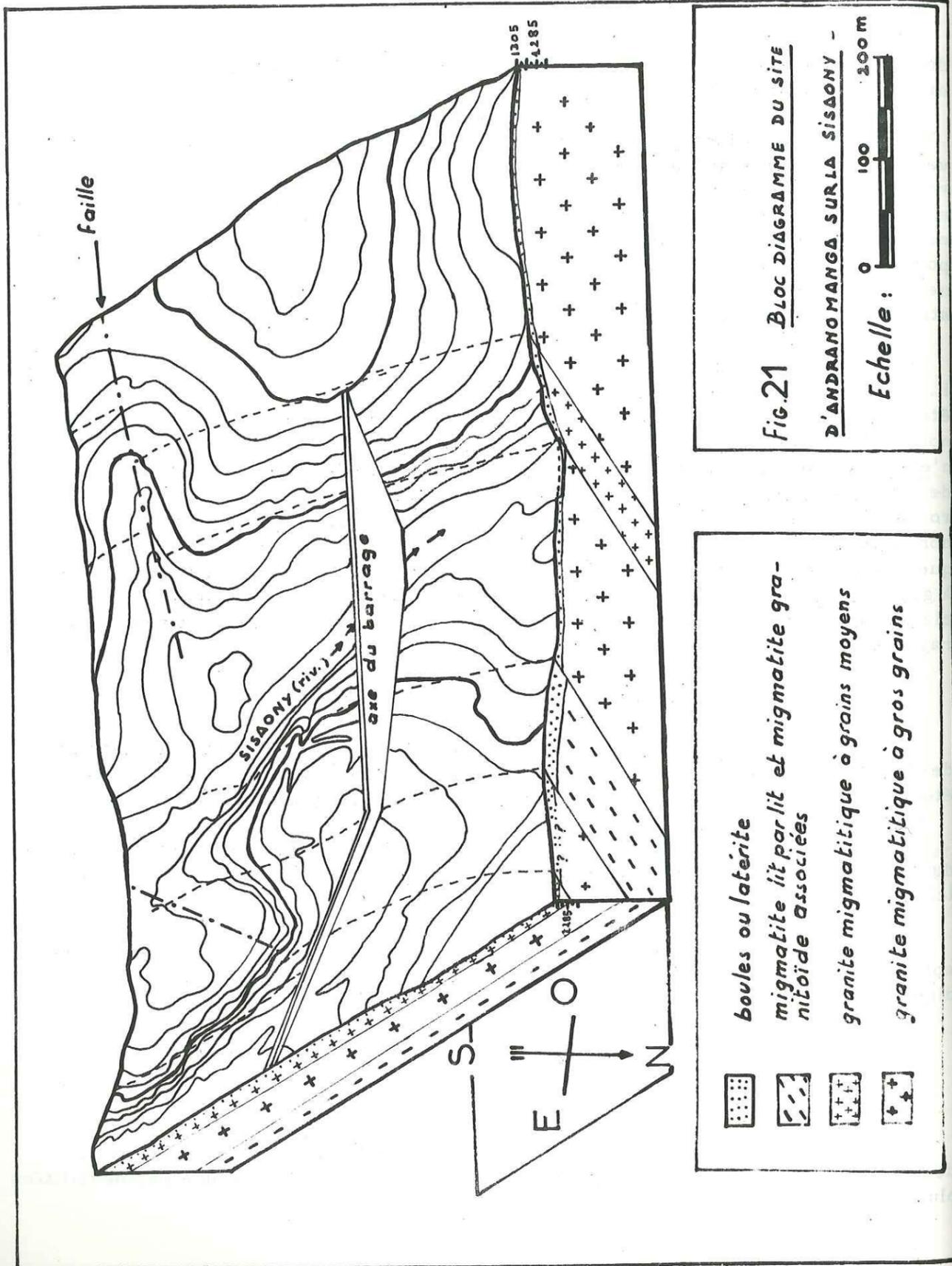


Fig. 21 Bloc DIAGRAMME DU SITE

D'ANDRANOMANGA SUR LA SISAONY -

Echelle: 0 100 200 m

L'échantillon R. 7961 extrait par nos soins du puits M3, soit à une centaine de mètres à l'Est du sondage C, donne les mêmes caractéristiques, avec :

IP = 26
69 % de fines.

Remarquons simplement que pour cette deuxième coupe amont, la limite de liquidité est déjà assez élevée pour un barrage en terre :

LL = 54 % pour R. 7961
 $49,8 < LL < 54,8$ pour les extraits du sondage C.

D'autre part la densité sèche correspondant à l'optimum proctor n'est que de 1,57.

Nous avons grossièrement indiqué sur la carte les zones à latérite argileuse particulièrement épaisse (allant de -2 à -6 m). Nous précisons toutefois qu'en dessous devrait venir directement les zones à boules (fig. 18) sauf au niveau du village Ambaniatsimo et du côté appui rive droite où l'on pourrait avoir une épaisseur relativement importante de latérite structurée avant l'apparition des boules. Dans l'optique d'un décapage total de la latérite du côté appui rive droite, on pourrait envisager d'utiliser les latérites des migmatites lit par lit et migmatites granitoïdes associées comme sols d'emprunt. Elles constituent une réserve assez importante (volume de l'ordre de 400 000 m³ non foisonné). Rappelons que leur caractéristiques sont fonction du degré d'altération qui varie avec la profondeur. C'est ainsi que pour les échantillons extraits des puits M1 :

	LL	IP	% des fins	Profondeur
R.7910	41 %	21 %	68,6	0,80 m
R.7914	50 %	26 %	54,4	3,50 m

V. B. 8. - Conclusion (fig. 21)

Rappelons que le site d'Andranomanga sur la Sisaony avait été retenu à priori comme favorable à la suite des reconnaissances préliminaires. Les études présentées dans ce mémoire apportent certaines précisions sur la Géologie du site et sur les caractères de quelques zones particulières telles que l'appui rive droite.

En ce qui concerne l'appui rive gauche et la zone centrale le substratum sain possédant de bonnes qualités mécaniques et proche de la surface topographique actuelle constituera une excellente assise. Il y aura lieu simplement de prendre quelques précautions pour éviter quelques éboulements superficiels.

Pour l'appui rive droite il faudra tenir compte de la nature pétrographique différente des bancs migmatitiques et granitiques qui entraîne un mode et une profondeur d'altération variables. La meilleure solution serait de procéder au décapage total des niveaux altérés. Une campagne de sondages permettrait de fixer avec précision leur épaisseur et de chiffrer avec exactitude le volume de découverte à enlever. Dans cette optique, il y aura lieu d'apprécier les difficultés que pourraient causer en certains endroits les lentilles de quartzite qui arment la latérite.

Si ce décapage total ne pouvait être retenu, il conviendrait de mesurer les propriétés mécaniques de la latérite structurée. On tolère évidemment un certain tassement partiel de l'assise pour les barrages souples mais à l'intérieur de certaines limites. En outre il faudrait s'assurer de l'étanchéité de cette formation.

Partout, les roches saines présentent une bonne tenue, à l'exception du banc de migmatite lit par lit et migmatite granitoïde associées qui mérite une attention particulière. Non seulement il présente des diaclases serrées et profondes (mailles décimétriques au niveau de la partie subaffleurante), mais son passage au niveau de l'appui rive droite risque de descendre assez bas (-15 à -20 m). Dans le cas d'une assise sur le bed rock (décapage total), quelques essais d'injection seraient nécessaires pour prévenir les fuites éventuelles compte tenu de la hauteur du barrage.

Quant à la retenue, la nature peu latéritique de la zone du site élimine les dangers de formation de lavaka.

Pour les constructions annexes, la dérivation provisoire poserait des problèmes si on cherchait à creuser en rive droite : elle traverserait le long de l'appui des boules noyées dans de la latérite structurée. La rive gauche serait plus sûre, mais la longueur à percer serait plus importante ; en outre on se heurterait aux problèmes des boules à l'entrée amont de la galerie. Une autre solution, favorisée par la disposition structurale des formations, consisterait à chercher le bed rock en rive droite au niveau du banc de migmatite lit par lit et migmatite granitoïde associées et à y implanter, suivant la direction de la foliation, une canalisation artificielle (buse) (cf. fig. 17).

Enfin l'évacuateur de crues trouve une place de choix en rive gauche.

CHAPITRE IV

SITE DE MANANTSOA SUR L'ANDROMBA

Le site de Manantsoa sur l'Andromba se trouve à 15 km à vol d'oiseau au Sud Ouest de Tananarive. Ses coordonnées sont les suivantes :

$$x = 785,80$$

$$y = 505,34.$$

Les collines environnantes, de forme molle, sont recouvertes uniquement de "bozaka" (herbacées). Sur les crêtes affleurent des boules rocheuses. On a là un paysage typique des Hautes-Terres. Les rares habitations sont groupées sur des collines de basse altitude (30 m au-dessus de la rivière) en rive droite de l'Andromba. Des fossés artificiels, encerclant à double tour les villages de Manantsoa et d'Ambohijatovo témoignent de leur ancienneté.

En ce qui concerne le barrage, 3 sites avaient été proposés le long de l'Andromba, mais ils ont été écartés après le tri préliminaire de mai 1967 (cf. IV.2.2), les appuis entièrement latéritiques étant plus ou moins menacés par des lavaka.

Par contre un nouveau site a été proposé en raison des roches saines plus apparentes au niveau des appuis : c'est le site de Manantsoa où l'on prévoyait une hauteur de retenue de 15 m.

En définitive, aucune reconnaissance particulière n'avait encore été faite sur ce site. Comme documentation, nous n'avons que l'indication de R. BARBIER (1967) lors du choix. Le Service Géologique de Madagascar nous a fourni les photographies aériennes du site au 1/5000 à partir desquelles nous avons établi les cartes. Un lever topographique au 1/5 000 de la colline de Manantsoa nous a permis de faire une étude détaillée de cette zone. L'ensemble du site est couvert par le lever géologique au 1/200 000 de 1951 (L. LAPLAINE et D. RAZAFINTSALAMA, feuille Miarinarivo-Tananarive) et celui au 1/100 000 de 1962 (G. DELUBAC-W. RAKOTOARISON-M. RANTOANINA, feuille Tananarive-Manjakandriana).

Le site de Manantsoa présente une certaine complexité par rapport au site d'Andranomanga tant du point de vue pétrographique que du point de vue tectonique. On se trouve dans des formations migmatitiques dont les faciès sont très variés. Quant à la tectonique, la surface intéressée par notre étude était trop restreinte pour en tirer des conclusions évidentes sur l'ensemble de la région. Néanmoins, certaines cassures sont parfaitement visibles sur le terrain, d'autres plus hypothétiques. Le tout nous a permis de dégager la structure au niveau du site afin de prévoir les problèmes géotechniques qui se posent pour la réalisation du projet.

VI. A - ETUDE GEOLOGIQUE

Les levés géologiques de 1951 et de 1952 sur la région de Tananarive, évoqués précédemment, situent la zone du site de Manantsoa dans un complexe de granite migmatitique et de migmatite granitoïde associés.

Cette association est si intime que même à l'échelle où nous avons travaillé, une différenciation nette s'est avérée aléatoire.

Les auteurs précités ont négligé à dessein de tracer des failles car, compte tenu du manque d'affleurement, leur mise en évidence est difficile. Il n'est pas exclu cependant que la région présente beaucoup de fractures importantes par suite de sa situation en bordure de la Plaine de Tananarive considérée comme d'origine tectonique. Plus nombreuses et plus évidentes sont les petites cassures de rejet métrique ou décamétrique qui, dans le domaine de notre étude, jouent parfois un rôle non négligeable.

VI. A-1. Pétrographie

Nous allons voir en premier lieu les différentes variétés de migmatite granitoïde et de granite migmatitique rencontrées en se basant sur la dimension des grains et la structure ; ensuite nous distinguerons les différents types d'association qu'elles présentent sur notre terrain (différenciation locale).

En effet, non seulement il existe des variations du point de vue granulométrique au sein de cet ensemble migmatitique, mais les divers faciès s'associent en des unités différenciées.

Dans notre cartographie générale nous avons essayé de délimiter ces unités car non seulement elles permettent de dégager la structure mais elles jouent aussi un rôle important dans la prévision des conséquences pour les travaux.

VI. A. 1-1. Variétés pétrographiques de l'ensemble migmatitique

On peut différencier :

- des roches à grain fin
- des roches à grain moyen
- des roches à grain grossier.

1a/ Roches à grain fin ($\phi \ll 1$ mm)

C'est une migmatite granitoïde mélanocrate, unique en son genre dans le secteur étudié. Les grains sont difficilement discernables à l'oeil nu, mais on peut constater l'abondance des éléments noirs qui, du fait d'une disposition orientée, soulignent la schistosité.

Rares à la hauteur du site, on les rencontre en boules ovales à face lisse, souvent énormes, intercalées dans les autres formations (x = 786,00 ; y = 506,18).

Aspect au microscope (lame mince R. 8000) :

- minéraux: quartz à extinction roulante, en esquilles ;
- feldspaths : orthose et plagioclase en petites plages. Par endroits on a des phénoblastes d'orthose craquelés et de plagioclase (oligoclase) ;
 - ferromagnésiens : biotite en petits minéraux nettement orientés, souvent corrodés.

La structure est porphyroblastique avec des phénoblastes d'orthose et d'oligoclase. Sur leur pourtour, l'alignement des biotites se trouve manifestement dérangé.

1b/ Roches à grain moyen ($\phi \neq 1$ mm)

Une cassure fraîche montre un aspect généralement clair, avec prédominance de feldspath.

On peut distinguer plusieurs variétés locales :

- les éléments ferromagnésiens sont si rares qu'ils apparaissent tout juste comme des traits fins, noirs, orientés qui reviennent sur un espacement de 1 à 4 mm. Les grains de quartz présentent souvent des cassures elliptiques (appui rive gauche et rebord est de la cuvette de retenue). Parfois des bandes quartzofeldspathiques roses, de 1 à 2 cm d'épaisseur, sillonnent le tout sans régularité apparente.;

- les éléments ferromagnésiens forment des bandes plus ou moins épaisses, alternant avec des lits quartzofeldspathiques, la séquence étant millimétrique. Cette alternance peut s'effectuer d'une façon régulière (cas rare) ou irrégulière. Dans ce dernier cas, les éléments noirs, concentrés en un endroit, se répartissent en faisceaux de plus en plus minces et mal définis suivant la direction du litage (cas rencontré du côté appui rive droite);

- les éléments ferromagnésiens ne présentent pas du tout une disposition aussi nette. Les roches saines affleurantes offrent beaucoup de similitude avec un granite ordinaire en raison de leur structure subgrenue. A certains endroits (carrière à l'Est d'Ambovoa) les éléments noirs sont disposés en gerbes autour d'une zone de concentration au sein des éléments clairs ; ailleurs les feldspaths dessinent des traînées roses sinueuses qui se détachent sur un fond blanc verdâtre de granite migmatitique.

Notons que dans la première variété citée, on décèle parfois la présence de grenat en petits grains arrondis de 1 mm de diamètre.

Aspect au microscope (R. 7969)(appui rive gauche) :

Minéraux : quartz brisés ;

- beaucoup d'orthose faiblement perthitique, associée à du microcline. Celui-ci est souvent morcelé avec contour peu net. Plagioclase rare (oligoclase) ;
- hornblende verte corrodée et déchiquetée, ayant une disposition nettement orientée ; absence de biotite ;
- les minéraux accessoires (zircon, sphène) sont rares.

Quartz et feldspath sont à extinction roulante ; la texture est nettement cataclastique esquilleuse.

R. 7970, R. 7971, R. 7973 (appui rive droite)

Les échantillons R. 7970 et R. 7971 ont été pris dans la série ouest de granite migmatitique à grain moyen (fig. 30).

Minéraux : quartz à extinction roulante ;

- la lame est riche en orthose perthitique ; pas de microcline ; plagioclase très rare ;
- prédominance d'amphibole verte déchiquetée en petits fragments et disposée suivant une certaine orientation ; la biotite est à peine représentée ;
- beaucoup de sphène, présence de zircon.

Quartz et orthose se présentent à la fois en grosses plages et en petits cristaux brisés. La lame possède une texture hétéroblastique engrenée, peu cataclastique.

La lame R. 7973 provient de la série est de la variété pétrographique précédente (fig. 30). Elle présente le même aspect avec seulement une texture plus cataclastique.

1c/ Roches à grain grossier (de 2 à 5 mm de diamètre)

Les roches saines telles que celles affleurant sur le bord est de la cuvette de retenue, riches en feldspaths potassiques, montrent une teinte rose dominante avec des mouchetures noires. En cassure fraîche on n'observe aucune orientation de minéraux. La structure est subgrenue, la répartition des éléments noirs n'étant pas régulière.

Dans la partie cartographiée du site, ces roches se rencontrent rarement sous leur forme saine, mais plutôt à l'état de latérite structurée "dure" ou à l'état presque de gore.

VI. A. 1-2. Différents types d'association sur le terrain

Sur le terrain, ces variétés pétrographiques se trouvent associées de diverses façons selon que leur alternance se fait à grande ou à petite échelle.

α) Alternance à grande échelle (d'ordre métrique)

Perpendiculairement à l'orientation générale on a une succession de bancs à granulométrie variable et dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques mètres.

Le lavaka au Nord du village Ambohijatovo fournit une coupe type de cet ensemble (fig. 22). Les formations possèdent une disposition générale N30, 60W.

Dans la partie nord du lavaka on relève, de haut en bas :

- 0,80 à 1 m de latérite argileuse formant la couverture ;
- 3 m de latérite structurée rouge, litée, à grain moyen, correspondant à la migmatite granitoïde à grain moyen ;
- 4 à 6 m de latérite structurée blanche, à gros grain (quartz : 3 à 5 mm), correspondant au granite migmatitique à gros grain ;
- quelques boules non en place, ovales, de teinte très sombre, à grain fin difficilement discernable à l'oeil nu, de dimension moyenne de 150 cm x 50 cm x 50 cm. Elles occupent la base du flanc au milieu des fougères et des broussailles.

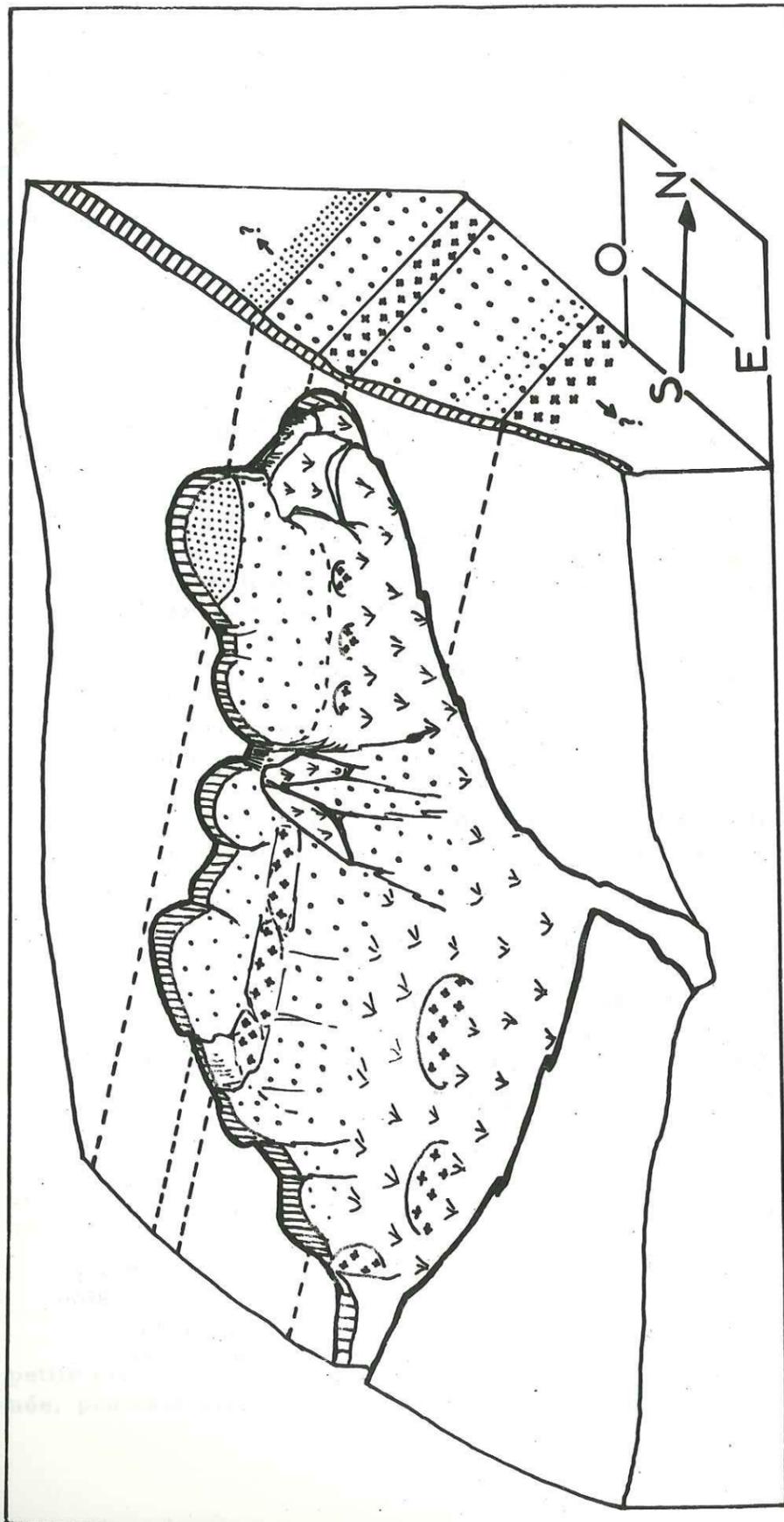


fig.22 bloc diagram.
me à main levée
d'un lavaka .
(site de Manantsoa)
échelle ~ 1/300

- | | |
|---|---|
|  |  |
| <i>laterite argileuse</i> | <i>granite migmatitique
lateritisee (gros grains)</i> |
|  |  |
| <i>migmatite granitoïde
lateritisee (grains moyens)</i> | <i>migmatite granitoïde
en boules (grains fins)</i> |

Dans la partie sud on a, de haut vers le bas :

- 1 m de latérite argileuse ;
- 2 m de latérite structurée blanche, à gros grain (correspondant au granite migmatitique à gros grain) ;
- 1 m de roche saine à grain fin, de teinte sombre, sous forme de boules en place ;
- 6 à 8 m de latérite structurée blanche à gros grain, correspondant au granite migmatitique à gros grain et couverte en partie de fougères. Cette couverture végétale ne permet pas de voir la suite en profondeur. En réalité, on a encore à la base quelques intercalations de 40 à 80 cm de latérite rouge à grain moyen. Celles-ci sont observables sur le flanc de la cloison qui sépare les 2 parties du lavaka ;
- au fond du lavaka, on a de nouveau des boules de roche à grain fin, sombres, et qui, cette fois, sont énormes (dimension moyenne : 4 à 6 m sur 1 à 2 m).

Les mêmes observations peuvent être effectuées sur les parois du lavaka au Sud du village de Ambohijatovo. Mais il n'est pas toujours aussi aisé de déterminer partout la succession des bancs à cause de la couverture de latérite argileuse.

Effet de l'altération

On rencontre souvent les bancs sous leur forme altérée jusqu'à une certaine profondeur, celle-ci étant fonction de la nature pétrographique et de l'état de fissuration de la roche.

En général, sur le site de Manantsoa :

- les roches à grain moyen, litées (migmatite granitoïde), offrent une résistance moindre à l'altération. La latérite structurée correspondante possède une épaisseur notable, avec une proportion élevée de produits argileux (latérite structurée "tendre") ;
- les roches à gros grain (granite migmatitique) résistent mieux. A peine altérées, on les rencontre sous forme de latérite structurée "dure" ;
- les roches à grain moyen, à litage estompé (granite migmatitique), offrent une certaine résistance aussi. On les rencontre sou-

vent en boules énormes plus ou moins proches du substratum sain ;

- les roches noires à grain fin (migmatite granitoïde) sont très résistantes et les boules affleurantes ne sont pas loin du substratum sain.

De la sorte, à un même niveau planimétrique, et dans le sens perpendiculaire à la direction des bancs, on pourrait avoir une alternance d'ordre métrique, de plusieurs zones :

- . zone à boules
- . zone profondément latéritisée, "tendre",
- . zone faiblement latéritisée, "dure",

selon la nature pétrographique et l'état de fissuration de la roche saine correspondante.

β) Alternance à petite échelle (ordre centimétrique)

Il s'agit d'une alternance étroite de roches à gros grain et à grain moyen en petits bancs de 2 à 5 cm d'épaisseur.

Les roches saines correspondant à ce type affleurent rarement (au Sud du village de Manantsoa, en bordure des rizières). Elles se présentent alors sous un aspect plus ou moins folié, légèrement onduleux.

Effet de l'altération

La structure finement rubanée et foliée de ce type d'association active l'effet de l'altération. A l'affleurement, on a donc essentiellement à faire à une latérite structurée rouge bariolé : alternance d'ordre centimétrique de bandes rougeâtres et blanchâtres.

γ) Les migmatites ocellées

Il ne s'agit en fait que d'une différenciation du type précédent. En effet, le faciès à grain moyen demeure inchangé tandis que le faciès à gros grain présente, par endroits, un bourgeonnement de feldspaths de 2 à 3 cm, conférant ainsi à l'ensemble une structure ocellée.

L'affleurement typique s'observe en rive gauche dans le premier coude de l'Andromba, en amont de l'axe du barrage (x = 785, 50 ; y = 505, 76). La roche est compacte ; elle se présente soit en bancs tronçonnés par des cassures transversales, soit en boules énormes de 4 à 5 m de long. Plus au Sud, des cassures fraîches révèlent la présence du grenat en petits grains arrondis de 1 mm. L'épaisseur du banc reste généralement faible (10 à 30 m).

échelle : 0 150 300 450 m

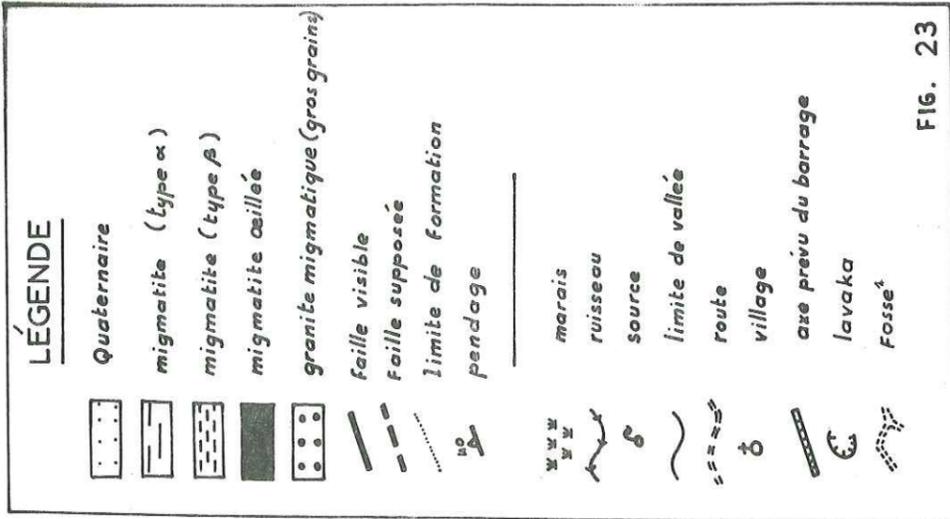
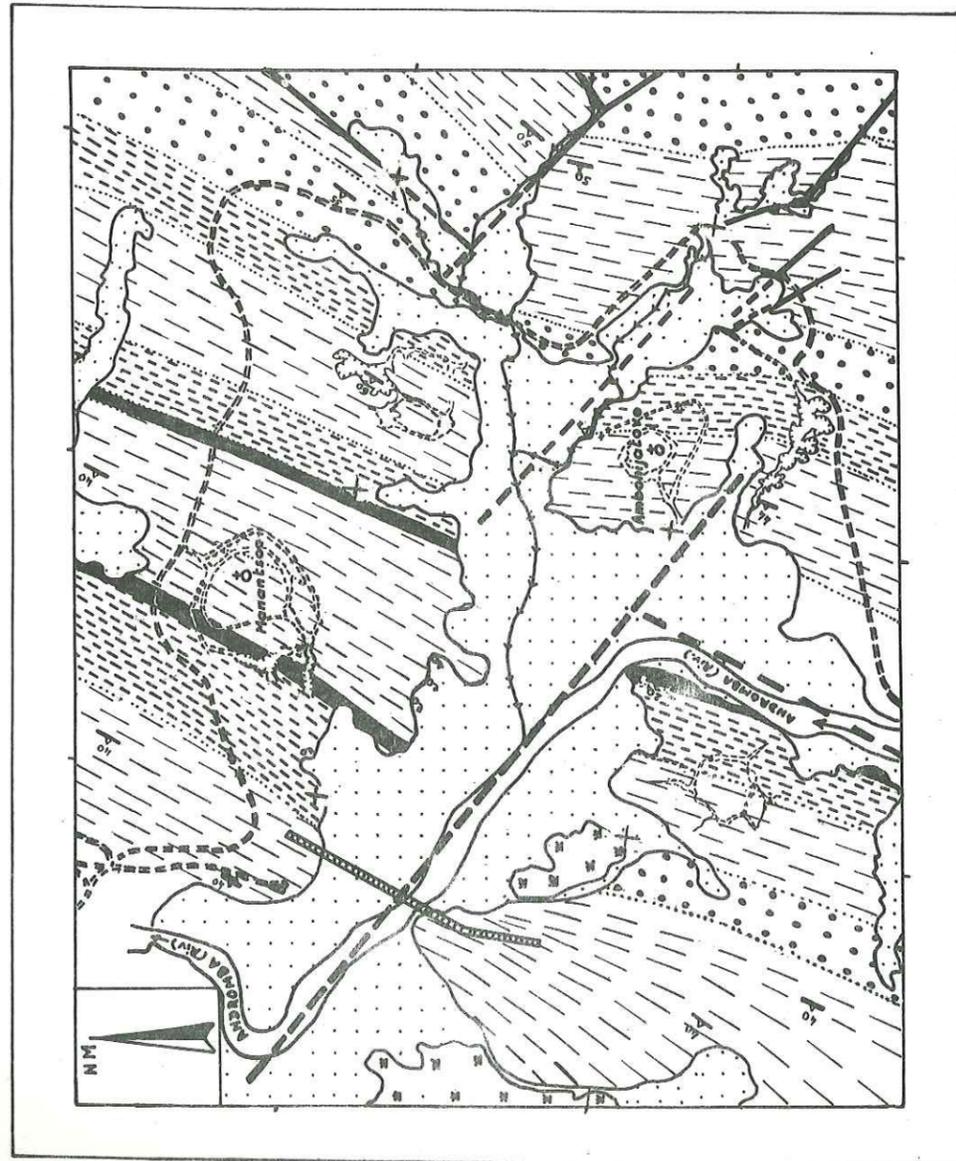


FIG. 23

Effet de l'altération

Ce type de roche offre une certaine résistance à l'altération.

