

THÈSE

présentée

A L'UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR
DE STRASBOURG

pour obtenir le grade de

DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

par

Christian Arsène Roger ANDRIAMIRADO

Recherches paléomagnétiques sur Madagascar
Résultats et interprétations dans le cadre de
la dislocation de la partie orientale du Gondwana

Soutenu le 29 Juin 1971 devant la Commission d'Examen

MM. A. ROCHE	Président
J. LUCAS	Examineur
E. THELLIER	Examineur
J. GOGUEL	Examineur

A MA MERE

A MA FEMME

A MES ENFANTS

UNIVERSITE LOUIS PASTEUR
STRASBOURG

Président : Professeur G. OURISSON

Vice-Présidents : Professeur A. CHAUMONT

Professeur G. LAUSTRIAT

Secrétaire Général : G. KIEHL

PROFESSEURS et MAITRES DE CONFERENCES des U.E.R.
RESPONSABLES DES DOCTORATS ès-SCIENCES

Doyens Honoraires : A. KIRRMANN, P. LACROUTE, H.J. MARESQUELLE, J.H. VIVIEN,
G. MILLOT

Professeurs Honoraires : P. DE BEAUCHAMP, L. BOISSELET, H. CARTAN, G. CERF,
C. CHABAUTY, A. CHRETIEN, J. DENY, Ch. EHRESMANN, M. FRECHET,
Mle S. GILLET, A. HEE, R. HOCART, A. KIRRMANN, G. LEMEE,
P. L'HERITIER, A. LICHNEROWICZ, H.J. MARESQUELLE, L. NEEL,
Ch. SADRON, F. TERROINE, H. VILLAT, H. WEISS, Et. WOLFF, J. YVON.

Maître de Conférences Honoraire : R. WEIL

Professeurs :

H. FORESTIER	T.	Chimie générale
J. ROTHE	T.	Physique du Globe
P. LACROUTE	T.	Astronomie
J.H. VIVIEN	T.	Zoologie et Embryologie expérimentale
A. MAILLARD	T.	Physicochimie du Pétrole
S. GORODETZKY	T.	Physique générale et Physique nucléaire
L. SACKMANN	T.	Mécanique des Fluides
J. BYE	T.	Chimie Physique
Mle M. PEREY	T.	Chimie nucléaire
S. GOLDSZTAUB	T.	Minéralogie et Pétrographie
P. JOLY	T.	Biologie générale
H. BENOIT	T.	Physicochimie macromoléculaire
P. CUER	T.	Physique générale et physique corpusculaire
G. MILLOT	T.	Géologie et Paléontologie
R. LECOLAZET	T.T.P.	Physique du Globe
H. SAUCIER	T.T.P.	Minéralogie
R. ROHMER	T.	Chimie minérale
Mle A. GAGNIEU	T.T.P.	Botanique
S. NIKITINE	T.	Physique générale
F. STUTINSKY	T.	Physiologie générale
B. WURTZ	T.T.P.	Chimie biologique
J. BRENET	T.	Electrochimie
G. OURISSON	T.T.P.	Chimie
A. COCHE	T.T.P.	Physique nucléaire
R. CERF	T.	Physique générale
J. FRENKEL	T.T.P.	Mathématiques
A. DELUZARCHE	T.T.P.	Chimie
R. ARMBRUSTER	T.T.P.	Physique
A. ROCHE	T.T.P.	Physique du Globe
L. HIRTH	T.	Microbiologie
A. FUCHS	T.	Mécanique rationnelle
A. GALLMANN	T.T.P.	Physique

P. MIALHE	T.T.P. Physiologie animale
J.P. EBEL	T. Chimie biologique
J. PARROD	T.T.P. Chimie
Mme D. MAGNAC	T.T.P. Physique
M. DAUNE	P.S.C. Physique
J.P. ADLOFF	T.T.P. Chimie nucléaire
D. BERNARD	T.T.P. Méthodes mathématiques de la physique
E. DANIEL	T. Physique expérimentale
P. CHEVALIER	T. Physique
J. GREMILLARD	T.T.P. Mécanique des Fluides
P. CARTIER	T. Mathématiques
G. REEB	T. Topologie
J. WUCHER	P.S.C. Physique
Mme M. BRINI	T.T.P. Chimie
H. DURANTON	T.T.P. Botanique
R. WEISS	T.T.P. Chimie
P. FEDERLIN	T.T.P. Chimie
J.P. SCHWING	T.T.P. Chimie
M. SIESKIND	P.S.C. Physique
G. MONSONEGO	T. Physique théorique
P. GABRIEL	T.T.P. Mathématiques
C. WIPPLER	T. Physicochimie des Hauts Polymères industriels
P.A. MEYER	T.T.P. Mathématiques
G. WEILL	P.S.C. Physique
A. CLAUSS	P.S.C. Chimie
E. FOLLENIUS	P.S.C. Zoologie
J. LUCAS	T.T.P. Géologie
J.J. THIEBOLD	P.S.C. Biologie animale
G. GLAESER	T. Mathématiques
J.H. WEIL	P.S.C. Chimie biologique
D. FOATA	T.T.P. Mathématiques
X. FERNIQUE	P.S.C. Mathématiques
F. GAUTIER	P.S.C. Physique
V. AVANISSIAN	T. Analyse supérieure
F. LACROUTE	T. Biologie végétale
J.P. EBERHART	P.S.C. Minéralogie
J.M. LEHN	P.S.C. Chimie
Cl. ROBERT	P.S.C. Physique
F. BECKER	P.S.C. Physique mathématique
M. KAROUBI	P.S.C. Mathématiques
A. MIGNOT	P.S.C. Mathématiques appliquées

Professeurs associés :

A. BANDERET (E.A.H.P.) - B. BENJAMINOV (Chimie) - E. DADE (Math.) - H. DELLMANN (Physiol.) - H. HAKEN (Physique) - L. LEITE-LOPEZ (Physique) - M. VAN-REGENMORTEL (Botanique) - K.S. SPIEGLER (Chimie) - J. WALSCH (Math.)

Maîtres de Conférences et Chargés d'enseignement :

M. GOUNOT	Botanique
J. DEHAND	Chimie minérale
C. GODBILLON	Mathématiques
J. ROUX	Botanique

R. VOLTZ	Physique théorique
A. MICHARD	Géologie
Y. BOULANGER	Chimie biologique
J.P. BRETAGNOLLE	Mathématiques
J.J. RIEHL	Chimie
Cl. DELLACHERIE	Mathématiques
M. GROSMANN	Physique
M. DAIRE	Chimie physique industr. et Sc. des Matériaux
G. DUNOYER de SEGONZAC	Géologie
E. BIANCO	Mathématiques
J. MARTINET	Mathématiques
J.P. JOUANOLOU	Mathématiques
Ph. ROPARTZ	Psycho-physiologie
Ph. RICHARD	Physiologie animale
G. SOLLADIE	Chimie organique
P. BENVENISTE	Physiologie végétale

Maîtres de Conférences associés :

P. FELLNER (Biochimie) - St PINE (Chimie) -

TABLE DES MATIERES

	Page
Avant-propos	
Liste des Figures	i
Liste des Tableaux	iv
Liste des Annexes	vi
Introduction	1

PREMIERE PARTIE

. QUELQUES GENERALITES ET METHODES D'ETUDE

CHAPITRE I : TRAITES GENERAUX DE LA GEOLOGIE DE MADAGASCAR

I.-	<u>Situation géographique de la Grande Ile</u>	4
II.-	<u>Le socle malgache</u>	5
	1.- Le système androyen	5
	2.- Le système du Graphite	6
	2-1.- Le groupe d'Ampanihy	6
	2-2.- Le groupe de Manampotsy	6
	2-3.- Les groupes d'Ambatolampy et d'Andriba	6
	3.- Le système du Vohibory	7
	4.- Les séries des Cipolins et des Quartzites	7
	5.- Principaux repères géochronologiques	7
III.-	<u>Les terrains sédimentaires</u>	8
	1.- Le Karroo malgache	8
	1-1.- Le groupe de la Sakoa	9
	1-2.- Le groupe de la Sakamena	9
	1-3.- Le groupe de l'Isalo	10
	2.- Le Crétacé	11
	3.- Le Tertiaire	11
	4.- Les formations récentes	12
IV.-	<u>Le volcanisme à Madagascar</u>	13
	1.- Le volcanisme dans le Nord	13

2.-	Le volcanisme dans le Centre	13
2-1.-	Le massif de l'Ankaratra	14
2-2.-	Le massif de l'Itasy	14
3.-	Le volcanisme dans le Sud	15
4.-	Le volcanisme de la côte occidentale	15
5.-	Le volcanisme de la côte orientale	16
6.-	Datations radiochronologiques	17
6-1.-	Le massif volcanique de l'Androy	18
6-2.-	Les filons doléritiques de la côte Centre Nord-Est	18
6-3.-	Les coulées de la côte Sud-Est	19
6-4.-	Les coulées de la côte Sud-Ouest	19
V.-	<u>Essai de corrélation avec les autres pays de l'Océan Indien</u>	19
	1.- Le socle	21
	2.- Le Karroo	21
	3.- Le volcanisme	21
VI.-	<u>Conclusion</u>	22
CHAPITRE II		
I.-	<u>Le Paléomagnétisme</u>	24
II.-	<u>Choix des matériaux</u>	25
III.-	<u>Prélèvement des échantillons</u>	26
IV.-	<u>Etudes en laboratoire</u>	28
	1.- Les différentes sortes d'aimantation d'une roche	28
	1-1.- L'aimantation rémanente isotherme	29
	1-2.- L'aimantation rémanente chimique	29
	1-3.- L'aimantation rémanente anhystérétique	29
	1-4.- L'aimantation rémanente visqueuse	29
	2.- Etude pétrographique des échantillons	30
	3.- Mesure de l'aimantation rémanente d'un échantillon	30

3-1.- Rappel du principe de 1'inductomètre	30
3-2.- Description de 1'inductomètre	31
3-3.- Qualités de 1'inductomètre	32
3-4.- Exécution d'une mesure de rémanence	35
3-5.- Reproductibilité des mesures	37
3-6.- Influence du shunt électrique	42
4.- Comparaisons avec d'autres appareils	44
5.- Analyse de 1'aimantation rémanente naturelle d'un échantillon	45
5-1.- Test de stabilité de E. Thellier	45
5-2.- Désaimantation par champs alter- natifs	46
5-3.- Recherche du champ alternatif à appliquer	46
5-4.- Recherche de la composante d'ai- mantation stable et caractéristi- que de 1'échantillon	48
5-5.- Détermination de la nature de 1'aimantation stable	49
5-6.- Exemples	51
6.- Dispositif de désaimantation	56
6-1.- Description de 1'appareil à désaimanter	60
6-2.- Etude de la dispersion introduite par la désaimantation	61
6-3.- <u>Estimation de la dispersion intro- duite par la désaimantation</u>	62
6-4.- Résultats	62
6-5.- Conclusions	66

CHAPITRE III : ANALYSE DES RESULTATS

I.- <u>Présentation des résultats</u>	68
II.- <u>Etude des dispersions</u>	69
1.- Dispersions entre échantillons	69

	2.- Dispersions entre blocs	69
	3.- Dispersions entre sites	70
	3-1.- Non parallélisme entre le champ magnétique local et le champ magnétique régional	70
	3-2.- Variation du champ magnétique terrestre	71
	3-3.- Estimation de la variation séculaire	71
III.-	<u>Calcul de la direction moyenne d'aimantation d'une formation</u>	72
IV.-	<u>Mode de comparaison des résultats</u>	75
	1.- Comparaison de deux directions	75
	2.- Calcul du pôle géomagnétique virtuel	75
	3.- Trajectoire du pôle	77

DEUXIEME PARTIE

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

	INTRODUCTION	78
	CHAPITRE IV : LE PALEOMAGNETISME DE QUELQUES FORMATIONS PLIO-QUATERNAIRES DE MADAGASCAR	
I.-	<u>Etude paléomagnétique de la Montagne d'Ambre</u>	79
	1.- Géologie	79
	2.- Etude magnétique	82
	3.- Discussion	83
II.-	<u>Etude paléomagnétique des laves de Betafo- Antsirabe</u>	87
	1.- Géologie	85
	2.- Etude magnétique	87
	3.- Discussion	91
III.-	<u>Etude paléomagnétique du massif volcanique de l'Itasy</u>	91
	1.- Géologie	91
	2.- Etude magnétique	94
	3.- Discussion	96

IV.-	<u>Etude paléomagnétique des formations volcaniques d'Andreforefo et de Bevoay</u>	97
	1.- Géologie	97
	2.- Etude magnétique	98
	3.- Discussion	101
V.-	<u>Discussion sur l'ensemble des résultats paléomagnétiques relatifs aux formations plio- quaternaires</u>	101
	1.- Directions d'aimantation	103
	2.- Pôles virtuels	104
	3.- Essai de corrélation avec les pôles virtuels des pays encadrant l'Océan Indien	105

CHAPITRE V : LE PALEOMAGNETISME DES PRINCIPALES FORMATIONS
VOLCANIQUES CRETACEES DE MADAGASCAR

I.-	<u>Introduction</u>	109
II.-	<u>Etude paléomagnétique des filons doléritiques de la Côte Centre Nord-Est</u>	110
	1.- Géologie	110
	2.- Etude magnétique	112
	3.- Discussion	115
III.-	<u>Etude paléomagnétique des coulées volcaniques de la Côte Sud-Est</u>	118
	1.- Géologie	118
	2.- Etude magnétique	121
	3.- Discussion	122
IV.-	<u>Etude paléomagnétique du massif volcanique de l'Androy</u>	128
	1.- Géologie	128
	2.- Etude magnétique	130
	3.- Discussion	132
V.-	<u>Etude paléomagnétique du groupe basaltique du Mangoky-Onilahy</u>	135
	1.- Géologie	135
	2.- Etude magnétique	139
	3.- Discussion	142

VI.-	<u>Etude paléomagnétique du plateau basaltique du Mailaka</u>	145
	1.- Géologie	145
	2.- Etude magnétique	147
	3.- Discussion	150
VII.-	<u>Etude paléomagnétique du plateau basaltique de l'Antanimena</u>	153
	1.- Géologie	153
	2.- Etude magnétique	155
	3.- Discussion	159
VIII.-	<u>Discussion sur l'ensemble des résultats paléo- magnétiques relatifs au Crétacé</u>	161
	1.- Résumé des résultats	161
	2.- Directions d'aimantation	162
	3.- Pôles virtuels	164
	4.- Conclusions	167
CHAPITRE VI : ESSAI D'INTERPRETATION DES RESULTATS		
I.-	<u>Madagascar - Un fragment du Gondwana</u>	168
II.-	<u>Dislocation du Gondwana</u>	173
III.-	<u>Existence d'une dérive de Madagascar</u>	174
IV.-	<u>Essai de comparaison avec les autres pays encadrant l'Océan Indien</u>	178
V.-	1.- Comparaison Madagascar - Afrique	181
	2.- Comparaison Madagascar - Inde	183
	3.- Comparaison Madagascar - Australie	185
	4.- Comparaison Madagascar - Antarctique	185
V.-	<u>Essai de corrélation géographique entre les pays encadrant l'Océan Indien</u>	186
VI.-	<u>Conclusion</u>	190
BIBLIOGRAPHIE		192
ANNEXES		

AVANT - PROPOS

L'intérêt sans cesse grandissant suscité par le Paléomagnétisme a conduit l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) à développer ce genre de recherches à Madagascar.

Monsieur l'Ingénieur Général des Mines, J. GOGUEL, Président du Comité Technique de Géophysique de l'ORSTOM, m'a chargé de l'installation d'un laboratoire approprié à Tananarive et de l'exécution d'une série d'études sur les formations de la Grande Ile.

Mes travaux ont commencé en 1962, ils ont pu être exécutés grâce aux moyens que l'ORSTOM a mis à ma disposition. Qu'il me soit donc permis d'adresser aujourd'hui mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur G. CAMUS et Monsieur J. SEVERAC, respectivement Directeur Général et Secrétaire Général de l'ORSTOM, d'avoir facilité au mieux la réalisation de cette étude.

J'ai été guidé dans mes débuts par le R.P. CATTALA dont je voudrais saluer ici la mémoire.

Je dois aussi exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur A. KUCHE qui a dirigé mes recherches. Périodiquement, je lui ai présenté mes résultats, les conseils et les encouragements qu'il m'a donnés chaque fois ont stimulé mes efforts. Il m'a toujours fait bénéficier de sa très grande expérience. J'ai trouvé auprès de lui la compréhension et l'aide qui m'ont permis de mener à bien la rédaction de ce mémoire.

Ma reconnaissance ira également à Monsieur le Professeur E. THELLIER, mon parrain scientifique. Je lui dois toute ma formation de paléomagnéticien. Par la qualité et l'étendue de ses connaissances, son habileté à les

transmettre et sa rigueur scientifique, il m'a donné le goût de la recherche méthodique.

Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu lire le texte de ce mémoire et présenter des observations. Par ses judicieuses critiques, il m'a amené à préciser et ordonner l'interprétation des faits.

Je veux également exprimer ma profonde gratitude à Monsieur l'Ingénieur Général des Mines J. GOGUEL, auprès de qui j'ai trouvé un soutien constant. L'intérêt qu'il a sans cesse porté à mon travail a été pour moi un vif encouragement. L'appui incessant de sa haute autorité a grandement facilité l'accord des moyens dont j'ai eu besoin pour réaliser ce travail.

Je dois également adresser mes remerciements à Monsieur le Professeur J. LUCAS, pour avoir bien voulu faire partie de ce Jury.

Je veux aussi remercier les éminents Géologues du Service Géologique de Madagascar, notamment Monsieur H. BESAIRIE, Membre correspondant de l'Institut, dont les renseignements m'ont été précieux.