Du côté rive droite, on le rencontre soit en boules, soit en latérite structurée dure, très kaolinique, rarement en latérite structurée tendre qui se présente alors en feuillets kaoliniques où l'on peut détacher facilement les yeux de feldspath résiduels encore en place.

Remarques

Nous précisons que la différenciation précédente est tout à fait locale. Elle nous servira à préciser la structure géologique du site.

- A part ces différents types d'association, nous avons séparé également dans notre cartographie le faciès de granite migmatitique à gros grain quand il constitue un banc continu de 100 à 200 m de puissance. En réalité, quelques intercalations de granite migmatitique à grain moyen ne sont pas exclues (2 à 4 m d'épaisseur) mais la répétition n'est pas fréquente et dans l'ensemble, le faciès à gros grain prédomine. Présenté souvent à l'état de latérite structurée dure (cf. VI. A. 1-1c), leur présence constitue un obstacle pour l'évolution d'un lavaka.

VI. A. 2. Structure et tectonique (fig. 23)

En ce qui concerne l'interprétation structurale et la mise en évidence des éléments de la tectonique cassante, certaines difficultés sont apparues en raison de la couverture de latérite argileuse qui masque la roche saine et la latérite structurée sur une grande partie du site. C'est souvent en bordure des vallées que l'on peut rencontrer des indications valables. Encore sont-elles obtenues sur des boules plus ou moins en place ou sur des latérites structurées, et non sur le substratum sain.

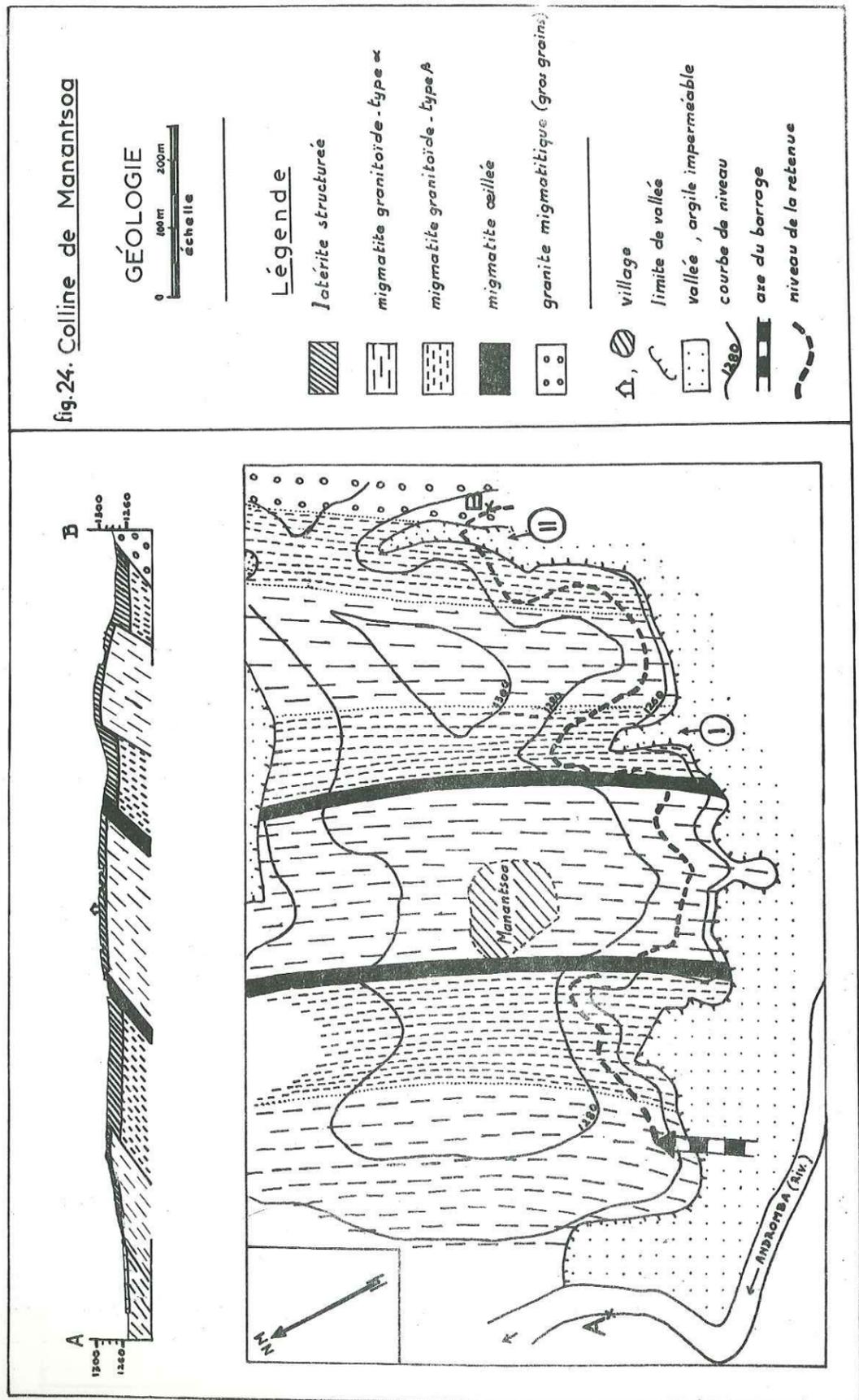
L'interprétation est donc en partie hypothétique. Nous allons étudier la région du site secteur par secteur puis établir une vue synthétique de l'ensemble. Cela permettra pour la suite d'avoir un repérage facile et des renseignements locaux complets sur l'incidence des caractères géologiques sur le barrage.

VI. A. 2-1. Etude secteur par secteur

Nous allons voir successivement :

- a/ le secteur du village de Manantsoa comprenant l'appui rive droite du barrage et sa prolongation vers l'Est ;
- b/ le secteur du flanc est de la cuvette de retenue ;

fig.24. Colline de Manantsoa



c/ le secteur du village de Ambohijatovo ;

d/ le secteur du côté rive gauche de l'Andromba correspondant à l'appui rive gauche du barrage.

a/ Secteur du village Manantsoa, appui rive droite du barrage (fig. 24)

Ce secteur est fortement latéritisé. Les vraies roches saines manquent sauf du côté de l'appui du barrage proprement dit où l'on a quelques séries de boules très proches du substratum sain. Seules ces boules peuvent donner des renseignements valables sur la structure. Quant aux autres, elles sont éparses et le plus souvent ne servent qu'à vérifier la nature pétrographique du banc sain sous-jacent.

Le double fossé entourant le village de Manantsoa présente aussi des éléments mesurables sur ses flancs taillés dans la latérite structurée ainsi que le lavaka tout à fait à l'Est qui a été décrit au paragraphe VI. A. 1-2a.

La direction générale des formations de ce secteur varie entre N20 et N36.

Si la direction varie assez largement, la valeur du plongement est assez constante du côté de l'appui du barrage (40° à 46°W), mais vers l'Est elle est nettement plus forte : 60°W à hauteur du lavaka.

Les quelques rares affleurements montrent qu'ils sont parcourus par un réseau lâche de diaclases.

Remarques

i) la grande variation des mesures obtenues pour la direction des bancs peut s'expliquer soit parce que les mesures ont été faites sur des faces de boules ou de tronçons de bancs, boules et bancs ayant pu être déplacés, soit parce que les diaclases transversales affectant ces formations ont facilité le décalage des tronçons de bancs ;

ii) la possibilité d'une légère courbure de l'ensemble n'est pas à exclure. On note en effet que les mesures prises du côté nord se regroupent autour de N22, alors que celles du flanc sud de cette colline oscillent autour de N30,

iii) Pour les fissures et diaclases, comme on peut le constater sur l'affleurement en aval immédiat de l'appui, la densité est plus forte en contre-bas des pentes que vers le sommet.

En résumé, ce secteur est constitué par une série de bancs à structure monoclinale plongeant de 40° vers l'Ouest mais qui se redressent de plus en plus vers l'Est. On peut remarquer une légère variation quant à la direction propre-

ment dite : de N30 vers le Sud, elle passe à N20 vers le Nord.

b/ Secteur oriental : flanc est de la cuvette de retenue

Contrairement au secteur précédent, on a ici de larges affleurements de roche saine sous forme de bancs tronçonnés ou de boules souvent en place. La roche massive du substratum n'est pas loin ; parfois même elle apparaît au niveau d'un ruissellement. L'ensemble constitue un flanc rocheux surplombant la vallée de 150 à 200 m.

Ici la structure d'ensemble se détermine aisément, et le passage des accidents cassants est parfois directement observable.

En étudiant la direction successive des bancs, du Nord au Sud, on constate l'existence de cassures transversales. De N30, 50W, la direction des bancs passe à N18, 50W pour revenir à N26, 40W à l'extrême sud (cf. carte géologique).

La première cassure transversale qui sépare le premier et le deuxième compartiment nord est marquée par le passage d'un ruisseau dévalant la pente qui, même en période d'étiage, ne manquait pas d'eau. Les roches affleurent largement sur son cours et un miroir de faille est observable au point $x = 785,78$; $y = 506,70$.

Toutefois, il ne s'agit souvent que de cassures relativement petites qui n'ont pas provoqué de décalage énorme des compartiments (20 à 100 m de décrochement). Entre le compartiment nord et celui du centre on a un accident unique et net orienté N160. Entre le compartiment du centre et l'extrême sud, on a plutôt à faire à une série de petites cassures oscillant autour de N135-N160.

Le compartiment nord comporte en particulier une cassure d'orientation perpendiculaire aux précédentes : N40. Elle est marquée par une gorge étroite profondément entaillée par un ruisseau. Il s'agit ici plutôt d'une petite faille d'effondrement (fig. 25).

En somme ce secteur est nettement plus accidenté que le précédent. Quelques cassures transversales modifient légèrement la direction des bancs sans déranger pour autant leur disposition monoclinale plongeant vers l'Ouest.

c/ Le secteur du village de Ambohijatovo

Ce secteur comprend la colline où se situe le village même et la croupe "lavakisée" au Sud. Elles sont séparées par un petit thalweg NW-SE.

Là encore on se trouve dans une zone occupée par une couverture latéritique argileuse. Cependant, le flanc nord de la colline, érodé de façon abrupte, constitue une coupe naturelle permettant de déceler l'agencement des différents faciès de latérite structurée. En outre le lavaka de la croupe sud, du fait de sa position transverse par rapport à la direction des bancs, est très propice à la détermination des formations constitutives.

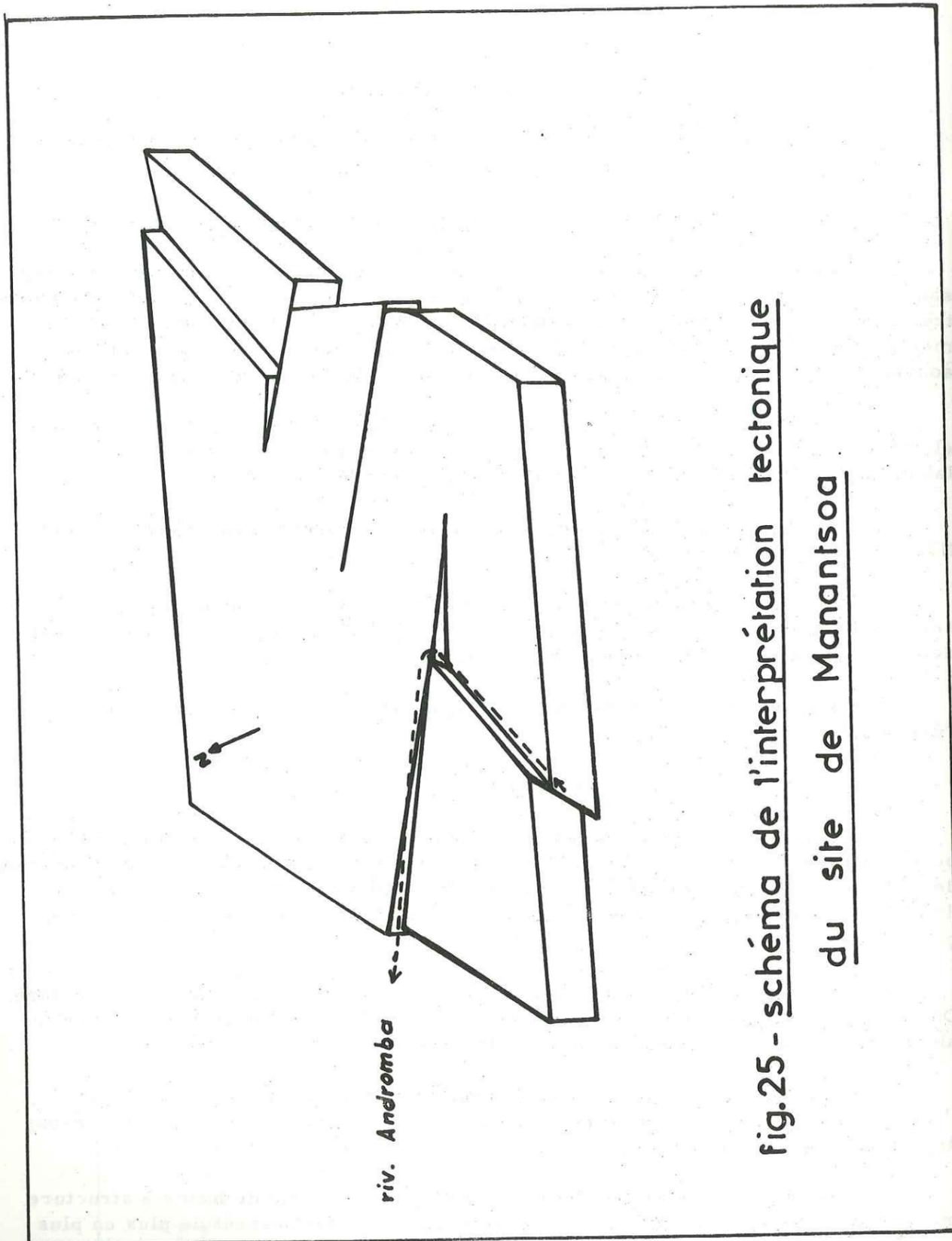
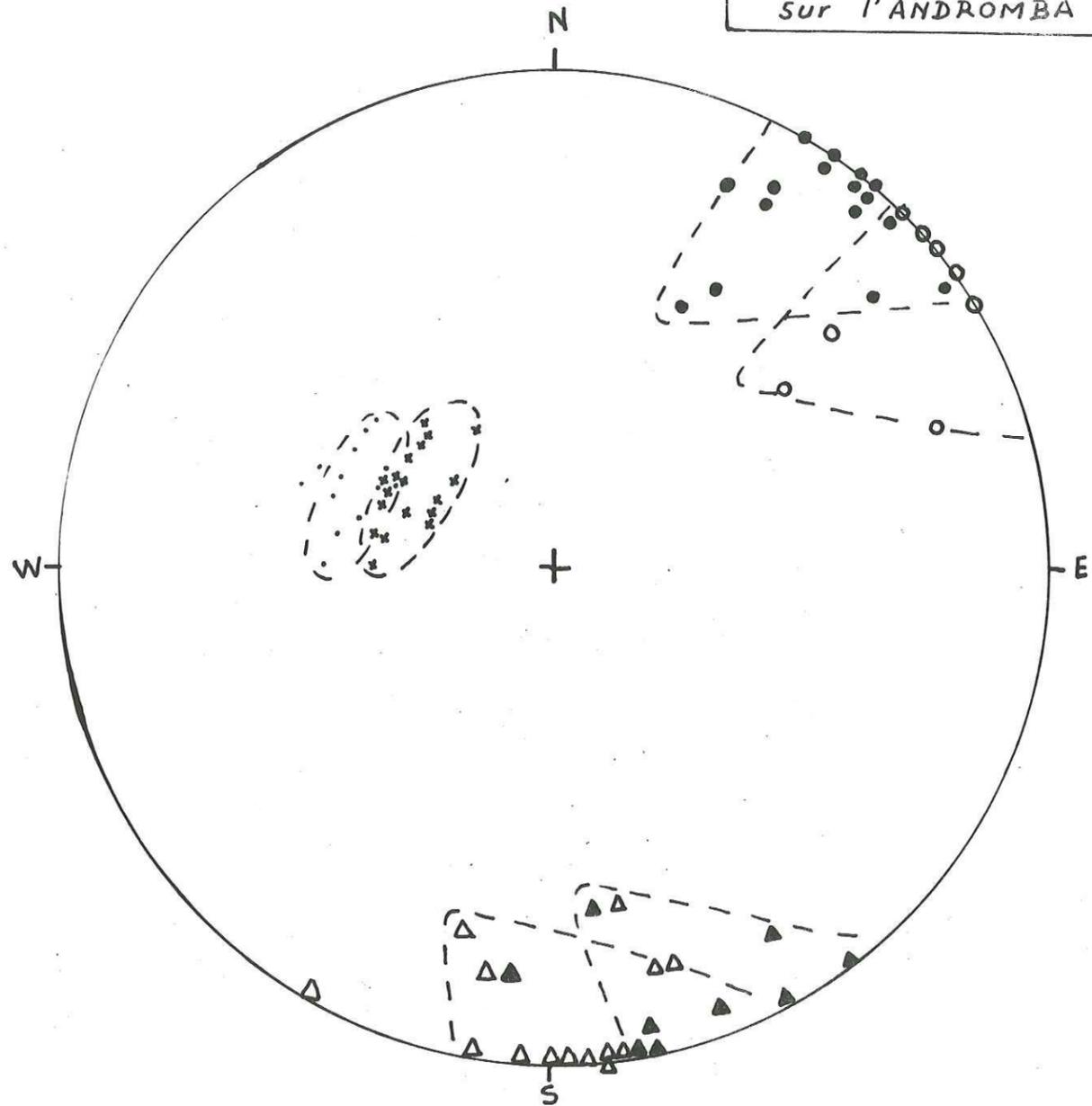


fig.25 - schéma de l'interprétation tectonique du site de Manantsoa

Site de Manantsoa
sur l'ANDROMBA -



	<u>Nord</u>	<u>Sud</u>
Schistosité —————	+	.
Diaclases : famille I ———	o	●
famille II ———	Δ	▲

fig.26. projection stéréographique
rive gauche - croupe d'appui

Dans l'ensemble, on a le même type d'association (type α) que celui rencontré au niveau du lavaka à l'Est du secteur a/, avec les mêmes successions de bancs. Du point de vue direction cependant, on note une variation importante : les formations de la colline de Ambohijatovo sont plus redressées avec une direction subméridienne (N14.70W), alors que celles de la croupe sud le sont moins (N26.40W). La variation est si brutale au-delà du thalweg que l'on peut admettre le passage d'une cassure, du moins sa terminaison, dans ce thalweg. D'ailleurs on expliquerait mal autrement la présence de ce dernier.

d/ Le secteur rive gauche de l'Andromba

i) Croupe d'appui du barrage proprement dit. Cet endroit est occupé par une quantité énorme de boules. Quand on remonte la pente vers le sud, elles font d'abord place à des tronçons de bancs séparés. Puis au sommet affleurent des bancs continus de roche saine (x = 785,20 ; y = 505,32) orientés N20 et pentés 50W.

Nous avons mesuré séparément la schistosité et les diaclases sur les affleurements sommitaux et ceux plus proches de l'appui. Les résultats sont présentés sur le canevas de la fig. 26. Sur ce canevas, on remarque en particulier un décalage de 10° à 12° de l'ensemble vers l'Est en allant au sommet (Sud) vers l'extrémité nord de la croupe. La valeur du plongement, elle, passe à 50°W au sommet à 40°W vers le nord.

Ces données paraissent assez décousues. En fait, la partie couverte par notre carte est trop restreinte pour pouvoir dégager une vue d'ensemble significative. En effet ce que l'on observe sur cette croupe n'est que la partie terminale d'une épaisse série de bancs associés (type α). Plus au Sud cette série se développe en s'incurvant vers le Sud Ouest. On peut penser qu'à la hauteur de l'appui, en bordure de l'Andromba, sa réduction en un faisceau étroit résulte d'un pincement d'origine tectonique.

ii) Deuxième croupe amont. Elle fait suite immédiatement à la précédente vers l'Est. Mais à l'encontre de la première, une couverture de latérite argileuse occupe la majeure partie de la surface.

Le côté est, en bordure de la rivière Andromba, fait cependant exception avec un banc frais de migmatite ocellée, partiellement dégagé et parcouru par 2 familles de cassures importantes : N80 et N170.

Au point x = 785,48 ; y = 505,68, des boules en place et de la latérite structurée affleurent au pied d'un arrachement.

Pour cette deuxième croupe amont, en raison du réseau étroit et profond de cassures transversales qui ont pu provoquer des basculements de bancs et en raison aussi du manque de surfaces mesurables, la valeur de la direction

ne peut être très rigoureuse. Toutefois elle paraît osciller entre N20 et N30 avec un plongement allant de 20° W en bordure de l'Andromba à 44° plus à l'Ouest.

VI. A. 2-2. Etude synthétique

Des études précédentes il ressort que les formations migmatitiques et granitiques constitutives du site de Manantsoa ont une structure monoclinale avec une direction moyenne de N20 et un pendage ouest de l'ordre de 40°.

Quelques accidents tectoniques plus ou moins importants ont entraîné certaines variations locales de direction. Ainsi, dans la partie est de la zone cartographiée, des cassures N160 ont décroché des bancs sur une distance qui ne dépasse pas la centaine de mètres.

Plus à l'Ouest, à la hauteur du village de Ambohijatovo, les variations brusques de direction observées au sein d'une même série de bancs suggèrent l'existence de cassures locales. En effet, de N30.60W au Nord, la direction des bancs devient N14.60W au niveau du village pour passer à N26.40W plus au Sud (cf. VI. A. 1-2a et VI. A. 2-1c). Ces cassures ne peuvent être que parallèles aux précédentes compte tenu de la direction des vallées et de la rectitude du flanc nord de la colline de Ambohijatovo. Notons que d'importantes sources sont rencontrées en contre-bas de ce flanc.

Au niveau de la vallée de l'Andromba, il est plus instructif de faire des observations sur les caractères tectoniques des bancs plutôt que de se baser sur leur direction.

Ainsi en rive gauche (croupe d'appui), l'allure générale de la série pincée à proximité de la rive (cf. VI. A. 2-1d) et le caractère cataclastique des minéraux vu au microscope (cf. VI. A. 1-1b) témoignent d'une phase tectonique importante.

En rive droite de l'Andromba, aux alentours de l'appui du barrage, les bancs sont moins bousculés, les roches plus saines. Cette apparence externe se confirme par une texture manifestement moins cataclastique au microscope. Nous constatons en plus une nette différence du point de vue constitution minéralogique entre les 2 rives : absence totale de microcline et développement des perthites pour les affleurements en rive droite (lame mince R. 7970), alors qu'en rive gauche, le microcline n'est pas rare et les perthites se manifestent seulement par endroits (lame mince R. 7969). Leur ressemblance minéralogique réside dans la prédominance des amphiboles corrodées (hornblende) sur les biotites qui sont faiblement représentées.

Malgré l'apparence de continuité entre les affleurements de l'appui rive gauche du barrage et ceux de l'appui rive droite, aucune preuve ne le confirme. Le

premier a certainement subi beaucoup plus l'influence d'un jeu de tectonique cassante. En outre, compte tenu de la structure monoclinale et parallèle des bancs de l'appui rive droite, nous avons cherché, par construction graphique (cf. annexe) ce que devrait être leur suite normale de l'autre côté de la rivière si aucune faille ne passait par celle-ci. On constate alors (fig. 27) un décalage de l'affleurement réel par rapport au passage de l'affleurement fictif. A l'emplacement de ce dernier, on ne rencontre que de la latérite qui n'est même pas structurée.

En somme le passage d'un accident tectonique relativement important est certain et il a été emprunté par l'Andromba. Il a provoqué en outre un dérangement notable des formations en place.

VI. A. 2-3. Conclusion

En étudiant les faciès rencontrés de part et d'autre de l'Andromba et le tracé en balonette de celle-ci, on est amené à concevoir que l'ensemble rive gauche a été décroché d'une centaine de mètres vers le Sud Est, ce décrochement s'accompagnant d'un léger chevauchement et d'une nouvelle cassure N45 empruntée par la rivière (fig. 23).

Pour l'ensemble rive droite, on constate une série de décrochements et d'effondrements à faible rejet localisés surtout vers l'Est, avec une poussée relative SE-NW (cf. carte géologique).

G. NOIZET, qui a étudié l'aménagement aval de la Plaine de Tananarive, a relevé certaines directions de fractures prédominantes:

- N10 à N20
- N45
- N90
- N160
- N120.

Par ailleurs, il a mis en évidence un affaissement général NS de l'ensemble.

Pour le site de Manantsoa, nous retrouvons certaines de ces directions :
N160 qui est prédominante
N45 rencontrée à l'Est.

Par contre NS et N90 n'ont pas été décelées mais leur présence n'est pas à exclure le long de la vallée de l'Andromba.

En nous référant à la notice de la carte géologique au 1/100 000 de la région, on peut expliquer cette structure par la tendance de l'ensemble à dessiner une grande virgation vers l'Est. Celle-ci est indiquée en effet sur la carte géologique au 1/100 000; de NE-SW vers le Nord, la direction passe à EW plus

au Sud. La partie est de notre secteur constitue l'amorce de cette virgation.

VI. B. - ETUDE GEOTECHNIQUE

L'axe prévu du barrage est disposé parallèlement à la direction structurale des bancs. Il s'agit d'un barrage en terre avec une hauteur maximum de 15 m.

Les problèmes géotechniques posés par ce site sont variés. Déjà les études précédentes avaient permis de relever les caractères défavorables de l'ensemble du terrain :

- prédominance des formations latéritiques : latérite argileuse constituant la couverture superficielle, et latérite structurée ;
- alternance de bancs soit métrique soit centimétrique de nature pétrographique différente. Elle entraîne une différence d'altération marquée à l'emplacement du site ;
- aspect très tectonisé des bancs, en particulier ceux constituant l'appui rive gauche du barrage.

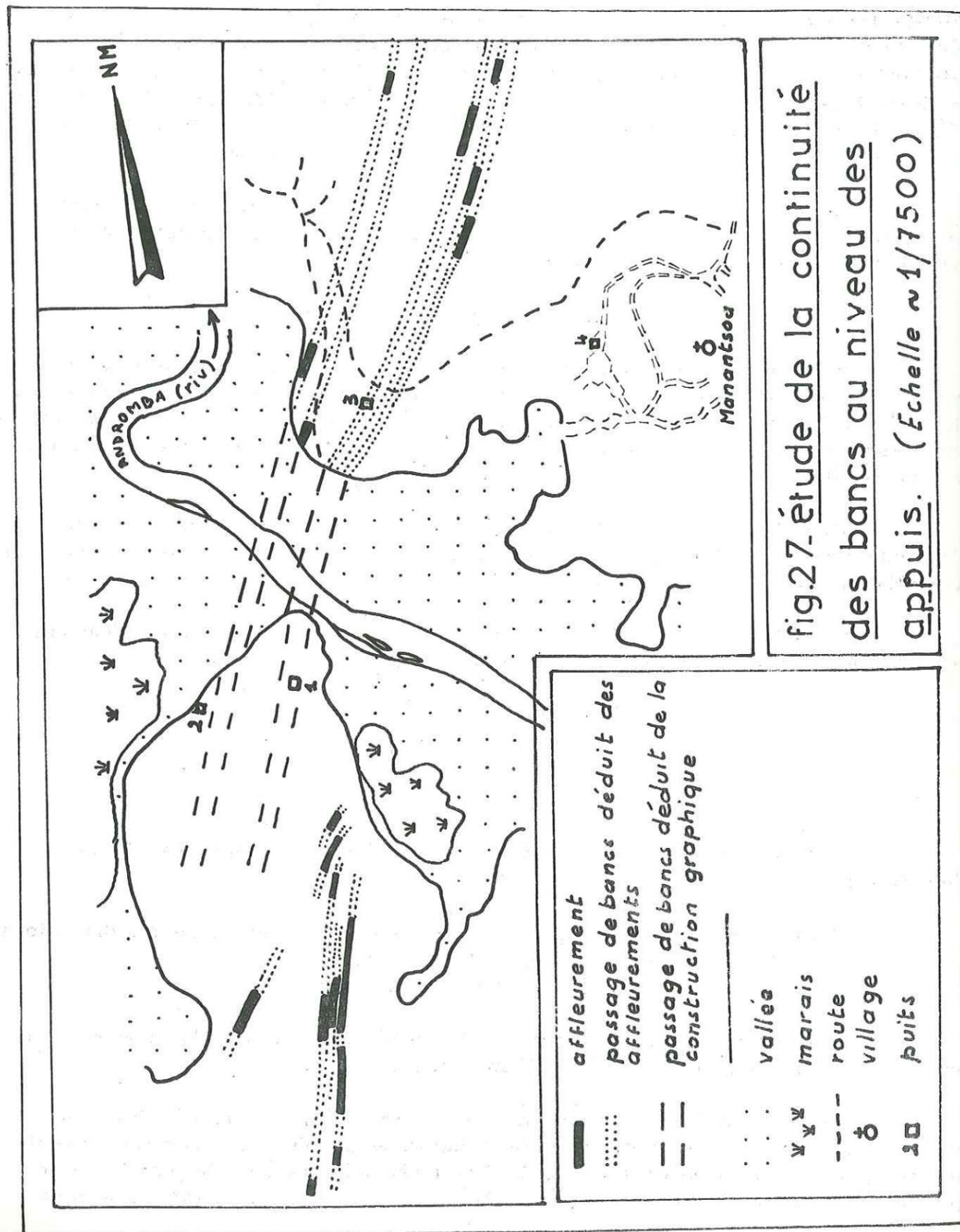
La retenue, elle, se trouve apparemment bien encaissée entre 2 chaînons qui dominent la vallée de plus de 100 m, ce qui dépasse largement le niveau d'eau le plus haut. La colline faisant suite à l'appui rive droite constitue cependant un point faible : comprise entre 2 vallées parallèles (amont et aval) qu'elle surplombe à moins de 50 m, cette colline pourrait occasionner quelques fuites lesquelles seraient favorisées d'une part par la direction structurale des bancs, d'autre part par certains passages profondément latéritisés qu'elle renferme.

VI. B. 1. Etude des appuis

VI. B. 1-1. Appui rive gauche (fig. 23 et 27)

Morphologiquement, c'est la terminaison nord d'un chaînon qui se prolonge vers le Sud en dehors de notre carte (VI. A. 2-1d). En forme de fer de lance dont la pointe devrait recevoir l'appui, il est constitué d'une croupe latéritique qui remonte mollement vers le Sud avec une pente de 7%. Topographiquement, cette croupe ne permet pas d'avoir une retenue haute.

Deux marais, en amont et en aval de l'axe prévu du barrage, l'encaignent. Tandis que le premier présente une surface assez restreinte, le second s'étend plus largement vers le Nord Ouest.



Un canal de dérivation pour irrigation des rizières a été creusé dans de la latérite le long de la bordure aval de la croupe (5 à 10 m du marais), sa profondeur varie de 2 à 5 m.

1a/ Caractères géotechniques de l'appui rive gauche

i) rappel géologique (cf. VI. A. 1-2a)

Pour cet appui, on a surtout en alternance des bancs de puissance métrique de granite migmatitique soit à gros grain (sous forme de latérite structurée à l'affleurement) soit à grain moyen (rencontrée en bancs de roche saine ou en boules).

ii) Présentation de la roche saine : nous en avons déjà parlé largement dans le chapitre tectonique (cf. VI. A. 2-1d et VI. A. 2-2).

Précisons simplement que la roche saine en place (banc continu) n'apparaît que vers la cote 1310 (soit 50 m au-dessus de la vallée) et à 700 m au Sud de l'emplacement du barrage. Les autres affleurements sont de plus en plus disséminés et laissent place à des boules isolées. A 200 m de la berge d'appui, les boules elles-mêmes disparaissent et on n'a plus que de la latérite.

iii) Zone altérée : elle s'étend sur une surface relativement faible (fig. 27).

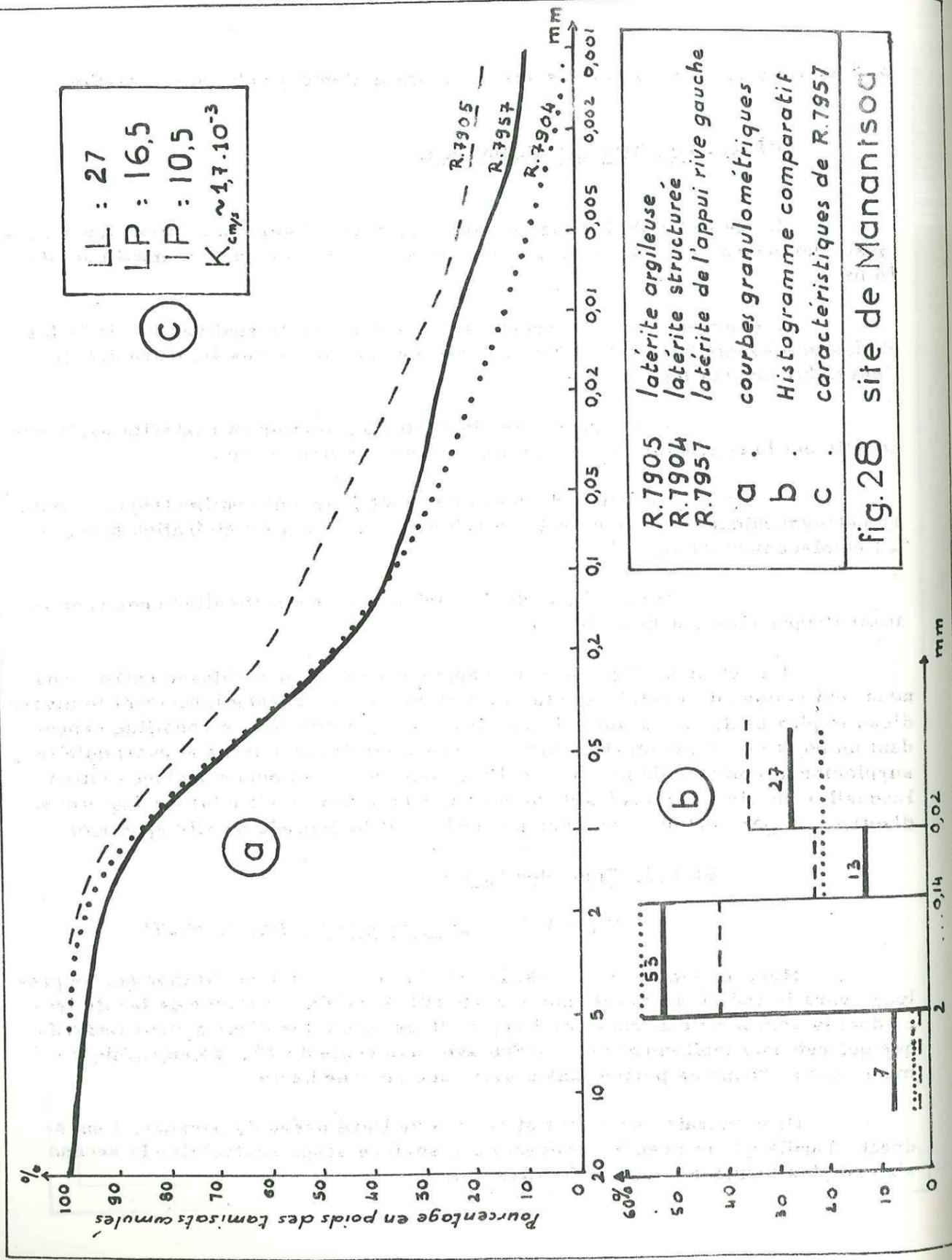
Compte tenu de la morphologie de la croupe, la subsistance de cette partie extrêmement latéritique, entourée de marais et sans ossature de roche saine apparente, semble assez intrigante.

- caractéristiques de la latérite : le puits n° 1 effectué au niveau de cette croupe permet d'analyser en partie la latérite constituante.

En surface (jusqu'à 0,80 à 1 m), on a une formation de latérite argileuse "dure", associée à des débris de quartzite.

En dessous, les parois laissent apparaître de la latérite non structurée (dans le sens défini au paragraphe III. A. 3). Ce n'est toutefois pas une simple latérite argileuse rouge compacte comme la précédente. En effet, en place, elle présente un fond rougeâtre argileux, parsemé de taches blanc jaunâtre constituées d'éléments de roches à grain moyen en voie d'altération identiques aux boules affleurantes plus au Sud. Leur répartition et leur dimension ne sont pas régulières. En outre des élévations de quartzite sont rencontrées dans cet ensemble, mais de moins en moins fréquentes en profondeur (éch. R. 7957).

L'analyse granulométrique dénote également une certaine... (fig. 28).



BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE SCIENCES
UNIVERSITAIRE

Ainsi pour l'échantillon R. 7957, on a :

$\phi > 2$ mm	-----	7 %	en poids
2 mm $> \phi > 0,14$ mm	-----	53 %	"
0,14 mm $> \phi > 0,02$ mm	-----	13 %	"
$\phi < 0,02$ mm	-----	27 %	"

Cette irrégularité rapproche plutôt cette formation des latérites argileuses. Celles-ci présentent cependant une plus forte proportion d'éléments fins argileux inférieurs à 0,05 mm (voir tableau ci-dessous).

Par ailleurs elle s'écarte des latérites structurées qui, non seulement possèdent une courbe plus régulière, mais renferment une très faible proportion d'éléments argileux fins, comme le révèle le tableau suivant :

Elément (mm)	Latérite argileuse				Latérite structurée	
	R. 7957	R. 7905	R. 7906	R. 7961	R. 7904	R. 7914
0,74	35,5 %	52,4 %	52,8 %	69 %	40 %	53 %
0,05	18 %	23 %	23 %	40 %	8 %	10 %

(Pour une étude comparative complète des caractéristiques de chaque type, voir annexe).

- Interprétation de l'appui : les diverses irrégularités rencontrées pour cette latérite (répartition des formes dures kaoliniques, allure de la courbe granulométrique, présence des débris de quartzite) nous amènent à considérer cette croupe comme constituée de fragments de roches amoncelés puis latéritisés.

Cette interprétation est conforme aux caractères tectoniques de cette zone d'appui. La reconnaissance toutefois s'avère insuffisante. Il faudrait faire une série de sondages qui iraient jusqu'à 15 m ou 20 m de profondeur pour avoir des résultats nettement significatifs.

Notons que le précédent puits (n° 1, fig. 27) a été effectué à 5 m au-dessus de la cote de la vallée, très voisine de celle de la rivière en cette saison sèche, et qu'il se situe juste au passage prévu de l'axe du barrage. Or à 2 m de profondeur, les caractères du terrain et la nature de la latérite sont identiques à ceux que nous avons vu plus haut et qu'en conséquence ni la zone à boules, ni la

roche saine ne semblent proches.

Il est probable qu'à cet endroit, au niveau planimétrique de la vallée, on aura encore de la latérite ; autrement dit, la roche saine ne se rencontrerait que nettement en dessous du lit de la rivière. En adoptant donc cet axe, il faudra soit appuyer le barrage uniquement sur de la latérite, soit exécuter une fouille profonde pour avoir la roche saine.

1b/ Valeur de l'appui

i) du point de vue étanchéité : il est difficile de donner un chiffre exact de la cote à laquelle apparaîtra la roche saine au droit de l'axe du barrage sans sondages préalables.

Compte tenu de la tectonique, une bonne partie de ce niveau serait encore constituée de fragments de boules ou de tronçons de banc fortement fissurés.

Ceci pourrait entraîner des fuites directes (à travers les fissures) sous l'effet de la pression d'eau. Certes celle-ci n'est pas très importante vu la hauteur maximum de la retenue. Cependant il faut remarquer l'existence des 2 marais situés en amont et en aval, distants de 200 m l'un de l'autre. Leur présence a dû favoriser l'altération, par imprégnation d'eau des roches déjà fracturées. Il est possible même qu'ils se rejoignent par l'intermédiaire d'une nappe libre créée au niveau de la croupe latéritique, l'hypothèse d'une roche saine imperméable jouant le rôle d'écran étant exclue. La fuite deviendrait alors probable dès la mise en eau.

Seule une reconnaissance par sondages permettrait de mettre en évidence la présence de cette nappe. Remarquons qu'à 1 m du fond du canal de dérivation mentionné précédemment, et qui était à sec en période de saison sèche, on rencontre le toit d'une nappe aquifère déterminé au fond du puits n° 2 situé à 8 m de la berge (fig. 27). Il correspond au niveau de l'eau du marais aval. Ceci prouve l'extension de celle-ci vers l'intérieur de la croupe.

ii) Du point de vue stabilité : la recherche de la roche saine comme assise nécessiterait une fouille profonde et s'accompagnerait de difficultés non négligeables telles que la présence hypothétique de bancs corrects et la nécessité d'injection. L'utilisation directe de la croupe latéritique comme appui entraînerait cependant certains inconvénients :

- faiblesse de l'appui : on a prévu avec raison un barrage souple avec un appui sur de la latérite. Celle-ci, par sa structure poreuse et son état originellement non comprimé, subirait un tassement plus ou moins notable (cf. site d'Andranomanga sur la Sisaony, V.B. 2-2c/2). Cependant ce n'est pas le tassement lui-même qui affaiblirait cet appui, mais le fait que la latérite constituant la croupe se trouve en contact direct avec le marais aval sans

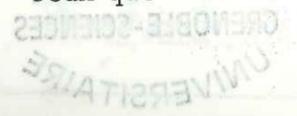
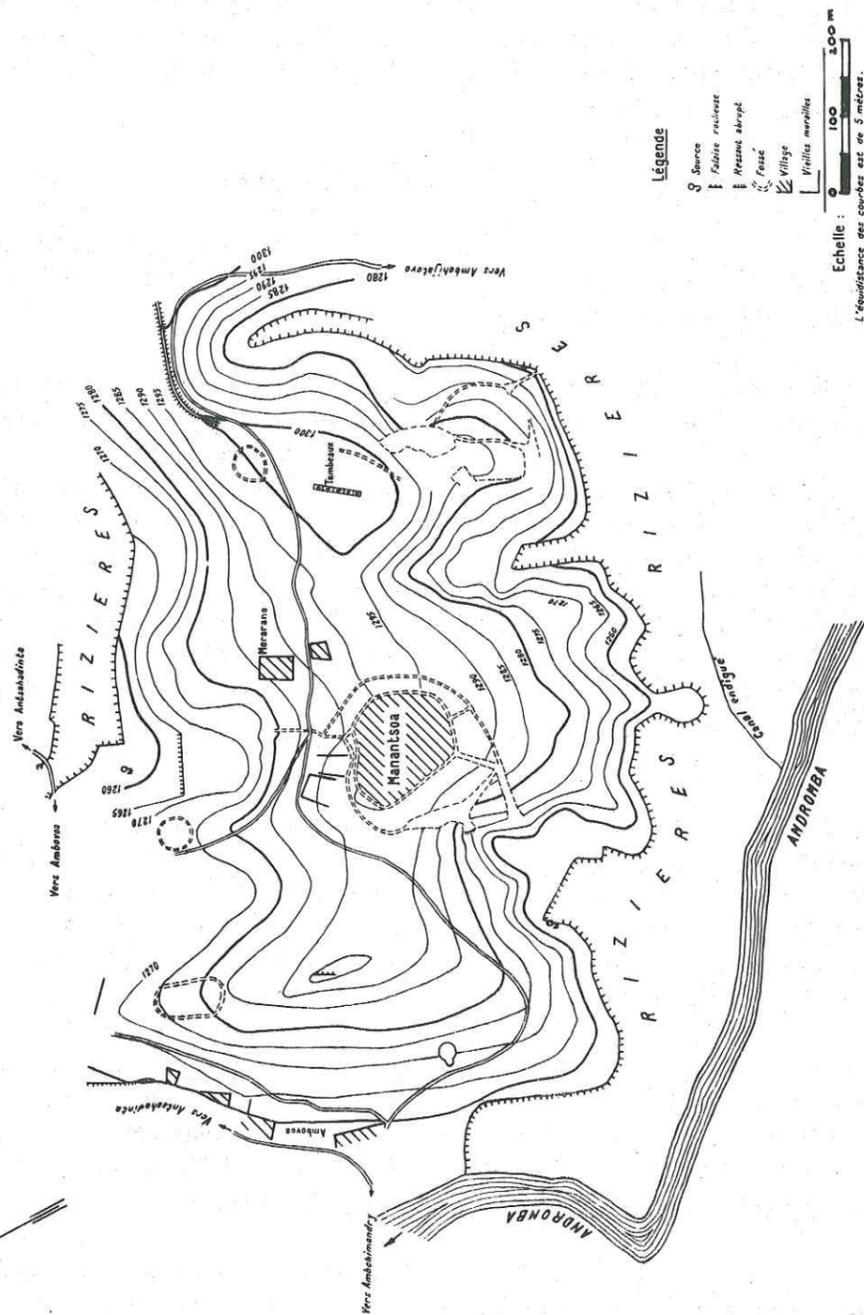


fig.29-SITE DE MANANTSOA

Appui rive droite
Levé de G. RAKOTOMAVO

aucun intermédiaire. L'idéal serait d'avoir un banc de roche saine qui servirait de butée à l'aval avant d'atteindre le marais (comme cela se présente du côté appui rive droite).

En outre, l'entaille due au petit canal de dérivation diminuera la valeur de l'appui en détruisant la cohérence de l'ensemble latéritique de cette partie aval de la zone d'appui, tout en favorisant l'établissement des lavaka.

- Menace de lavaka : la formation de lavaka s'amorce en effet au point $x = 785,69$; $y = 505,18$. L'extension n'est pourtant pas rapide. Toutefois le phénomène se manifeste et l'évolution s'effectue en direction du barrage. Le reboisement pourrait être une solution pour arrêter cette évolution.

1c/ Reconnaitances complémentaires à prévoir

Quelques travaux préliminaires s'avèrent indispensables pour compléter la reconnaissance de cet appui avant de se prononcer définitivement sur sa valeur :

- une tranchée recoupant la partie supposée terminale des bancs, au passage de l'axe, pour étudier l'état de fracturation, l'aspect des roches en profondeur et la partie altérée. Elle doit être assez profonde (au-delà des premières boules rencontrées) pour être significative;

- des sondages pour déterminer la cote d'apparition de la roche saine et celle de la nappe phréatique.

VI. B. 1-2. Appui rive droite

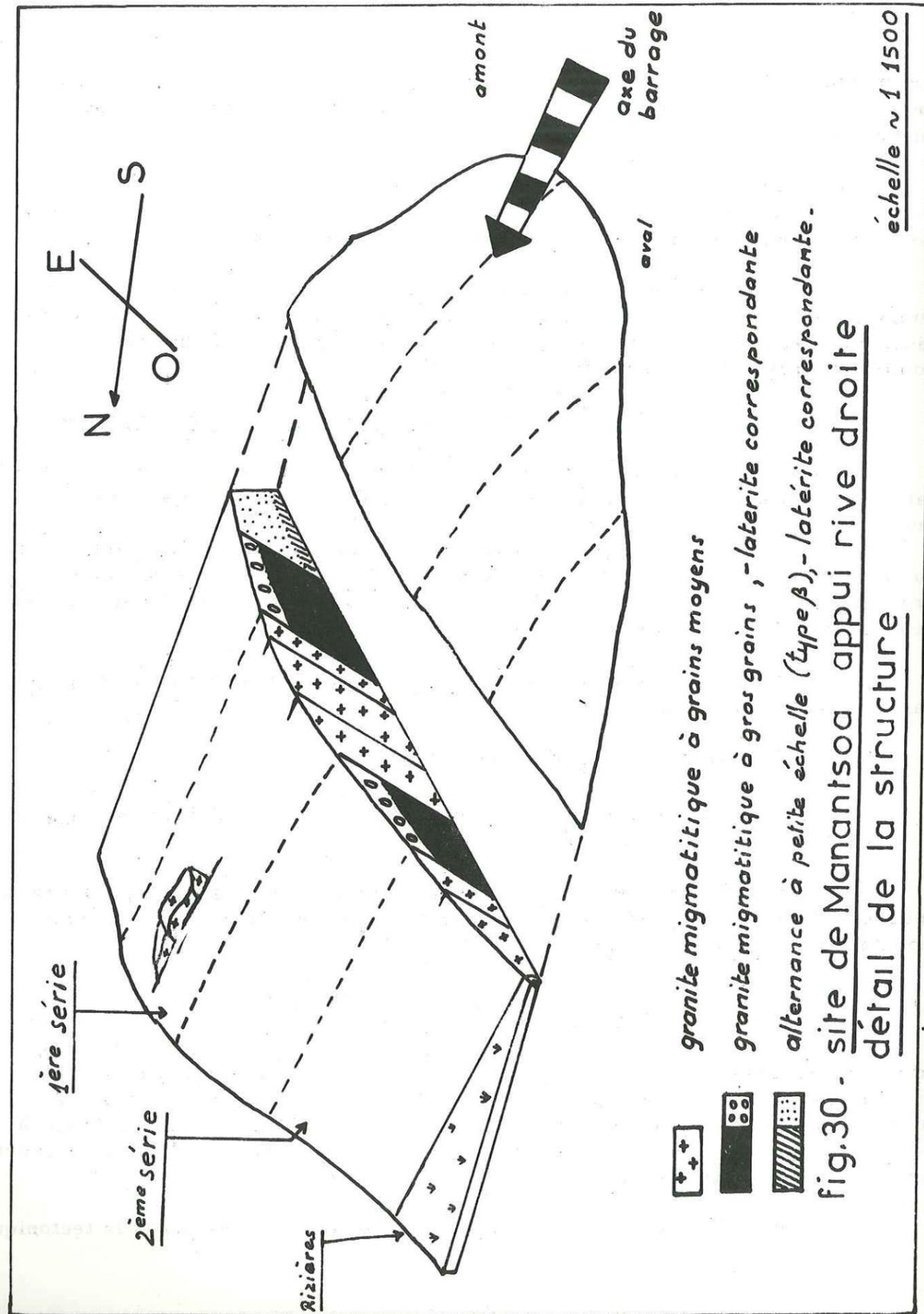
L'appui rive droite est constitué d'une croupe moins effilée que l'appui rive gauche.

Suivant l'axe du barrage, cette croupe part de la cote 1255 et atteint la cote 1300 d'abord par une pente assez forte (14 %) jusqu'à la cote 1280, puis par une pente plus douce (10 à 8 %) au-delà (fig. 29).

2a/ Aspect géotechnique

2a-1/ rappel géologique : on a une alternance de bancs métriques de granites migmatitiques l'un à grain moyen l'autre à gros grain. Le premier se présente sous forme de 2 séries de bancs de roche saine qu'on suit grâce à des boules ou des fragments de banc. Le second est réduit à l'état de latérite structurée "dure" en surface... Le tout est plus ou moins couvert par de la latérite argileuse.

Rappelons que ces formations semblent moins affectées par la tectonique



cassante que celles de la rive gauche.

2a-2/ Etude de la roche saine : l'axe du barrage aboutit sur la deuxième série de bancs à grain moyen (fig. 30). Les premières boules de cette série affleurent, en suivant l'axe du barrage, seulement à 300 m au NE de la berge d'appui.

Leur aspect paraît très sain. D'ailleurs ce ne sont pas des boules proprement dites mais plutôt des tronçons de bancs qui se trouvent en continuité entre eux en profondeur. On les exploite localement comme carrière (preuve de leur bonne tenue).

Quelques diaclases, peu ouvertes, (N100.80W, N50.60E), constituent un réseau assez lâche. Elles permettent aux roches de s'individualiser parfois en blocs énormes de 6 à 10 m de long.

Par construction graphique (fig. 27), ces bancs devraient passer juste au niveau de l'axe du barrage. Aucun affleurement n'est pourtant visible à la hauteur de l'appui lui-même. Néanmoins, la morphologie du terrain indique assez bien le passage d'une formation "dure" (aspect bosselé de la croupe). Nous pensons que la roche saine est présente à moins d'une dizaine de mètres de la surface.

L'autre série de granite migmatitique à grain moyen affleure au bas de pente, en aval de l'axe du barrage. Elle est plus tectonisée que la précédente mais l'ensemble reste cohérent. Sa direction parallèle à l'axe et sa situation en aval de celui-ci lui confèrent un rôle important pour le maintien du barrage.

2a-3/ Zone altérée ; aucune latérite structurée tendre n'est observable. On n'a que des latérites structurées "dures" dont les qualités sont définies dans le paragraphe III. A. 3b.

En surface on ne voit que de la latérite argileuse qui est ici particulièrement épaisse. Le puits n° 3 (fig. 27) montre que jusqu'à 2 m de profondeur, on se trouve encore dans le même faciès de latérite (éch. R. 7905).

2b/ Valeur de l'appui

Cet appui rive droite ne présente pas de problème particulier en l'état actuel de nos connaissances.

D'une part la stabilité est assurée par la série de bancs de roche saine affleurant en bas de pente. Elle servirait de butée pour le barrage lui-même, si l'appui s'effectuait sur de la roche saine, ou pour les latérites, si le barrage prenait appui sur elles.

D'autre part il n'y a pas de menace de formation de lavaka. La couverture de latérite argileuse épaisse et dure ne se laisserait pas entamer facilement et ainsi ne pourrait pas amorcer le début de cette forme d'érosion (cf. III. B. 3). Le banc de roche saine aval, en outre, empêcherait l'entraînement des éléments fins vers la vallée.

Du point de vue perméabilité, la disposition structurale des bancs par rapport à l'axe du barrage et l'existence d'une ossature de roche saine (du moins de bancs "durs") jouant le rôle d'écran, permettrait d'éviter toute fuite directe.

2c/ Conclusion

Compte tenu de la hauteur du barrage, la tenue des roches n'est pas du tout néfaste. L'appui est stable et la fuite peu probable.

Un point faible cependant mais qui n'aggrave nullement la situation de ce côté : c'est la disparition de la roche saine sous la latérite argileuse juste au niveau de l'appui. Il conviendrait d'y effectuer un sondage pour reconnaître la profondeur de l'horizon latéritique.

VI. B. 2. Zone centrale (thalweg)

Pour la zone centrale aucune détermination préliminaire n'a été encore faite.

Compte tenu des caractères tectoniques de cette zone et dans l'hypothèse vraisemblable d'une cassure qui aurait emprunté l'Andromba, on doit s'attendre à trouver une épaisseur relativement importante d'alluvions.

A 800 m en amont, à l'emplacement de l'ancien site proposé une série de pénétrètres ont été pratiqués pour la vallée de l'Andromba. Les résultats montrent que le socle rocheux apparaît entre -11 m et -14 m.

Par analogie, étant donné que les 2 emplacements appartiennent à la même zone tectonique (n'ayant pas toutefois la même direction de faille), on peut avancer, à titre indicatif, que le rocher sain au droit du barrage de Manantsoa n'apparaîtrait pas à moins de 10 m de la surface.

En outre il s'agirait de boules ou de fragments de bancs non en place. Seule une fouille encore plus profonde permettrait d'atteindre un ensemble plus cohérent. L'existence de bancs corrects est pourtant aléatoire, et on devrait procéder à d'importantes injections car les fissures seraient multiples et très ouvertes et les bancs peu épais.

VI. B. 3. La cuvette de retenue

L'ensemble de la retenue est bien encaissé. Partout, vers le Sud, les bancs rocheux constituent des murs hauts de plus de 100 m au-dessus de la vallée.

VI. B. 3-1. Rive gauche

Une faible portion seulement est représentée sur notre carte. On a un éperon rocheux où on voit des bancs continus en saillie vers le Sud. Ils constituent la ligne de crête. On peut supposer que la roche saine leur fait suite directement en profondeur et on n'a pas à craindre des fuites éventuelles. Il y a bien sûr le problème des fissures occasionnées par la tectonique (cf. VI. A. 2-2). Mais la disposition en bancs étroitement alternés, ceci sur une largeur relativement grande (de 200 m à plus de 800 m), a rendu cet ensemble plus souple du point de vue comportement mécanique et a permis une meilleure répartition des fractures. Ceci diminue les possibilités de fuite. En plus la retenue ne produisant pas un effet de pression énorme (niveau bas), le danger de percolation est éliminé.

VI. B. 3-2. Rive droite

Ici encore le flanc domine de 150 m à 200 m la vallée avec des roches saines dénudées sous forme soit de bancs soit de boules plus ou moins en place (cf. VI. A. 2-1b).

La colline de Manantsoa constitue cependant une exception. Profondément latéritisée et s'élevant au-dessus de la vallée à une moyenne de 30 m (le point haut la domine de 45 m), elle mérite une étude particulière.

VI. B. 3-3. Etude de la colline de Manantsoa

L'ensemble constitue une croupe molle allongée, comprise entre 2 vallées parallèles, de direction EW, qui débouchent dans la vallée de l'Andromba.

Longue de 1 200 m et large de 700 m, la colline se rattache au chaînon relativement haut constituant le flanc est de la cuvette de retenue.