Que Monsieur P. ROEDERER, Directeur délégué du Centre ORSTOM de Tananarive et Monsieur J. AUBRAT du Bureau Géophysique de l'ORSTOM à Paris, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour leur compréhension et l'aide qu'ils m'ont apportée.

Mes remerciements vont également à Monsieur R. REMIOT qui a réalisé l'inductomètre que j'ai utilisé et à mes collaborateurs de la section géophysique du Centre ORSTOM de Tananarive, en faisant une mention spéciale pour Messieurs J.L. RAKOTOARISOA et A. RAZAFINJOHANY, pour leur dévouement et l'aide efficace qu'ils m'ont apportée tout au long de la réalisation de ce travail.

Le laboratoire de géochronologie du B.R.G.M. a effectué des mesures d'âge sur quelques uns de mes échantillons, que les membres de cette équipe en soient ici remerciés.

Pour la rédaction de ce mémoire, j'ai été accueilli dans le laboratoire de Monsieur le Professeur A. ROCHE. J'y ai toujours rencontré le meilleur accueil; aussi dois-je exprimer tous mes remerciements aux membres de son équipe, en faisant une mention spéciale pour Madame H. PFAFF.

La dactylographie de ce mémoire a été assurée par Madame P. SPRINGER et sa collaboratrice Madame M. WILLER. Elles n'ont ménagé ni leur temps ni leur peine, qu'elles en soient remerciées.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur J. KUPFFER qui a dessiné les figures contenues dans ce mémoire, ainsi qu'à Monsieur R. JOCHEM qui en a assuré le tirage.

Enfin nombreux sont les collaborateurs que je ne puis citer, que tous trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

- Figure I-1 Carte géologique schématique de Madagascar
 Figure I-2 Le volcanisme à Madagascar, en Afrique du Sud, aux Indes et en Australie. Tableau comparatif

CHAPITRE II

- Figure II-1 Uniformité de \vec{G} dans le volume utile de l'inductomètre
 Figure II-2 Orientation de l'échantillon pour la mesure
 Figure II-3 Premier exemple de trajectoires dans le plan, des projections de l'extrémité d'un vecteur relatif à une aimantation naturelle stable
 Figure II-4 Deuxième exemple de trajectoires dans le plan, des projections de l'extrémité d'un vecteur relatif à une aimantation naturelle stable
 Figure II-5 Exemple de trajectoires dans le plan, des projections de l'extrémité d'un vecteur relatif à une aimantation naturelle partiellement stable
 Figure II-6 Exemple de trajectoires dans le plan, des projections de l'extrémité d'un vecteur relatif à une aimantation naturelle instable
 Figure II-7 Trajectoires sur une projection stéréographique des extrémités des vecteurs relatifs à des aimantations naturelles stable, partiellement stable et instable
 Figure II-8 Différents types de courbes de désaimantation

CHAPITRE IV

- Figure IV-1 Esquisse géologique de l'extrême Nord de Madagascar
 Figure IV-2 Montagne d'Ambre : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
 Figure IV-3 Montagne d'Ambre : Directions des aimantations rémanentes naturelles
 Figure IV-4 Esquisse géologique de la région de Betafo-Antsirabe

- Figure IV-5 Betafo-Antsirabe : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
- Figure IV-6 Betafo-Antsirabe : Directions des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations caractéristiques
- Figure IV-7 Esquisse géologique de la région de l'Itasy
- Figure IV-8 Itasy : Directions des aimantations caractéristiques
- Figure IV-9 Andreforefo-Bevoay : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
- Figure IV-10 Andreforefo-Bevoay : Directions d'aimantation avant et après désaimantation.
- Figure IV-11 Position des pôles virtuels relatifs à divers pays de l'Océan Indien pour le Tertiaire supérieur et le Quaternaire

CHAPITRE V

- Figure V-1 Esquisse géologique de la côte centre Nord-Est
- Figure V-2 Côte centre Nord-Est : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
- Figure V-3 Côte centre Nord-Est : Directions des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations caractéristiques
- Figure V-4 Côte centre Nord-Est : Position des pôles virtuels
- Figure V-5 Esquisse géologique de la côte Sud-Est
- Figure V-6 Côte Sud-Est : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
- Figure V-7 Côte Sud-Est : Directions des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations caractéristiques
- Figure V-8 Côte Sud-Est : Position des pôles virtuels
- Figure V-9 Esquisse géologique de la région de l'Androy
- Figure V-10 Androy : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
- Figure V-11 Androy : Directions des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations caractéristiques
- Figure V-12 Androy : Position des pôles virtuels
- Figure V-13 Esquisse géologique de la région du Mangoky-Onilahy
- Figure V-14 Le Crétacé entre Mangoky et Onilahy
- Figure V-15 Mangoky-Onilahy : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique

- Figure V-16 Mangoky-Onilahy : Directions des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations caractéristiques
- Figure V-17 Mangoky-Onilahy : Position des pôles virtuels
- Figure V-18 Esquisse géologique de la région du Mailaka
- Figure V-19 Mailaka : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
- Figure V-20 Mailaka : Directions des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations caractéristiques
- Figure V-21 Mailaka : Position des pôles virtuels
- Figure V-22 Esquisse géologique de la région de l'Antanimena
- Figure V-23 Antanimena : Histogramme des intensités d'aimantation spécifique
- Figure V-24 Antanimena : Directions des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations caractéristiques
- Figure V-25 Antanimena : Position des pôles virtuels
- Figure V-26 Position des pôles virtuels de Madagascar pour le Crétacé supérieur

CHAPITRE VI

- Figure VI-1 Le Gondwana au début du Permien d'après L.C. KING
- Figure VI-2 Position relative des éléments du Gondwana d'après A.G. SMITH et A. HALLAM
- Figure VI-3 Le Gondwana au Paléozoïque d'après M.W. Mc ELHINNY et G.R. LUCK
- Figure VI-4 Le Gondwana au Permien d'après F. AHMAD
- Figure VI-5 Position des pôles virtuels pour divers pays entourant l'Océan Indien
- Figure VI-6 Position relative possible de l'Afrique et de Madagascar
- Figure VI-7 Position relative possible de l'Inde et de Madagascar
- Figure VI-8 Position relative des éléments du Gondwana vers la fin du Jurassique ou le début du Crétacé d'après L.C. KING
- Figure VI-9 Le Gondwana au Crétacé supérieur d'après M.W. Mc ELHINNY
- Figure VI-10 Le Gondwana au Crétacé moyen et supérieur d'après F. AHMAD
- Figure VI-11 Position relative possible des pays de la partie orientale du Gondwana vers la deuxième moitié du Crétacé

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

- Tableau II-1 Variation de la valeur du moment magnétique et de la direction d'aimantation d'un échantillon avec la position du shunt électrique
- Tableau II-2 Résultats des comparaisons avec un inductomètre du laboratoire de géomagnétisme de St Maur-des-Fossés
- Tableau II-3 Différentes valeurs de la dispersion introduite par la désaimantation par champs alternatifs

CHAPITRE IV

- Tableau IV-1 Montagne d'Ambre : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
- Tableau IV-2 Betafo-Antsirabe : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
- Tableau IV-3 Itasy : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
- Tableau IV-4 Andreforefo-Bevoay : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
- Tableau IV-5 Résumé des résultats paléomagnétiques relatifs aux formations volcaniques plio-quaternaires
- Tableau IV-6 Position des pôles virtuels de divers pays de l'Océan Indien pour les périodes récentes
- Tableau IV-7 Distances angulaires entre les divers pôles virtuels des pays de l'Océan Indien

CHAPITRE V

- Tableau V-1 Côte centre Nord-Est : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
- Tableau V-2 Côte Sud-Est : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
- Tableau V-3 Distances angulaires entre les pôles virtuels calculés pour la côte Sud-Est

Tableau V-4	Androy : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
Tableau V-5	Mangoky-Onilahy : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
Tableau V-6	Mailaka : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
Tableau V-7	Antanimena : Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels
Tableau V-8	Résumé des résultats paléomagnétiques relatifs aux formations crétacées

CHAPITRE VI

Tableau VI-1	Liste des pôles virtuels relatifs aux divers pays entourant l'Océan Indien, pour la deuxième moitié du Crétacé
--------------	--

LISTE DES ANNEXES

- Annexe I : Résultats des différents étalonnages effectués
- Annexe II : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de la Montagne d'Ambre
- Annexe III : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de la région de Betafo-Antsirabe
- Annexe IV : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de la région de l'Itasy
- Annexe V : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance d'Andreforefo et de Bevoay
- Annexe VI : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de la Côte Centre Nord-Est
- Annexe VII : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de la Côte Sud-Est
- Annexe VIII : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de la région de l'Androy
- Annexe IX : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de la région du Mangoky-Onilahy
- Annexe X : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance du Mailaka
- Annexe XI : Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons en provenance de l'Antanimena

RECHERCHES PALEOMAGNETIQUES SUR MADAGASCAR
RESULTATS ET INTERPRETATIONS DANS LE CADRE DE
LA DISLOCATION DE LA PARTIE ORIENTALE
DU GONDWANA

I N T R O D U C T I O N

Au cours de ces dernières décennies, nos connaissances sur l'histoire de la terre se sont considérablement accrues. Par contre coup, des sciences nouvelles se sont répandues. Parmi celles-ci figure le Paléomagnétisme, qui connaît un développement sans cesse grandissant, grâce à la découverte récente de l'expansion des fonds océaniques (40) qui a remis en faveur la théorie, déjà ancienne, de la dérive des continents. La méthode paléomagnétique semble, en effet, particulièrement adaptée pour l'étude des problèmes concernant l'évolution des masses continentales sur une grande échelle (62, 88).

S'il est presque unanimement admis que Madagascar faisait partie primitivement du supercontinent nommé Gondwana, l'accord n'est pas total en ce qui concerne son évolution au cours des temps géologiques. La voie paléomagnétique paraît être une source susceptible d'apporter des éléments nouveaux dans ce domaine, en particulier sur les changements de latitude et d'orientation qu'elle a pu avoir par rapport aux autres pays entourant l'Océan Indien.

Les recherches paléomagnétiques sur Madagascar ont débuté avec le R.P. L. CATTALA et le Professeur A. ROCHE (85, 86, 87). Presque en même temps A.E.M. NAIRN (80) a procédé à l'étude de l'aimantation de quelques roches malgaches. Leurs résultats ont été depuis largement utilisés par les chercheurs du monde entier (32, 60, 73).

L'intérêt suscité par ces premières études a conduit l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) à développer ce genre de recherches à Madagascar. A cette fin, j'ai été chargé de l'installation

à Tananarive d'un laboratoire approprié, en réalisant un ensemble cohérent qui permet de mesurer et d'analyser les aimantations rémanentes naturelles d'un grand nombre de roches de l'écorce.

Sur les conseils des Professeurs E. THELLIER et A. ROCHE, je me suis spécialement attaché à l'étude des formations volcaniques crétacées. Celle-ci constitue la partie principale de ce travail; des formations tertiaires et quaternaires ont été examinées accessoirement.

Le Crétacé apparaît comme étant une période particulièrement intéressante, parce que c'est à l'intérieur de cet intervalle de temps que la dérive des divers fragments, déjà en voie de dislocation, du Gondwana semble avoir atteint une grande ampleur (19, 47, 67, 74, 78).

Mes travaux ont commencé en 1962. Ils comprennent, outre l'installation du laboratoire nécessaire, la récolte d'échantillons orientés dans les différentes régions volcaniques de la Grande Ile, ainsi que différentes études de laboratoire, en particulier l'analyse détaillée des aimantations rémanentes naturelles.

Ce sont les résultats de ces différents travaux qui font l'objet de ce mémoire.

Cependant, pour mieux se familiariser avec la Grande Ile, il me semble nécessaire de rappeler auparavant les grandes lignes de sa structure géologique. Par le même fait, on peut obtenir une vue d'ensemble permettant, non seulement de mieux situer les formations étudiées, mais aussi d'effectuer quelques comparaisons avec les autres pays du pourtour de l'Océan Indien.

Ce sera l'objet du premier chapitre.

Aucune tentative d'explication du fondement du paléomagnétisme ne sera envisagée; mais un certain nombre de points, considérés comme nécessaires

pour la justification des expériences effectuées et des solutions adoptées, seront rappelés.

Deux chapitres seront réservés à cet effet.

Enfin je chercherai, dans les trois derniers chapitres du mémoire, à mettre en relief les principaux faits expérimentaux observés, les résultats qui en ont été tirés ainsi que les significations qui pourraient leur être attribuées.

Ce mémoire comprendra une annexe dans laquelle des détails concernant les différentes expériences entreprises seront donnés.

PREMIERE PARTIE

Quelques généralités et méthodes d'étude

C H A P I T R E I

TRAITS GENERAUX DE LA GEOLOGIE DE MADAGASCAR

Le présent chapitre ne saurait être une étude détaillée de la géologie de Madagascar. Il s'agira d'un exposé dans lequel je chercherai à mettre en relief les trois entités qui caractérisent sa structure géologique, à savoir :

- le socle
- les terrains sédimentaires
- les formations volcaniques.

Une carte géologique schématique synthétisera les données exposées (fig. I-1).

I. - SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA GRANDE ILE

Localisée dans la partie occidentale de l'Océan Indien, l'île de Madagascar s'étend du Nord au Sud approximativement entre les parallèles 12 degrés Sud et 25,5 degrés Sud, soit sur près de 1.500 kilomètres.

Elle se termine au Nord par la quesqu'île du Bobaomy et au Sud par le Cap Sainte Marie. A l'Ouest sa côte sinueuse s'avance vers la mer par le Cap Saint André. A l'Est elle se termine par une côte plate et monotone, orientée Nord-Nord-Ouest - Sud-Sud-Est du Cap d'Ambre au Cap Masoala, devenant ensuite rectiligne vers le Sud et orientée Nord-Nord-Est - Sud-Sud-Ouest.

Madagascar est séparée de l'Afrique par le Canal de Mozambique, dont la largeur minimum est entre le Cap St André et le Mozambique, où elle est de 400 km environ.

Madagascar est une des plus grandes îles du globe. Sa superficie dépasse celle de la France.

II. - LE SOCLE MALGACHE

Le socle malgache est divisé en trois grands systèmes, avec à la base le système androyen, composé de gneiss et de leptynites, puis le système du Graphite et au sommet le système du Vohibory avec des bancs de quartzites et de cipolins.

Le terme système a été introduit pour la première fois par H. BESAIRIE pour définir des unités stratigraphiques de caractères voisins, représentant une période ou un cycle à l'échelle de l'île (9).

1.- Le système androyen

Ce système tire son nom de l'Androy, région du Sud de Madagascar où il a été défini pour la première fois. Il est caractérisé par la prédominance du faciès leptynite, et comporte trois grandes subdivisions basées chacune sur la localisation géographique de faciès pétrographiques bien caractérisés. Ce sont, à la base, le groupe de Fort-Dauphin, essentiellement formé de leptynites, puis successivement, le groupe de Tranomaro, avec un faciès calcocalmagnésien dominant et le groupe d'Ampanrandava, formé de gneiss et de leptynites.

Le système androyen est recouvert par celui du Graphite et a subi avec lui la grande orogénèse de 2420 millions d'années. Il renferme plusieurs formations granitiques, parmi lesquelles on distingue notamment les granites dits kalambatréens, datés de 550 millions d'années au Kalambatitra et les granites ésiriens (du nom d'Esira), roches claires intimement associées à des charnockites, datées de 900 millions d'années.

En dehors de l'orogénèse de 2420 millions d'années, le système a été ultérieurement affecté par le cycle généralisé de 485 millions d'années, qui a mis en place d'importants gisements de thorianite, de phlogopite et aussi de monazite. Ces minéralisations présentent d'étroites analogies avec celles de Travancore en Inde.

2.- Le système du Graphite

Le système du Graphite a pour caractéristique essentielle la présence de nombreuses couches de graphite. On peut y définir plusieurs coupures zonéographiques.

2-1.- Le groupe d'Ampanihy

Le groupe d'Ampanihy présente comme le groupe d'Ampandrandava sous-jacent, un faciès leptynite. Il s'en distingue cependant par l'apparition du graphite. Ce groupe comporte également des roches apparentées aux gondites et kodurites du Dharwar de l'Inde (10).

2-2.- Le groupe du Manampotsy

Les bancs de graphite deviennent fréquents dans le groupe du Manampotsy, avec surtout le faciès khondalite à grenat et sillimanite.

2-3.- Les groupes d'Ambatolampy et d'Andriba

Les groupes d'Ambatolampy et d'Andriba sont caractérisés l'un par un ensemble de gneiss et de micaschistes, avec des bancs de quartzites, l'autre, moins graphiteux, par des gneiss à biotite, à pyroxènes et à muscovite.

Le système du Graphite constitue la plus grande partie du socle malgache. Une datation faite sur monazite recueillie dans le groupe d'Ambatolampy permet de lui attribuer un âge de 2420 millions d'années. On y retrouve également la granitisation de 550 millions d'années, déjà signalée dans le système androyen.

3.- Le système du Vohibory

Le système du Vohibory repose sans discordance sur celui du Graphite.

L'abondance du faciès amphibolique constitue la caractéristique essentielle de ce système. On distingue successivement :

- le groupe du Vohibory, à faciès gneissico-micaschisteux,
- le groupe de Beforona, à faciès amphibolique,
- le complexe basique d'Andriamena, intrusif dans le groupe précédent,
- le groupe de Maevatanana, à faciès schistes verts,
- le groupe de Daraina, à faciès amphibolite,
- et enfin le groupe de Mananjary, à faciès gneissico-micaschisteux, à sillimanite.

L'ancienneté du Vohibory est fixée à 1890 millions d'années, par l'âge des galènes d'Ambatofinandrahana. Cet âge est également celui de la minéralisation plombifère dans le complexe basique d'Andriamena.