Tant du côté amont que du côté aval par rapport au site, on a un certain nombre de "rentrants" (fig. 29):

- des thalwegs orientés NS occupés par des rizières ;
- plusieurs dépressions délimitées par une rupture de pente bien marquée, correspondant à d'anciens lavaka (fig. 31), (cf. III. B. 5) avec

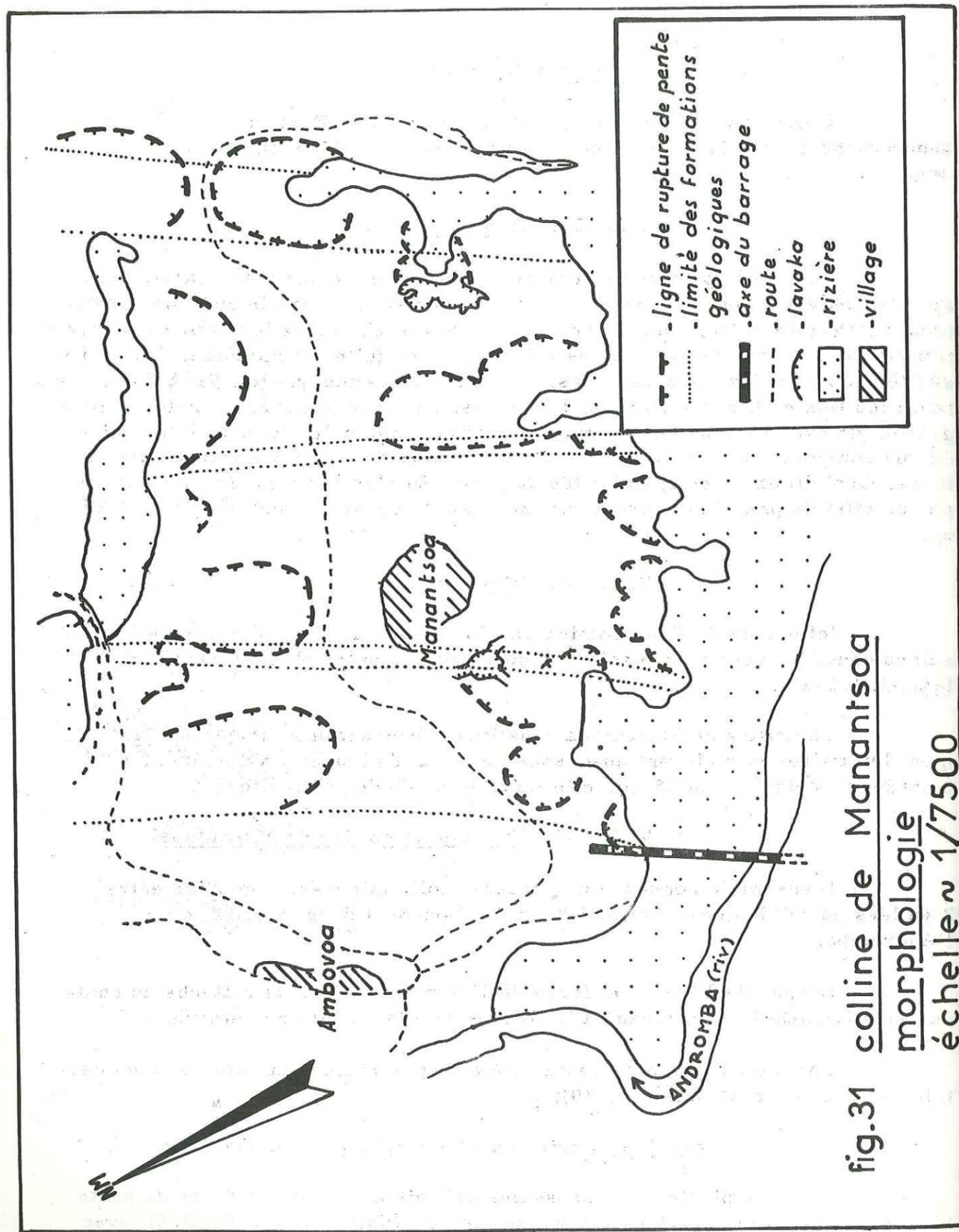


fig.31 colline de Manantsoa
morphologie
échelle ~ 1/7500

souvent au fond quelques cultures vivrières.

On constate que ces dépressions et thalwegs apparaissent grossièrement symétriques par rapport à l'allongement de la colline. Cette disposition est liée à la constitution et à la structure du terrain soumis à l'action consécutive de l'altération et de l'érosion.

3a/ Influence de l'altération

Les 2 vallées principales recoupent transversalement la direction structurale des bancs. Géologiquement ces derniers sont constitués de roches migmatitiques à grain varié avec une structure monoclinale pentée vers l'Ouest (cf. VI. A. 1-2).

Le processus de l'altération suivant chaque catégorie de roche suit ce que nous avons déjà exposé au chapitre des "latérites" (III. A. 2.). Mais chaque type d'association ne présente pas la même résistance à l'altération (cf. VI. A. 1-2).

Aussi les formations constitutives de cette colline se trouvent-elles altérées différemment suivant leur nature pétrographique. C'est ainsi que certaines zones, aidées par l'altitude basse de la colline, sont profondément latéritisées (jusqu'au niveau planimétrique de la vallée et même au-delà), tandis que d'autres présentent encore une ossature de roche saine surmontée de boules en surface.

3b/ Influence de l'érosion

Ces faciès d'altération (boules et latérites) ne présentent pas également la même résistance à l'action des agents d'érosion : les boules font saillie au milieu des latérites argileuses, alors que les latérites structurées "tendres" se laissent facilement attaquer (le processus de formation des lavaka est de règle à leur niveau, cf. III. B.).

L'action de l'érosion est donc fonction du degré d'altération des différents bancs. C'est ainsi que les dépressions et thalwegs n'apparaissent qu'à la hauteur des zones fortement latéritisées et parallèlement des 2 côtés de la colline.

En somme, la colline de Manantsoa est constituée d'une alternance de formations "dures" et "tendres". Verticalement la limite de l'altération est plus poussée pour les secondes (ce qui explique l'allure légèrement moutonnée de la surface) ; horizontalement l'action de l'érosion est toujours plus manifeste pour les formations "tendres", d'où l'alternance des dépressions et des croupes avancées.

3c/ Conséquences pour la retenue

3 c-1/ Effet de la différence d'altération : des formations profondément latéritisées se trouvent intercalées entre d'autres peu ou non latéritisées. Cette disposition, jointe à la structure monoclinale de l'ensemble contribue à canaliser les eaux d'infiltration de l'amont vers l'aval. Nous signalons en plus que la direction de la schistosité (pour les roches à minéraux orientés) et la direction des joints (pour les roches du type β) favorisent non seulement la latéritisation mais aussi la trajectoire des eaux infiltrées suivant une direction préférentielle qui est la leur.

3c-2/ Effet de la différence d'érosion : celle-ci, en localisant la formation des dépressions à l'endroit des zones à latérite structurée "tendre" (côté amont et aval en même temps), introduit un danger de percolation.

Nous donnons ci-dessous un tableau pour les dépressions les plus menacées (I et II de la fig. 24) ; la cote de la vallée étant de 1255 au droit du barrage.

cote en m	1260	1265	1270	1275	1280	1285	1290
percolation en I (en m)	800	450	350	300	260	220	150
percolation en II (en m)			400	300	150	100	70

Remarquons que le danger réel de percolation ne se manifeste à priori que pour les niveaux assez hauts de la retenue. Avec 15 m au droit du barrage, cela nous amène à la cote 1270, c'est-à-dire 350 à 400 m de percolation environ. Et encore, à cette hauteur (à l'endroit de la dépression), le niveau d'eau couvrirait à peine les rizières ; celles-ci cependant sont constituées d'argile plastique pratiquement imperméable.

3c-3/ Menace de formation de lavaka : si le problème de percolation semble être écarté pour cette colline de Manantsoa en raison du niveau de la retenue, la menace de lavaka n'est pas exclue. Le danger, occasionné toujours par la nature latéritique des bancs, n'est pourtant pas immédiat,

L'endroit menacé se trouve au Sud Ouest de Manantsoa (à côté de la zone d'appui) où le fossé entourant le village s'ouvre en brèche vers l'Andromba.

Morphologiquement le lieu est une dépression de forme arrondie, ouverte sur la vallée de l'Andromba. Cette dépression possède bien les caractéristiques d'un ancien lavaka.

Géologiquement, un banc de migmatite ocellée, de puissance métrique, constitue le flanc du fossé externe. Il sépare un ensemble formé de bancs alternés (type α) à l'Est (supportant le village) et de type β à l'Ouest qui s'étend sur plusieurs mètres de puissance.

Du point de vue de l'altération, le banc de migmatite ocellée, faiblement latéritisé, constitue une armature résistante. A l'Ouest, par contre, la formation est profondément latéritisée (l'existence de la dépression dont le bas fond parvient à la hauteur de la vallée en est témoin). Par ailleurs, le puits n° 4 (fig. 27) pratiqué jusqu'à 5 m de profondeur à partir du fond du fossé (soit à 7,50 m de la surface) reste dans de la latérite structurée "tendre" sans aucun indice de roche saine (boules ou latérite structurée "dure").

La menace de lavaka provient du fait que la hauteur de la retenue à cet endroit dépasse d'au moins 10 m le fond argileux imperméable de la dépression. L'eau se trouve alors directement en contact avec les flancs latéritiques de l'ancien lavaka, ce qui pourrait entraîner la reprise de celui-ci (fig. 32).

En effet, les clapotis du bord suffiraient à créer une excavation à leur niveau. A la longue, celle-ci entraînerait l'éboulement de la partie supérieure saturée d'eau par capillarité. L'eau d'infiltration de surface et le ruissellement au cours de la période des pluies achèveraient l'écroulement du pan ainsi formé, et le processus se continuerait de la même façon ¹.

En somme l'établissement de la retenue entamerait une reprise de l'ancien lavaka.

En l'état actuel de nos connaissances sur les lavaka, on n'arrive pas encore à prévoir leur limite d'extension une fois le phénomène amorcé. Selon J. RIQUIER, la stabilisation ne pourrait être atteinte tant que le déblaiement des produits d'éboulement serait toujours possible (c'est-à-dire tant que l'eau arriverait à saper la base), cf. III. B. 5. Dans ce cas, la reprise présumée de l'ancien lavaka s'étendrait encore assez loin en direction de l'aval et entraînerait de la sorte une réduction de la percolation.

1. Ce processus de formation est calqué sur celui exposé par J. RIQUIER dans "Les Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar" (étude sur les "lavaka", p. 169-189, t. VI, série D, 1954).

Précisons que la rupture de pente actuelle se situe à 100 m environ de la ligne de crête, et que celle-ci se trouve à moins de 25 m au-dessus de la retenue adoptée.

VI. B. 4. Conclusion

Le site de Manantsoa sur l'Andromba nécessite de prendre certaines mesures en raison de la structure géologique et du caractère fortement tectonisé et altéré des formations.

- Du point de vue topographique, l'appui rive droite répond assez bien à son rôle. Celui de la rive gauche, avec sa pente trop faible, ne permet qu'une retenue basse. Par la suite, le problème de comblement rapide reste à envisager.

La cuvette de retenue présente un aspect satisfaisant des 2 côtés, à part la colline de Manantsoa qui surmonte le niveau de la rivière seulement de 30 m.

- Du point de vue géologique, l'appui rive droite ne présente pas de problème particulier. L'existence de bancs de roche saine affleurant en aval élimine la possibilité de formation ultérieure de lavaka ainsi que la fuite directe sous l'appui.

L'appui rive gauche, par contre, nécessite encore des reconnaissances supplémentaires par sondages et tranchées pour contrôler les pronostics défavorables : d'importantes fracturations sont à prévoir en profondeur, occasionnant des fuites probables. En plus, la bordure aval de la croupe d'appui ne présente aucun passage de roche saine jusqu'au niveau de la vallée. Enfin la menace de lavaka est à redouter.

Quant à la zone centrale, une épaisseur importante d'alluvions (plus d'une dizaine de mètres) serait à prévoir, malgré la largeur réduite de la vallée, à cause de la faille que suit l'Andromba. L'étude de leurs caractères mécaniques en laboratoire sera indispensable.

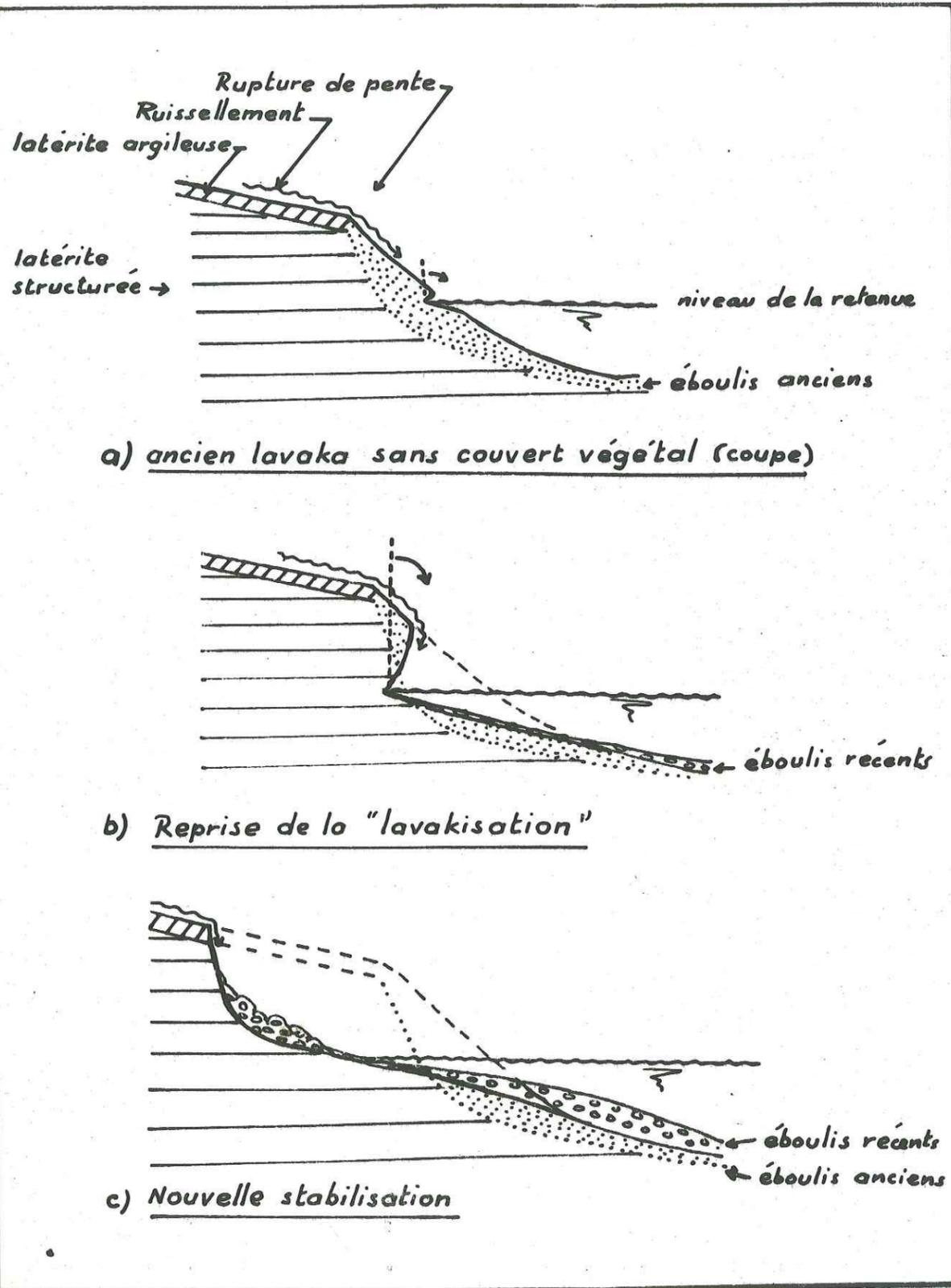


fig.32. reprise d'un ancien lavaka

CHAPITRE VII

SITE D'ANTARAMANANA SUR L'IKOPA

Ce site a été l'objet de 2 reconnaissances préliminaires du point de vue géologique : en 1966 par G. NOIZET et en 1967 par R. BARBIER.

Les appuis sont constitués de quartzites qui affleurent très mal. G. NOIZET émettait une grande réserve sur leur étanchéité. Pour R. BARBIER, "il est possible (et même probable) que l'on n'a pas affaire à une masse quartzitique homogène mais plutôt à des alternances de bancs de quartzite plus ou moins épais et de passage de roches micaschisteuses très décomposées".

Tous deux recommandaient la nécessité d'une reconnaissance plus poussée et plus détaillée du terrain en matière de géologie.

Aucune carte géologique à grande échelle n'avait été encore effectuée sur le site ni sur ses environnements. Le lever au 1/100 000 de la feuille Tananarive-Manjakandriana reste la seule documentation. Certes il ne fournit pas de renseignements de détail mais la structure d'ensemble de la zone intéressée se dégage bien, ce qui nous a beaucoup aidé pour l'interprétation.

Par ailleurs un certain nombre de reconnaissances de la vallée a été effectuées par le L. B. T. P. : essais au pénétromètre et sondages à la tarière.

De son côté, le Service Géologique de Madagascar a mis à notre disposition comme base de travail les photos aériennes au 1/5 000 de la zone du site.

Le site lui-même se trouve à 10 km au Sud Est de Tananarive en suivant la route de Ambohimambola-Masindray. La Plaine de Tananarive proprement dite débute dans ce secteur.

Nous rappelons que :

- l'Ikopa, intéressée par ce site, est la rivière principale desservant cette plaine. A la hauteur d'Antaramanga, elle présente une largeur de 60 à 100 m, avec un débit de 30 m³/s à l'étiage mais qui peut dépasser 225 m³/s en saison de pluie.;

- du point de vue géologique, on se trouve dans une zone où prédominent les paragneiss du Système du Graphite.

Les études antérieures prévoyaient la formule de barrage souple (digue en latérite) avec une passe de crue obturée par des vannes levantes (fig. 33, Pl.).

Voici quelques caractéristiques du barrage projeté :

- volume de la retenue au déversoir	: en millions de m ³ -----	80 ..
- cote du seuil -----	en mètres -----	1 257
- cote de P. H. E. -----	" -----	1 273, 50
- cote d'arase de la digue -----	" -----	1 276, 50
- hauteur de la digue -----	" -----	22, 50
- volume de la digue -----	en milliers de m ³ -----	360

VII. A. - ETUDE GEOLOGIQUE

Comparativement aux sites précédemment étudiés, celui d'Antaramana se trouve dans une zone comportant plusieurs ensembles géologiques bien différenciés, qui ont été traités d'une façon très générale dans le chapitre de la géologie régionale (cf. chap. II).

Pour l'instant, nous allons détailler, mais d'une façon très locale, la constitution de cet ensemble avant d'aborder les études pétrographique, structurale et tectonique.

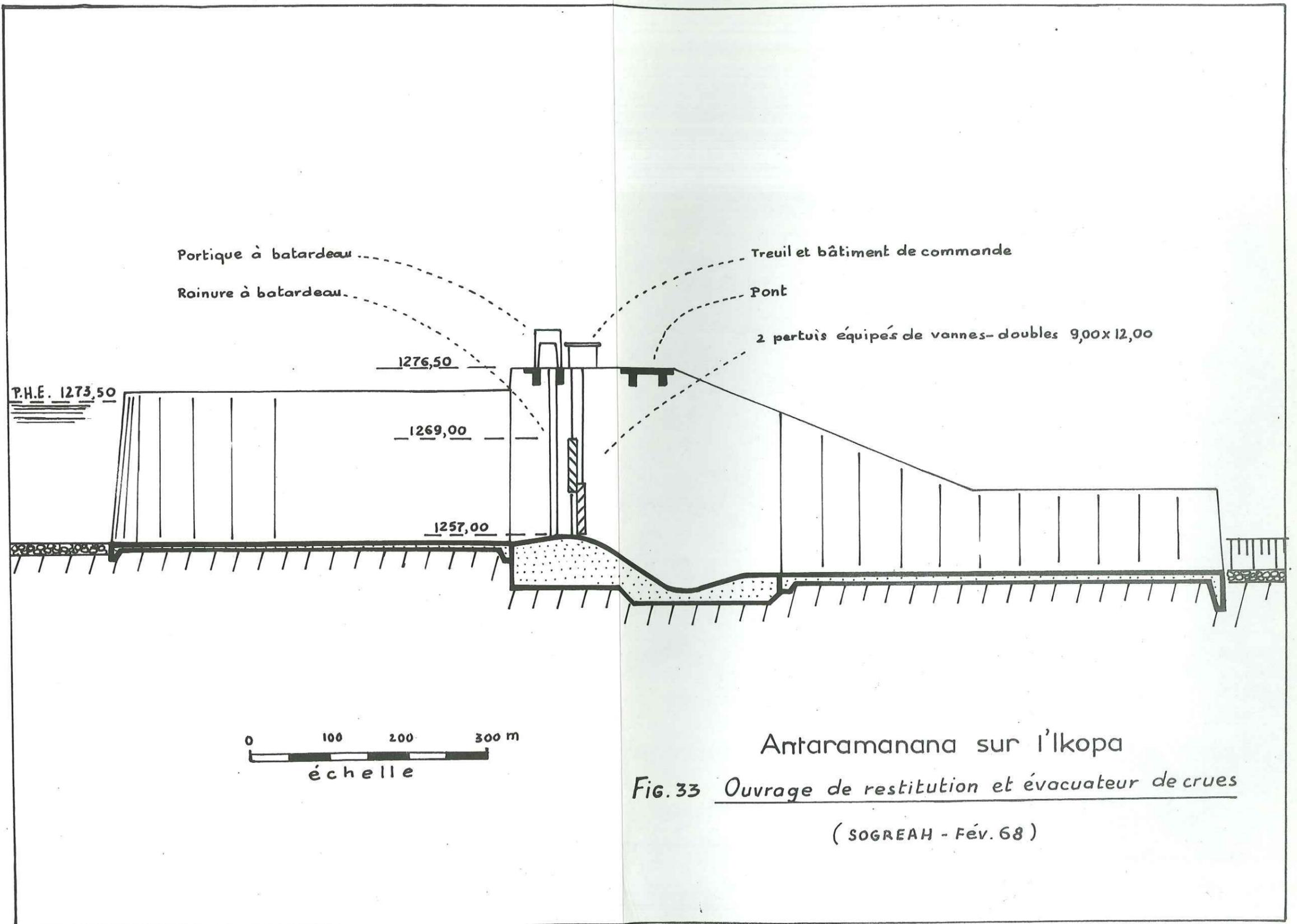
VII. A. 1 - Constitution géologique

Pour ce site d'Antaramana, 3 ensembles géologiques se dégagent nettement :

- les formations non granitisées,
- les formations granitisées,
- les formations intrusives récentes.

VII. A. 1-1. Les formations non granitisées

Ce sont d'anciens sédiments métamorphisés lors du cycle majeur de



2 600 MA (cf. 2, B). Elles sont largement décrites dans la notice du lever au 1/100 000 de la région de Tananarive.

Dans la partie qui nous intéresse, on a :

1a/ Des gneiss à structure rubanée (rarement ocellée) : ils se présentent en bancs minces (souvent inférieurs à 10 m d'épaisseur), en alternance plus ou moins régulière.

Un banc de composition pétrographique donnée peut revenir ainsi plusieurs fois dans la série. Ainsi en est-il par exemple d'une formation micaschisteuse dont l'épaisseur ne dépasse guère 5 m et que l'on préfère dénommer au sein du groupe par "gneiss surmicacé". "... Cette appellation a l'avantage à la fois de mettre l'accent sur la composition minéralogique particulière de ces roches, sans prêter confusion du point de vue zonéographique ..." (G. HOTTIN, feuille Ambatolampy 1/100 000, 1965).

1b/ Des quartzites : qui se présentent en plusieurs ensembles de bancs minces, chaque banc ne dépassant pas 5 m de puissance.

Indemnes de la latéritisation, leur présence constitue souvent des reliefs révélant ainsi la structure d'ensemble de la zone intéressée. Ils constituent en majeure partie les croupes d'appui et leurs environnements.

VII. A. 1-2 - Les formations granitisées

Elles comprennent les migmatites granitoïdes et les granites de type Ambatomiranty.

2a/ Les migmatites granitoïdes

Elles occupent une zone relativement vaste du côté amont. Elles affleurent rarement car elles sont enfouies sous des formations latéritiques. On en trouve au Sud du village Ambatobe et au Nord du lac Nanganona. Ici, comme ailleurs, migmatite granitoïde et granite migmatitique alternent en bancs relativement étroits.

2b/ Les granites de type Ambatomiranty : on les rencontre soit aux abords des vallées (région sud ouest de la carte) soit comme constituant l'ossature d'une colline entière (cas du village Ambatobe et au Sud du village Mandrangobato). Ils affleurent sous forme de boules parfois énormes formant saillies et disposées en chaos.

On remarque que cette formation se situe ici au contact entre les

migmatites et les paragneiss.

En ce qui concerne leur origine, nous renvoyons le lecteur au paragraphe II. C. 2a.

VII. A. 1-3. Les formations intrusives récentes

Elles sont représentées par des filons de dolérites qui recoupent les formations paragneissiques. Leur puissance ne dépasse pas 20 m.

Ces filons résistent bien à la latéritisation sans former pour autant de crêtes remarquables comme pour les granites et les quartzites.

VII. A. 2 - Pétrographie

Plusieurs variétés pétrographiques sont rencontrées sur ce site. Comme la latéritisation est fonction également de la composition minéralogique et de la structure de la roche (cf. sites précédents), il s'ensuit qu'elle affecte différemment ces diverses variétés.

VII. A. 2-1 - Les formations non granitisées

1a/ Les gneiss

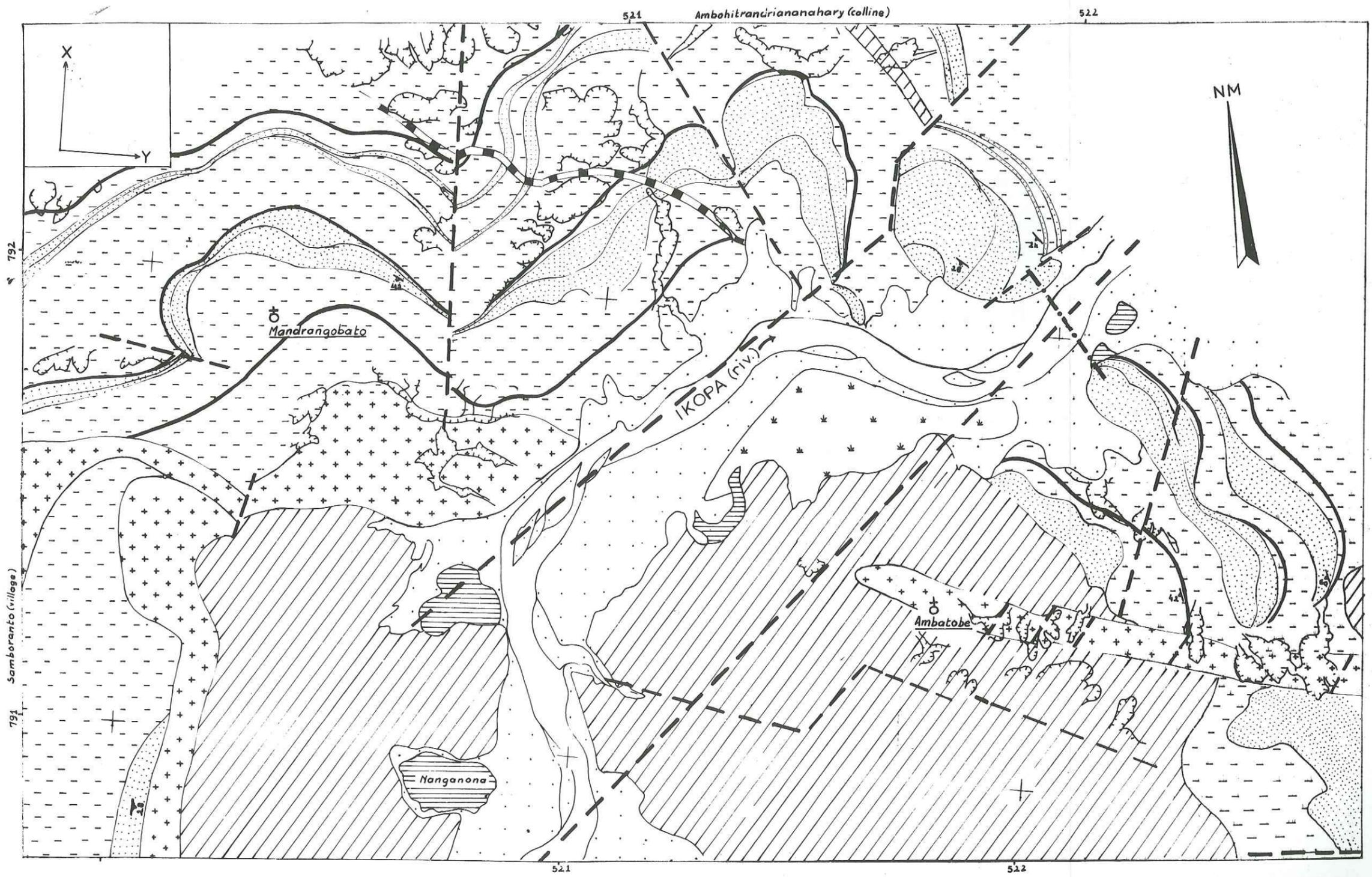
Les faciès gneissiques sont très variés. Malheureusement il nous est impossible de donner des détails microscopiques, ces roches étant partout fortement latéritisées.

On doit donc se rabattre sur les latérites structurées correspondantes qui témoignent assez fidèlement de la structure, mais ne permettent pas bien sûr de déterminer tous les minéraux.

Ainsi, on peut distinguer à partir des diverses latérites structurées les formations gneissiques suivantes :

- gneiss normaux : on voit encore les restes non altérés de feldspath et de biotite. Les grains sont parfois grossiers. La structure est rubanée : alternance de latérite blanche assez résistante et de latérite avec une teinte bariolée où domine le rouge ;

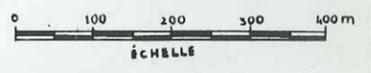
- gneiss à grenat : la latérite est de couleur jaune verdâtre mouchetée de noir. Le grenat n'est pas aussi régulièrement réparti que précédemment et la dimension est plus faible. Dans le lavaka (x = 792, 34 ; y = 520, 66). La sillimanite apparaît en aiguilles soyeuses blanches disséminées dans des pro-



LÉGENDE

-  alluvions
-  dolérite
-  granite type Ambatomiranty
-  granite migmatitique
-  quartzite
-  micaschiste
-  gneiss
-  faille
-  pendage
-  lavaka
-  marais
-  étang
-  village
-  axe du barrage

fig.34
SITE D ANTARAMANANA
GÉOLOGIE



duits kaoliniques. Le tout enchasse des grenats subsphériques de 1 cm de diamètre. Altérés en hématite, ceux-ci se présentent avec une teinte brun noirâtre. Les grenats sont nombreux et disposés régulièrement. L'ensemble possède ainsi une structure ocellée.;

- gneiss à grenat : la latérite est de couleur jaune verdâtre mouchetée de noir. Le grenat n'est pas aussi régulièrement réparti que précédemment et la dimension est plus faible. Dans le lavaka $x = 792,40$; $y = 520,61$, un flanc fraîchement décapé montre une structure rubanée marquée par des zones nettement micacées et d'autres fortement kaoliniques. L'épaisseur des lits n'est pas toujours régulière ;

- gneiss "surmicacés" : ils donnent une latérite qui se désagrège facilement en laissant voir des restes non altérés de paillettes de micas enrobées de leurs produits d'altération. Le tout se présente avec une teinte "lie de vin" caractéristique.

Ces gneiss sont localement minéralisés en graphite et en manganèse. Le graphite se présente alors soit en veines d'ordre décimétrique, interstratifiées, soit en lamelles fines associées à du kaolin. Quant au manganèse, il se trouve intimement associé aux autres composants de la latérite qui prend alors une teinte noirâtre.

1b/ Les roches à faciès pegmatitique

Ce sont des roches à gros éléments de quartz et d'orthose (2 à 4 cm). Elles se rencontrent en intercalations dans les formations précédentes. Les affleurements de roche saine, en boules énormes de 5 m x 6 m sont cependant rares.

Elles sont caractérisées par une cassure très rugueuse. Les biotites sont rares, petites et dispersées. On rencontre du grenat en petits grains millimétriques, formant des petits amas épars dans la roche.

1c/ Les quartzites

On peut rencontrer 2 types de quartzites :

- les quartzites purs : d'un blanc vitreux, ils sont les plus abondants. Deux familles de diaclases rectangulaires prédominent ; l'une est perpendiculaire à la surface structurale ; très étroite, elle revient tous les 3 à 10 cm.

Leur présence est caractérisée par des éluvions qui vont, suivant les endroits, de quelques centimètres à des blocs décimétriques. Ils parviennent à

couvrir des collines entières et paraissent protéger celles-ci des attaques de lavaka ;

- les quartzites à grenat : ils sont plus compacts. Le grenat de 2 à 4 mm de diamètre, souvent altéré superficiellement en hématite, se trouve enchassé dans le quartz. De rares passages de fines paillettes de biotite sont observables à l'oeil nu. On les rencontre surtout au Nord de la zone cartographiée, sur la colline Ambohitrandriananahary.

VII. A. 2-2 - Les formations granitisées

2a/ Les migmatites granitoïdes et les granites migmatitiques

Nous renvoyons le lecteur aux sites précédents ainsi qu'au chapitre "migmatites" (II. D. 2) pour la description des faciès migmatito-granitiques qui sont ici les mêmes.

Ajoutons que des filonnets quartzo-feldspathiques, d'épaisseur centimétrique, parcourent souvent ces roches en tout sens et constituent un réseau à mailles serrées. On trouve parfois des enclaves gneissiques à bord franc et de surface variée, (par exemple en x = 791, 21 ; y = 521, 85, sur le passage d'un ruisseau ; à quelques dizaines de mètres en aval, on rencontre aussi un large septum de gneiss rubané à bord flou, dont la surface affleurante couvre plus de 4 m²).

- Aspect au microscope (lames minces R. 7988, R. 7991). Pour R. 7988 (près du lac Nanganona) :

Minéraux :

- quartz à extinction roulante,
- orthose parfois en grosse plage maclée Carlsbad, quelques microclines et des plagioclases résiduels,
- hornblende verte et biotite en association, déplacées et déchiquetées, sans orientation définie,
- beaucoup d'apatite ; sphène et magnétite accessoires.

La texture est hétéro-porphroblastique avec un caractère nettement cataclastique.

La lame R. 7991 (x = 792, 55 ; y = 521, 58) possède la même texture. Elle montre des minéraux relativement gros. Les biotites présentent un cer-

tain alignement. Les plagioclases sont aussi rares que dans R. 7988. Pas d'amphibole, mais on remarque l'abondance du grenat en grains millimétriques.

2b/ Le granite de type Ambatomiranty

Le type fréquemment rencontré est leucocrate, grenu, isodiamétrique. (1 mm).

Quelques filonnets feldspathiques (1 m de large en général) sillonnent les faces observables. Ils sont rarement discontinus. Serrés, ils donnent à l'ensemble un aspect plus clair, presque bariolé.

- Aspect au microscope : (lames minces R. 7974 à R. 7977)

Minéraux :

.....

- beaucoup de quartz, à extinction roulante ;
- pour les feldspaths, à part l'orthose, on remarque la prédominance de microcline et des résidus de plagioclases ; beaucoup de myrmécite ;
- absence d'amphibole ; les biotites sont disséminées ;
- à côté du zircon, qui est rare, le sphène et l'apatite sont particulièrement abondants. On note aussi l'importance de la magnétite.

Texture : granoblastique cataclastique.

.....

VII. A. 2-3. Formation intrusive récente

Il s'agit d'une roche mélanocrate à structure microgrenue doléritique. A l'oeil nu, on peut observer des lattes de plagioclases enchevêtrés, noyées dans une pâte microcristalline noire. Les boules sont petites mais de dimension variée : du centimètre au mètre.

- Aspect au microscope : (lames minces R. 7900 et R. 7987)

R. 7980 (cet échantillon provient d'une boule rencontrée en rive droite : x = 791, 89 ; y = 522, 42) : texture ophitique avec andésine (An = 33) et augite. Les craquelures sont faiblement serpentinisées ; beaucoup d'apatite.

L'échantillon R. 7987 a été prélevé sur le filon marqué sur la carte en rive gauche. C'est une variante à grain plus fin. L'altération en serpentine est beaucoup plus marquée le long des craquelures des pyroxènes. Ceux-ci présentent parfois une texture zonée (macles en sablier).

La pâte microcristalline possède une teinte jaune verdâtre en lumière naturelle et grise en lumière polarisée (prédominance de serpentine).

- Latérite correspondante : teinte jaune verdâtre, non granulée, peu épaisse (environ 1 m).

VII. A. 3. Structure

Plusieurs unités structurales ont été reconnues sur le site de Antaramana. On peut en distinguer plusieurs catégories :

- les formations non granitisées du Système du Graphite. Elles constituent la partie nord d'un périsynclinal dont l'axe a une direction subméridienne,
- les migmatites : elles occupent le fond du périsynclinal,
- les formations recoupantes : elles traversent le périsynclinal suivant 2 directions : SW-NE et ESE-WNW.

VII. A. 3-1. Les formations non granitisées du Système du Graphite

Leur structure est assez nette car on les voit affleurer en plusieurs endroits. Elle se décèle surtout grâce aux bancs de quartzite. Ceux-ci, difficilement attaquables par l'érosion, forment relief et on peut ainsi les suivre de part et d'autre de l'Ikopa. Ils dessinent grossièrement un arc dont la concavité est tournée vers le Sud.

On se trouve en présence d'un périsynclinal s'ouvrant vers le Sud.

En effet, en rive droite de l'Ikopa, les quartzites, de direction N-S, s'incurvent vers le NW près de l'axe prévu du barrage. Leur plongement est de 40° à 50° W.

En rive gauche, cette allure incurvée se continue jusqu'à ce que les formations reprennent, à l'Ouest du lac Nanganona, une direction subméridienne (N10.28E).

Quelques variations locales compliquent la forme de ce périsynclinal. Signalons en particulier l'intervention d'un perianticlinale qui s'ouvre vers le Nord et qui aboutit au Nord du village de Mandrangobato. Il se matérialise au fond d'un lavaka en x = 792, 40 ; y = 520, 61 par un petit dôme de gneiss latéritisé.

Remarques

.....
- L'allure structurale de l'ensemble gneissique suit en gros ce périsynclinal. Cependant, sa direction n'est pas toujours conforme à celle des quartzites.

tes. Le "gneiss surmicacé" latéritisé que l'on peut suivre facilement sur le terrain "recoupe" les bancs de quartzites. Ceux-ci ont dû jouer le rôle de niveaux compétents vis-à-vis des gneiss plus plastiques.

- Si le plongement du flanc oriental avoisine 40° à 50° Ouest, celui du flanc occidental est de 28° Est. Ce périsynclinal est donc dissymétrique.

A l'extrême Est de la carte, le flanc du synclinal devient celui d'un anticlinal dont l'axe passe en dehors de notre secteur.

VII. A. 3-2. Les migmatites

Elles occupent le fond du périsynclinal précédemment défini. Ce sont pour la plupart des granites migmatitiques. Aucune structure géologique nette n'est décelable. On note simplement qu'elles constituent des bancs orientés généralement NE-SW et plongeant constamment vers l'Ouest.

VII. A. 3-3. Les formations recoupantes

Nous avons successivement les granites de type Ambatomiranty et les intrusions filoniennes doléritiques.

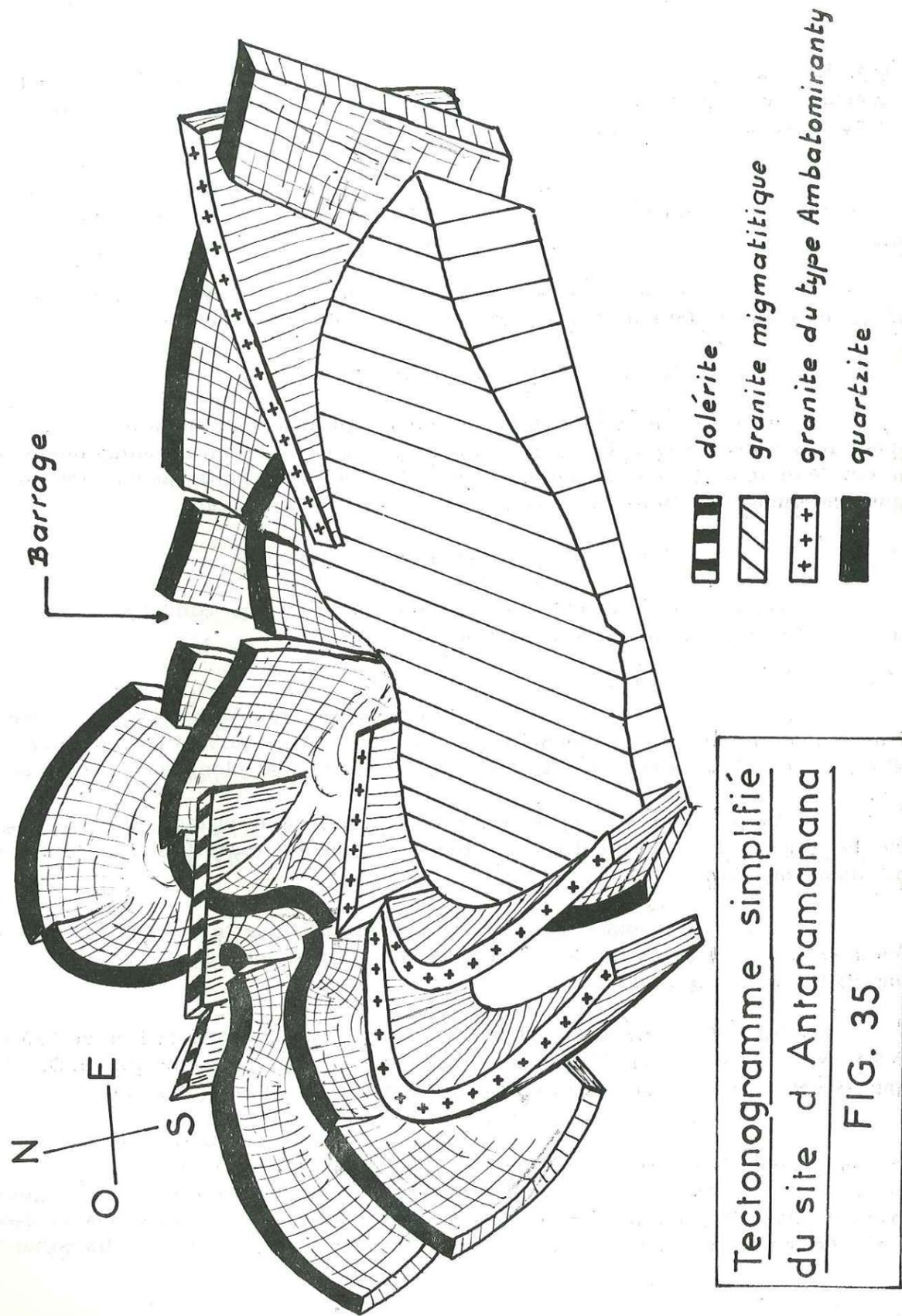
3a/ Les granites de type Ambatomiranty : ils constituent des lames filoniennes traversant le secteur suivant 2 directions différentes : ESE - NNW, plongeant à 54° S et NNE-SSW plongeant vers l'Est.

La première catégorie est rencontrée près du village de Ambatobe. On la retrouve de l'autre côté de l'Ikopa constituant le massif au Sud du village de Mandrangobato.

A l'extrême ouest de la carte, les filons de cette catégorie s'infléchissent brusquement vers le Sud pour suivre la deuxième direction à hauteur du village de Samboranto.

En fait, la première direction s'avère particulière si l'on se réfère à l'orientation générale (N40) des filons du même type de roche (cf. II. D. 1) qui se dégage nettement sur la carte régionale au 1/200 000 (fig. 1).

Ces granites recoupent indifféremment les autres formations du secteur. Ils semblent suivre la limite entre migmatites et paragneiss. Au Sud de Mandrangobato par exemple, la lame granitique qui remonte à une centaine de mètres au-dessus de la vallée, constitue une sorte de barrière entre les 2 faciès, tandis qu'au



Sud elle se trouve directement en contact avec les migmatites.

A proximité du village de Ambatobe, la limite entre granite ordinaire et granite migmatitique demeure incertaine par suite de la ressemblance des faciès. Le granite de type Ambatomiranty se dégage nettement plus à l'Est en recoupant le flanc est du perisynclinal.

3b/ Les dolérites : elles sont orientées généralement ESE-WNW et plongent de 40° à 80° vers le Sud. Au Nord de l'Ikopa, on peut suivre en continuité sur plus de 800 m un filon qui recoupe les formations paragneissiques. C'est le seul endroit où on peut le suivre correctement. Un peu partout, dans les formations paragneissiques, on en rencontre quelques petites boules éparses. Etant donné la fréquence de ces boules, il semble que les intrusions doléritiques ne sont pas rares dans la région. Mais, soit elles n'arrivent que difficilement en surface, soit elles constituent des petites intrusions locales morcelées par la tectonique. Les pyroxènes n'ayant pas subi d'ouraltisation, ces intrusions doivent être relativement récentes, en tout cas postérieures aux phénomènes de granitisation.

En résumé, la structure géologique du site d'Antaramanana est un périclinal subméridien ouvert vers le Sud et constitué par les formations non granitisées du groupe d'Ambatolampy qui appartient au Système du Graphite.

Le fond est représenté par des migmatites dont la formation a dû s'effectuer vers 550 MA par comparaison avec les autres formations régionales du même type (cf. II. C. 1a).

Le tout est traversé par des filons granitiques dont l'âge radiométrique de 1 050 MA paraît aberrant puisqu'ils recoupent les migmatites, et par des dolérites d'âge probablement crétacé. Les premiers ont à l'Ouest une orientation de N40 qui s'infléchit à N100 au Sud de Mandragobato ; les seconds suivent cette deuxième direction. Ils sont localisés plus au Nord dans le domaine des paragneiss, mais ils doivent être plus abondants que ne le montre notre carte.

VII. A. 4. Tectonique (fig. 34 et 35)

Comme pour toutes les zones de bordure de la Plaine de Tananarive, le site d'Antaramanana montre de nombreuses traces d'une tectonique cassante complexe.

Plusieurs cassures relativement importantes affectent la zone étudiée. Certaines sont faciles à déterminer, d'autres sont plus hypothétiques.

VII. A. 4-1. Secteur Sud Ouest

C'est le secteur le moins accidenté. Il est caractérisé par la forme arquée de la lame granitique, laquelle est recoupée par une vallée de direction N20. La partie orientale de cette lame granitique présente une surface structurale de N84.54S ; celle à l'Ouest de la vallée possède la même direction mais elle est plus redressée. De la sorte on peut considérer que la vallée s'est installée dans une cassure qui s'est accompagnée d'un effondrement de la partie ouest, le rejet étant de quelques dizaines de mètres tout au plus. Quant à savoir si cette cassure a étendu ses effets sur les autres formations environnantes, il ne nous est pas possible de le dire.

VII. A. 4-2. Secteur Nord

Les paragneiss constitutifs y sont fortement latéritisés. S'il est difficile et aléatoire de raisonner sur des latérites structurées, il y a par contre des bancs de quartzites qui témoignent fidèlement de la tectonique d'ensemble.

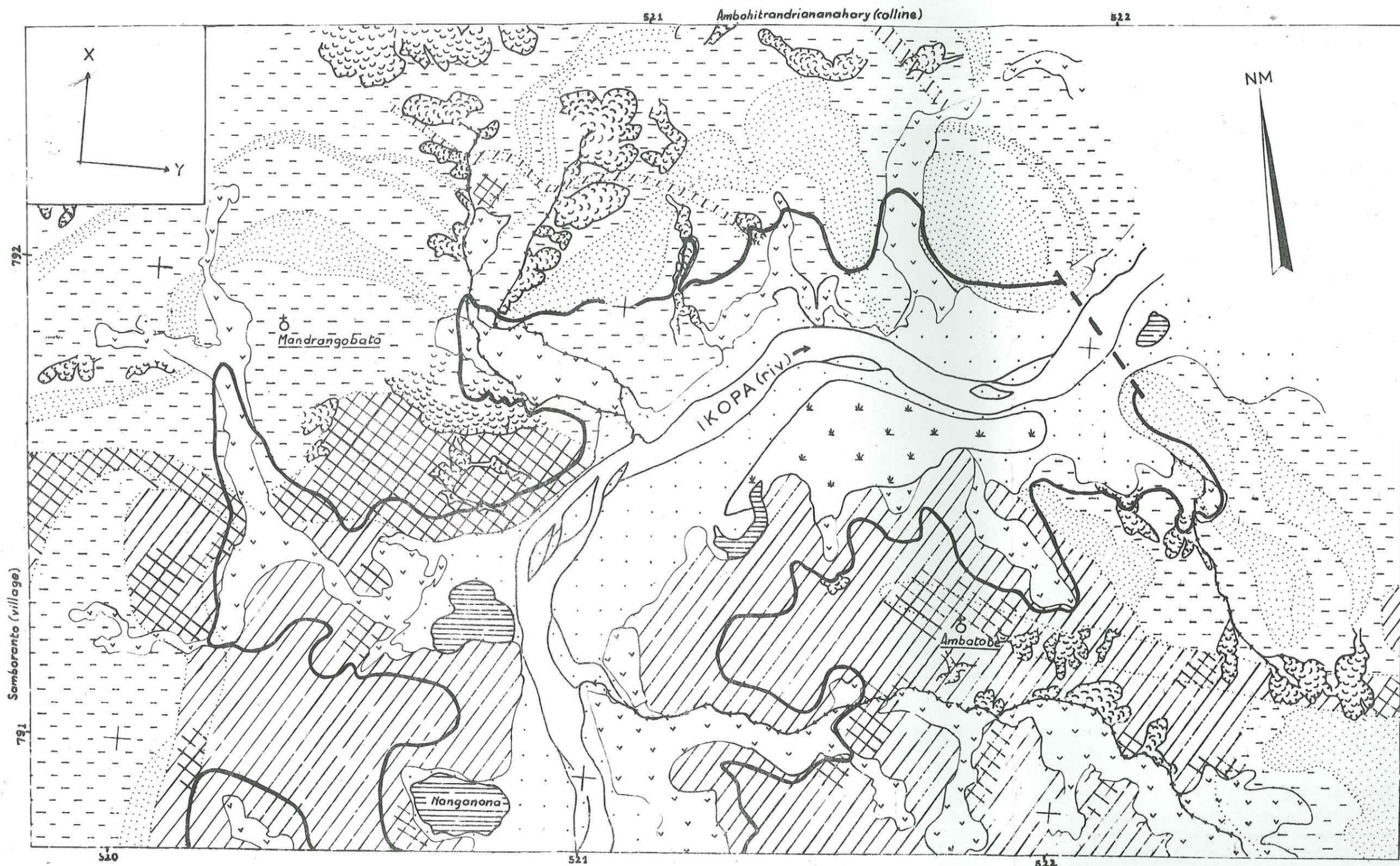
2a/ Zone du périantoclinal : on a une vallée qui s'ouvre en combe vers le Sud (fig. 38). Les rebords sont affectés de lavaka qui laissent apparaître sur leurs flancs l'agencement des bancs.

On constate facilement une anomalie de la forme de ce périantoclinal en suivant la direction des bancs : le flanc est est plus redressé que le flanc ouest et la direction structurale présente une nette discontinuité.

Certains faits s'observent sur le terrain. Ainsi on remarque le redressement du filon doléritique dans la vallée : de N80.40S à l'Ouest, il devient N100.80S. En plus le lavaka du fond, immédiatement au Sud Ouest de celui qui renferme le dôme témoin du périantoclinal, montre des couches de gneiss latéritisés dérangées et sectionnées par plusieurs cassures locales, probablement satellites d'une cassure principale.

On peut en déduire qu'un accident suit la direction de la vallée et est localisé plus particulièrement à son rebord ouest. Il a provoqué un redressement vers le Sud ne dépassant pas une vingtaine de mètres.

On note que pour le filon de dolérite, le décalage entre les deux parties se remarque à peine. Sur le terrain, on constate même^{que} le compartiment est se trouve légèrement déplacé vers le Nord au lieu d'être entraîné à plusieurs mètres vers le Sud comme les autres formations. La variation brusque de direction et le redressement du compartiment est sont tout à fait remarquables.



LÉGENDE

- alluvion sablonneuse
- argile plastique
- éboulis sablo-argileux
- latérite structurée
- boules noyées dans de la latérite structurée
- boules affleurantes
- blocs et éluvions de quartzite
- lavaka
- marais
- étang, lac
- village
- axe du barrage
- limite de la retenue

fig.38
site d'Antaramanana
formations superficielles

0 100 200 300 400m
ÉCHELLE

De la sorte on a une cassure qui a provoqué d'une part un décrochement dans les seules formations non granitisées du Système du Graphite et d'autre part un effondrement affectant lui un filon doléritique récent (et certainement aussi son encaissant bien qu'il n'a pas pu être mis en évidence). On a donc là un exemple d'un rejeu d'une très ancienne cassure.

2b/ Abords du barrage : ils sont constitués par des paragneiss et des quartzites.

i) En rive gauche de l'Ikopa : l'étude des quartzites et des migmatites montre l'existence d'une cassure relativement importante.

Le flanc est du périantoclinal précédemment décrit montre du Sud au Nord la succession suivante :

- une série de quartzites en petits bancs accolés les uns aux autres,
- une formation de gneiss latéritisés, incluant un banc de gneiss surmicacé,
- un banc de migmatite granitoïde,
- de nouveau des gneiss latéritisés,
- une seconde série de quartzites en plusieurs petits bancs rapprochés.

La colline d'appui, immédiatement à l'Est de la zone précédente, révèle une anomalie manifeste. En effet :

- les bancs de quartzites qui la constituent, au lieu de relayer normalement une des séries de quartzites précédentes, sont brutalement interrompus à hauteur de la première vallée amont ;

- le banc de migmatite granitoïde, bien représenté à l'Ouest, disparaît complètement à l'Est ;

- les bancs de quartzites se trouvent pincés en bordure de cette vallée.

Il y a donc une nette discontinuité structurale en rive gauche de l'Ikopa. Tout se passe comme si une poussée tectonique NE-SW avait affecté ce panneau, provoquant ainsi son déplacement relatif vers l'intérieur du périclinal.

ii) Au niveau de l'Ikopa elle-même = les principaux faits suivants se dégagent des observations effectuées le long des berges :

- sur les 2 rives, la direction générale des formations est la même (NW-SE), mais les bancs de quartzites ne se situent pas pour autant dans le même prolongement : ceux de la berge gauche se trouvent déplacés plus au Sud, ce qui con-

firme le mouvement relatif décrit précédemment ;

- les quartzites de la rive droite présentent un aspect tordu, étiré, pincé, avec des reliefs locaux (fig. 37) ; mais vers le Sud Ouest ils reprennent une allure normale et forment le flanc normal du périsynclinal ;

- des sondages au pénétromètre effectués par le L. B. T. P. de Tananarive indiquent un profil tourmenté du socle rocheux : sa profondeur varie entre 9 m et 24 m, le côté berge droite étant le plus profond (fig. 39).

Le cours de l'Ikopa suit donc un accident dont l'effet tangentiel est ici manifeste. La tectonique verticale n'est pas à exclure mais elle n'est pas directement observable.

Notons que cet accident est relativement important. Il pourrait se poursuivre vers le Sud Ouest jusqu'au granite migmatitique, mais la couverture latéritique ne permet pas d'en être absolument certain.

On peut signaler simplement l'importance des marais et étangs dans cette zone ainsi que la discontinuité affectant la lame de granite de part et d'autre de l'Ikopa (fig. 35).

iii) en rive droite : les cassures sont moins apparentes. Envahis par leurs propres éluvions, les bancs affleurent difficilement. Un petit col laisse apparaître cependant une certaine discontinuité des bancs. Une petite tranchée de contrôle pratiquée au col nous a permis de justifier cette anomalie : de plus en plus diaclasé, le banc finit par s'émietter pour disparaître brusquement vers l'Est en laissant la place à de la latérite argileuse.

Plus au Sud, dans un lavaka, on observe également un dérangement tectonique des formations latéritisées. Le fond de ce lavaka n'est pas aussi abrupt que les autres : la pente n'est que de 45°, ce qui est anormal. Les constituants sont des gneiss surmicacés. La nature de la cassure est peu nette. On remarque cependant les points suivants :

- les latérites structurées sont parcourues par tout un réseau de fractures matérialisées par des lignes droites noires et rouilles. Il ne s'agit pas de filonnets car ceux-ci donnent des latérites claires par suite de leur composition quartz-feldspathique ;

- on voit des stries de glissement sur la pente. Ce glissement peut s'expliquer par :

la présence de "gneiss surmicacé" latéritisé qui aurait favorisé ce phénomène ;

l'existence de cassures qui se recoupent et qui isolent des blocs ; par la suite ceux-ci se détachent facilement de l'ensemble.

En se basant sur les observations effectuées sur le prolongement de l'appui rive droite, cette cassure n'est en fait qu'un petit décrochement ne dépassant pas une vingtaine de mètres.

VII. A. 4-3. Secteur du village d'Ambatobe

Le granite de type Ambatomiranty y constitue un relief. Ce granite présente une disposition particulière : parfois il affleure en boules énormes disposées en chaos, parfois dans le même alignement il passe à une série très profondément latéritisée, marquée sur le terrain par la présence de lavaka.

Ces derniers sont très importants car ils donnent des indications précises sur les caractères structuraux du filon. Les boules, elles, ne donnent que des informations fragmentaires.

C'est ainsi que nous avons pu relever des directions de diaclases et des cassures ;

- les diaclases se recoupent selon une maille presque rectangulaire. Les mesures oscillent autour de 4 directions principales : N60, N130, N40, N170 ;

- une série de cassures parallèles (N46 à N52), parfois très serrées, découpent le filon en plusieurs tronçons et provoquent des effondrements partiels des compartiments. On a en somme, à petite échelle un système de failles en touche de piano. Ceci explique l'alternance de boules et de latérites.

VII. A. 5. Conclusion

Les formations non granitisées du Système du Graphite constitutives du site d'Antaramanana forment un périsynclinal à fond de migmatite. Cette structure est recoupée par des filons granitiques anciens et des intrusions doléritiques relativement récentes.

Ce périsynclinal n'a pas une forme régulière. Un certain nombre de cassures l'affectent :

- N10 à N30
- N50
- N120
- N160

Selon H. BESAIRIE (1968) la tectonique tangentielle est liée à une époque ancienne (antérieure à l'orogénèse pré-Karoo de 255 MA) tandis que la tectonique subactuelle est plutôt verticale (cf. II. C. 3).