4.- Les séries des cipolins et des quartzites

Au-dessus des vieux schistes cristallins se trouvent les séries des cipolins et des quartzites, traversées plus ou moins complètement par diverses roches éruptives, comme le complexe basique d'Andriamena et le complexe d'Ambatofinandrahana (1125 millions d'années). On peut également citer plusieurs séries granitiques, les granites de la chaîne anosyenne, dans l'extrême Sud-Est et les granites andrigitréens, dans le centre.

5.- Principaux repères géochronologiques

Les minéralisations successives ont permis de fixer, d'après l'échelle de A. HOLMES, des repères géochronologiques bien distincts :

- 485 MA Eocambrien, mise en place généralisée des pegmatites à U, Th, Be, Nb, Ta et la minéralisation à thorianite-phlogopite
- 550 MA granitisation stratoïde, granites à orthite. Orogenèse
- 875 MA granitisation et charnockitisation
- 1125 MA complexe intrusif d'Ambatofinandrahana, minéralisation Cu-Pb pegmatites à bastnaésite et tcheffkinitite

Série des quartzites .

Série des Cipolins

- 1890 MA complexe intrusif basique d'Andriamena (Cr, Pb)
- 2140 MA minéralisation en or du système du Vohibory
- 2420 MA orogenèse majeure, migmatisation, granitisation, charnockitisation.

Le socle malgache fait, depuis quelques années, l'objet de nouvelles études (8). Le schéma qui vient d'être exposé risque, de ce fait, de subir quelques modifications.

III. - LES TERRAINS SEDIMENTAIRES

Les terrains sédimentaires connaissent un développement considérable sur toute la zone côtière occidentale. C'est également dans ce secteur que les renseignements géologiques sont les plus précis (10).

1.- Le Karroo malgache

La période glaciaire qui a suivi les mouvements hercyniens a déposé, du carbonifère au jurassique, un ensemble de sédiments auquel on a donné le nom de Karroo, parce que la première série a été étudiée au Karroo, en Afrique du Sud.

Le système Karroo malgache comprend trois groupes principaux :

- le groupe de la Sakoa, à la base (Eopermien et Mésopermien)
- le groupe de la Sakamena (Néopermien, Eotrias inférieur)
- et le groupe de l'Isalo (Trias, Rhétien, Lias, Bajocien, Bathonien).

1-1.- Le groupe de la Sakoa

C'est dans le Sud-Ouest que le groupe de la Sakoa connaît son plus grand développement. Il repose là directement sur les schistes cristallins.

On trouve successivement, de la base au sommet :

- des schistes noirs et des tillites
- des couches à charbon
- une série rouge inférieure
- et des calcaires dits de Vohitoliha.

Les schistes noirs et les tillites correspondent au Dwyka sud-africain. Les schistes très fissiles présentent parfois un aspect varvé.

Les couches à charbon ont un faciès très homogène et présentent les caractères habituels des houilles gondwaniennes, c'est à dire, forte teneur en cendre, association de charbon brillant et de charbon terne dominant.

La série rouge inférieure qui recouvre les couches à charbon est constituée par un complexe argilo-gréseux avec des argilites de couleur rouge dominante.

Les calcaires de Vohitoliha ont des faciès variés. Ils correspondent à la première incursion marine quand s'est ouvert le Canal de Mozambique.

1-2.- Le groupe de la Sakamena

Les dépôts de la Sakamena ont débuté au Permien supérieur et se sont poursuivis jusqu'à l'Eotrias inférieur compris.

Transgressif et discordant sur le précédent, le groupe de la Sakamena comprend un faciès continental et quelques intercalations marines. Il est

constitué par plusieurs niveaux pouvant être groupés en Sakamena inférieure, moyenne et supérieure.

La Sakamena inférieure comprend des schistes et des calcaires. Ces derniers renferment des faunes dont quelques espèces se retrouvent dans les couches de Ruhembe en Tanzanie. Certains fossiles se rencontrent également en Afrique australe. Son âge est Permien supérieur. (10).

La Sakamena moyenne, datée de l'Eotrias inférieur grâce à des fossiles, forme un ensemble riche en argilite.

La Sakamena supérieure comprend surtout des grès fins.

1-3.- Le groupe de l'Isalo

Ce groupe comprend trois séries :

- Isalo I, qui va de l'Eotrias supérieur au Néotrias
- Isalo II, qui correspond au Rhétien et au Lias
- Isalo IIIa et IIIb, qui s'étend du Bajocien au Bathonien inférieur et moyen.

L'Isalo I comprend essentiellement des grès clairs, grossiers et mal cimentés, dont l'épaisseur est considérable par endroits. Un sondage à Vohidolo, par exemple, est allé jusqu'à 3000 mètres, sans en atteindre la base.

L'Isalo II est également composé de grès, mais associés à des couches d'argilites rouges. Ils sont en outre plus fins et moins épais.

L'Isalo III comprend une partie inférieure à faciès continental (Isalo IIIa) et une partie supérieure, à faciès marin, avec des calcaires bathoniens (Isalo IIIb).

Le Karroo malgache ne comporte aucune manifestation volcanique.

2.- Le Crétacé

Le Crétacé inférieur malgache va du Berriasien au Barrémien. Il comprend à la base un faciès marin. Le sommet est formé de grès continentaux.

Le Crétacé moyen réunit l'ensemble Aptien-Coniacien. Il montre de belles séries marines avec d'importantes formations continentales intercalées entre certains niveaux. Sa caractéristique essentielle à Madagascar est la première apparition du volcanisme.

Le Crétacé supérieur est caractérisé par la présence de nombreuses formations continentales dans le Santonien, comprenant à la base, des grès à reptiles, notamment dans le bassin de Majunga, sur la côte Ouest. Plus au Sud, il est entièrement marin.

Sur la côte orientale, une première transgression marine a déposé sur le vieux socle des sédiments marins peu épais, n'excédant pas quelques mètres.

3.- Le Tertiaire

L'étude de l'Eocène à Madagascar est encore incomplète.

Dans le Nord, les formations gréseuses continentales du Maestrichtien se poursuivent dans l'Eocène qui ne comprend que le Lutétien. Au Lutétien inférieur, le début de la transgression marine a déposé de grosses épaisseurs de calcaires.

Dans l'Ouest, le Lutétien inférieur et moyen est surtout calcaire. Le faciès devient marno-calcaire au sommet du Lutétien.

Sur le littoral Sud-Ouest, un sondage a rencontré au-dessus de l'Eocène quatre cents mètres de marnes oligocènes, surmontées par des calcaires détritiques aquitano-burdigaliens.

Le Miocène est constitué de marno-calcaires ou de calcaires gréseux. Il s'agit de calcaires généralement blancs. L'importante régression marine qui a suivi le Miocène a déposé des formations essentiellement continentales, constituées de grès et de sables gris ou rouges, notamment près du Cap Saint André, sur la côte Ouest:

Dans la région de Majunga et principalement dans la zone côtière, les grès contiennent de grands bois silicifiés et sont recouverts par des témoins de hautes terrasses à galets, considérées comme limite supérieure du Pliocène.

4.- Les formations récentes

La stratigraphie des formations récentes peut être résumée comme suit :

- 1.- Néogène continental avec des grès, sables et argiles, le lacustre ancien d'Antsirabe et de l'Alaotra, la cuirasse bauxitique de Sambaina, la cuirasse ferrugineuse du Sud-Ouest.
- 2.- La haute terrasse pliocène supérieure de Majunga.
- 3.- Creusement et érosion.
- 4.- Transgression marine visible à Marovoay, dans l'Ouest.
- 5.- Regression, comblement et alluvions.
- 6.- Transgression marine.
- 7.- Alluvions anciennes, moyennes et basses terrasses, lacustre récent d'Antsirabe.
- 8.- Dépôts fluviatils et lacustres à Aepyornis et subfossiles : lémuriens, hippopotames, dunes à Aepyornis.
- 9.- Actuel, regression marine, alluvions et dunes, déforestation et lavakisation (phénomène d'arrachement dû à une érosion).

IV. - LE VOLCANISME A MADAGASCAR

On peut distinguer deux grandes phases volcaniques principales à Madagascar, l'une crétacée, l'autre plio-quadernaire.

Les premières manifestations ont débuté au Crétacé moyen et ont atteint leur paroxysme au Turonien supérieur. Elles ont affecté plusieurs endroits de l'île et plus particulièrement les côtes occidentale et orientale. Le centre et le Nord ont surtout été le théâtre de volcanismes plus récents.

1.- Le volcanisme dans le Nord

Le volcanisme dans le Nord de Madagascar comprend trois phases d'émissions (90) :

- une phase d'âge Turonien-Coniacien, ayant donné uniquement des roches acides,
- une phase aquitanienne, dont la caractéristique essentielle semble être l'émission d'ankaratrites (type extrêmement mélanocrate de néphéline à olivine),
- une phase quadernaire, essentiellement constituée par des basaltes et des basanitoïdes.

Ces différentes émissions ont donné naissance à diverses formations, dont les plus importantes sont le massif de la montagne d'Ambre et la presque île du Bobaomby, qui forme l'extrême Nord de la Grande Ile.

2.- Le volcanisme dans le Centre

Les manifestations volcaniques dans le centre de Madagascar ont eu lieu dans deux zones principales, l'Ankaratra et l'Itasy.

2-1.- Le massif de l'Ankaratra

Le massif de l'Ankaratra forme un vaste ensemble d'une centaine de kilomètres environ de longueur. Il comprend des laves de natures différentes, dont les âges s'étendent du Pliocène au Quaternaire subactuel (57).

Les diverses éruptions formant l'Ankaratra peuvent être classées ainsi qu'il suit :

- éruptions trachytiques et rhyolitiques antérieures au dépôt des sédiments lacustres d'Antsirabe
- première éruption basaltique interstratifiée dans les parties moyenne et supérieure du Néogène
- éruptions andésitiques et basaltiques recouvrant les dépôts pliocènes; début Pléistocène
- éruptions basanitiques puis ankaratritiques, recouvrant les dépôts pléistocènes
- éruptions basanitiques, à formes parfaitement bien conservées.

2-2.- Le massif de l'Itasy

Le massif volcanique de l'Itasy est constitué par de nombreux dômes et puys isolés les uns des autres. On y distingue de multiples cratères-lacs ou lacs de barrage, dont le plus connu est le lac Itasy, d'où le massif a tiré son nom.

Dans l'Itasy, comme dans l'Ankaratra, les éruptions ont eu lieu en plusieurs périodes. Les laves émises peuvent être classées en trois types : trachytes, basanitoïdes-limburgites et ordanchites.

On ne possède aucun élément pour définir avec précision l'âge absolu des éruptions; mais la grande fraîcheur des appareils volcaniques indique un âge récent (22).

3.- Le volcanisme dans le Sud

Le volcanisme dans le Sud de la Grande Ile est représenté par le grand massif de l'Androy. Celui-ci se présente en vaste ovale, dont l'axe Nord-Sud atteint 90 km environ et l'axe Est-Ouest 40 km.

Les manifestations volcaniques ont donné essentiellement des épanchements basaltiques et rhyolitiques. Le massif est encore mal connu. Sa structure, en particulier, est l'objet d'une certaine divergence. H. BESAIRIE (9) pense que le massif est formé d'une couche rhyolitique recouvrant les basaltes. R. BATTISTINI (7) lui donne une structure beaucoup moins simple, dont la caractéristique serait la superposition d'un grand nombre de coulées.

L'âge du massif de l'Androy n'est pas connu, l'état avancé de l'érosion ainsi que l'absence d'appareils volcaniques conservés, indiquent un âge ancien. Par analogie pétrographique avec les coulées bien datées de l'Ouest, il est rattaché au Crétacé supérieur (90).

4.- Le volcanisme de la côte occidentale

Sur la côte occidentale, les volcans ont donné naissance à des rhyolites, des trachytes et surtout, à des basaltes plus ou moins doléritiques.

Du Nord au Sud, on peut distinguer :

- les coulées du Manasamody et de l'Antanimena
- les coulées du Manambao
- les coulées du Mailaka
- et les coulées du Mangoky-Onilahy.

Les coulées du Manasamody et de l'Antanimena ne se différencient entre elles que par leur couleur, leur structure et leur degré d'altération. Elles sont datées du Turonien moyen (11).

Le volcanisme du Manambao, près du Cap Saint André, est mal connu. Des études récentes ont montré à Maningoza que les éruptions principales pourraient remonter au Tertiaire, voire au Quaternaire.

Les coulées du Mailaka sont essentiellement formées de basaltes et de labradorites. Elles sont bien datées à Antsalova, où elles s'intercalent entre le Turonien et le Coniacien inférieur (10). Le basalte est recouvert, par endroits, de petits épanchements rhyolitiques.

Sur la côte Sud-Ouest, les épanchements ont eu lieu en trois périodes différentes et on peut distinguer les basaltes inférieurs, moyens et supérieurs. Les premiers sont considérés comme la réplique lointaine du Mailaka. Ils se situent au milieu du Turonien. Les basaltes moyens, les plus importants, sont formés d'une superposition de coulées dont l'épaisseur totale atteint 150 mètres. Ils se placent entre le Santonien et la base du Campanien. Les basaltes supérieurs, qui se rencontrent essentiellement au Nord de Tuléar, sont d'âge Pliocène récent (12).

5.- Le volcanisme de la côte orientale

Sur le littoral oriental de la Grande Ile se sont également épanchées de très importantes coulées, accompagnées de filons doléritiques.

Au Nord-Est, de la Sambava au Cap Masoala, les émissions volcaniques sont essentiellement basaltiques. Par endroits, notamment entre Sambava et Vohémar, ce sont les coulées acides qui prédominent. Ce sont des rhyolites d'un gris rosâtre ou violacé. L'antériorité relative des rhyolites et des basaltes n'est pas encore connue. Au point de vue âge, la découverte d'une faunule à Actéon, permettrait de supposer qu'au Turonien, les émissions rhyolitiques duraient encore et que de puissants massifs acides étaient en voie de submersion, sous

l'influence d'une transgression probablement campanienne, alors que les basaltés n'étaient pas encore apparus (90).

Au Sud du Cap Masoala, les manifestations volcaniques sont représentées par d'innombrables filons diabasiques. Ces roches d'aspect très frais, sont rattachées au grand cycle volcanique crétacé moyen qui affecte tout Madagascar (13).

Les grandes coulées volcaniques réapparaissent à hauteur de Mahanoro et longent la côte sur une longueur de 450 km environ, jusqu'au Sud de Manambondro.

Dans cette zone les émissions ont débuté par des venues acides, constituées essentiellement de rhyolites et de dacites, et se sont poursuivies par des roches basiques, recouvrant plus ou moins les précédentes laves.

Les laves basiques, plus développées que les premières comprennent des sakalavites (basaltes renfermant de la silice), des basaltes et des labradorites.

L'âge des coulées n'est pas connu avec précision, on pense qu'elles sont contemporaines des coulées de l'Ouest.

6.- Datations radiochronologiques

Sur la côte Ouest, les éruptions sont datées par des interférences avec des couches sédimentaires connues. Tel n'est pas le cas à l'Est, où l'on ne possède que peu d'éléments pour dater les émissions avec précision.

Or l'interprétation des résultats paléomagnétiques nécessite une connaissance précise de l'âge des formations géologiques étudiées. Aussi, était-il indispensable, pour ce travail, de faire appel à des mesures radiométriques.

De telles études ont été possibles, grâce à l'aide financière apportée par l'ORSTOM.

Des datations radiochronologiques, par la méthode K/A, ont été exécutées par le laboratoire du B.R.G.M. (17) et ont donné les résultats suivants :

6-1.- Le massif volcanique de l'Androy

Ech.	Nature	Situation	^{40}A total ($\text{cm}^3 10^{-5} \text{TPN g}^{-1}$)	K%
E 39	Basalte	X=213,8; Y=353,1	0,28	0,55
E 46	Basalte	X=186,6; Y=359,2	0,42	0,97
E 12	Basalte	X=227,7; Y=360,3	0,49	1,24
E 16	Basalte	X=214,6; Y=353,1	0,55	1,48

En reportant les données analytiques sur un diagramme "Argon 40 total", en fonction de K %, les points s'alignent suivant une droite isochrone, dont la pente correspond à un âge de 70 MA + ou -7.

6-2.- Les filons doléritiques de la côte centre Nord-Est

Ech.	Nature	Situation	^{40}A radiogénique ($\text{cm}^3 10^{-5} \text{TPN g}^{-1}$)	K%
A 55	Dolérite	X=892,9; Y=709,1	0,0489 (57% atm)	0,18
A 36	Dolérite	X=966,7; Y=716,1	0,0595 (55% atm)	0,18

Le nombre restreint des échantillons analysés ne permet pas d'utiliser la méthode des isochrones.

Les données analytiques indiquées ci-dessus ont été obtenues après correction d'argon atmosphérique par le laboratoire de géochronologie de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand. Elles permettent d'assigner aux deux échantillons les âges suivants :

A 55 : 68 MA + ou - 7

A 36 : 80 MA + ou - 8 Moyenne 74 MA

La moyenne des âges est identique à la valeur trouvée par les isochrones pour les échantillons de l'Androy et, comme on le verra, de la côte Sud-Est.

6-3.- Les coulées de la côte Sud-Est

Ech.	Nature	Situation	40_A total ($\text{cm}^3 10^{-5} \text{TPN g}^{-1}$)	K%
C 26	Dolérite	X=436,8; Y=557,2	0,14	0,12
C 46	Dolérite	X=324,4; Y=526,9	0,37	0,91
C 147	Dacite	X=381,5; Y=540,6	0,73	2,10

La méthode des isochrones indique un âge de 73 MA + ou - 7.

6-4.- Les coulées de la côte Sud-Ouest

Ech.	Nature	40_A total ($\text{cm}^3 10^{-5} \text{TPN g}^{-1}$)	K%
D 137	Basalte	0,276	0,77
D 135	Basalte	0,277	0,79

Les mesures ont été effectuées sans correction d'argon atmosphérique.