Les directions principales des cassures se rapprochent de celles relevées par G. NOIZET sur la zone aval de la Plaine de Tananarive (cf. site de Manantsoa VI. A. 2-3), celle-ci étant considérée comme le résultat du rejeu récent d'anciennes failles.

On remarque en outre que la structure régionale aux alentours du site présente un faisceau de plis parallèles et serrés¹. Plus précisément, le périclinal individualisé ici se trouve compris entre 2 anticlinaux, et on note l'amorce d'un autre anticlinal qui se développe vers le Nord.

Compte tenu du fait que la tectonique tangentielle a surtout affecté les formations non granitisées, il nous paraît logique de rattacher cette phase aux plissements responsables du faisceau de plis observé sur la carte au 1/100 000.

Le fait qu'elle affecte également le filon de dolérite en rive gauche prouve l'existence d'un rejeu récent, mais celui-ci n'est pas toujours aussi apparent sur la zone du site.

La tectonique verticale par contre est particulièrement marquée par les formations granitisées.

VII. B. ETUDE GEOTECHNIQUE

VII. B. 1. Vue d'ensemble

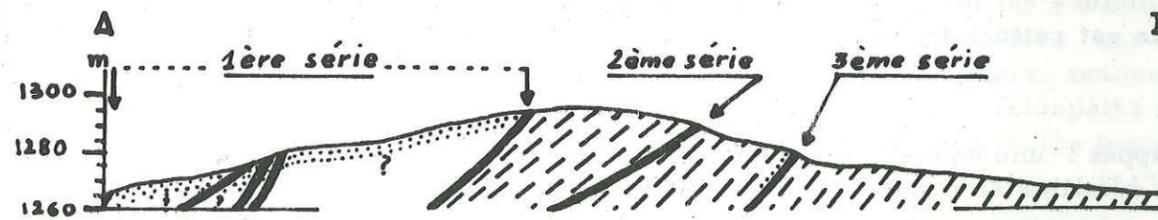
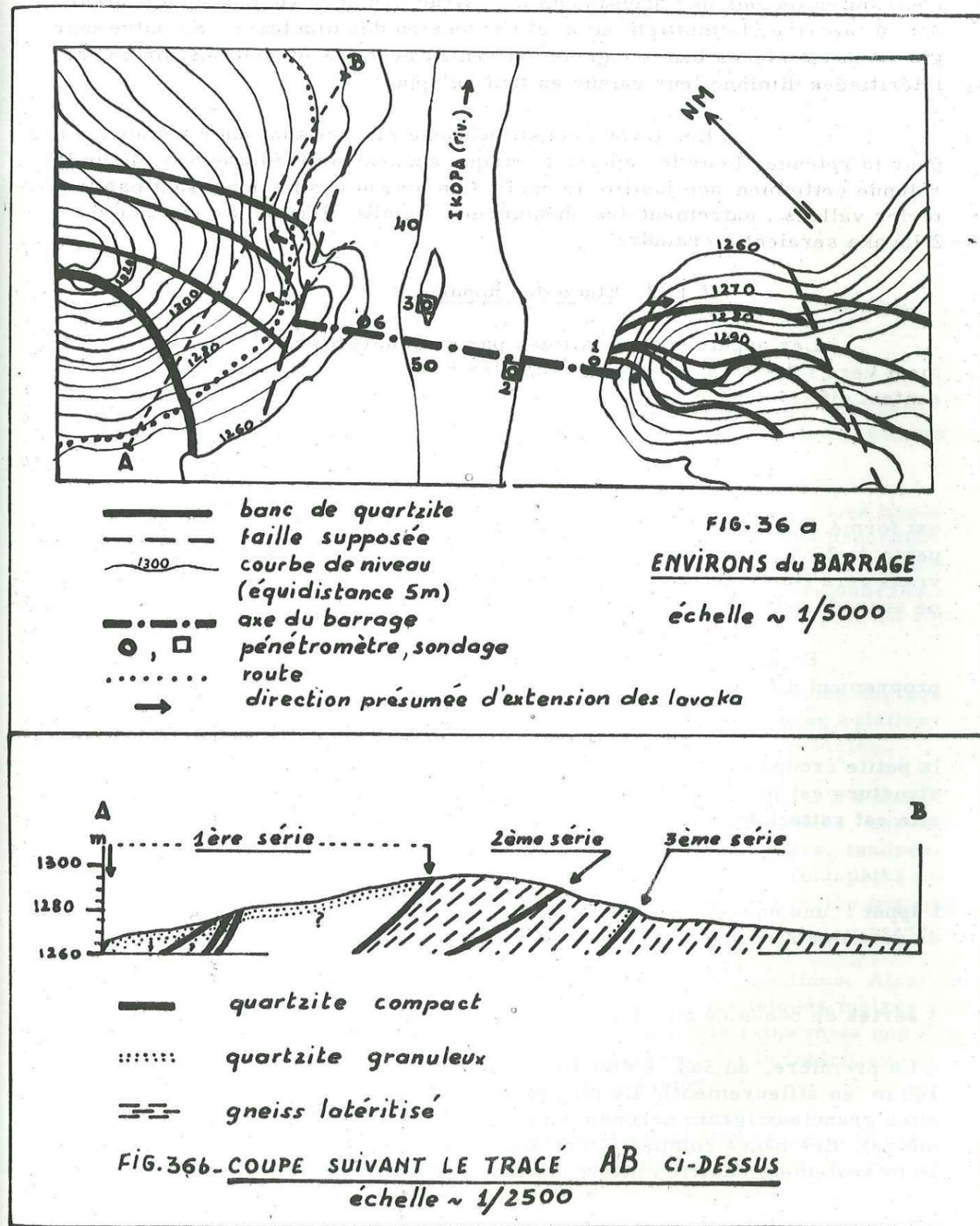
Un certain nombre de faits caractéristiques se dégagent immédiatement :

- la zone du site présente beaucoup de fractures. Elles ne sont pas toutes importantes, mais elles conditionnent les travaux ;
- la zone d'appui et les flancs de la cuvette de retenue sont profondément latéritisés à l'exception des quartzites ;

De la sorte se posent les problèmes suivants :

- les fractures ont modifié l'agencement originel des formations, ce qui réduit leurs qualités de stabilité et d'étanchéité ;
- les quartzites ne sont pas des roches de bonne tenue. Les

1. Lever géologique au 1/100 000 de Tananarive-Manjakandriana (1962).



- quartzite compact
- quartzite granuleux
- == gneiss latéritisé

FIG. 36b. COUPE SUIVANT LE TRACÉ AB ci-DESSUS
échelle ~ 1/2500

contraintes tectoniques aboutissant à la structure périssynclinale du secteur ont dû favoriser la multiplication et l'extension des diaclases. En outre leur gisement en minces bancs rigides, alternant avec les formations fortement latéritisées diminue leur valeur en tant qu'appui.

- Les lavaka constituent une menace tant pour les appuis que pour la retenue. Pour les appuis le risque apparaît immédiatement. Pour la retenue cette menace justifie le choix d'un niveau bas ne dépassant pas la cote des vallées ; autrement des phénomènes de fuite directe par jonction de 2 lavaka seraient à craindre.

VII. B. 2. Etude des appuis

Les appuis sont constitués par des quartzites qui plongent généralement vers l'amont. L'axe du barrage les suit en direction. Ces bancs se présentent différemment sur les 2 rives de l'Ikopa.

VII. B. 2-1. Appui rive gauche

1a/ Aspect topographique : l'appui rive gauche est formé d'une colline large de 500 m et dominant la vallée de 70 m avec une pente de 25 % du côté de la rivière. Un petit thalweg orienté NE-SW et s'ouvrant vers l'aval l'affecte en bas de pente tendant ainsi à isoler une petite croupe avancée qui, elle, remonte jusqu'à 20 m au-dessus de l'Ikopa.

En fait, c'est cette croupe avancée qui devrait constituer l'appui proprement dit du barrage si l'on se réfère au tracé de l'axe proposé.

1b/ Aspect géotechnique : il est vrai que seule la petite croupe avancée reçoit le barrage. Cependant, étant donné que sa structure est mal définie, on doit traiter en même temps la colline à laquelle elle est rattachée.

i) Etude de la colline formant le corps de l'appui : une nouvelle route, longeant la pente de cette colline, nous a permis de détailler sa constitution.

a/ Coupe géologique (fig. 36) : on a 3 séries de bancs de quartzites séparées par les gneiss latéritisés.

- La première, au Sud, s'étend sur plusieurs mètres d'épaisseur (plus de 100 m en affleurement). La plus grande partie pourtant est constituée de quartzites granuleux (grain arrondi, non cimenté, en général de 2 à 4 mm de diamètre). Les bancs compacts formant l'ossature ne sont représentés que sur 10 m seulement vers le milieu. Et encore ils ne sont pas continus : nous avons

relévé 2 bancs de quartzite de 4 m d'épaisseur chacun, et 1 banc de 1 m avec chaque fois une intercalation de 1,50 m de quartzite granuleux. Un peu plus au Nord, terminant cette série, on a un banc correct de 2 m d'épaisseur. Toutefois, nous pensons que le quartz granuleux ne constitue pas une épaisseur considérable en profondeur.

- La seconde série est formée par plusieurs petits bancs associés à un "gneiss surmicacé" latéritisé. L'ensemble ne dépasse pas 2 m.

- La troisième est un banc mince de 1,50 m.

L'ensemble plonge de 20° à 50° vers le Sud Ouest.

β/ Tenue des quartzites et latérites :

- les quartzites : les bancs de la première série sont fortement diaclasés mais relativement cohérents. Ils répondent à la description donnée précédemment (VII. A. 2-1c).

La deuxième série se trouve dans un très mauvais état. Les bancs présentent d'autres fractures en plus des diaclases normales vues précédemment. Les intercalations de latérites de "gneiss surmicacés" diminuent beaucoup leur valeur. Réduits en un agglomérat de petits morceaux peu cohérents détachables à la main, ils s'effritent facilement et ne peuvent jouer aucun rôle de soutien.

La troisième série au Nord, malgré la qualité défectueuse due aux diaclases serrées communes à ces formations, présente une tenue relativement meilleure, mais elle possède l'inconvénient d'être mince et isolée.

- Les latérites : le nouveau tracé de route dégage sur 2 à 4 m un flanc latéritique formé de 1 m de latérite argileuse compacte et dure, associée à des colluvions de quartzite ; en dessous on a des latérites rouges, tendres, faiblement structurées. Les restes non altérés de micas et de feldspaths ne sont pratiquement plus décelables qu'au niveau des séquences à faciès pegmatitique.

La latéritisation affecte donc profondément ces formations. Ainsi plus en aval, dans un arrachement situé en bordure de vallée à quelques mètres seulement au-dessus du niveau de l'Ikopa, on a non pas la roche saine mais une latérite structurée dérivant d'un gneiss à graphite et grenat. Ici la latéritisation descend donc nettement en dessous du niveau de la rivière.

ii) Etude de la petite croupe avancée : il n'y a aucun affleurement. En surface on n'observe que des élévations de quartzite de taille variée, associées à des blocs aux arêtes émoussées et des fragments

de bancs apparemment non en place qui gardent encore leurs diaclases. L'ensemble se trouve enrobé dans de la latérite argileuse compacte.

Interprétation : apparemment, il n'existe pas de banc formant l'ossature de cette croupe.

Toutefois, on peut envisager 2 explications quant à sa constitution compte tenu de la structure et de la tectonique précédemment étudiées :

1re interprétation : cette croupe est constituée de bancs de quartzite faisant suite normalement, sans intervention de cassure, à ceux de la colline à laquelle elle est rattachée.

En effet parmi les fragments de bancs rencontrés il y en a qui se trouvent alignés suivant une direction définie (NNE-SSW). Il est cependant difficile de les considérer comme en place. D'abord ils ne sont pas en continuité, ensuite ils s'observent sur 5 m à peine, leur épaisseur étant de 40 cm à 80 cm.

On pourrait alors penser que le vrai banc se trouve enfoui sous de gros blocs évolutionnaires, représentés par ces fragments de banc. Effectivement, au sommet de la grande colline, à côté des petits morceaux éluvionnaires, on a souvent de gros blocs pouvant dépasser 1 m de long. Remarquons que dans cette hypothèse, il s'agirait de la deuxième série de quartzites qui constituerait cette croupe. Or d'après notre coupe, cette série est trop morcelée pour donner des fragments de banc aussi énormes et aussi résistants.

En outre comment expliquer la présence de thalweg qui remonte assez haut et qui les entaille à mi-pente en coupant nettement les deuxième et troisième séries de quartzites ?

- 2e interprétation : les quartzites de la croupe font effectivement suite à ceux de la colline mais ils ont été morcelés et déplacés par une cassure. La cassure devrait alors avoir la direction du thalweg. En outre, il ne s'agirait pas d'un accident majeur mais d'une simple réplique à d'autres cassures plus importantes.

La taille variée des morceaux rencontrés, leur disposition éparses sans direction définie, la tectonisation importante de cette zone sont autant d'arguments en faveur de cette hypothèse. Elle permet en plus d'expliquer parfaitement l'existence du thalweg par attaque préférentielle de l'érosion le long de cette cassure.

La présence de l'eau au fond du thalweg qui se manifeste par un écoulement sans source apparente à 20 m au-dessus de la rivière nécessite une ex-

plication. Les eaux de pluie ou de ruissellement pourraient s'infiltrer à travers les formations latéritisées ou les fissures des quartzites et occasionner ce point d'eau. Seulement pour qu'il soit placé à 20 m au-dessus de la rivière, et compte tenu de la régularité du pendage des formations, il faudrait qu'il y ait un accident à cette hauteur. En effet, une cassure recoupant les formations pourrait capter et canaliser les eaux d'infiltration suivant sa direction. Autrement le thalweg s'ouvrirait directement sur l'Ikopa sans présenter vers l'amont ce petit rentrant.

1c/ Valeur de l'appui

i) La colline faisant suite à la croupe

Si par leur tenue, les quartzites favorisent la fuite, il y a les intercalations argileuses de gneiss latéritisés qui sont plus imperméables.

En fait le danger ne vient pas de la possibilité de percolation à travers la colline même, en raison de la hauteur de la retenue, mais plutôt de la présence du thalweg juste en aval de l'appui.

- Menace de lavaka : l'ouverture de la nouvelle route dont le tracé recoupe obliquement les formations géologiques à une cote assez basse (ne dépassant pas 25 m au-dessus de la rivière) constitue une menace pour l'établissement des lavaka.

En effet, si jusque-là cette colline n'est pas affectée par ce phénomène d'érosion, c'est que d'une part aucune des causes prévues par J. RIQUIER (cf. III. B. 3) ne se sont manifestées et que d'autre part, les colluvions de quartzites, particulièrement importantes se sont rajoutées aux latérites argileuses compactes pour assurer une protection efficace.

Actuellement les conditions de départ sont réalisées (III. B. 3). Nous présentons sur la fig. 36 la direction d'extension ultérieure probable des lavaka. Les bancs de latérite structurée plongent vers le Sud. Normalement l'extension des lavaka s'effectuerait dans le sens perpendiculaire à la direction des bancs, comme cela se passe dans tout le secteur. Mais compte tenu de la direction transversale du tracé, l'alternance de bancs durs (quartzites) et tendres (latérites structurées) va donner aux lavaka une extension latérale. En outre la pente assez raide de la colline va favoriser l'exportation vers la chaussée des éléments fins par les eaux d'infiltration et de ruissellement.

Avec le tracé actuel du barrage, limité à la croupe avancée, cette menace ne constitue pas un danger imminent. Par contre, si pour une raison quelconque, on cherchait à prolonger l'appui jusqu'à atteindre la grande colline, le problème se poserait autrement.

ii) La croupe d'appui proprement dite

- perméabilité : en considérant les hypothèses successives du paragraphe VII. B. 2-1b. ii, sur la constitution de cette croupe, on a :

- 1re interprétation : cas où il n'y a pas d'intervention de cassure. Le terrain amont (quartzite granuleux) n'offre aucune assurance quant à sa perméabilité. Il y a cependant le banc extrême nord de cette première série qui présente une tenue meilleure. Seulement il est mince et probablement très fracturé. La deuxième série de quartzites (qui va constituer l'ossature principale de la croupe) ne possède pas non plus la qualité requise pour être étanche. L'étanchéité repose donc sur les latérites intermédiaires qui comportent beaucoup d'éléments fins argileux, donc à priori assez imperméables. Seulement la longueur de percolation reste trop faible pour que tout danger soit écarté (voir tableau ci-dessous).

- 2e interprétation : cas où il y a une cassure suivant le thalweg. Aussi minime soit-elle, une fuite directe est possible.

Non seulement le terrain n'est pas, comme il a été prévu, d'une étanchéité parfaite, mais la présence d'une telle discontinuité faciliterait encore la canalisation de l'eau vers l'aval, d'autant plus que l'érosion a réduit la longueur de percolation en entaillant ce thalweg.

Le long de la cassure présumée, on a :

Niveau au-dessus de la rivière	20 m	15 m	10 m	5 m
Longueur de percolation	50 m	100 m	135 m	200 m

Stabilité : les 2 cas possibles précités n'offrent pas non plus d'assurance quant à la stabilité.

- 1re interprétation : cas où il n'y a pas d'intervention de cassure. La tenue de la quartzite formant l'ossature ne permettrait pas d'avoir un appui stable car le vrai banc en place n'excède pas 2 m de puissance. Le reste de la croupe n'est constitué que de débris et d'éluvions superficiels.

- 2e interprétation : cas où il y a une cassure suivant le thalweg. La croupe ne présenterait aucune ossature de banc en place, mais serait faite de morceaux entraînés, cimentés par de la latérite argileuse assurant seule leur cohésion. Dans ce cas, la croupe offrirait une plus grande résistance, mais elle ne serait pas enracinée en profondeur.

Ainsi, si la croupe envisagée pour y implanter l'appui rive gauche est favorable du point de vue topographique, par contre ces caractères géologiques ne le sont pas tant du point de vue de la perméabilité que du point de vue de la stabilité.

VII. B. 2-2. Appui rive droite

2a/ Aspect topographique : l'appui rive droite correspond à une bosse qui est la terminaison d'une colline s'étendant vers l'Est et le Sud Est. Elle domine la vallée d'une trentaine de mètres environ. Suivant l'axe du barrage sa pente est de 30 %.

2b/ Aspect géotechnique : rappelons qu'on a là de minces bancs de quartzites superposés. Celui situé au Nord est le plus mince (1 m environ). Il surmonte un passage de gneiss latéritisé observé dans le lavaka aval en pleine évolution. Les autres bancs sont accolés entre eux et donnent ainsi l'apparence d'une formation unique et épaisse du côté de la berge. En réalité des contraintes tectoniques ont dû les comprimer en bordure de l'Ikopa, tandis qu'on les voit nettement se séparer plus à l'Est où ils constituent le flanc nord est du périsynclinal.

Dans l'ensemble ces bancs plongent à 50° vers l'amont. En fait, seul le banc individualisé au Nord présente une allure régulière avec N160. 40W. Les autres bancs dessinent des replis, bien visibles sur la surface structurale, avec des laminages et des étirements. Cette disposition est schématisée sur le bloc diagramme de la fig. 37.

Il s'agit de quartzites vitreux, découpés par des diaclases serrées et très ouvertes par suite des replis. Cependant l'ensemble possède une parfaite cohérence.

Les bancs latéritisés de gneiss ne se rencontrent qu'en bas de pente et du côté aval. Le petit lavaka aval donne des indications sur leur composition.

Immédiatement après le quartzite, on a un banc de gneiss latéritisé, blanc bariolé de rouge (1 m) puis un banc de gneiss surmicacé rouge violacé, manganésifère (2, 50 m) et enfin au fond du lavaka on retrouve le même gneiss latéritisé qu'au sommet.

VII. B. 2-3. Valeur de l'appui

Cet appui présente moins de risques que l'appui rive gauche. La compression d'origine tectonique qui a réuni côte à côte les bancs de quartzite et en a fait un tout cohérent est un facteur favorable : d'une part on n'a pas ici de niveaux gneissiques latéritisés en alternance avec les bancs de quartzite qui auraient pu être à l'origine du lavaka, d'autre part du fait de cette "compaction" et du

grand nombre de replis qui affectent les quartzites, la surface et l'épaisseur de ces bancs résistants s'en trouvent accrues.

Du point de vue étanchéité, si les quartzites paraissent rigides et épais, il faut signaler que les diaclases y sont très ouvertes. Compte tenu des caractères tectoniques du secteur, ces diaclases pourraient affecter toute l'ossature, aussi bien en profondeur que latéralement.

Toutefois la masse de quartzites comprimés pourrait jouer un rôle d'écran si les fissures étaient colmatées. De plus les gneiss latéritisés du mur aval sont assez épais pour empêcher toute fuite directe. Mais une menace subsiste : le petit lavaka aval. En effet, une route récemment construite (moins de 6 ans) a provoqué l'extension de ce lavaka juste en aval de l'appui. Le départ s'est effectué au niveau du gneiss surmicacé latéritisé (fig. 37) qui se montre favorable à ce phénomène d'érosion. La forme dissymétrique observée (plus étendue à l'Est qu'à l'Ouest) est due à l'existence d'un toit de quartzite (premier banc aval) qui a arrêté l'évolution dans le sens perpendiculaire à la direction structurale. Actuellement, il oblige le lavaka à évoluer dans le sens latéral des bancs (vers le SE).

Il tendra ainsi à dégager la base latéritique de l'appui. Ceci ne produira peut-être pas d'effet notable pour la stabilité ; par contre, il favoriserait la fuite dans le cas où les bancs "comprimés" de quartzite ne joueraient pas parfaitement leur rôle d'écran étanche.

En somme l'agencement particulier des bancs de quartzite au niveau de cet appui assure une certaine stabilité mais il peut favoriser une fuite directe au cas où les fissures ne seraient pas colmatées en profondeur.

VII. B. 3. Cuvette de retenue

La retenue apparaît encaissée de façon satisfaisante par suite de la structure périsynclinale des formations. En outre avec seulement une hauteur de barrage de 16 m, le niveau d'eau atteindra très rapidement en amont les rizières faites d'argile plastique imperméable (fig. 38).

Par la suite, les menaces directes occasionnées par la cuvette de retenue se localisent aux abords du barrage.

Certes la zone du site est largement pourvue de lavaka. Seulement ceux-ci ne poseront pas de problèmes pour le bassin lui-même en raison de la faible hauteur de la retenue, mais ils contribueront à combler rapidement la retenue par leurs apports.

Les zones menacées directement sont celles qui font suite immédia-

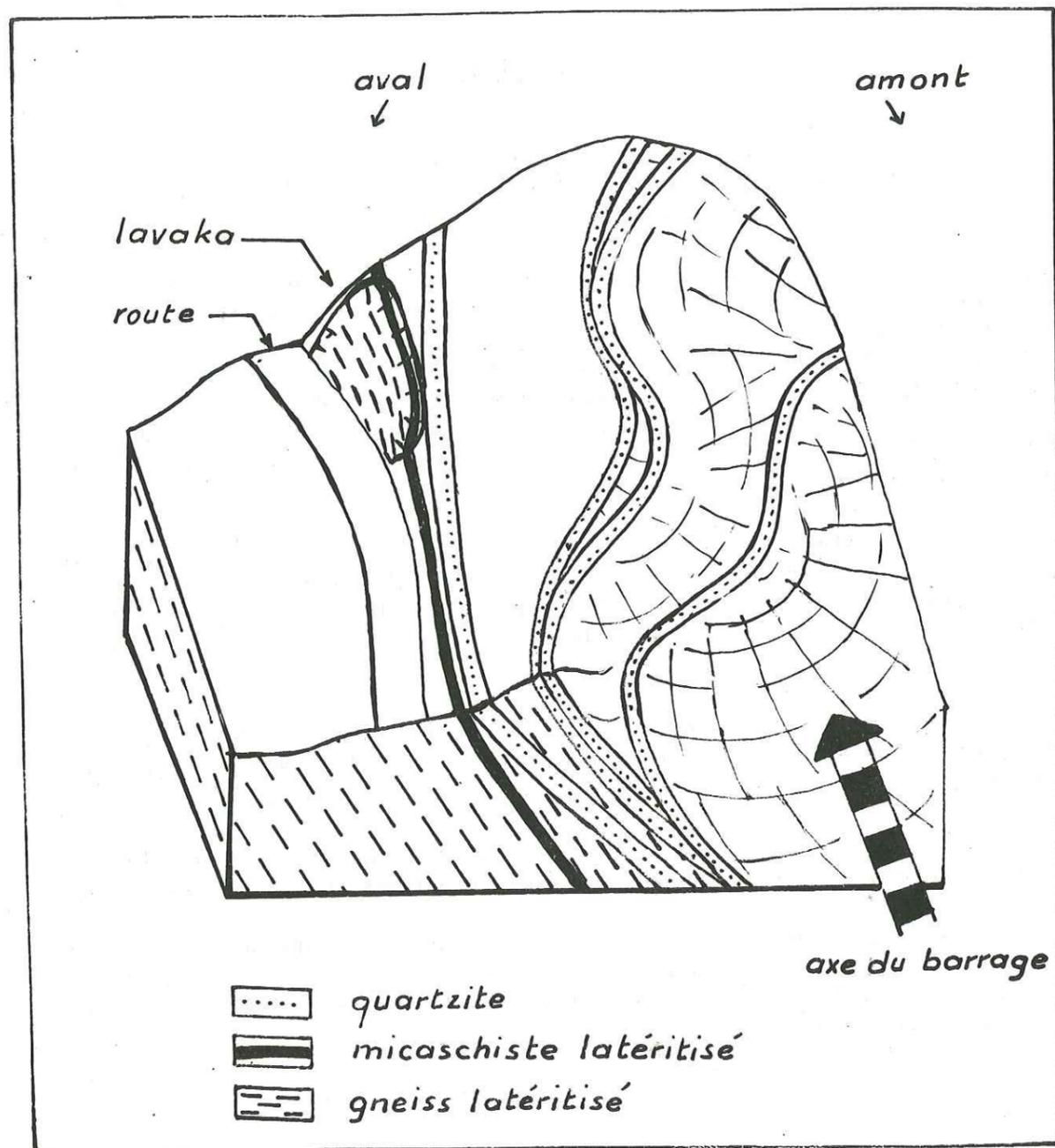


fig.37 Site d'Antaramanana
appui rive droite

tement aux appuis.

VII. B. 3-1. En rive gauche

Elle a déjà été étudiée en détail au chapitre "appui rive gauche" (VII. B. 2-1). Les problèmes sont étroitement liés au comportement de la grande colline voisine.

VII. B. 3-2. En rive droite

La première cassure au niveau du périsynclinal mérite une attention particulière. Elle n'est pas très importante (cf. VII. A. 4-2b) mais elle est à l'origine d'un rétrécissement de la colline et de l'installation d'un col dont la cote est de seulement 25 m au-dessus de la vallée. En outre le léger décrochement (10 à 20 m) risque de favoriser une fuite, l'intervalle entre les deux fragments du banc de quartzite étant latéritisé.

Selon la cote, les longueurs de percolation sont les suivantes :

cote	1265	1270	1275
longueur de percolation	140 m	110 m	90

Enfin la nature de l'argile latéritique au niveau de cette cassure n'est pas satisfaisante. Elle est peu compacte, avec des débris de quartzite (R. 8013). L'essai au perméamètre C. B. R. donne $1,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s, ce qui témoigne d'une certaine perméabilité.

Cet essai est bien sûr insuffisant, mais en profondeur les caractères de la latérite doivent être assez voisins. Tout au plus est-elle plus compacte et moins riche en débris de quartzites.

VII. B. 4. Zone centrale (thalweg) et zone d'emprunt

La zone centrale et les sols d'emprunt ont été l'objet d'une reconnaissance préliminaire par sondages à la tarière et au pénétromètre effectués par le L. B. T. P. (fig. 39 et 40).

Pour la zone centrale, la profondeur du socle rocheux se situe entre 9 et 24 m avec un creux marqué en rive droite.

Le rapport sur ces sondages n'est pas du tout optimiste (M. MALA, 1968).