Elles donnent les âges suivants :

D 137 : 88 MA + ou - 10

D 135 : 86 MA + ou - 10

Dans ces résultats A total signifie que le volume mesuré comprend l'argon radiogénique et l'argon de pollution. Lorsqu'une correction d'argon atmosphérique a été effectuée, le volume d'argon radiogénique mesuré est donné. C'est le cas pour les mesures faites sur les filons doléritiques de la côte centre Nord-Est. Dans l'un et l'autre cas le volume d'argon est donné en 10^{-5}cm^3 à température et pression normales et par gramme d'échantillon.

V. - ESSAI DE CORRELATION AVEC LES AUTRES PAYS DE L'OCEAN INDIEN

Les données géologiques qui viennent d'être présentées et qui sont rassemblées sur la figure I-1, sont incomplètes; elles peuvent néanmoins fournir une vue d'ensemble qui va permettre quelques comparaisons avec les autres pays encadrant l'Océan Indien.

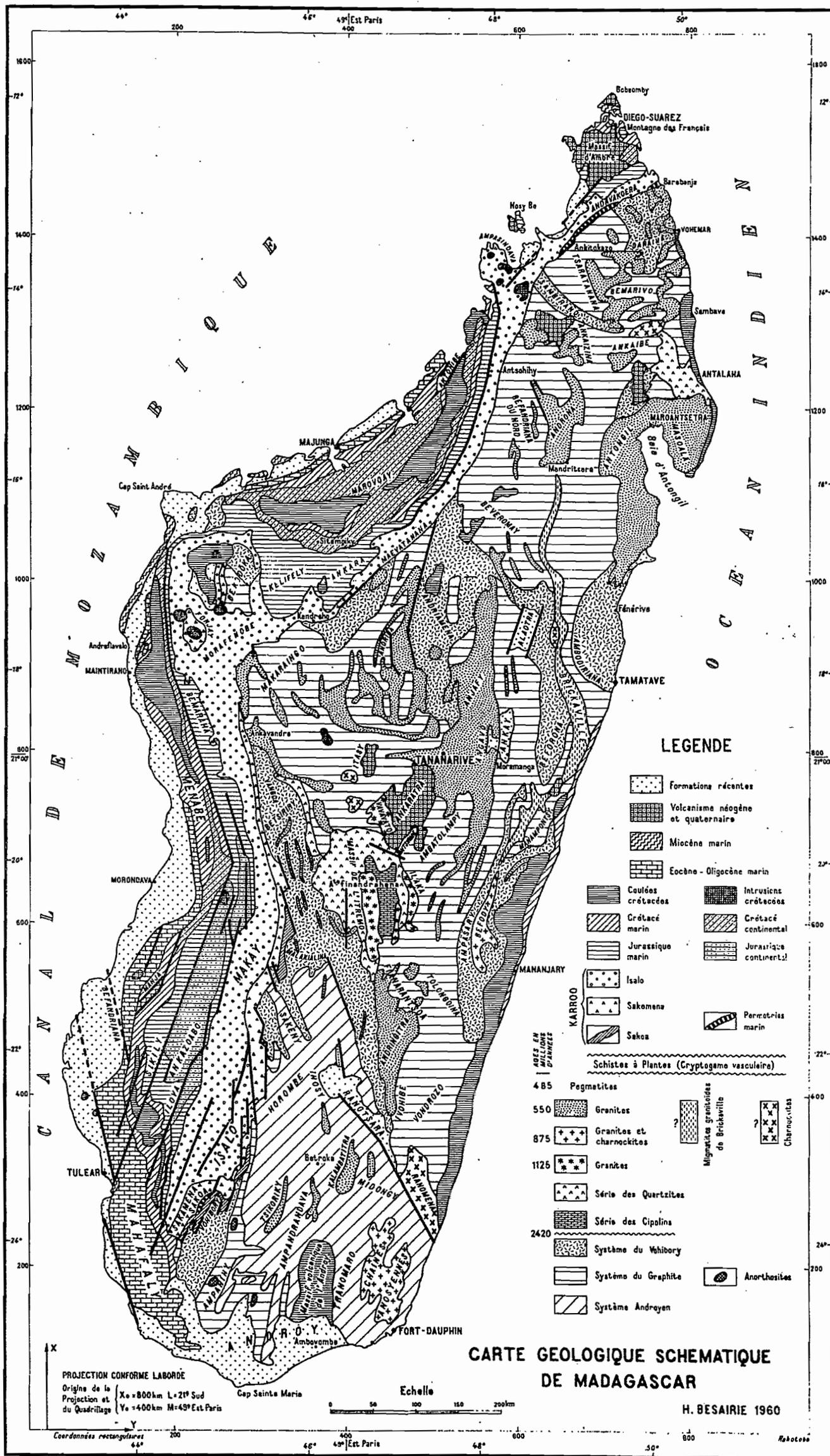


FIG. I - 1

1.- Le Socle

Le Précambrien de Madagascar est semblable à celui de l'Inde et de Ceylan. En Inde, la série la plus ancienne du socle, celle du Dharwar, a une zone inférieure datée d'environ 2300 MA. En Rhodésie, on trouve un cycle d'orogénie d'âge comparable.

Le système du Graphite malgache équivaut au Mozambiquien du Mozambique. Des phases de minéralisation entre 435 et 540 MA sont également connues, par analyse de certaines pegmatites. Ceci correspond très bien à la phase de minéralisation dans la série des Quartzites de la Grande Ile.

A Travancore, il existe la trace d'un mouvement orogénique cambrien daté de 485 MA, comme à Madagascar (41, 44, 47, 48).

2.- Le Karroo

La tillite, à la base de la Sakoa, se rencontre dans le Dwyka en Afrique du Sud et dans la région centrale de l'Antarctique. De même les couches de charbon de la Sakoa, se rencontrent dans les formations d'Eccla, en Afrique du Sud, Afrique orientale et au Congo. Elles ont, en outre, fourni une flore connue dans les Greta Seams, en Australie et dans les Pali Beds, en Inde (47, 65).

3.- Le volcanisme

Du point de vue volcanique, ce qui frappe surtout l'esprit en procédant à une comparaison, c'est l'absence de volcanisme Karroo à Madagascar, contrairement à ce qui se passe dans les autres pays de l'Océan Indien.

Le grand épisode volcanique africain du Stormberg, au Lias, n'est pas représenté dans la Grande Ile, de même que les émissions volcaniques des Nouvelles Galles du Sud et de Tasmanie, et la série de Rajmahal de l'Inde.

Le volcanisme Crétacé est représenté en Afrique du Sud par la série du Lupata qui est nettement différente au point de vue pétrologique des émissions du Crétacé supérieur de Madagascar. Leur âge est également différent. Les émissions malgaches possèdent par contre beaucoup d'analogies avec les volcanismes du Dekkan en Inde, où l'on observe des émissions à prédominance basaltique, comme à Madagascar. La chronologie n'est cependant pas identique. Les émissions les plus récentes à Madagascar se situeraient d'après les datations radiochronologiques, vers le Maestrichtien, tandis que les trapps du Dekkan seraient du Paléocène inférieur (16).

En Australie, le volcanisme d'âge cénomanien a émis essentiellement des laves acides, comme les trachytes de la série de Winton et du Queensland.

Au Tertiaire et au Quaternaire des analogies magmatiques et chronologiques semblent exister entre le volcanisme qui s'est manifesté dans l'extrême Nord de la Grande Ile et le volcanisme australien de Queensland. Au Victoria, par exemple, on observe une reprise de l'activité volcanique au Pléistocène récent.

En Inde l'activité volcanique semble manquer totalement au Quaternaire, en exceptant toutefois la Birmanie qui sort cependant du cadre qui nous occupe. Le tableau comparatif de la figure I-2 synthétise quelques données concernant les différentes activités volcaniques des pays du pourtour de l'Océan Indien.

VI. - CONCLUSION

La comparaison de la géologie de Madagascar, de l'Afrique et de l'Inde, fait apparaître des analogies qui n'ont pas manqué d'attirer l'attention des géologues. Les faunes et les flores fossiles recueillies dans ces pays sont également connues en Amérique du Sud et en Australie. Toutes ces observations ont conduit à l'idée d'un continent unique, dénommé Gondwana.

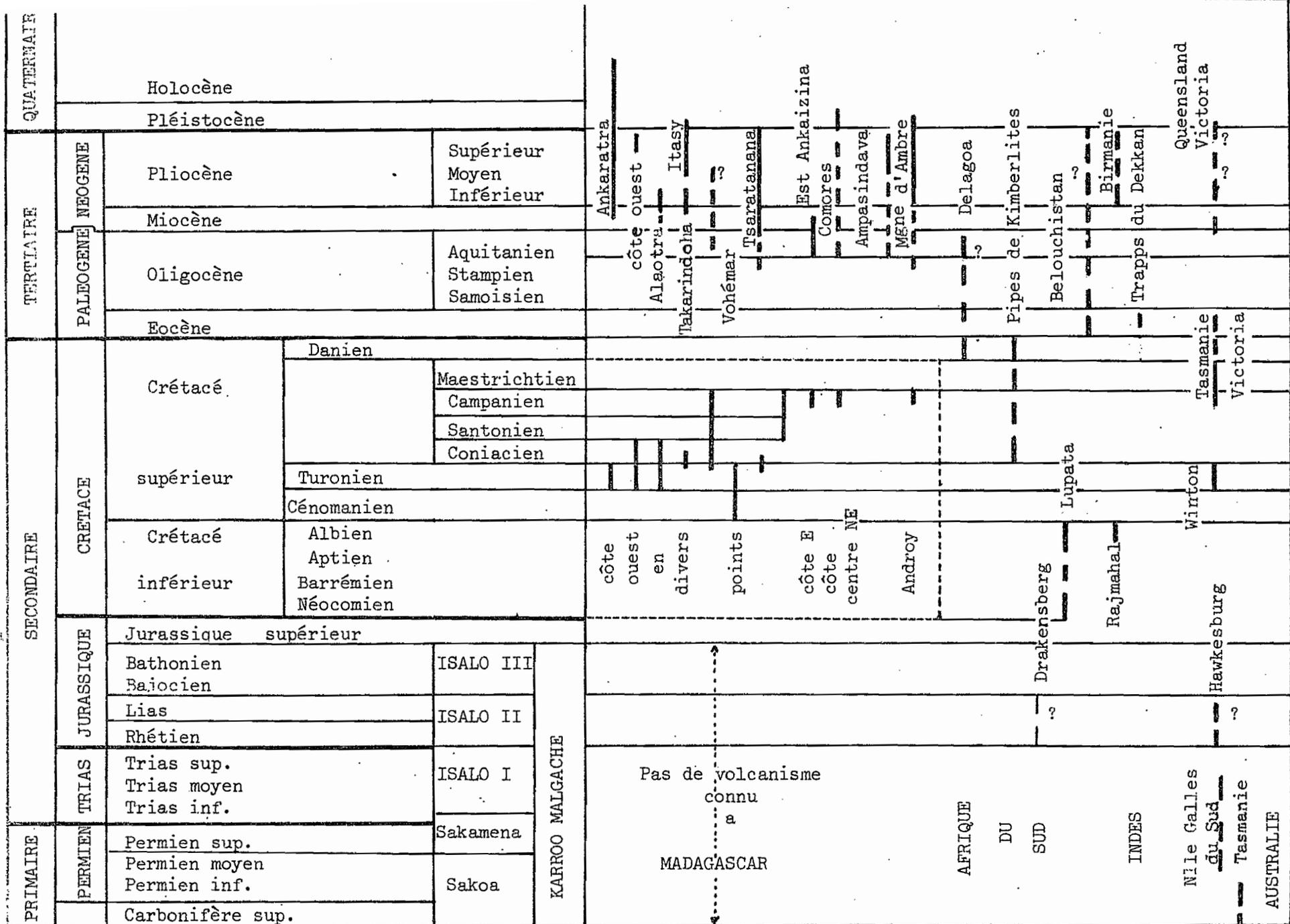


FIG. I-2.- LE VOLCANISME A MADAGASCAR, EN AFRIQUE DU SUD, AUX INDES ET EN AUSTRALIE
Tableau comparatif, d'après P. BRENON

C H A P I T R E II

PRELEVEMENT ET ETUDE EN LABORATOIRE

DES ECHANTILLONS

L'exposé des différents travaux effectués, tant sur les terrains qu'en laboratoire constitue l'objet essentiel du présent chapitre.

I. - LE PALEOMAGNETISME

Le champ magnétique terrestre en un point peut être défini complètement par son intensité, sa déclinaison et son inclinaison. L'analyse des résultats des observations faites tant dans les observatoires que sur les terrains, met en évidence que ce champ peut être assimilé, dans sa partie principale, à celui qu'engendrerait un dipôle géocentrique, mais comprend également des éléments non dipolaires.

La même analyse révèle l'existence d'une variation lente dite variation séculaire qui se manifeste sur toute la terre d'une manière non uniforme. Cette variation existe également pour les temps historiques, d'après l'étude de l'aimantation des terres cuites (archéomagnétisme).

A l'échelle des millions d'années, les irrégularités du champ magnétique terrestre, ainsi que ses variations séculaires, doivent disparaître, de sorte que le champ moyen devient celui d'un dipôle placé au centre de la Terre et dirigé suivant son axe de rotation. Les pôles géomagnétiques se trouvent donc confondus avec les pôles géographiques. Ainsi la connaissance de la direction du champ magnétique terrestre en un point permet de déter-

miner l'axe du dipôle correspondant, donc l'axe de la Terre, par rapport à ce point. La recherche des positions du pôle géomagnétique au cours des temps géologiques, constitue le Paléomagnétisme.

II. - CHOIX DES MATERIAUX

Le Paléomagnétisme est fondé sur l'aimantation acquise par les roches.

Certaines roches peuvent en effet, acquérir une aimantation rémanente sous l'action du champ magnétique terrestre. Les roches ignées s'aimantent en se refroidissant depuis leur point de Curie. Les roches sédimentaires acquièrent leur aimantation au cours des dépôts des sédiments, et peut-être aussi au cours de la transformation chimique survenant après consolidation des sédiments.

Cette aimantation est généralement dirigée parallèlement au champ magnétique ambiant de l'époque. Il en résulte que la connaissance de la direction d'aimantation d'une formation géologique bien datée permet de recueillir des informations sur le champ magnétique ancien.

Cela implique donc, en premier lieu, le choix d'une formation géologique connue; il s'agit ensuite d'en prélever des échantillons orientés.

Les formations envisagées dans le cadre de ce travail, sont exclusivement volcaniques. Elles proviennent de plusieurs points de l'île et appartiennent, pour la plupart, au Crétacé supérieur.

Quelques formations volcaniques appartenant au Tertiaire et surtout au Quaternaire ont été accessoirement étudiées. Elles proviennent de la côte Sud-Ouest, du Nord et surtout du Centre.

III. - PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS

La récolte des échantillons a été faite, d'après les indications fournies par le Service Géologique de Madagascar, en ce qui concerne le choix des sites.

Les différentes régions volcaniques ont été systématiquement explorées au cours des années successives :

- 1962 - 1969 : pour le gisement volcanique crétacé de la côte Nord-Ouest
- 1964 : pour les formations filoniennes d'âge crétacé supérieur de la côte centre Nord-Est
- 1964 - 1966 - 1968 : pour le massif quaternaire de l'Itasy dans le centre
- 1964 - 1969 : pour les grandes coulées crétacées de la côte Sud-Est
- 1965 : pour les formations quaternaires de Betafo et d'Antsirabe dans le centre
- 1965 - 1968 - 1969 : pour le groupe volcanique pliocène et crétacé, entre le Mangoky et l'Onilahy sur la côte Sud-Ouest
- 1966 : pour le massif volcanique crétacé de l'Androy dans le Sud
- 1967 : pour le plateau basaltique crétacé du Mailaka sur la côte Ouest

Au total, 650 échantillons orientés ont été étudiés, se répartissant comme suit :

430 pour le Crétacé

49 pour le Tertiaire

171 pour le Quaternaire

J'ai adopté le mode de prélèvement par site. Une coulée peut n'être échantillonnée qu'en un seul site; mais elle peut aussi être représentée par plusieurs sites. Dans chaque site, un ou plusieurs échantillons de roche orientés peuvent être prélevés.

Pour avoir une bonne représentativité toutes les formations étudiées sont représentées par plusieurs sites répartis aussi largement que possible, sur toute l'étendue de chacune d'elles. Dans chaque site, trois échantillons orientés, au minimum, ont été prélevés.

Pour éviter certaines dispersions, comme celles dues aux coups de foudre, les échantillons ont été espacés le plus possible, les uns des autres. La distance entre deux échantillons peut varier de un mètre à plusieurs dizaines de mètres, suivant l'étendue de l'affleurement.

La direction du champ magnétique actuel peut parfois changer de place en place, par exemple, par suite de l'effet des aimantations des roches consécutives à des coups de foudre. Pour mettre en évidence l'existence éventuelle d'une telle anomalie, j'ai étudié le changement de la direction de l'aiguille aimantée d'une boussole, d'un échantillon à l'autre. Les échantillons pour lesquels la boussole indiquait une direction trop différente de celle qui semblait être la normale pour l'affleurement, ont été abandonnés.

L'altération étant également une source de dispersion, j'ai choisi des roches aussi fraîches que possible.

En règle générale, les échantillons ont été prélevés de préférence dans des affleurements se trouvant à un niveau le plus bas possible, c'est à dire, dans des lits de rivières ou de ruisseaux; car ils sont moins affectés par les coups de foudre.

L'orientation des échantillons a été obtenue suivant la méthode préconisée par E. THELLIER (93, 95). Chaque bloc de roche à prélever est coiffé d'un chapeau de plâtre dont la surface supérieure a été rendue horizontale. Sur cette dernière, on trace l'ombre d'un fil à plomb ou une direction connue.

La direction est obtenue à 3° près et le nivellement à 2° près.

IV. - ETUDES EN LABORATOIRE

1.- Les différentes sortes d'aimantation d'une roche

La validité des résultats paléomagnétiques repose sur l'aimantation acquise par la roche à l'endroit et au moment de son refroidissement. Il est donc indispensable de la mettre en évidence. Dans les circonstances favorables, cette aimantation peut n'avoir subi aucune modification. La direction de l'aimantation naturelle de l'échantillon considéré, représente par conséquent, la direction de l'ancien champ, aux effets près du champ des autres coulées et du champ démagnétisant de la coulée étudiée.

De telles circonstances sont cependant rares. Souvent l'aimantation primaire est superposée à des aimantations secondaires, qui ont pu la modifier; Dans le premier cas, les aimantations rémanentes naturelles ne sont pas directement utilisables pour la recherche d'informations sur le champ magnétique ancien. Dans le second cas, aucun renseignement valable ne peut être obtenu.

Parmi les aimantations secondaires qu'un échantillon de roche est susceptible de porter, on peut citer :

- l'aimantation rémanente isotherme (ARI)
- l'aimantation rémanente chimique (ARC)
- l'aimantation rémanente anhystérétique (ARA)

- l'aimantation rémanente visqueuse (ARV)

Les lois d'acquisition de ces différents types d'aimantation, ainsi que leurs propriétés, ont été étudiées par T. NAGATA (79) et surtout par E. THELLIER (93). On pourra se reporter aux travaux de ces auteurs. Un résumé de leurs principales caractéristiques est exposé dans l'article de E. THELLIER (94) ou celui de E. THELLIER et O. THELLIER (p. 289-292, 98).

Je me bornerai donc ici à rappeler quelques définitions.

1-1.- L'aimantation rémanente isotherme

Lorsqu'un échantillon est soumis à un champ magnétique, à température constante, l'aimantation acquise, après suppression du champ agissant, est appelée aimantation rémanente isotherme. Un échantillon de roche acquiert une ARI à la suite de coups de foudre.

1-2.- L'aimantation rémanente chimique

Il s'agit de l'aimantation acquise par un échantillon de roche, lors de toute évolution chimique d'un minéral initialement non magnétique en présence d'un champ magnétique. L'ARC peut aussi provenir de l'apparition d'un minéral magnétique.

1-3.- L'aimantation rémanente anhystérétique

Soumis à l'action d'un champ magnétique continu, superposé à un champ alternatif que l'on fait décroître progressivement, un corps acquiert une aimantation dite anhystérétique.

1-4.- L'aimantation rémanente visqueuse

C'est l'aimantation qui résulte de l'action prolongée d'un champ magnétique sur la roche.

Le champ alternatif agit différemment sur ces diverses sortes d'aimantation (83, 97). L'aimantation thermorémanente est une des moins sensibles.

C'est pourquoi il est possible de l'isoler des autres formes d'aimantation.

2.- Etude pétrographique des échantillons

L'étude pétrographique de chaque site de prélèvement a été faite par l'examen systématique en lame mince de deux à trois échantillons. Cette étude répond à deux buts essentiels, d'une part déterminer la variation éventuelle de la composition minéralogique de la roche d'un site à l'autre, et d'autre part définir le degré d'altération de la roche. Il est en effet, comme il a été dit déjà, nécessaire d'utiliser des échantillons aussi frais que possible pour éviter des aimantations secondaires du type ARC.

L'examen des lames minces a été exécuté, en grande majorité, par le Service géologique de Tananarive. Les principaux résultats sont décrits en annexe.

3.- Mesure de l'aimantation rémanente d'un échantillon

La plupart des roches volcaniques ont des aimantations rémanentes naturelles variant entre 10^{-4} et 10^{-2} uém par centimètre cube. La mesure de rémanence nécessite donc un appareil suffisamment sensible.

J'ai utilisé un inductomètre pour mes mesures d'aimantation.

3-1.- Rappel du principe de l'inductomètre

L'inductomètre que j'ai utilisé a été créé par R. REMIOT dans le laboratoire du Professeur E. THELLIER qui en a décrit le principe de façon détaillée (93).

Soit un circuit C qui, parcouru par un courant i , créerait un champ $\vec{H} = \vec{G}i$, dans une certaine région de son centre, \vec{G} étant la constante électrodynamique du circuit. Si l'on ferme le circuit C sur un galvanomètre, une masse aimantée \vec{M} placée dans cette région, envoie à travers C un flux

magnétique :

$$\phi = G \cdot Mx$$

Mx étant la composante de \vec{M} sur l'axe Ox dirigé comme le champ H .

Par déplacement de la masse aimantée, le circuit devient le siège d'une variation de flux, qui fait passer dans le circuit du galvanomètre une quantité d'électricité provoquant une déviation de ce dernier.

Le mode de déplacement utilisé est le retournement.

3-2.- Description de l'inductomètre

L'inductomètre est composé :

- de trois systèmes de bobines d'Helmholtz
- d'un dispositif de retournement placé au centre des bobines
- d'un galvanomètre.

a) Les bobines

Les trois systèmes de bobines sont concentriques et déterminent en leur centre un volume de 15 cm environ de rayon. Les paires de bobines ayant le plus grand et le plus petit diamètres servent aux mesures de rémanence. La troisième paire est utilisée pour les mesures d'aimantation induite.

b) Le dispositif de retournement

Pour procéder au retournement de l'échantillon, celui-ci est placé dans le centre du système sur un plateau mobile autour d'un axe vertical passant par le centre du système.

Un dispositif à vis permet de "bloquer" l'échantillon contre le plateau. De ce fait, l'ensemble formé par le plateau et l'échantillon peut être retourné autour de l'axe vertical.

L'échantillon de forme généralement cubique peut être placé avec précision au centre des bobines grâce à des cales appropriées. Un cadran gradué,

de 5° en 5°, solidaire du bâti support des bobines, permet de repérer la position des axes de l'échantillon par rapport à l'axe des bobines.

c) Le galvanomètre

Les bobines sont reliées à un galvanomètre Kipp-Zonen type A54. Ce dernier est muni d'un shunt magnétique réglable. La position optimum est celle qui permet d'obtenir un maximum de sensibilité en même temps qu'un amortissement voisin de l'amortissement critique.

On peut également modifier la sensibilité de l'inductomètre à l'aide d'un shunt électrique branché aux bornes du galvanomètre.

3-3.- Qualités de l'inductomètre

a) Uniformité de la constante \vec{G}

E. THELLIER avait montré qu'un inductomètre doit être tel que la composante G_x (suivant l'axe des bobines) de \vec{G} soit constante dans tout le volume de l'échantillon, et de plus, que la composante transversale G_z soit faible.

Pour étudier l'uniformité de \vec{G} , j'ai repris l'expérience décrite par cet auteur.

Une petite bobine, placée d'abord avec son axe suivant l'axe Ox de l'inductomètre et ensuite suivant la verticale Oz , était déplacée de 2 cm en 2 cm, puis de cm en cm le long de Ox , de Oz et de Oy . Chaque fois la déviation provoquée au galvanomètre par l'inversion d'un courant constant traversant la bobine a été notée. Cette série d'expériences était destinée à étudier, dans le volume utile de l'appareil, la constante \vec{G} en un point quelconque des plans xOz et yOz respectivement perpendiculaire et parallèle au plan des bobines de l'inductomètre.

Les expériences ont donné les valeurs indiquées sur la figure II-1. La valeur en 0 correspond au centre du système. Les valeurs "zéro" (non portées sur la figure) indiquent que l'inversion du courant était, ou sans effet sur le spot du galvanomètre, ou tout au plus provoquait une déviation du spot inférieure au quart du mm.

De l'examen de ces résultats il ressort les faits suivants :

- la composante G_x est pratiquement constante le long des trois axes O_x , O_y et O_z ,
- la composante transversale G_z est nulle le long des mêmes axes,
- dans un volume de rayon égal à 5 cm (trait fort sur la figure), la composante G_x est constante à moins de 1% près; de plus la composante G_x est faible.

Par conséquent, la condition d'uniformité de \vec{G} peut être considérée comme remplie.

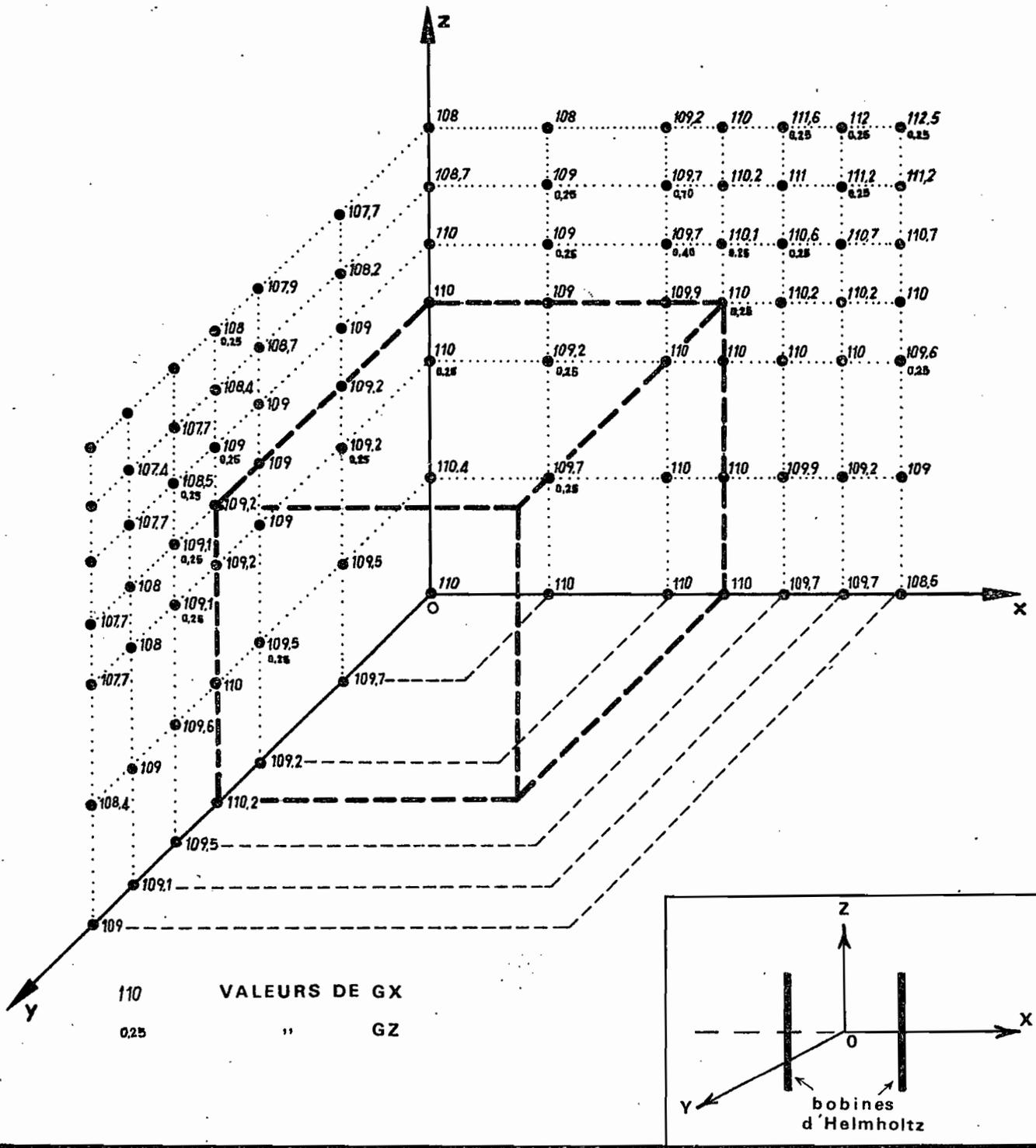
Les échantillons que j'ai utilisés sont généralement des cubes dont le côté est au maximum de 10 cm. Il en résulte que le volume utilisé de l'inductomètre possède bien les qualités requises.

b) Sensibilité

Une bobine de surface connue S est placée au centre du système avec son axe dirigé suivant celui des bobines de l'inductomètre. Un courant i étant établi, on l'inverse. La déviation obtenue correspond au renversement du moment S_i .

La bobine que j'ai utilisée a une surface de $992,9 \text{ cm}^2$. Un courant de 15 mA provoque sur une échelle graduée placée à deux mètres une déviation de 109 mm, soit 137.10^{-4} uém par mm.

FIG. II-1 UNIFORMITE DE LA CONSTANCE G DANS LE VOLUME UTILE DE L'INDUCTOMETRE.



La proportionnalité des déviations aux moments est bonne sur toute l'étendue de l'échelle de lecture. Voici quelques valeurs :

i mA.	5	10	15	20	25	30
d mm	36,4	72,5	199,3	147,7	181,9	218,6

Des étalonnages fréquents ont montré que la fidélité de l'inductomètre peut être considérée comme bonne.

Les valeurs obtenues au cours des divers étalonnages effectués sont données dans l'annexe.

3-4.- Exécution d'une mesure de rémanence

Dans toutes les mesures, l'axe de l'inductomètre a été orienté perpendiculairement au Nord magnétique dans le laboratoire.

a) Méthode de mesure

La méthode de mesure que j'ai utilisée est celle qui a été développée par E. THELLIER (93).

Supposons que l'on cherche à déterminer (en intensité et en direction) l'aimantation d'un échantillon de forme cubique. Il faut pour cela mesurer ses trois composantes \vec{M}_x , \vec{M}_y , \vec{M}_z suivant trois axes liés à l'échantillon.

Par rotation de 180° autour de l'axe Oz de l'échantillon par exemple, la composante d'aimantation M_x , initialement dirigée suivant l'axe de l'inductomètre, est renversée et on la mesure par la variation de flux provoquant la déviation du spot du galvanomètre.

En fait les composantes \vec{M}_x , \vec{M}_y et \vec{M}_z ne sont pas mesurées directement, mais plutôt les trois résultantes \vec{R}_{xy} , \vec{R}_{xz} et \vec{R}_{yz} . Pour cela, l'échantillon est placé dans le centre du système suivant les trois positions suivantes :

1) Oz suivant l'axe de rotation et l'on mesure \vec{R}_{xy}

$$\vec{R}_{xy} = \vec{M}_x + \vec{M}_y$$

par la déviation (a) du spot du galvanomètre.

2) Oy suivant l'axe de rotation et l'on mesure \vec{R}_{xz}

$$\vec{R}_{xz} = \vec{M}_x + \vec{M}_z$$

par la déviation (b) du spot du galvanomètre.

3) Ox suivant l'axe de rotation et l'on mesure \vec{R}_{yz}

$$\vec{R}_{yz} = \vec{M}_y + \vec{M}_z$$

par la déviation (c) du galvanomètre.

Ces trois équations fournissent tous les éléments nécessaires à la détermination de \vec{M} .

b) Orientation de l'échantillon

La méthode de mesure adoptée suppose une orientation particulière de l'échantillon, à savoir : la résultante à mesurer doit se trouver suivant l'axe du champ, c'est à dire suivant l'axe de l'inductomètre. J'admets en effet que les bobines sont construites de telle façon que leur axe géométrique coïncide exactement avec leur axe magnétique.

On y arrive par tâtonnements. L'échantillon est placé dans le centre de l'appareil avec son axe Ox, par exemple, dirigé suivant celui des bobines (figure II-2a). On le fait ensuite tourner lentement dans le sens des aiguilles d'une montre en suivant le déplacement du spot du galvanomètre. Celui-ci change de sens lorsque la résultante \vec{R}_{xy} passe par l'axe de l'inductomètre (figure II-2b). Après avoir repéré cette position sur le cadran

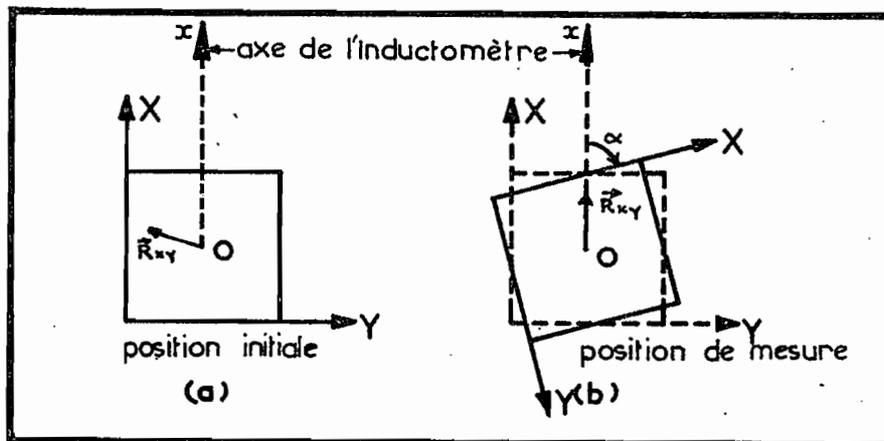


FIG. II - 2

gradué on fait subir à l'échantillon de petites rotations autour de cette position. La position de mesure est celle pour laquelle une petite rotation de l'échantillon demeure sans effet sur le spot du galvanomètre.

Le système mobile étant bloqué à la position ainsi déterminée, on retourne l'échantillon de 180°.

c) Effet de la vitesse de retournement

J'ai toujours opéré par double retournement : une fois à gauche, une fois à droite. La vitesse de retournement à l'aller peut être différente de celle du retour. Dans ce cas, on observe une dissymétrie dans les déviations gauche et droite. Cependant, lorsque l'opérateur est bien entraîné, les déviations obtenues sont presque toujours symétriques.