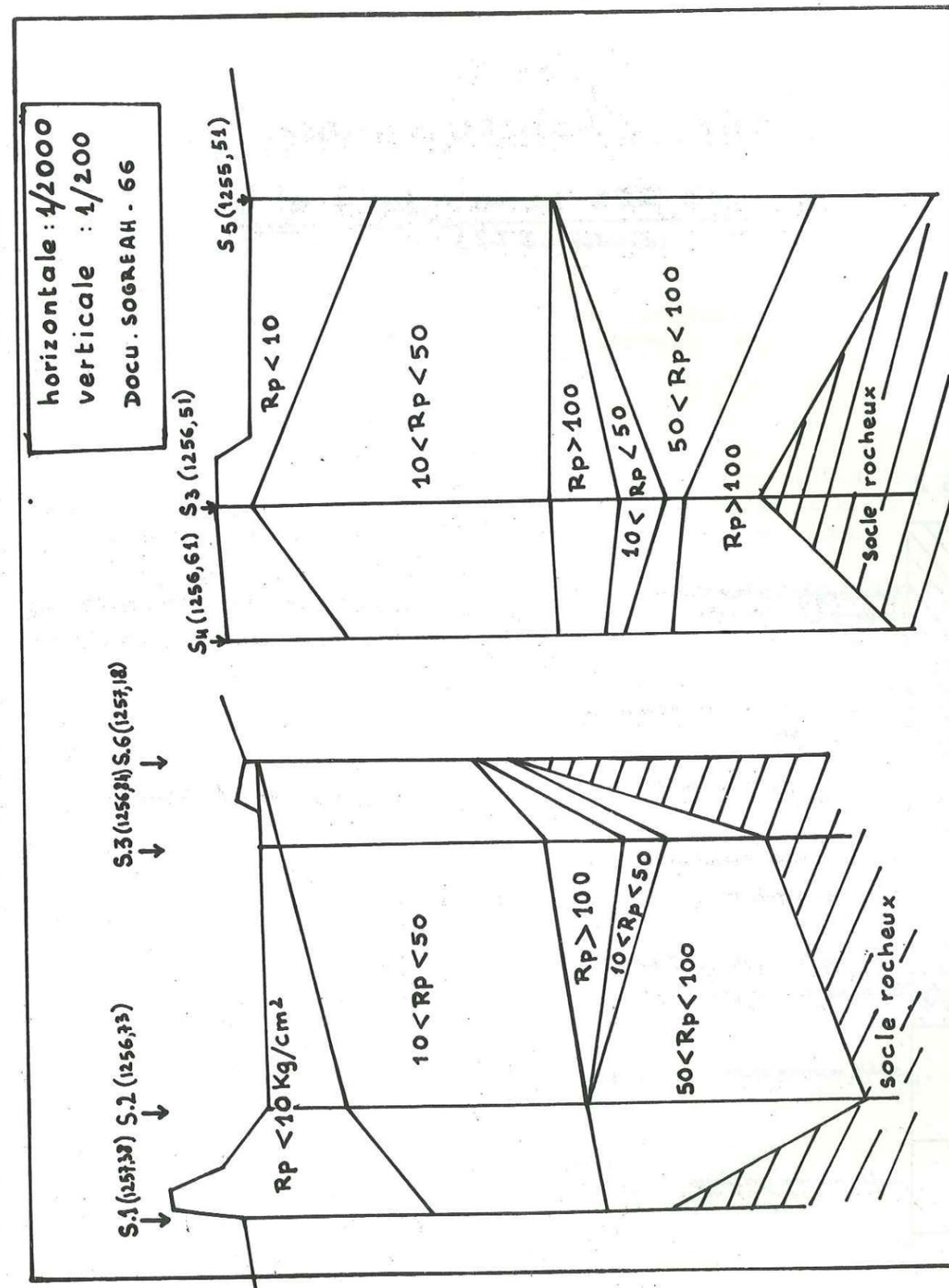
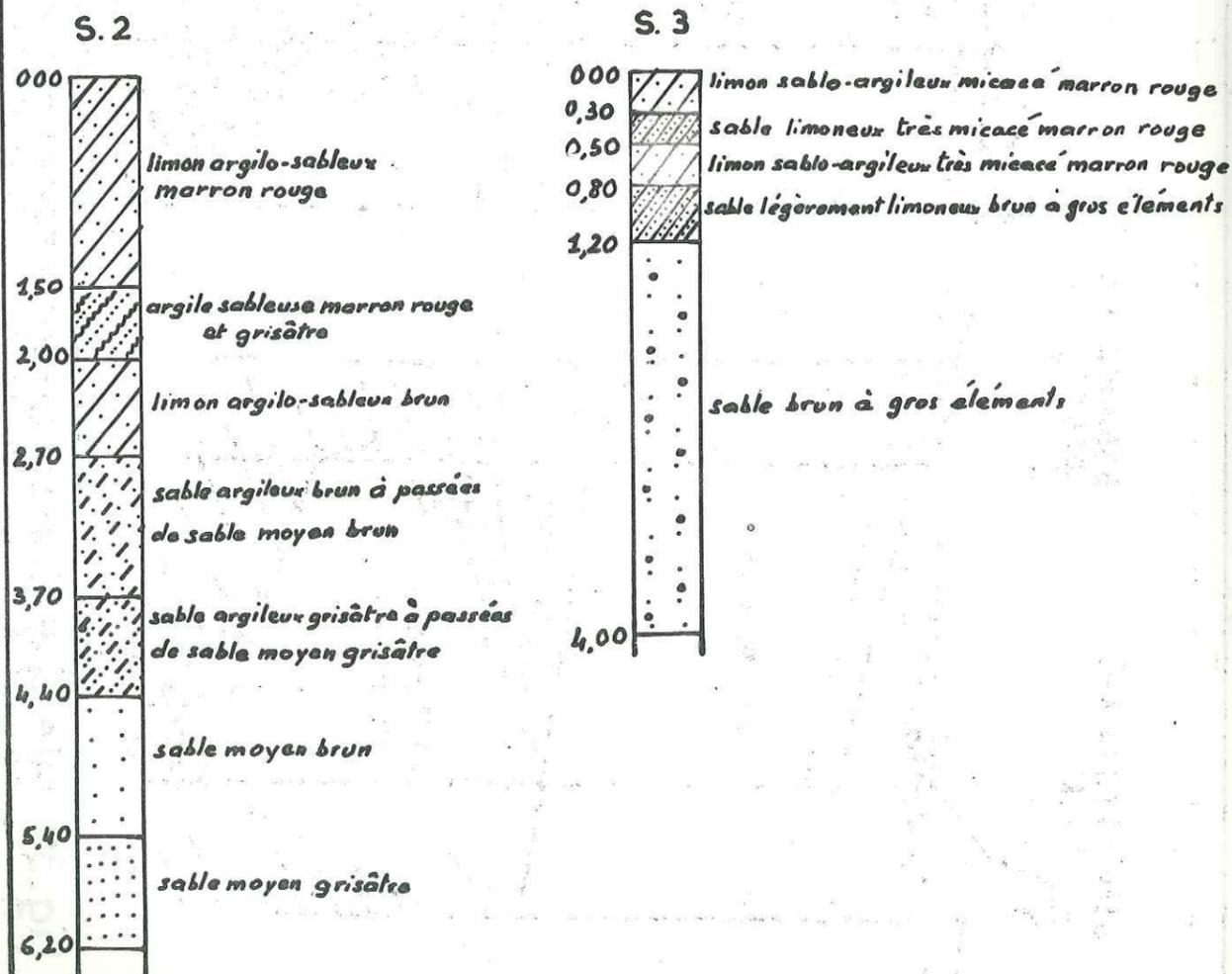


Fig. 39 site d'Antaramanana - zone centrale du barrage

fig. 40
Site d'Antaramanana
coupe des sondages 2 et 3
 (dossier L.B.T.P)



"... Les sols de fondation sont :

- particulièrement mauvais en surface sur une profondeur variant de 1 m à 6,50 m (limons argileux doués de très faibles caractéristiques mécaniques) ; $R_p < 10 \text{ kg/cm}^2$ (minimale : 2 kg/cm mesurée au pénétromètre statique)

- médiocres sur des profondeurs importantes (couches sableuses avec intercalation argilo-limoneuse vraisemblablement, $10 < R_p < 50 \text{ kg/cm}^2$),

- par contre les sols d'apport ne semblent pas poser des problèmes particuliers ni dans le domaine de la perméabilité ni dans celui des caractéristiques mécaniques".

VII. B. 5. Conclusion

Le périsynclinal étant ouvert vers le Sud, soit vers l'amont, il devrait constituer un site favorable pour un barrage. Malheureusement des cassures multiples relativement importantes le recoupent et diminuent sa valeur.

Ainsi en rive gauche, la structure de la croupe d'appui demeure encore hypothétique. En outre le passage d'un accident suivant le petit thalweg en aval immédiat de l'appui est probable. De la sorte, une fuite directe serait à craindre et la stabilité de l'appui en serait diminuée.

Pour la zone centrale du barrage, le passage d'une faille importante que suit le cours de l'Ikopa a entraîné un profil irrégulier du socle rocheux". Les pénétromètres ont mis en évidence une grande épaisseur d'alluvions (plus de 20 m à certains endroits). Or les caractères mécaniques des parties superficielles de ces alluvions sont médiocres.

Si la tectonique cassante a des effets fâcheux pour la rive gauche et pour la zone centrale, par contre, en rive droite, elle a provoqué une sorte de compression des petits bancs de quartzites qui se présentent de la sorte sous un aspect massif. La stabilité de l'appui en est donc améliorée. Toutefois, en raison de l'importance des diaclases qui découpent ces quartzites, des essais d'injection paraissent nécessaires pour s'assurer de leur étanchéité.

Quant à la cuvette de retenue, la hauteur du barrage est trop basse pour occasionner une menace de fuite en amont.

Ainsi ce site, qui apparaît dans l'ensemble favorable, nécessite des mesures particulières car les dangers, s'ils sont moins évidents que sur les deux autres, subsistent néanmoins.

CONCLUSION GENERALE

SITE D'ANDRANOMANGA SUR LA SISAONY

La géologie d'ensemble de la région est encore mal définie en raison du manque d'affleurement et de la monotonie des faciès.

Le site lui-même se trouve implanté sur un ensemble migmatitique constitué par une alternance de bancs de migmatite granitoïde et de granite migmatitique.

Les bancs de direction N168 plongent constamment de 20° à 30° vers l'Est. Aucun accident majeur n'a été observé. Par contre on a de très nombreuses cassures, transversales par rapport à la foliation, qui provoquent des décrochements de quelques dizaines de mètres. Il est important de signaler que la densité des diaclases, dont les directions sont à peu près les mêmes, varient avec la nature pétrographique des différents bancs. Ainsi les migmatites granitoïdes et les migmatites lit par lit associées sont les plus atteintes. Cet état de fracturation conditionne la profondeur de la latéritisation, laquelle est également fonction de la granulométrie et de la structure des différents faciès pétrographiques.

De ces caractères géologiques essentiels, on peut tirer les conclusions géotechniques. L'axe du barrage est sensiblement perpendiculaire à la direction de la foliation de l'ensemble migmatito-granitique. En rive gauche, l'appui s'effectuera sur une surface structurale parsemée de boules dont la majeure partie est en place. En rive droite on doit s'attendre à ce que le profil du bed rock soit irrégulier du fait de l'alternance, sous la couverture latéritique, de bancs de nature pétrographique variable. Pour la zone centrale, qui correspond à la vallée de la Sisaony, le substratum sain subaffleure dans le lit vif de la rivière en période d'étiage ; en rive gauche on a une petite terrasse alluviale dont l'épaisseur ne dépasse pas 3 m.

D'une façon générale, le rocher sain est d'une bonne tenue à l'exception des migmatites granitoïdes et migmatites lit par lit associées parcourues par un réseau relativement dense de diaclases.

Divers travaux de reconnaissance doivent être envisagés pour compléter l'étude de surface. En rive droite, et suivant l'axe du barrage, des sondages devront être exécutés pour préciser l'épaisseur exacte des différents horizons d'altération (zones à latérite structurée "tendre", à boules, et à latérite structurée "dure"). Selon les positions de ces sondages, la roche saine sera atteinte entre -5 m et -20 m. A l'extrémité est du barrage quelques tranchées perpendiculaires à la direction des bancs seront pratiquées pour connaître le mode de passage d'un banc à un autre, le profil exact du bed rock, et le mode

de gisement exact des quartzites. Leur exécution sera gênée par l'épaisseur de la latérite et la présence de filons ou bancs quartzeux résiduels.

SITE DE MANANTSOA SUR L'ANDROMBA

Du point de vue de la géologie régionale, le site de Manantsoa se situe au début d'une grande virgation : la foliation, orientée NE-SW au Nord s'infléchit rapidement vers le Sud pour devenir E-W.

Du point de vue pétrographique, le sous-sol est constitué par une alternance plus ou moins étroite de bancs de migmatites granitoïdes à faciès variés, généralement orientés N30. La valeur des pendages varie de 20° à 65° mais le sens est constamment ouest.

Les environs immédiats du site montrent de nombreuses traces d'une intense tectonique cassante. On a plusieurs failles de décrochement dont l'orientation moyenne est de N160. En outre, en rive gauche, les bancs granitiques ont été pincés le long de la cassure N160 qui a été empruntée par l'Andromba. Ils ont également été débités par un réseau très dense de diaclases satellites de cet accident. Ces diverses cassures ont facilité le processus d'altération comme en témoigne l'épaisseur de la latérite dans ce secteur. Il est vraisemblable qu'elles se poursuivent en profondeur.

En rive droite par contre, les bancs granitiques ne sont que très localement affectés par cette fracturation.

Quant à la zone centrale, elle correspond à la vallée de l'Andromba dont le cours ici a emprunté une importante faille de décrochement. Le long de celle-ci, l'altération a été très active et le rocher sain doit se situer à plus de 10 m de la surface.

Du point de vue géotechnique, notons tout d'abord que l'axe du barrage est sensiblement parallèle à la direction majeure des bancs dont le pendage est dirigé vers l'aval. La rive droite ne doit pas poser de problème. La tenue du matériel migmatitique, qui doit être rencontré à moins de 10 m de la surface, est satisfaisante. Quelques sondages seront nécessaires pour préciser l'épaisseur de la latérite. Pour la rive gauche par contre, l'intense fracturation, d'une part, a permis une profonde latérisation, ce qui entraînera un découvert important au cas où le décapage sera nécessaire, et d'autre part, risque de provoquer des fuites sous l'ouvrage. Des sondages devront être exécutés pour déterminer les caractéristiques mécaniques de la latérite, la profondeur du rocher sain qui se présentera d'abord en boules, ainsi que la présence éventuelle d'un niveau aquifère. Ils pourront être complétés par des tranchées perpendiculaires à la direction générale des bancs afin de mieux préciser leur agencement.

ANNEXE

METHODES DE TRAVAIL ET RESULTATS D'ANALYSES

A. METHODES DE TRAVAIL

A.1 - Photographies aériennes

Nous avons été amenés à établir nos cartes à partir de photographies aériennes pour 2 des 3 sites : Antaramanana sur l'Ikopa et Manantsoa sur l'Andromba.

Pour cela, nous avons utilisé un procédé de triangulation simple basé sur la non déformation des angles admettant le nadir des photos pour sommet : connaissant 2 points d'une carte, visibles sur la zone de recouvrement de 2 photographies aériennes, il est en effet possible de replacer sur la carte, avec précision, n'importe quel autre point de la zone.

Les diverses opérations peuvent se résumer de la façon suivante (fig. 41) :

a/ appliquer un calque sur chaque photographie. Sur chacun des calques, noter l'emplacement des nadirs et de leurs homologues (N_1, N_1', N_2, N_2'), les points a et b (homologues des points repères A et B de la carte) sur le calque I, et les points a' et b' sur le calque II, et les points tels que Z (points dont on veut connaître l'emplacement sur la carte) également sur les 2 calques. Tout doit être fait sous stéréoscope ;

b/ porter les 2 calques sur la carte. Aligner les nadirs et leurs homologues (N_1, N_2', N_1', N_2) sur la même droite. Bouger les 2 calques suivant cette droite de façon à ce que les droites N_1a, N_2a' se coupent en A et N_1b, N_2b' en B. Fixer les nadirs.

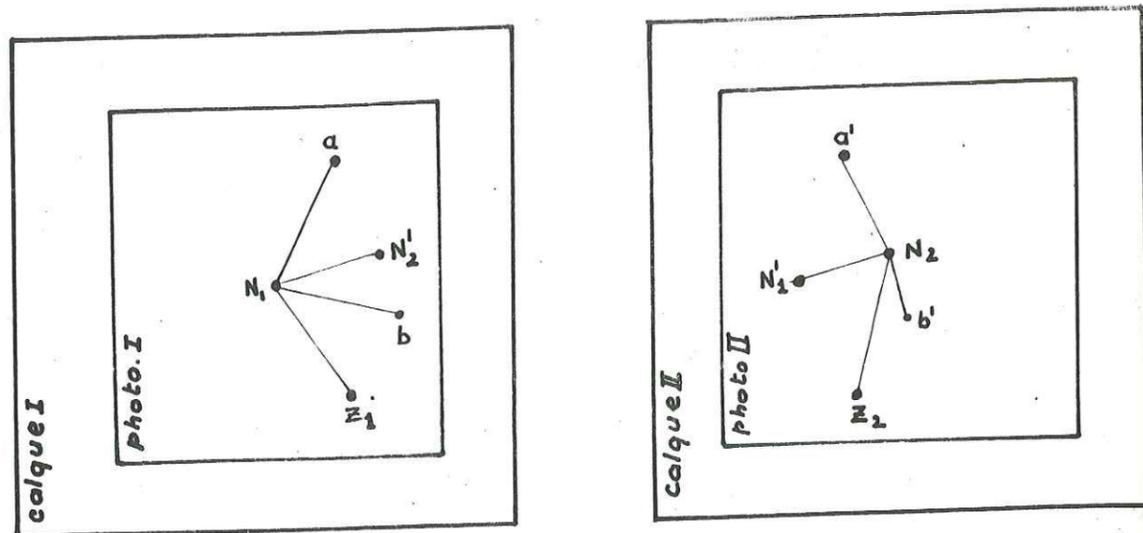
A partir de là, l'emplacement exact de tous les points tels que Z est donné par l'intersection des droites N_1Z' et N_2z' .

Procéder de la même façon, de proche en proche et par couple de photo, jusqu'à couvrir la zone intéressée.

A.2 - Construction graphique

Nous avons appliqué la construction graphique pour déterminer le passage d'un banc sous la latérite, en connaissant :

1ère opération



2ème opération

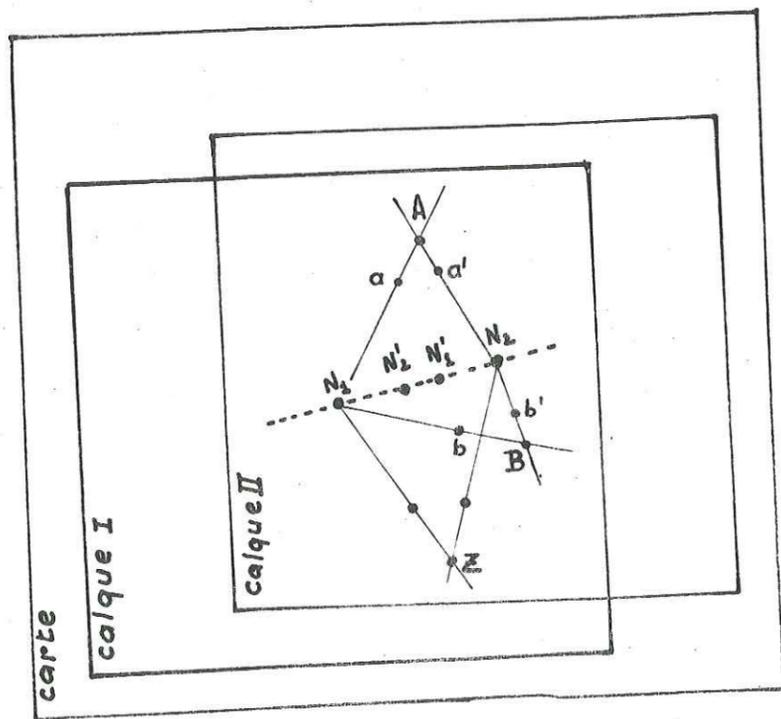
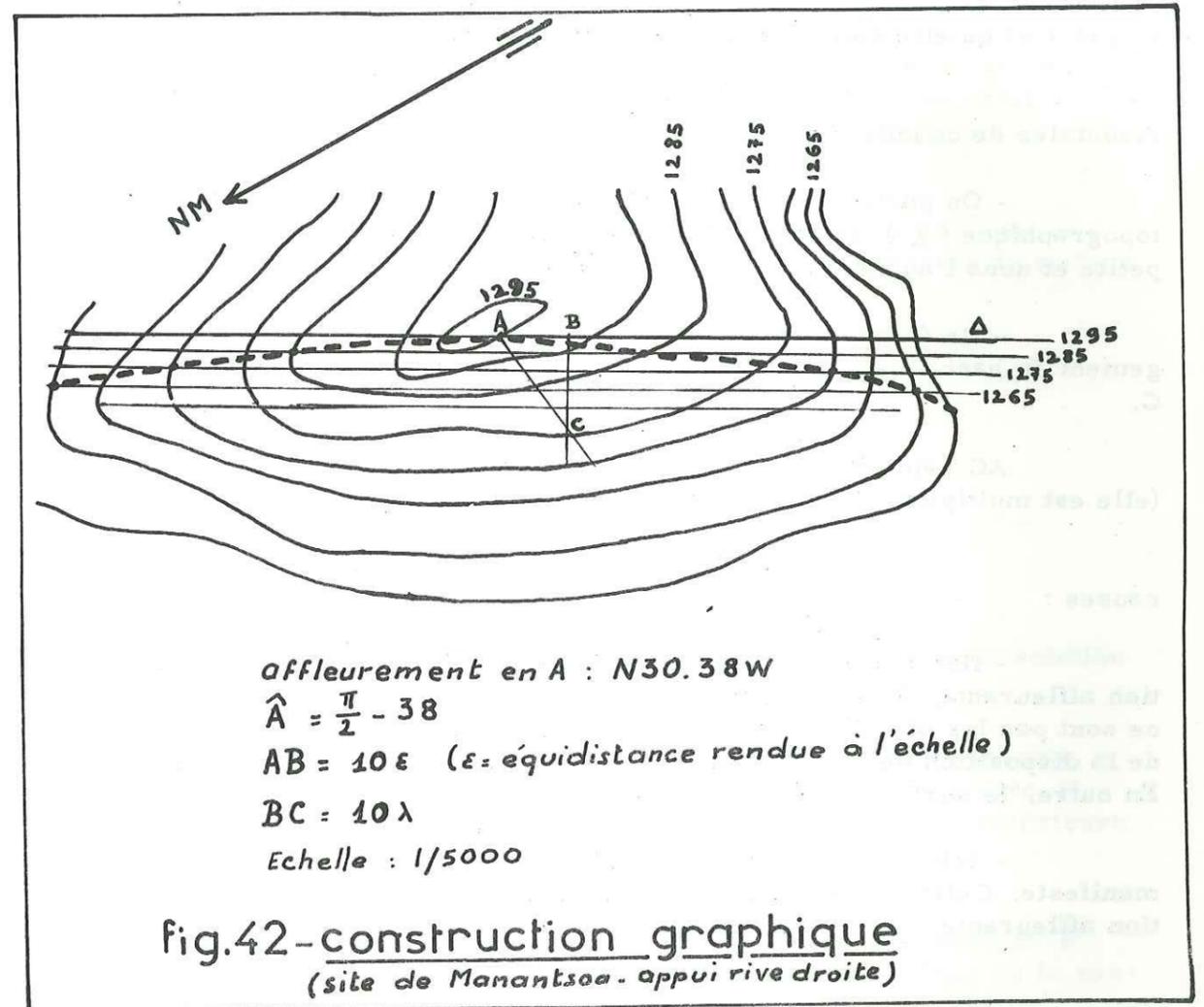


Fig.41 - Report de points sur une carte
à partir des photographies aériennes



- le point d'affleurement,
- la direction du banc,
- la cote de l'affleurement avec les courbes de niveau du lieu.

Cette construction peut être appliquée dans les secteurs comme la colline de Manantsoa où les bancs ne sont pas plissés et plongent constamment dans la même direction.

a/ Condition : il faut que la portion affleurante soit en place et qu'elle soit bien localisée sur la carte.

b/ Construction : elle consiste à déterminer les horizontales de couche (fig. 42).

- On porte de A, suivant la direction des bancs (Δ) l'équidistance topographique (ξ) rendue à l'échelle; (pour le cas de la fig. 42, ξ est trop petite et nous l'avons multipliée par 10). On a ainsi le point B.

- De A toujours, on porte l'angle $\frac{\pi}{2} - \alpha$, et dans le sens du plongement du banc. Le côté de cet angle recoupe la perpendiculaire en B au point C.

AC représente alors l'équidistance des horizontales de couche (λ) (elle est multipliée par 10 sur notre figure).

c/ Imprécision : elle est due en grande partie à deux causes :

- fluctuation des mesures concernant la direction prise sur la portion affleurante. Pour les formations qui nous intéressent effectivement, ce ne sont pas les diaclases qui manquent pour faciliter quelques modifications de la disposition des portions de bancs par rapport à l'emplacement originel. En outre, la surface structurale n'est pas toujours correcte ;

- échelle du travail : plus elle est grande, plus l'imprécision est manifeste. Celle-ci est d'autant plus importante que l'on s'écarte de la portion affleurante.

A. 3. Identification des sols

Un certain nombre d'essais ont été utilisés dans le but de caracté-

riser les échantillons latéritiques recueillis. Ces essais comportent :

A. 3-1. Détermination de la teneur en eau : la teneur en eau est le quotient du "poids d'eau contenu dans l'échantillon" avec son "poids sec". Pour la détermination nous avons utilisé la méthode de référence : séchage à l'étuve de laboratoire à 105° pendant 24 h.

A. 3-2. Analyse granulométrique

Les éléments $> 74 \mu$ ont été soumis à un "tamisage sous l'eau". Le principe consiste à faire passer le matériau à analyser sur des tamis de dimensions décroissantes normalisées. On note ensuite le poids sec du refus sur chaque tamis, et on déduit le pourcentage des refus cumulés par rapport au poids total du matériau utilisé.

Pour les éléments $< 74 \mu$, nous avons pratiqué la méthode de sédimentométrie en utilisant, comme défloculant, le pyrophosphate de sodium. Elle est basée sur la loi de Stokes :

$$v = \frac{g(P - P_0) D^2}{18\mu}$$

avec v = vitesse de décantation d'une particule sphérique,
 D = diamètre de la particule,
 P = poids spécifique de la particule,
 P_0 = poids spécifique du liquide,
 μ = viscosité dynamique du liquide,
 g = accélération de la pesanteur.

On mesure à certain niveau la variation de la densité de la solution en fonction du temps.

A l'instant t après abandon de la suspension homogène (grains + défloculant + eau distillée), se trouvent éliminés au-dessus de la cote H tous les grains dont le diamètre D donne une vitesse de chute v supérieure à $\frac{H}{t}$.

Soit M la masse du matériau contenu dans V cm³ d'eau, et P le pourcentage de matériau de diamètre $< D$; la masse spécifique de la suspension qui ne comprend pas de grains de diamètre $> D$ est :

$$P' = P_0 + \frac{M}{V} \frac{P}{100} \left(1 - \frac{P_0}{P}\right)$$

A l'aide d'un densimètre gradué, on mesurera au temps t la masse spécifique (P_0) d'un liquide de référence, et celle (P') de la suspension de la cote H . Soit respectivement B et A les deux lectures. Si chaque division du

densimètre représente une variation de masse spécifique de 0,001, on a $\rho' - \rho_0 = \frac{A-B}{1000}$. Le pourcentage des grains de diamètre inférieur à

$$D_p = \sqrt{\frac{18\mu - H}{g(\rho - \rho_0)t}}$$

devient alors :
$$P = \frac{V}{M} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \cdot \frac{A-B}{10}$$

Remarque : L'analyse granulométrique est délicate pour les latérites structurées. En effet, les grains de feldspath, en voie d'altération, sont si friables (d'autant plus qu'ils sont fissurés) que le moindre choc arrive parfois à les briser. La course ne traduit donc pas toujours fidèlement la répartition des grains en place. Plus les grains sont grossiers, plus l'erreur est courante.

A. 3-3. Détermination des limites d'Atterberg : elles permettent d'apprécier la plasticité de l'échantillon sous l'influence de la teneur en eau. La consistance d'un sol varie en effet avec la quantité d'eau interstitielle que contiennent les pores et l'épaisseur des couches d'eau absorbée par les grains. Les essais ont été effectués sur le mortier de granulométrie inférieure à 0,5 mm.

A. 3-4. Essai de perméabilité (fig. 43)

Compte tenu de la perméabilité relativement faible des latérites ($K \leq 10^{-3}$), nous avons retenu les résultats de l'essai à charge variable en utilisant le perméamètre C. B. R. sur un échantillon non remanié, pris directement sur le terrain par l'intermédiaire d'une "trousse coupante" adaptée au moule.

- Principe : la mesure de la perméabilité est basée sur la loi de Darcy : $v = K i$

- v = vitesse d'écoulement,
- K = coefficient de perméabilité,
- i = gradient hydraulique.

On fait passer un courant d'eau à travers l'échantillon de sol. En mesurant i et v, on déduit K par la formule.

Pour l'essai à charge variable, l'eau provient d'un tube de faible diamètre et s'écoule à travers l'échantillon. On déduit la perméabilité du sol (K) en mesurant la vitesse avec laquelle le niveau d'eau baisse dans le tube.