3-5.- Reproductibilité des mesures

Les erreurs de mesure peuvent avoir plusieurs sources :

- centrage de l'échantillon
- orientation de l'échantillon
- vitesse de retournement
- lecture des déviations du spot du galvanomètre.

Le nombre et la complexité des facteurs qui peuvent intervenir et qui sont plus ou moins contrôlables, rendent pratiquement impossible l'évaluation théorique exacte de la précision avec laquelle les mesures sont obtenues.

L'étude de la précision peut cependant être ramenée à celle de la reproductibilité des mesures.

3-5-1.- Etude de la dispersion des moments

Si N représente le nombre de mesures effectuées, les N valeurs du moment magnétique ne seront pas toutes égales, mais vont varier autour d'une valeur moyenne.

Si la durée des mesures n'est pas trop longue et si l'échantillon a un indice de viscosité faible, l'effet d'un traînage dans le champ magnétique terrestre peut être négligé. (En fait, pour que l'effet de traînage soit nul, il faut opérer en champ terrestre compensé). Les dispersions observées dans les résultats peuvent alors être attribuées aux erreurs de mesure seules. Elles seront définies par l'écart entre les observations individuelles et la valeur moyenne qui pourra être considérée comme un ordre de grandeur de l'erreur commise.

Ainsi dans le cas de N observations, l'ordre de grandeur de l'erreur peut être défini par la déviation moyenne :

$$dm = (M - \bar{M}) / N$$

ou mieux par l'écart-type :

$$e = \left[\frac{(M - \bar{M})^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

où M désigne le moment considéré et \bar{M} la moyenne des N moments magnétiques.

3-5-2.- Etude de la dispersion des directions

Comme dans le cas des moments magnétiques, les N directions d'aimantation vont varier autour d'une direction moyenne. Celle-ci peut être déterminée en appliquant la méthode statistique de R.A. FISHER (45) qui va être brièvement rappelée dans le paragraphe a) ci-dessous. La dispersion des directions peut être définie par le paramètre de R.A. FISHER. Si les N directions sont bien groupées autour de leur moyenne, la valeur du coefficient k sera élevée.

a) Bref exposé de la méthode statistique de R.A. FISHER

Les cosinus directeurs du vecteur aimantation d'un échantillon sont définis par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}l &= \cos I \cos D \\m &= \cos I \sin D \\n &= \sin I\end{aligned}\tag{2-2}$$

Dans ces expressions D et I représentent la déclinaison et l'inclinaison dans un système d'axes trirectangulaires Ox, Oy, Oz, dirigés respectivement vers le Nord, l'Est et vers le bas.

R.A. FISHER a montré que la meilleure estimation l', m', n' des cosinus directeurs de la direction moyenne exacte est :

$$\begin{aligned}l' &= \Sigma l_i / R \\m' &= \Sigma m_i / R \\n' &= \Sigma n_i / R\end{aligned}\tag{2-3}$$

avec $X = \Sigma l_i$, $Y = \Sigma m_i$; $Z = \Sigma n_i$

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

La déclinaison et l'inclinaison du vecteur résultant moyen sont telles que :

$$\begin{aligned}\text{tg } D &= Y/X \\ \sin I &= Z/R\end{aligned}\tag{2-4}$$

En appelant N le nombre d'échantillons considérés, la quantité k, définie par la relation

$$k = (N-1) / (N-R)\tag{2-5}$$

caractérise la dispersion des points. Pour k grand, les points sont bien groupés autour de leur moyenne.

Enfin, la relation (2-6) ci-dessous définit le demi angle d'ouverture d'un cône circulaire axé sur le vecteur résultant, à l'intérieur duquel la direction moyenne exacte a une probabilité égale à 95 % de se trouver :

$$\cos \alpha = 1 - \frac{N-R}{R} \left[\left(\frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right] \quad (P = 0,05)\tag{2-6}$$

b) Estimation de la dispersion angulaire

L'amplitude de la dispersion angulaire peut donc être précisée par le paramètre k de R.A.F. FISHER, défini par la relation (2-5), ou par une approximation de la déviation angulaire standard.

La meilleure estimation de la dispersion angulaire est donnée par la relation :

$$\theta_{\text{rad}} = (2/k)^{1/2} \quad \text{ou} \quad \theta^{\circ} = 81/(k)^{1/2} \quad (2-7)$$

Une autre méthode de calcul a été proposée par R.L. WILSON (104). Dans cette méthode, la direction moyenne est déterminée de la même façon que dans celle de R.A. FISHER, mais la déviation δ_i de la i ème direction avec la direction moyenne est définie par :

$$\delta = \text{arc cos } (R/N) \quad (2-8)$$

Les résultats obtenus par les relations (2-7) et (2-8) ne présentent pas de différence notable entre eux, pour N grand. Par contre, lorsque les données sont peu nombreuses, la relation (2-8) assigne plus de précision aux résultats.

3-5-3.- Exemples numériques

Dans les exemples qui suivent les mesures ont été répétées 7 fois. Après chaque mesure l'échantillon a été retiré de l'appareil et chaque fois la valeur et la direction de son aimantation ont été déterminées.

Résultats

1) Echantillon B-89-6

a) Moment

- moment moyen : $\bar{M} = 0,078$ uém
- déviation moyenne $dm = 0,002$ soit 2,6 %
- écart-type $e = 0,002$ soit 2,6 %

b) Direction d'aimantation

- $\beta = -9;6$ (β définit l'orientation du moment dans le plan horizontal)
- $k = 839,16$
- $\theta = 2;8$
- $\delta = 2;6$

2) Echantillon 827-4

a) Moment

- moment moyen : $\bar{M} = 0,384$ uém
- déviation moyenne $dm = 0,002$ soit 0,5 %
- écart-type $e = 0,004$ soit 1,0 %

b) Direction d'aimantation

- $\beta = 77;1$
- $k = 2068,96$
- $\theta = 1;8$
- $\delta = 1;6$

3) Echantillon D 45-2

a) Moment

- moment moyen : $\bar{M} = 0,541$ uém
- déviation moyenne $dm = 0,004$ soit 0,7 %
- écart-type $e = 0,005$ soit 0,9 %

b) Direction d'aimantation

- $\beta = -10;2$
- $k = 3680,98$
- $\theta = 1;3$
- $\delta = 1;2$

4) Echantillon 827-I

a) Moment

- moment moyen : $\bar{M} = 3,220$ uém
- déviation moyenne $dm = 0,009$ soit 0,3 %
- écart-type $e = 0,014$ soit 0,4 %

b) Direction d'aimantation

- $\beta = 73,3$
- $k = 8450,70$
- $\theta = 0,9$
- $\delta = 0,8$

Ces exemples montrent que les valeurs de θ et de δ sont effectivement peu différentes les unes des autres. La relation (2-8) semble toutefois donner un écart plus faible.

L'amplitude des dispersions dépend, comme l'on devaiéts'y attendre, de la valeur de l'aimantation : plus l'aimantation est forte, moins la dispersion est grande. En fin de compte, la précision dépend de la sensibilité de l'appareil; les dispersions deviennent évidemment importantes lorsque les déviations sont faibles.

Les valeurs ci-dessus sont vraisemblablement plus faibles que les dispersions réelles lors des mesures normales. En effet, les conditions normales de mesure sont différentes de celles décrites ci-dessus du fait que les mesures ne sont pas répétées. Il paraît néanmoins raisonnable d'après ces résultats, de prendre comme limite de l'erreur à craindre sur une mesure, 3 degrés en direction et 3 % en moment.

3-6.- Influence du shunt électrique

J'ai été parfois amené à réduire la sensibilité de l'inductomètre, en

branchant pour cela un shunt électrique aux bornes du galvanomètre.

L'emploi du shunt affecte les résultats des mesures. Pour un même échantillon en effet, les valeurs déterminées avec et sans shunt aux bornes du galvanomètre, présentaient un certain écart entre elles.

J'ai essayé de déterminer l'ordre de grandeur de cet écart par l'étude de deux exemples et de la façon suivante :

L'aimantation d'un échantillon est mesurée plusieurs fois en modifiant chaque fois la position du shunt électrique (j'ai donné à ce dernier les positions les plus couramment utilisées). Les valeurs obtenues sont ensuite comparées avec la valeur observée en l'absence de shunt.

J'ai utilisé, pour cette étude, les échantillons D 45-2 et 827-I qui m'ont déjà servi pour l'étude de la reproductibilité des mesures. Ces échantillons ont été choisis de façon à étudier l'effet du shunt, sur deux valeurs différentes du moment magnétique.

Résultats

Les tableaux ci-dessous exposent les résultats de l'expérience. Dans ces tableaux, ΔM , $\Delta \beta$ et ΔI représentent les écarts entre les moments moyens des échantillons et les quantités homologues déterminées pour chaque position du shunt électrique.

Tableau II-1

Variation de la valeur du moment magnétique
et de la direction d'aimantation d'un échantillon
avec la position du shunt électrique

1) Cas d'une aimantation faible D 45-2

	\bar{M} uém	ΔM	β	$\Delta \beta$	I	ΔI
sans shunt	0,541		-10°2		-23°3	
1ère position du shunt	0,538	0,6 %	-10°3	-0°1	-22°9	-0°4
2ème position du shunt	0,537	0,7 %	-12°9	-2°7	-22°5	-0°8
3ème position du shunt	0,538	0,6 %	-9°7	-0°5	-26°0	-2°7
4ème position du shunt	0,537	0,6 %	-9°7	0°5	-23°1	0°2

2) Cas d'une aimantation élevée 827-I

	\bar{M} uém	ΔM	β	$\Delta\beta$	I	ΔI
sans shunt	3,22		73°3		-36°9	
1ère position du shunt	3,24	+0,6 %	73°3	0	-37°1	-0°2
2ème position du shunt	3,23	+0,3 %	72°0	-1°3	-36°3	+0°6
3ème position du shunt	3,19	-0,9 %	72°1	-1°2	-37°1	-0°2
4ème position du shunt	3,18	-1,2 %	73°0	-0°3	-37°6	-0°7

Il apparaît d'après ces expériences que l'emploi du shunt peut introduire un écart entre les valeurs. L'écart reste cependant faible, il ne dépasse pas 1 % en moment et reste inférieur à 2° en direction. Il est clair cependant que, lorsque l'on utilise un shunt de valeur élevée, on réduit considérablement l'amplitude des déviations et par conséquent on augmente l'erreur.

Un changement de shunt peut en particulier intervenir au cours d'une désaimantation et les écarts définis ci-dessus peuvent être à l'origine de dispersions supplémentaires. Cependant un choix convenable de la sensibilité en début d'expérience permet d'éviter de la modifier en cours de désaimantation.

4.- Comparaisons avec d'autres appareils

J'ai effectué un certain nombre de comparaisons entre l'inductomètre que j'ai utilisé et celui du laboratoire géomagnétique du Professeur E. THELLIER (inductomètre rotatif SERCEL). Les comparaisons ont porté uniquement sur les valeurs du moment magnétique et les directions d'aimantation.

Pour cela j'ai repris l'étude de trois échantillons, examinés auparavant à Tananarive. La comparaison a donné les résultats suivants :

Tableau II-2

Résultats des comparaisons avec un inductomètre
du laboratoire de géomagnétisme de St-Maur-des-Fossés

Echantillon	Moment en uém		ΔM	β		$\Delta \beta$	I		ΔI
	St Maur	Tana		St Maur	Tana		St Maur	Tana	
B 89-6	0,078	0,078	0	-10°5	-9°6	+0°9	-40°3	-41°7	-1°4
D 92-4	0,179	0,177	-1,1 %	34°0	36°2	+2°2	68°5	65°6	-2°9
D 45-2	0,533	0,541	+1,5 %	-11°0	-10°2	+0°8	-22°6	-23°3	-0°7

L'examen de ces résultats montre que les deux appareils donnent sensiblement les mêmes valeurs, l'écart observé en valeur de moment reste inférieur à 2 %, il est plus petit que 3° en direction.

La valeur du moment magnétique de l'échantillon D 45-2 a été également déterminée avec l'inductomètre 'Bellevue' du même laboratoire. La valeur trouvée est exactement la même que celle qui a été déterminée à Tananarive.

5.- Analyse de l'aimantation rémanente naturelle d'un échantillon

L'aimantation rémanente naturelle d'un échantillon de roche comporte la plupart du temps des aimantations secondaires qui sont les principales sources d'erreur dans une étude paléomagnétique. Il est par conséquent indispensable de les supprimer auparavant.

5-1.- Test de stabilité de E. THELLIER

L'application de ce test permet de déterminer le degré de sensibilité à l'action du champ magnétique actuel d'un échantillon de roche. Il permet par conséquent, de distinguer les échantillons susceptibles de porter une aimantation du type visqueux qui peut entraîner des changements dans la direction de l'aimantation originelle.

J'ai étudié l'action du champ magnétique terrestre actuel sur les échantillons en procédant à la détermination de la direction de leur aimantation

à deux ou trois mois d'intervalle. Entre les deux mesures les échantillons ont été retournés.

5-2.- Désaimantation par champs alternatifs

L'analyse des aimantations naturelles a été faite par la désaimantation progressive des échantillons par action de champs alternatifs de plus en plus intenses.

Son principe peut se résumer ainsi :

Si on soumet un échantillon à un champ alternatif H_i que l'on annule progressivement, les composantes d'aimantation dont les champs coercitifs sont inférieurs à H_i vont disparaître.

Le même processus se répète lorsque l'on augmente l'intensité du champ agissant. Par conséquent, les composantes à champs coercitifs faibles (ou composantes "molles") vont disparaître les premières et la composante ayant le champ coercitif le plus élevé (composante la plus "dure"), disparaît la dernière.

Le procédé permet donc de séparer la composante d'aimantation la plus "dure" des autres formes d'aimantation.

5-3.- Recherche du champ alternatif à appliquer

Il importe de déterminer pour chaque bloc de roche l'intensité du champ alternatif qui annule les composantes secondaires d'aimantation.

J'ai déterminé ce champ de la façon suivante :

Un échantillon-pilote par bloc orienté a été soumis à l'action de champs alternatifs, en déterminant pour chaque valeur du champ appliqué la fraction d'aimantation restante et sa direction. Le champ alternatif que j'ai adopté pour la désaimantation partielle des autres échantillons du même bloc, était celui pour lequel une stabilité des directions d'aimantation de l'échantillon-

pilote a été observée. L'aimantation stable ne doit pas représenter une fraction trop faible de l'aimantation naturelle.

Il existe une autre méthode pour rechercher le champ alternatif à appliquer. Elle consiste à désaimanter progressivement un certain nombre d'échantillons-pilotes par site de prélèvement. Le champ à adopter est celui pour lequel on observe le minimum de dispersion entre les échantillons-pilotes (64).

Ces deux méthodes sont comparables entre elles puisque l'une et l'autre sont basées sur la stabilité du vecteur-aimantation. La première fournit une valeur du champ pour un bloc de roche, la deuxième donne une valeur moyenne du champ pour tout un site de prélèvement.

J'ai cependant préféré la première méthode bien qu'elle soit nettement plus longue.

En effet, dans la seconde méthode, il peut arriver que la désaimantation progressive des échantillons-pilotes ne conduise pas à un résultat satisfaisant, les directions peuvent ne pas converger pour former un groupe. Il est alors nécessaire de désaimanter tous les échantillons du site, dans des champs de plus en plus élevés, jusqu'à ce qu'un minimum de dispersion soit observé. On est donc ramené à la première méthode.

En outre, le champ pour lequel on obtient la stabilité des directions, peut ne pas être le même pour tous les blocs de roche prélevés dans un même site à cause d'une part d'une variation toujours possible dans la constitution minéralogique de la roche, et d'autre part de la possibilité d'une aimantation consécutive à des coups de foudre, qui peut être extrêmement différente d'un échantillon à un autre, (en particulier dans le cas d'un site de prélèvement étendu). Dans ces conditions, si l'on utilise un champ moyen,

un échantillon peut être ou trop désaimanté, ou au contraire, pas assez désaimanté.

Le premier phénomène n'entraîne pas de conséquence grave. Par contre, lorsque l'échantillon n'est pas assez désaimanté, toutes les aimantations secondaires peuvent ne pas être détruites et cela pourrait entraîner une source supplémentaire de dispersion entre les blocs d'un même site.

5-4.- Recherche de la composante d'aimantation stable et caractéristique de l'échantillon

Le recherche de la composante d'aimantation stable d'un échantillon a été faite par l'étude de la variation de son vecteur-aimantation pendant la désaimantation.

Pour chaque échantillon-pilote j'ai analysé :

- la trajectoire de la projection de l'extrémité du vecteur-aimantation dans le plan horizontal et dans un plan vertical
- et les directions de ce vecteur, vues sur une projection stéréographique.

D'une façon générale, le vecteur-aimantation tourne au cours des phases successives de la désaimantation, jusqu'à ce que toutes les aimantations secondaires soient détruites. La fraction d'aimantation stable restante est considérée comme étant l'aimantation caractéristique de l'échantillon.

Lorsque l'aimantation naturelle d'un échantillon de roche ne comporte pas de fraction stable, son vecteur-aimantation subit une rotation continue, d'un bout à l'autre du traitement.

Lorsque l'aimantation stable est superposée à une ou plusieurs composantes instables, le vecteur-aimantation tourne jusqu'à ce que celles-ci soient détruites. Les points représentatifs de la projection de son extrémité

s'alignent alors sur une même ligne droite passant par l'origine (cas d'une représentation dans le plan), ou sont groupés (cas d'une représentation stéréographique).

Lorsque la composante d'aimantation supposée stable ne constitue qu'une faible fraction de l'aimantation initiale de l'échantillon, les points représentatifs, suivant le choix des unités sur les axes, peuvent se trouver très près de l'origine des coordonnées. L'analyse des trajectoires est alors plus difficile, car le déplacement des rayons vecteur devient moins apparent.

La difficulté peut être résolue en utilisant les trajectoires sur une projection stéréographique.

La simplicité ou la complexité des trajectoires dépend du nombre et de l'importance des aimantations secondaires.

Le cas le plus simple est évidemment celui d'un échantillon dont l'aimantation rémanente naturelle est stable. Dans les plans, les trajectoires seront rectilignes et passeront par l'origine des coordonnées. Sur une projection stéréographique, les points représentatifs seront groupés.

Cependant par suite des erreurs d'expérience, les trajectoires ne seront pas rigoureusement rectilignes, de même sur une projection stéréographique, les points ne seront pas confondus en un seul comme cela devrait être.

5-5.- Détermination de la nature de l'aimantation stable

Après avoir isolé l'aimantation stable, il est indispensable de vérifier qu'elle est bien du type thermorémanent.

En effet, la stabilité seule peut ne pas suffire car une aimantation d'origine chimique (ARC) peut avoir la même stabilité qu'une thermorémanence.

Une aimantation du type ARC peut s'observer dans les échantillons altérés. Mais si ceux-ci sont frais, il est peu probable que l'aimantation stable soit une ARC.

L'étude des directions m'a fourni une première indication sur la nature des différentes aimantations.

Quand les composantes considérées sont dirigées suivant la direction du champ magnétique terrestre actuel, il est possible qu'elles soient des aimantations de traînage ou des aimantations chimiques associées à une altération de surface.

Si, au contraire, les directions observées sont écartées de la direction du champ géomagnétique actuel, on peut supposer l'absence d'un traînage magnétique. Si en plus les directions données par les échantillons provenant d'un même site, ou d'une même formation, sont en bon accord entre elles, cela démontre que les aimantations correspondantes ont été acquises dans un même champ. Elles pourraient être du type thermorémanent.

On observe parfois des écarts importants entre les intensités d'aimantation des échantillons, même appartenant à une même formation. Cela révèle quelquefois une différence dans la constitution des échantillons. Dans ce cas, l'accord observé éventuellement entre les différentes directions d'aimantation suggère que là aussi, les échantillons ont acquis leur aimantation dans un même champ.

Enfin, une thermorémanence est non seulement stable mais aussi "dure", c'est à dire qu'elle se laisse difficilement attaquer par le champ alternatif. J'ai donc associé l'étude de la stabilité à celle de la "dureté".

Pour connaître la "dureté" d'une aimantation, j'ai étudié la variation de son intensité en fonction du champ alternatif appliqué. Pour chaque échantillon, j'ai tracé la courbe de variation du rapport M/M_0 en fonction du champ H (M représente l'aimantation résiduelle après application d'un champ H , et M_0 l'aimantation initiale de l'échantillon). La forme de la courbe

dépend évidemment du choix des rapports des unités sur les axes de coordonnées. Elle renseigne néanmoins sur la "durété" de l'aimantation étudiée.

Une aimantation qui est à la fois "dure" et stable pourrait être d'origine thermorémanente.

5-6.- Exemples

Différents cas peuvent évidemment se produire dans une étude paléomagnétique. Ils peuvent cependant se ramener aux trois cas examinés plus bas.

Pour chaque exemple, les trajectoires dans les plans (horizontal et vertical) et sur une projection stéréographique seront données et analysées (fig. II-3 à II-7).

Le plan horizontal de projection sera représenté par les axes Ox et Oy de l'échantillon, le plan vertical par l'axe Oy et un axe dirigé vers le haut ou vers le bas, suivant le cas.

Les intensités des différents champs alternatifs appliqués seront indiqués par des chiffres placés près de chaque point représentatif et selon les conventions suivantes :

- 1, si aucun champ n'est appliqué
- 2 à 7 pour les champs 25, 50, 75, 100, 125, 150 Oe
- 8 à 11 pour les champs 200, 300, 400, 600 Oe.

a) Cas d'un échantillon dont l'aimantation naturelle est "dure" et stable

Du début à la fin de la désaimantation, les points représentatifs des projections de l'extrémité du vecteur aimantation sont pratiquement alignés sur une droite passant par l'origine, ou restent groupés, dans le cas d'une projection stéréographique (fig. II-3, II-4, II-7a-7b).

Quelques fluctuations existent, mais elles sont vraisemblablement dues aux erreurs d'expérience.

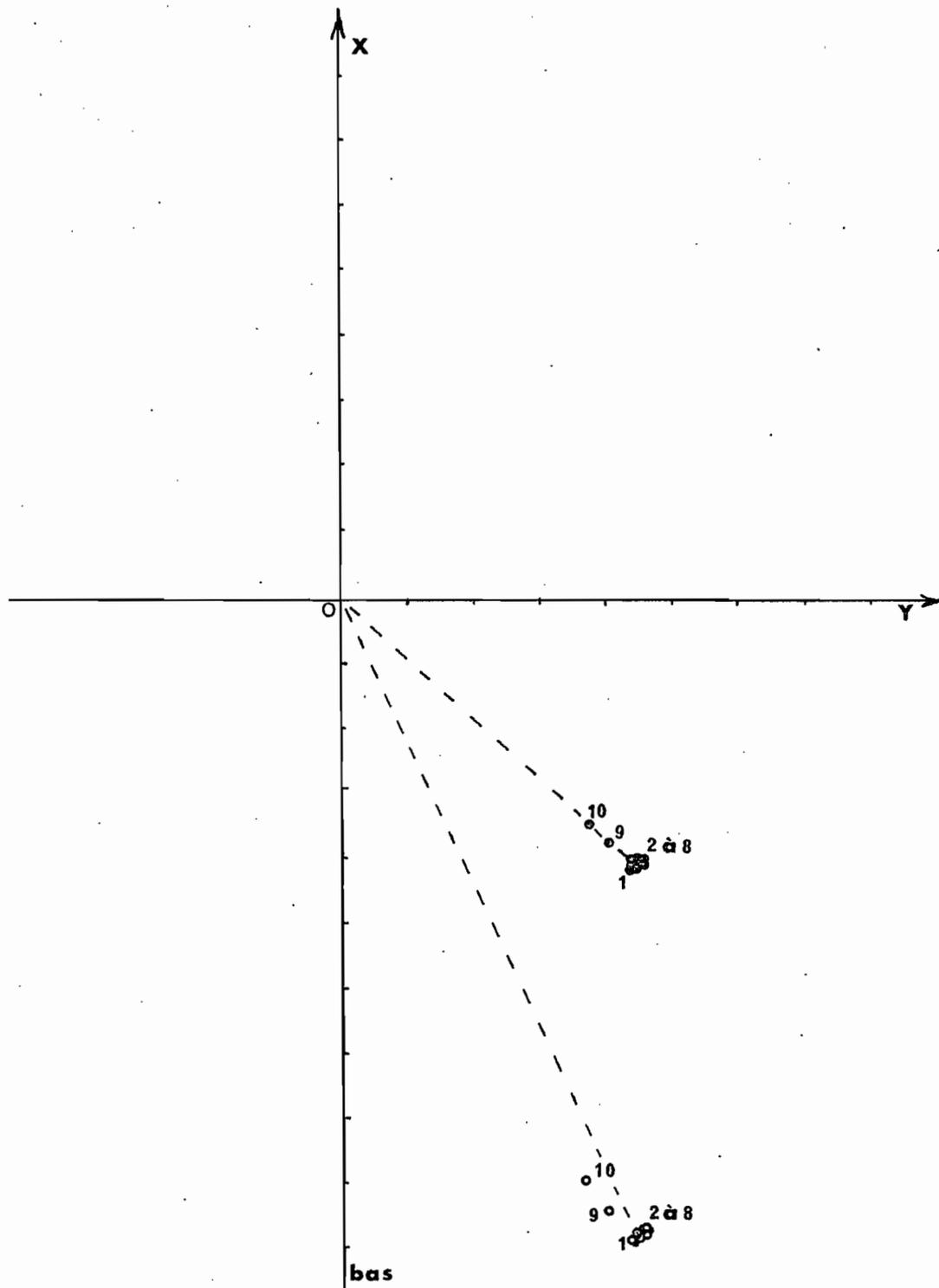


Fig. II-3 1er. EXEMPLE DE TRAJECTOIRES DANS LE PLAN DES PROJECTIONS DE L'EXTREME D'UN VECTEUR RELATIF A UNE AIMANTATION NATURELLE STABLE.

- Points représentant dans le plan horizontal
- " " vertical

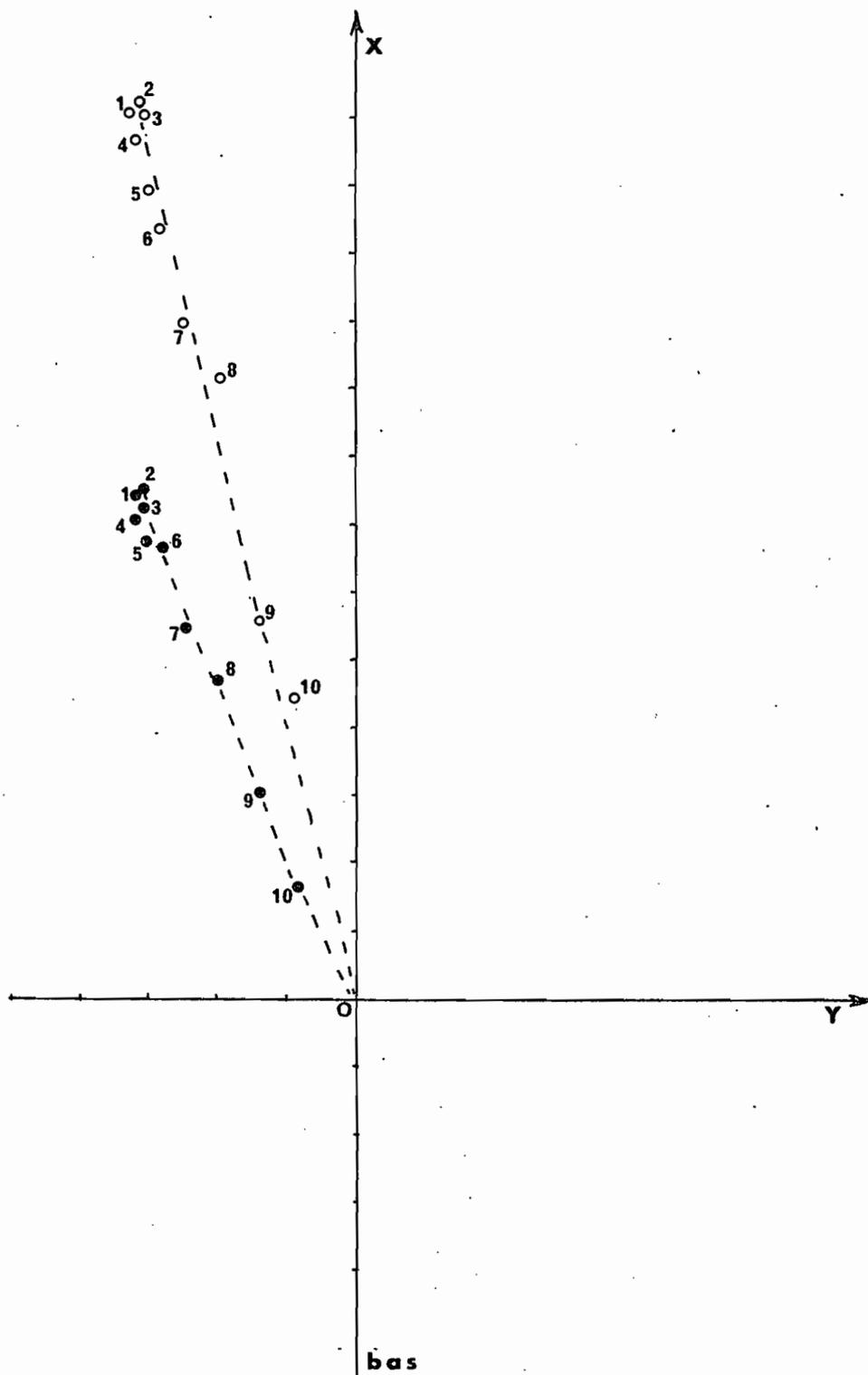


Fig. II - 4 2ème EXEMPLE DE TRAJECTOIRES DANS LE PLAN DES PROJECTIONS DE L'EXTREMITÉ D'UN VECTEUR RELATIF A UNE AIMANTATION NATURELLE STABLE.

La variation de l'intensité d'aimantation quand l'aimantation rémanente naturelle est soumise à l'action de champs alternatifs croissants est indiquée par des courbes du type a ou b de la figure II-8. Dans le premier cas il s'agit d'une aimantation très "dure" sur laquelle le champ alternatif a une action très faible. Dans le cas de la courbe b, le champ alternatif agit davantage, l'aimantation naturelle est moins "dure".

Dans l'un et l'autre cas, il s'agit d'aimantation stable peu ou pas sensible à l'effet du champ alternatif. Les aimantations rémanentes naturelles sont considérées comme étant d'origine thermorémanente.

b) Cas d'un échantillon dont une fraction seulement de l'aimantation naturelle est stable

Dans les phases initiales de la désaimantation on observe une rotation sensible du vecteur aimantation, les points figuratifs dans les plans se sont rapprochés de l'origine des coordonnées. C'est le cas dans l'exemple présenté (figure II-5). Mais il peut arriver que les points représentatifs s'éloignent au contraire de ce point; tout dépend en effet des orientations relatives des aimantations "dure" et "douce" qui peuvent composer l'aimantation naturelle.

La poursuite de l'expérience permet de constater que le vecteur aimantation se fixe à un stade donné. Les points représentatifs sur une projection stéréographique forment un groupe (figure II-7c). Dans les plans, ils s'alignent suivant une droite passant pas l'origine (figure II-5).

Les courbes c et d de la figure II-8 montrent dans ce cas la valeur du rapport de l'aimantation restante à l'aimantation initiale pour chaque phase de désaimantation. Elle indique une augmentation initiale (courbe c) ou une diminution initiale (courbe d) de l'aimantation.

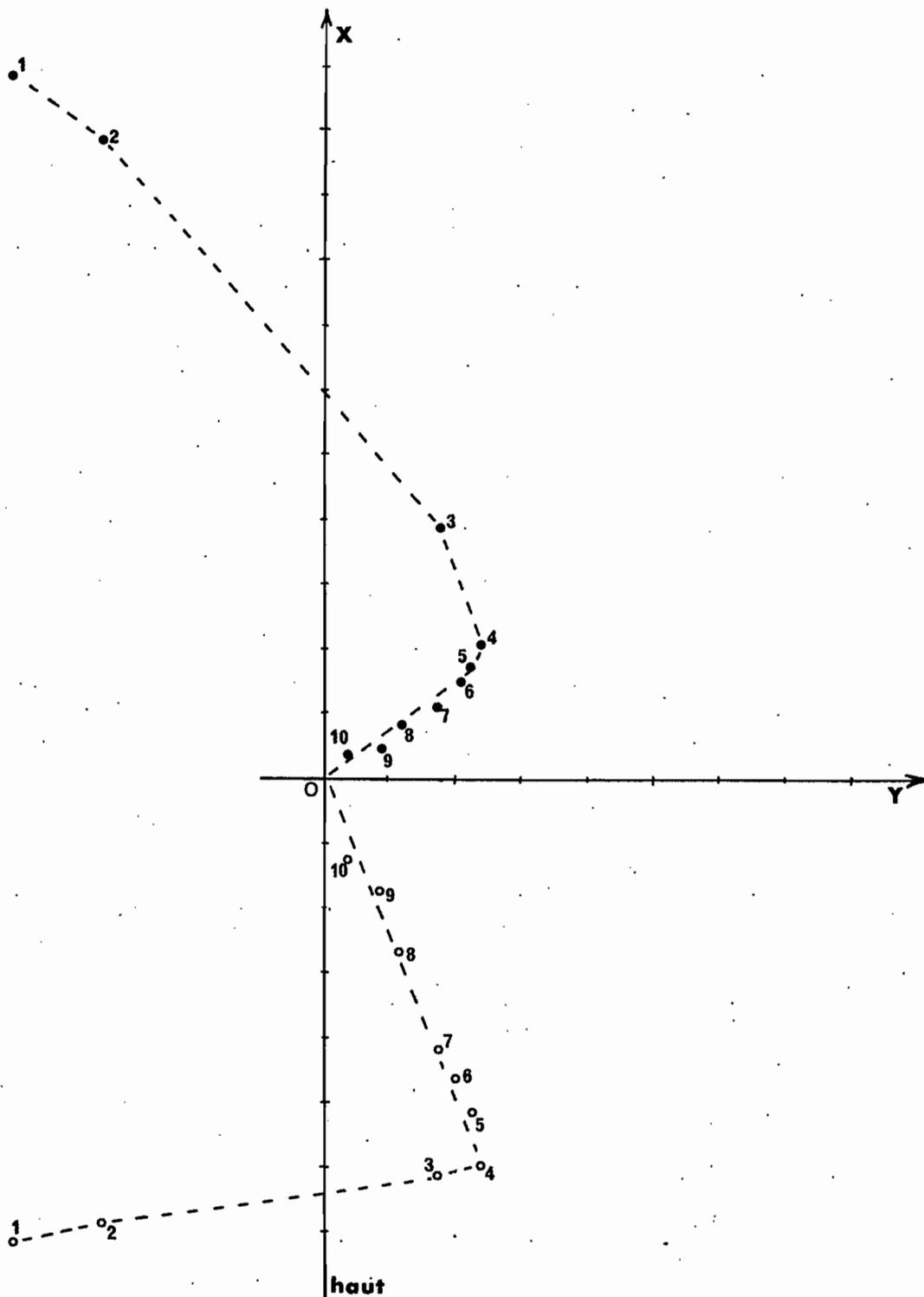


Fig. II-5 - EXEMPLE DE TRAJECTOIRES DANS LE PLAN DES PROJECTIONS DE L'EXTREME D'UN VECTEUR RELATIF A UNE AIMANTATION PARTIELLEMENT STABLE.