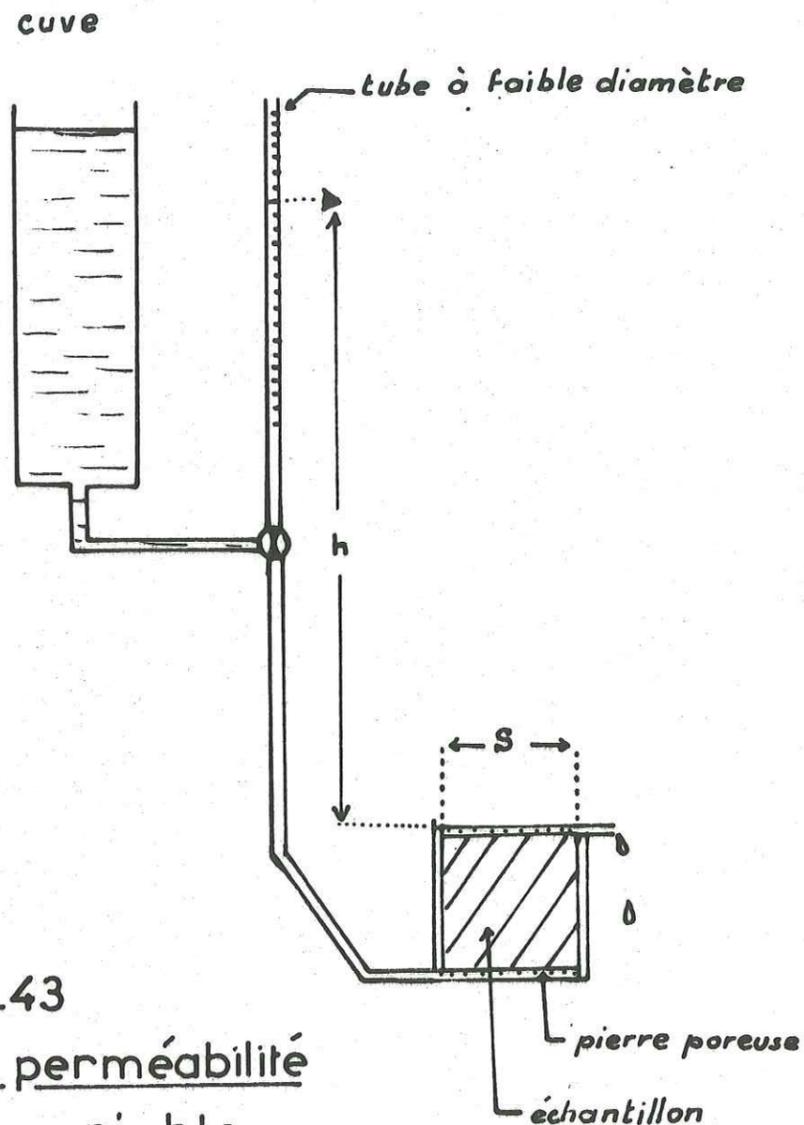


fig.43
essais de perméabilité
à charge variable

Soit S la section de l'échantillon,
 H la hauteur de l'échantillon,
 h la charge d'eau à l'instant t,
 s la section du tube,
 dh la diminution du niveau de l'eau dans le tube pendant le temps dt,
 h₀ la charge d'eau initiale à l'instant t₀
 h₁ la charge d'eau à la fin de l'essai au temps t₁

le débit d'eau qui traverse l'échantillon pendant le temps dt est :

$$q = -s \frac{dh}{dt}$$

la vitesse de l'eau dans l'échantillon est alors :

$$\frac{q}{s} = \frac{s}{s} \frac{dh}{dt}$$

et la loi de Darcy peut s'écrire : $-\frac{s}{S} \frac{dh}{dt} = K \frac{h}{H}$

$$\text{soit } K dt = -\frac{s}{S} H \frac{dh}{h}$$

en intégrant, $Kt = -\frac{s}{S} H \log h$

ce qui s'écrit de t₀ à t₁ : $K(t_1 - t_0) = \frac{s}{S} H \log \frac{h_0}{h_1}$

$$K = 2,3 \frac{s}{S} \frac{H}{t_1 - t_0} \log_{10} \frac{h_0}{h_1}$$

- Sources d'erreur :

. Le mode de prélèvement introduit une erreur notable. L'enfoncement du moule dans la latérite en place provoque la destruction de l'agencement originel des grains et la fermeture des pores. Cependant elle affecte moins les latérites argileuses, qui sont souvent très compactes, que les latérites structurées de nature peu cohérente.

. L'essai lui-même introduit une erreur non négligeable. Le courant d'eau établi peut entraîner les particules fines et les accumule en pellicules à la surface de l'échantillon, obstruant ainsi l'écoulement normal, ou si la vitesse de passage de l'eau est trop grande, ces éléments fins seront directement entraînés vers l'extérieur.

B - RESULTATS D'ANALYSES EFFECTUEES SUR LES FORMATIONS LATERITISEES DES SITES ETUDIES

DESCRIPTION SOMMAIRE DES ECHANTILLONS

R. 7901 et R. 7902 : site de Manantsoa sur l'Andromba ; prélevés en x = 786, 25 ; y = 506, 40). Le puits a été pratiqué sur le rebord d'une dépression (ancien lavaka selon toute probabilité).

R. 7901 : latérite argileuse (à 30 cm de la surface) ;
aspect en place :
 - non structuré, teinte ocre jaune ;
 - prédominance d'éléments argileux fins, pas de débris de quartzite ;
 - compact, très poreux (pores pouvant aller jusqu'à 2 mm de diamètre), densité très faible.

R. 7902 : aspect en place : (à 120 cm de la surface) :
 - non structuré, teinte rouge jaunâtre ;
 - grains discernables (quartz et feldspath # 1 mm), pas de débris de quartzite ;
 - assez compact, pores non visibles à l'œil nu.
Observation : le fait que cet endroit se situe sur le flanc d'un ancien lavaka élimine toute possibilité de définir la roche saine originelle. En effet pour un lavaka qui est stabilisé, la paroi n'est plus abrupte mais remplacée par un amoncellement d'éboulis que la rigole intérieure n'arrive plus à évacuer (cf. III. B. 2 et III. B. 5).
 K = 5. 10⁻⁴ cm/s.

R. 7903 et R. 7904 : site de Manantsoa ; prélevés dans le puits (x = 786, 17 ; y = 505, 90) pratiqué à partir du fond d'un fossé artificiel qui possède déjà une profondeur de 3-4 m.

R. 7903 : (à 80 cm de l'ouverture du puits, au-delà du sol proprement dit qui est noir et humique).
aspect en place :
 - structure non apparente, teinte ocre jaune ;
 - beaucoup d'éléments argileux fins ; pas de débris de quartzite ;
 - consistance molle, de nature peu cohérente.

R. 7904 : (à 200 cm de l'ouverture du puits) : latérite structurée ;
 - aspect en place :
 - structuré (foliation assez floue représentée par des paillettes dorées de mica altéré), teinte généralement rougeâtre (tachée de blanc).

- grains visibles (quartz et feldspath \neq 1 mm) ;
- cohérent mais pas dur ;
remarque : on note quelques passages lenticulaires (épaisseur centimétrique) de latérite structurée blanchâtre à gros grain. Ils sont parallèles à la foliation des roches encaissantes ;
Au-delà de 200 cm, on commence à rencontrer un autre type de latérite qui constitue un banc à part, résistant à l'angady, à grain grossier (latérite structurée dure à gros grain) ;
roche originelle présumée : migmatite granitoïde à grain moyen que l'on rencontre en affleurement dans la même suite en bordure de la première vallée transversale aval.

R. 7905 : site de Manantsoa, appui rive droite, puits n°3 (fig. 27) : latérite argileuse type, à 1 m de la surface ;

aspect en place :
- non structuré, teinte ocre rouge ;
- prédominance d'éléments fins argileux associés à des radicules et petits fragments de quartzite ;
- compact, très dur.

R. 7906 : site d'Andranomanga sur la Sisaony, appui rive droite, puits (fig. 44). Latérite argileuse, prélèvement à 1 m de la surface ;

aspect en place :
- non structuré, teinte rougeâtre ;
- éléments fins argileux, avec des grains millimétriques de quartz pas de débris de quartzite ;
- compact, moins dur que le R. 7905 ;

remarque : vers 1,50 m de la surface : début de latérite structurée blanche mouchetée de noir, à gros grain, "tendre".

R. 7910 et R. 7914 : site d'Andranomanga. Prélévés au même puits (fig. 44), pratiqué à partir du fond du fossé qui possède déjà une profondeur de 4 à 5 m.

R. 7910 : (à 80 cm de l'ouverture du puits)

aspect en place :
- structure à grain fin de quartz, teinte rouge jaunâtre, prédominance d'éléments argileux fins ;
- "tendre".

R. 7914 : (à 350 cm de l'ouverture du puits) ;

aspect en place :
- structuré, de teinte rouge jaunâtre ;
- grains millimétriques de quartz avec des restes non altérés de feldspath et de mica enrobés d'éléments fins argileux ;
- "tendre" ;

roche originelle présumée : migmatite granitoïde ;
K = $6,6 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

R. 7947 : site d'Andranomanga. Prélèvement à la hauteur de l'ouverture du fossé du côté de la rivière ;

aspect en place :
- structuré, de teinte blanc jaunâtre, tachée de rouille ;
- grain grossier (2 à 5 mm), feldspath non altéré très friable ;
- "tendre" ;
roche originelle présumée :
granite migmatitique à gros grain ;
K = $6,0 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

R. 7957 : site de Manantsoa. Prélèvement au puits n°1 (fig. 27) ;

aspect en place :
- teinte rougeâtre avec prédominance d'éléments argileux fins, enrobant des blocs centimétriques irrégulièrement répartis, latérite structurée blanche à grain moyen. On observe aussi des débris de quartzite qui sont de moins en moins fréquents à mesure qu'on descend le puits ;
- de plus en plus tendre en profondeur ;
roche originelle présumée : boules et fragments de granite migmatitique amoncelés.
K = $1,7 \cdot 10^{-3}$ cm/s.

R. 7961 : site d'Andranomanga. Prélèvement au puits (fig. 44) à 3 m de profondeur ;

aspect en place :
- latérite argileuse non structurée de teinte rougeâtre ;
- prédominance d'éléments argileux, pas de débris de quartzite ;
- assez résistant à l'angady.

R. 7993 : site de Manantsoa. Prélèvement au puits n°4 (fig. 27) pratiqué au fond d'un fossé qui se trouve déjà à 3 m de la surface ;

aspect en place :
- latérite structurée (subgrenue) de teinte blanc jaunâtre ;
- grain moyen (voisin de 1 mm) ;
- "tendre" mais bien cohérent ;
roche originelle présumée :
granite migmatitique à grain moyen.

R. 8007 : site d'Antaramanana. Prélèvement au point x = 792,60 ; y = 521,70 , à 1 m de la surface ;

aspect en place :
- latérite non structurée rouge, les débris de quartzite existent seulement dans la partie tout à fait superficielle ;
- assez résistant à l'angady.
K = $2,8 \cdot 10^{-4}$ cm/s).

R. 8010 : site d'Antaramanana. Prélèvement au point x = 791,30 ; y = 522,60 sur le flanc d'un lavaka ;

aspect en place :
- latérite structurée (subgrenue) blanc jaunâtre ;

- grain de quartz millimétrique, feldspath et mica en grande partie altérés ;
 - "tendre", visiblement poreux ;
roche originelle présumée :
 granite de type Ambatomiranty dont on voit au fond du lavaka quelques boules ;
remarque :
 les diaclases se matérialisent par des traces noirâtres en réseau suborthogonal délimitant des faces polyédriques sur une paroi fraîchement décapée
 $K = 4,7 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

R. 8012 : site d'Antaramanana. Prélevé dans la combe anticlinale, au point $x = 792,40$; $y = 520,60$.

aspect en place :

- latérite structurée (embréchtique) blanc jaunâtre, avec des mouchetures noires irrégulièrement réparties ;
- prédominance d'éléments fins, argileux, altération très poussée ;
- consistance molle ;

roche originelle présumée :

gneiss à grenat (grenat altéré en hématite).

$K = 1,2 \cdot 10^{-5}$ cm/s.

R. 8013 : site d'Antaramanana. Prélèvement du côté appui rive droite du barrage, au point $x = 791,85$; $y = 522,25$, à 1 m de la surface ;

aspect en place :

- latérite non structurée de teinte ocre rouge ;
- éléments argileux associés à des débris de quartzite (colluvions) de dimensions allant du centimètre au millimètre ;
- très dur.

$K = 1,2 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Echant. n°	W %	Granulométrie %				Limites d'Atterberg			Classification américaine H. R. B.			IC
		sup. à 2 mm	2 mm à 0,2 mm	0,2 mm à 0,08 mm	inf. à 0,08 mm	LL	LP	IP	classe	IG	type de matériaux	
R. 7901	20,41	1,1	34,2	11	53,7	42	30	12	A-7-5	4	sol argileux	1,8
R. 7902	19,27	1,2	32,3	18,6	47,9	37,5	21	16,5	A-6	5	"	1,1
R. 7903	15,73	2,1	26,9	11,6	59,4	32	21	11	A-6	5	"	1,5
R. 7904	29,5	2,4	48,5	17,1	32	28	19	9	A-2-4	0	sable argileux	0
R. 7905	16,63	1,1	34,3	12,2	52,4	40	25	15	A-6	5	sol argileux	1,6
R. 7906	24,94	6,5	24,2	15	54,3	46,5	25	21,5	A-7-6	9	"	1
R. 7910	24,19	1,3	10,9	19,2	68,6	41	20	21	A-7-5	11	"	0,8
R. 7914	31,87	0	22,4	23,2	54,4	50	24	26	A-7-6	11	"	0,7
R. 7947	23,74	0,5	32,3	26,6	40,6	48,5	27	21,5	A-7-6	4	"	1,1
R. 7957	12,46	6,7	41,8	15,7	35,8	27	16,5	10,5	A-4	0	sol limoneux	1,4
R. 7961	26,59	1,7	16,7	12,6	69	54	28	26	A-7-6	16	sol argileux	1,0
R. 7993	13,85	1,3	32,1	21,2	45,4	32,5	15	17,5	A-6	4	"	1,0
R. 8007	30,28	0,5	16,2	5,2	78,1	62	34	28	A-7-5	19	"	1,1
R. 8010	-	0,1	58	15,3	26,6	30	16	14	A-2-6	0	sable limoneux	-

TABLEAU II

Son- da- ge	Profondeur en m	Nature	Limites d'Atterberg			Granulométrie %		
			LL	LP	IP	2	0,42	0,08
A	0,30 à 1,50	limon sableux	38,1	24,8	13,3	100	88	56
A	1,50 à 2,50	sable limoneux (arène)	36,2	29,0	7,2	91	61	22
A	2,50 à 3,10	sable limoneux (arène)	35,5	29,0	6,5	82	54	21
A	3,10 à 4,10	sable limoneux jaunâtre (arène)	23,0	17,6	5,4	92	54	18
B	0,5 à 2	limon argilo-sableux brun	38,6	22,6	16,0	99	96	77
B	2 à 4	limon argilo-sableux brun	56,3	37,1	19,2	100	97	74
B	4 à 6	limon argilo-sableux brun jaune	52,7	34,8	17,9	100	99	73
C	0,10 à 2,50	argile limono-sableuse brune	54,8	32,7	22,1	100	93	70
C	2,50 à 3,20	limon argilo-sableux micacé	49,8	33,8	16,6	97	86	60
C	3,20 à 4,80	argile limono-sableuse micacée	55,4	28,8	26,6	98	87	60
C	4,80 à 6	argile limono-sableuse micacée	54,6	31,9	22,7	99	89	59
D	0,60 à 3,50	argile sablo-limoneuse micacée	52,8	28,7	24,1	97	82	42
D	3,50 à 5	limon argilo-sableux micacé	44,1	29,3	14,8	99	89	65
D	5 à 5,60	sable limoneux (arène)	30,6	23,2	7,4	94	62	29
E	0,30 à 2,70	limon argilo-sableux	37,1	22,5	14,6	99	85	69
E	2,70 à 6,10	limon argilo-sableux	40,2	23,8	16,4	100	81	58

Sondage	Profondeur en m	Limites d'Atterberg			Granulométrie		
		LL	LP	IP	2mm	0,42mm	0,08mm
A	0,5 à 2,10	55	35	20	97	80	62
A	2,10 à 4,30	43	30	13	97	78	57
B	0,00 à 2	41	27	14	98	75	61
B	2 à 4,40	51	23	28	97	70	58

TABLEAU III

IC = indice de constance
 IG = indice de groupe
 IP = indice de plasticité
 LL = limite de liquidité
 K = perméabilité
 W = teneur en eau

.....

Tableau I = résultats des essais d'identification effectués sur des échantillons latéritiques.

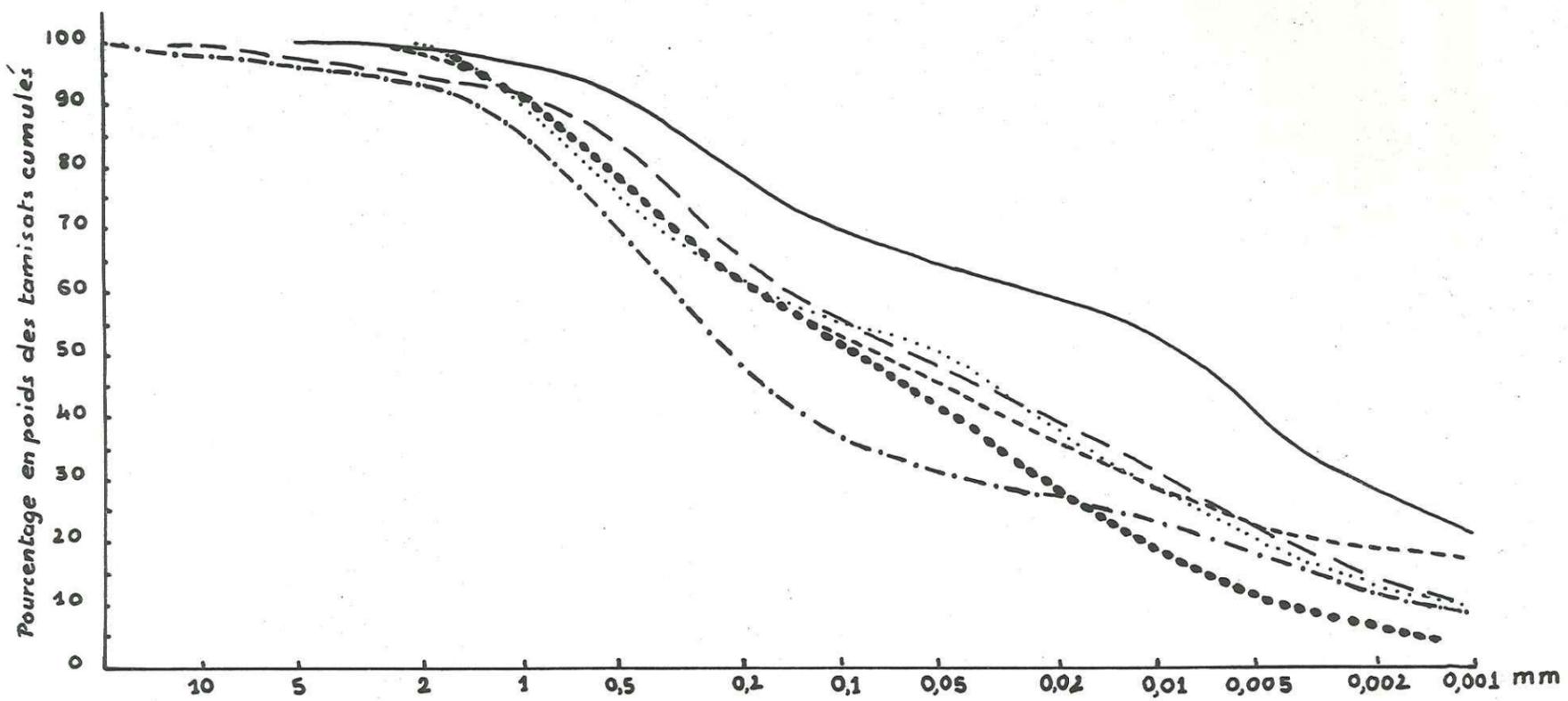
Tableau II = sondages à la tarière - site d'Andranomanga.

Tableau III = résultats des essais d'identification des sols d'apport - site d'Antaramanana.

A (x = 791,70 ; y = 521,70)
 B (x = 791,60 ; y = 522,00).

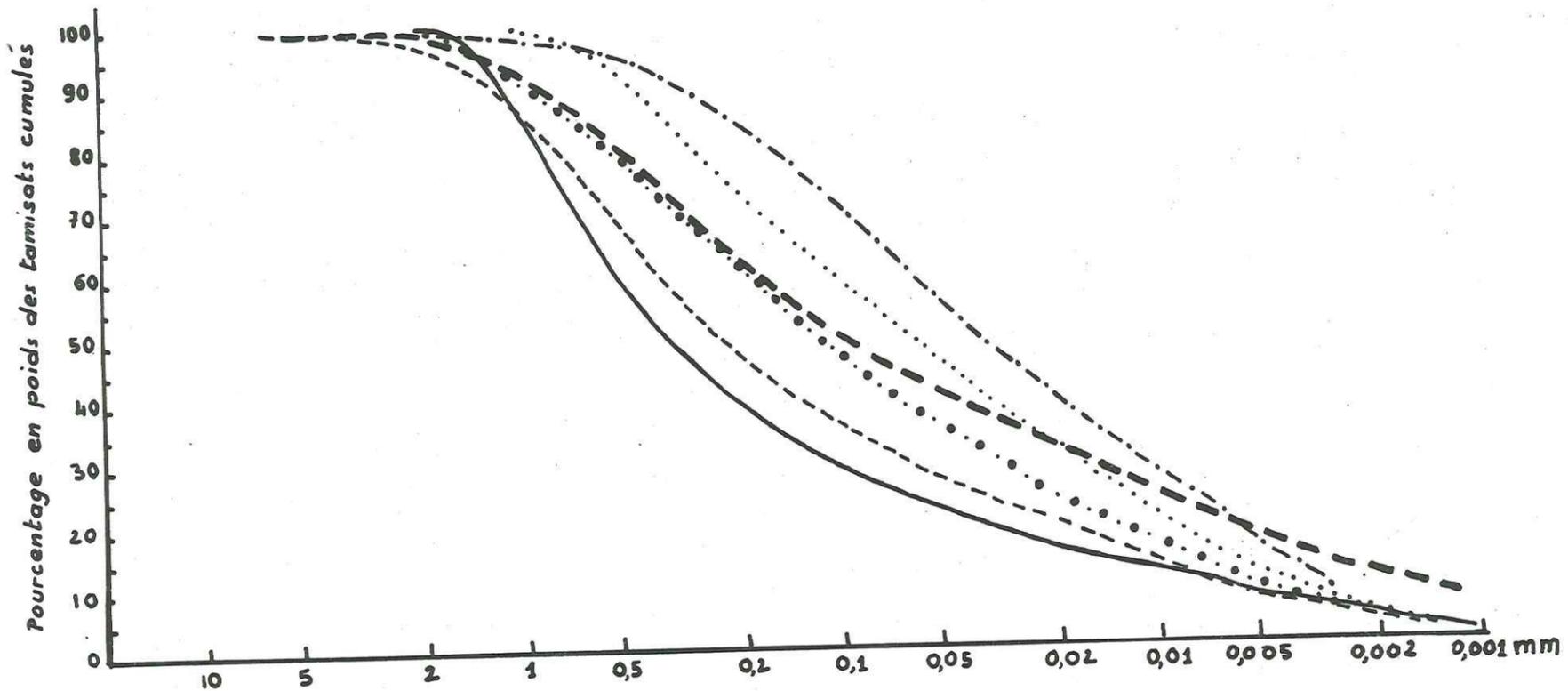
.....

courbes granulométriques de latérites argileuses



- | | | | |
|-----------|--------|-------------|--------|
| | R.7901 | - - - - - | R.7906 |
| | R.7902 | - . - . - . | R.7957 |
| - - - - - | R.7905 | ————— | R.7961 |

courbes granulométriques de latérites structurées



- | | | | |
|-------------|--------|-----------|--------|
| - - - - - | R.7904 | | R.7947 |
| - . - . - . | R.7910 | - - - - - | R.7993 |
| | R.7914 | ————— | R.8006 |

BIBLIOGRAPHIE

Abréviations

- B. S. G. F. : Bulletin de la Société géologique de France
C. G. I. : Congrès Géologique International
D. B. G. M. : Documentation du Bureau Géologique de Madagascar
M. I. S. M. : Mémoire de l'Institut Scientifique de Madagascar
P. U. F. : Presses Universitaires de France
SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques
T. B. G. M. : Travaux du Bureau Géologique de Madagascar

-
- BARBIER (R.) et GIGNOUX (M.), 1955. - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Masson et Cie édit., Paris.
- BARBIER (R.), 1967. - Rapport géologique sur l'aménagement de la Plaine de Tananarive. SOGREAH, R. 9312-1, mai 1968.
- BATTISTINI (R.), 1967. - L'Afrique australe et Madagascar. Magellan n° 23, P. U. F.
- BESAIRIE (H.) et COLLIGNON (M.), 1956. - Lexique stratigraphique de Madagascar. T. B. G. M. n° 73
- BESAIRIE (H.), 1956. - Le socle cristallin de Madagascar. C. G. I. de Mexico, ×
D. B. G. M. n° 126, p. 15-31.
- d° 1968. - Description géologique du massif ancien de Madagascar. ×
T. B. G. M. n° 177a.
- BRENON (P.), 1952 a. - La Plaine de Tananarive et les possibilités d'abaissement du niveau de l'Ikopa. SOGREAH, R. 9312-1, annexe, mai 1968.
- BRENON (P.), 1952 b. - Contribution à l'étude pétrographique et géologique des terrains cristallins de Madagascar dans les régions de l'Antsihanaka, de l'Antanosimboahangy (Hauts Plateaux) et dans les bassins de Bemarivo et de la Fanambana (côte NE). Thèse, Nancy.
- CASTANY (G.), 1960. - Rôle de la géologie appliquée aux grands travaux de Génie civil. B. S. G. F., p. 821-823.
- d° , 1969. - Prospection et exploitation des eaux souterraines. Dunod édit., Paris.
- DELBOS (L.), 1959. - Essais de classification des granites malgaches. Thèse Clermont-Ferrand, T. B. G. M. n° 93.
- DELUBAC (G.), RAKOTOARISON (W.), RANTOANINA (M.), 1962. - Etude géologique des feuilles Tananarive-Manjakandriana au 1/100 000. T. B. G. M. n° 114.
- DELVIGNE (J.), 1965. - Pédogenèse en zone tropicale. Dunod édit., Paris. ×
- DESCHAMPS (H.), 1960. - Histoire de Madagascar. Berger-Levrault, édit. Paris.
- ERHART (H.), 1967. - La genèse des sols en tant que phénomène géologique. × Masson et Cie, édit., Paris.

- GHISTE (S.), 1969. - Carte géotechnique de la région de Mons (avec notice).
Laboratoire de Mécanique des sols IRAM.
- GIGNOUX (J.) et MATHIAN (J.), 1950. - Les conditions géologiques de l'aménagement hydro-électrique du Rhône entre Genève et Seyssel. Revue "La Houille Blanche", n° hors série (Génissiat).
- GOGUEL (J.), 1959. - Application de la géologie aux travaux de l'Ingénieur. Masson et Cie édit., Paris.
- HOTTIN (G.), 1965? - Etude géologique de la feuille d'Ambatolampy au 1/100 000 T. B. G. M. n° 121.
- KRYNINE (D.P.) et JUDD (W.R.), 1957. - Principles of engineering geology and geotechnics. McGraw Hill Book Company.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES, 1967. - Recommandations pour la reconnaissance géologique et géotechnique.
- LAPLAINE (L.), 1957. - Etude géologique du massif cristallin malgache à la latitude de Tananarive. Thèse, Nancy.
- LUGEON (M.), 1933. - Barrages et géologie. Dunod, édit., Paris.
- MARCHAND (P.), 1963. - Contribution aux études de reconnaissance des barrages de Castirla, Figareto et Alesani (Corse) Thèse de 3e cycle, Grenoble.
- MARINOS (P.), 1969. - Etudes géologiques d'aménagements hydrauliques dans le Lauragais. Thèse de Docteur Ingénieur, vol. I, Grenoble.
- MAYER (A.), 1959. - Précis de mécanique des sols. Armand Colin, Paris.
- NOIZET (G.), 1964. - Comptes rendus de tournées à propos du projet d'abaissement de l'Ikopa. SOGREAH, R. 9312-1, annexe II.
- d° 1966. - Travaux sur le projet d'aménagement de la Plaine de Tananarive. SOGREAH, R. 9312-1, annexe III.
- d° 1967. - Première reconnaissance du site de barrage dit n° 4 d'Andranomanga-sur-Sisaony. SOGREAH, R. 9312-1, annexe IV.
- d° 1968. - Etat des études géologiques pour l'aménagement de la Plaine de Tananarive en janvier 1968. - SOGREAH, R. 9312-1.
- PERNET X 1954. - Evolution des sols de Madagascar sous l'influence de la végétation. M. I. S. M., t. VI, série D.
- REY (A.), 1968. - Aménagement de la Plaine de Tananarive. Synthèse de la première tranche d'études (66-68). SOGREAH, R. 9314.
- RIQUIER (J.), 1954. - Etude sur les "lavaka". M. I. S. M., t. VI, série D.
- TALOBRE (J.), 1957. - Mécanique des roches appliquée aux travaux publics. Dunod, édit., Paris.
- TERMIER (G. et H.), 1960. - Erosion et sédimentation. Masson et Cie, édit., Paris.
- TERZAGHI (K.) et PECK (R. B.), 1965. - Mécanique des sols appliquée. Dunod édit., Paris.
- TRICART (J.), 1962. - L'épiderme de la terre. Esquisse d'une géomorphologie appliquée. Masson et Cie, Paris.
- VIALON (P.), 1966. - Méthodes de l'analyse structurale. Applications à la géologie alpine. Thèse (2e thèse de doctorat ès Sciences naturelles), Grenoble.

Vu

Grenoble, le
Le Président de la Thèse,

R. BARBIER

Vu

Grenoble, le
Le Doyen de la Faculté des Sciences

E. BONNIER

BIBLIOTHÈQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

Vu, et permis d'imprimer
Le Recteur de l'Académie de Grenoble

M. NIVEAU

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCE
UNIVERSITE