La diminution progressive ou l'augmentation de l'intensité d'aimantation accompagnée d'un changement systématique de la direction du vecteur aimantation correspondant, indique une composante instable. Celle-ci disparaît au fur et à mesure que l'intensité du champ alternatif croît, et la direction de l'aimantation tend progressivement vers la direction de la composante thermorémanente la plus stable.

c) Cas d'un échantillon dont l'aimantation naturelle ne comporte aucune fraction stable

La trajectoire suivie par les projections de l'extrémité du vecteur aimantation est complexe. Dans l'exemple présenté la désaimantation introduit, dès sa phase initiale, une perte importante d'aimantation (figure II-6, II-7d). (Lorsque l'aimantation naturelle est la résultante de plusieurs aimantations secondaires, la pente initiale de la courbe peut être positive).

En poursuivant la désaimantation, on constate que le vecteur ne se fixe jamais jusqu'à la disparition complète de l'aimantation.

Toutes ces observations révèlent une aimantation naturelle complexe et "molle", c'est à dire sensible à l'action du champ alternatif. Aucune composante stable n'est présente.

Les aimantations de ce type ne peuvent fournir aucun renseignement utile sur le champ magnétique ancien.

6.- Dispositif de désaimantation

En paléomagnétisme, comme il a été évoqué déjà, seule l'aimantation originelle est utile, c'est pourquoi il est indispensable de l'isoler des autres formes d'aimantation.

Dans les paragraphes précédents, les méthodes d'analyse qui permettent d'y parvenir ont été abordées. Dans les lignes qui vont suivre, je décrirai

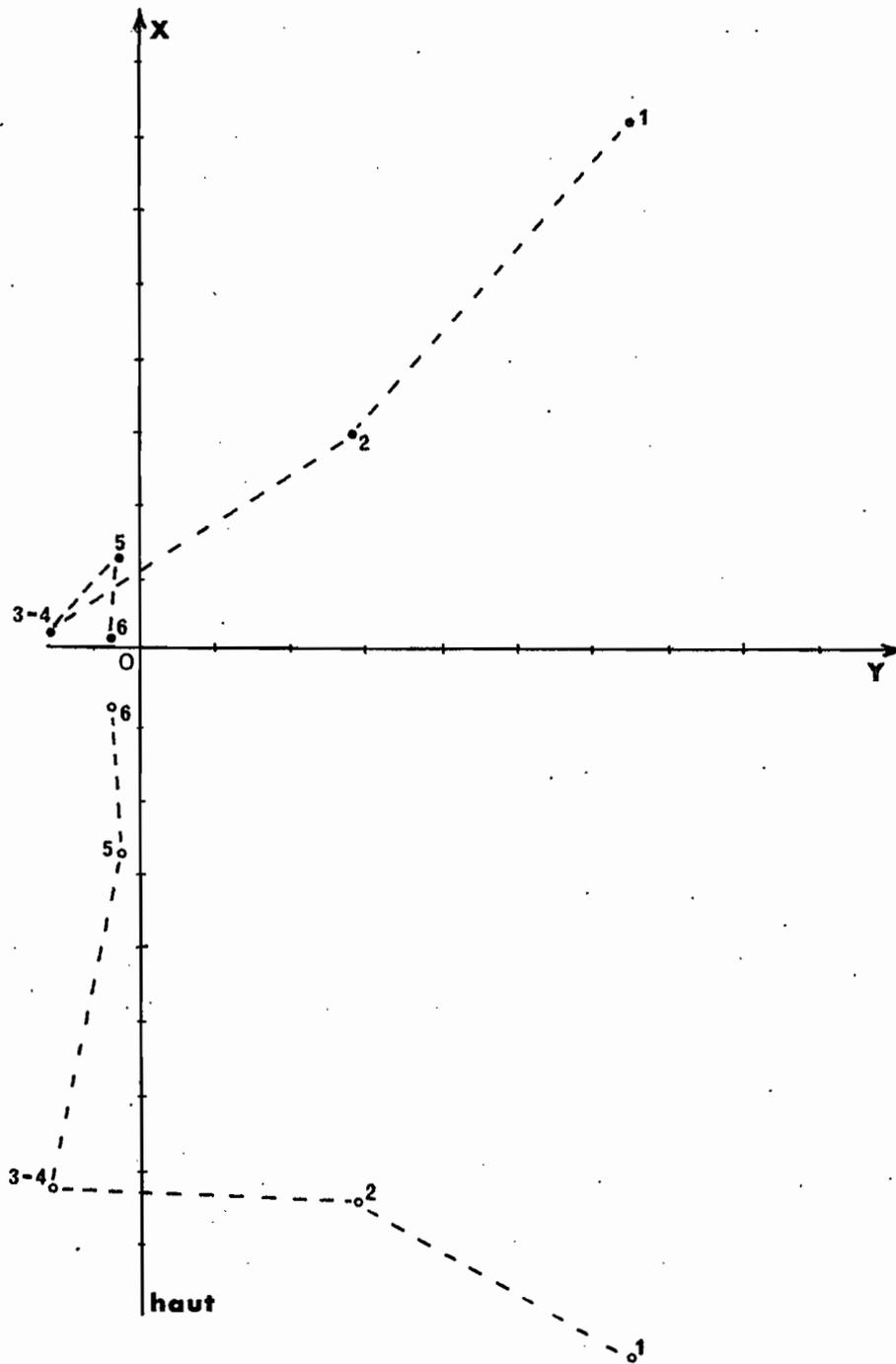


Fig. II-6 EXEMPLE DE TRAJECTOIRES DANS LE PLAN DES PROJECTIONS DE L'EXTREMITÉ D'UN VECTEUR RELATIF A UNE AIMANTATION NATURELLE INSTABLE.

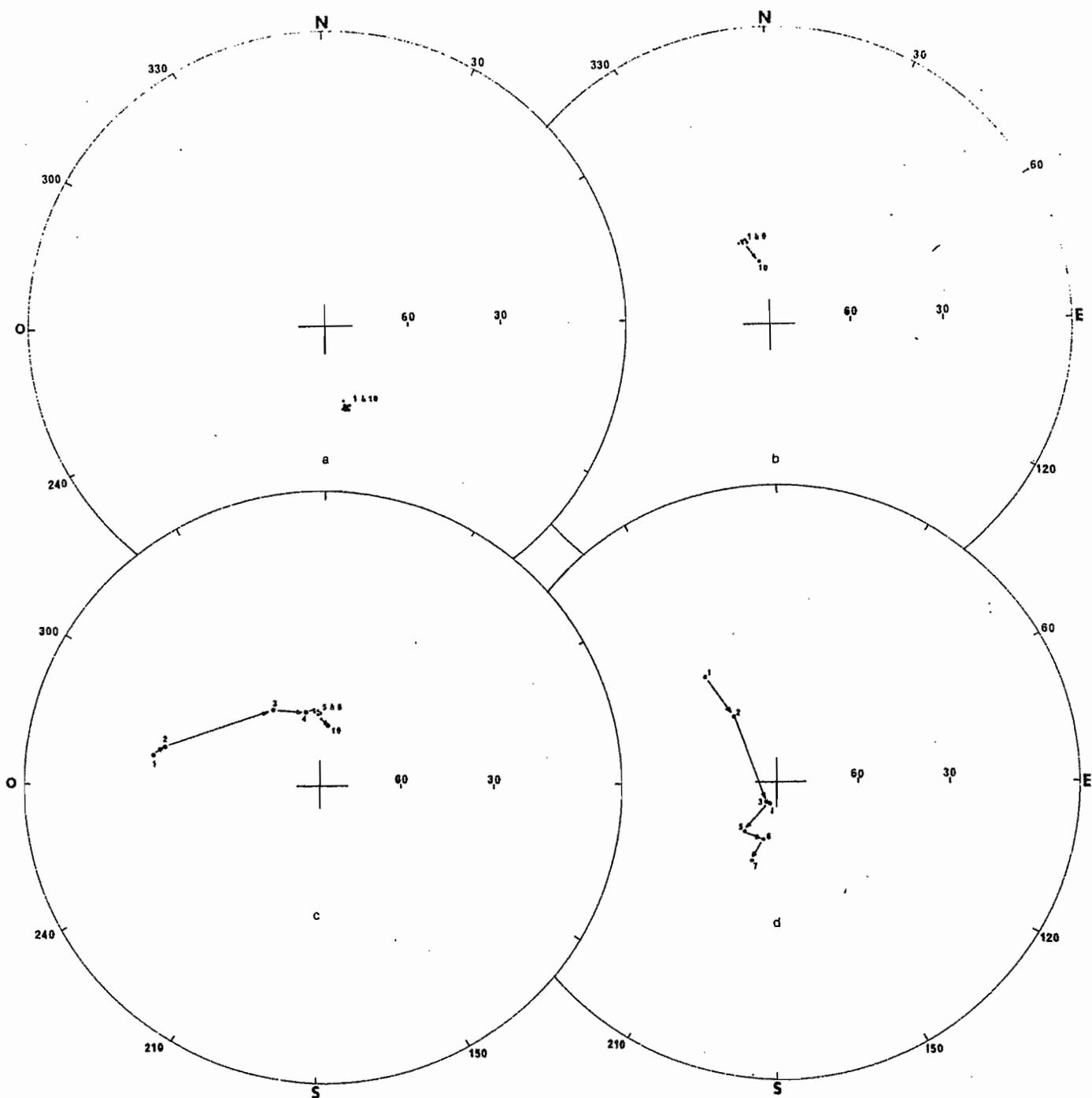


FIG. II-7. - TRAJECTOIRES SUR UNE PROJECTION STEREOGRAPHIQUE
 DES EXTREMITES DES VECTEURS RELATIFS A DES
 AIMANTATIONS NATURELLES STABLE (a, b), PARTIEL-
 LEMENT STABLE (c) ET INSTABLE (d).

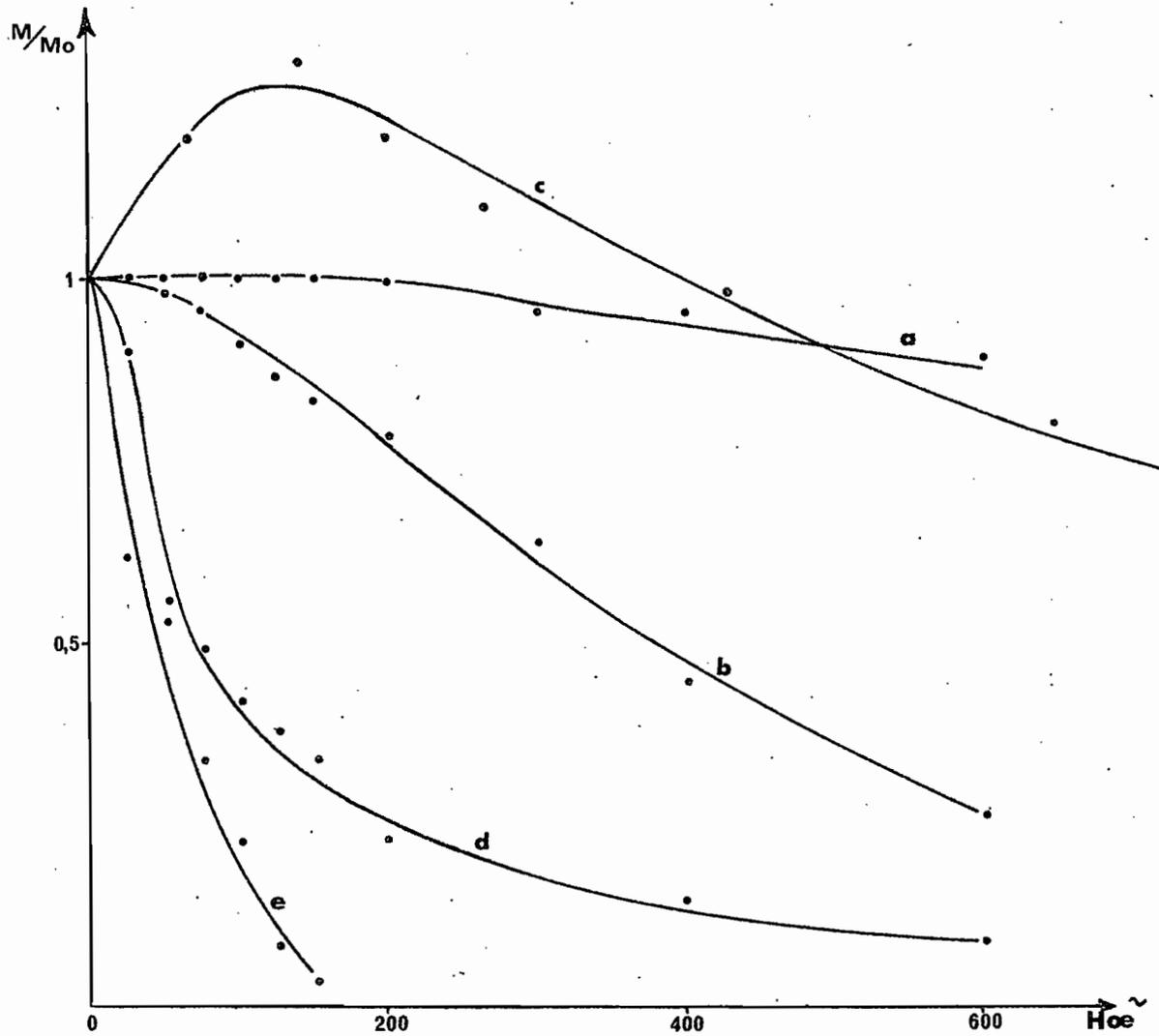


FIG. II-8 DIFFERENTS TYPES DE COURBE DE DESAIMANTATION .

- a: Cas d'une aimantation "très dure"
- b: " moyennement "dure"
- c: " "dure" partiellement stable
- d: " "douce"
- e: " molle et instable

le dispositif expérimental que j'ai utilisé. Il est analogue à celui qui existe dans le laboratoire du Professeur E. THELLIER.

La désaimantation par champs alternatifs peut être une source supplémentaire de dispersion, si des précautions appropriées ne sont pas prises. Les moyens que j'ai utilisés pour supprimer de telles dispersions ou tout au moins pour réduire au minimum leurs effets, seront également traités.

6-1.- Description de l'appareil à désaimanter

Dans le dispositif que j'utilise, le champ alternatif est obtenu à l'aide d'une bobine ayant les caractéristiques suivantes :

diamètre extérieur	:	41 cm
diamètre intérieur	:	35 cm
longueur du bobinage	:	35 cm
nombre de spires	:	1070 réparties en 10 couches
diamètre du fil	:	30/10

Pour se mettre le plus possible dans la condition de résonance, la self de la bobine est accordée sur 50 périodes avec des condensateurs Ferrix.

Un alternostat Ferrix permet de faire varier la tension appliquée de 0 à 220 V.

La tension d'alimentation de la bobine est réglée à l'aide d'un régulateur automatique de tension Voltreg qui fournit à sa sortie une tension stabilisée (en valeur moyenne) à plus ou moins 2 %.

Les champs alternatifs de désaimantation sont dirigés, par construction, suivant une direction fixe qui est celle de l'axe de la bobine. Or l'efficacité du "lavage" dépend de l'angle que fait l'aimantation naturelle avec la direction du champ appliqué. Il est donc utile de faire agir le champ suivant plusieurs directions.

J'ai utilisé pour cela un dispositif analogue à celui employé au laboratoire du Professeur E. THELLIER, permettant de faire tourner l'échantillon suivant plusieurs directions.

Le champ appliqué est annulé progressivement en déplaçant la bobine de champ le long de deux rails de trois mètres environ de longueur.

La compensation du champ magnétique terrestre est obtenue à l'aide de deux systèmes d'Helmholtz, respectivement de 120 cm et 140 cm de diamètre.

6-2.- Etude de la dispersion introduite par la désaimantation

Si la désaimantation par champs alternatifs constitue un moyen efficace pour séparer la composante stable des aimantations secondaires, l'expérience montre cependant que de nouvelles composantes parasites peuvent prendre naissance au cours de la désaimantation. Ces aimantations parasites proviennent :

- des imperfections instrumentales
- et de l'insuffisance de la compensation du champ magnétique terrestre.

Elles peuvent parfois rendre difficile la recherche de la composante stable ou même masquer celle-ci.

a) Imperfections instrumentales

Des distorsions asymétriques dans le courant alternatif qui alimente la bobine de champ, peuvent créer des aimantations parasites. Ces distorsions sont dues aux harmoniques pairs qui doivent donc être filtrés.

Dans le dispositif que j'utilise, le régulateur de tension est également muni d'un filtre d'harmonique réduisant la distorsion globale à moins de 2 %. Il y a production uniquement d'harmoniques impairs. Ces derniers, créant des distorsions symétriques, ne provoquent aucune réaimantation accidentelle (4).

b) Insuffisance de la compensation du champ magnétique terrestre

Si le champ magnétique terrestre est insuffisamment compensé, il y a une réaimantation accidentelle de l'échantillon. F. RIMBERT (83) a montré

qu'il s'agit d'une aimantation anhystérétique due à la superposition du champ alternatif de désaimantation avec le résidu du champ magnétique terrestre.

Dans mon dispositif, la compensation du champ magnétique terrestre est obtenue à l'aide des deux systèmes d'Helmholtz, déjà décrits. Le contrôle de la compensation est effectué avec un gaussmètre BELL type 620, muni d'une sonde "Magna Probe" M. 6001.

6-3.- Estimation de la dispersion introduite par la désaimantation

Malgré les précautions prises, la désaimantation peut néanmoins créer des dispersions supplémentaires dont il est utile de connaître l'ordre de grandeur. J'ai étudié expérimentalement ces dispersions et de la manière suivante :

Un échantillon est désaimanté plusieurs fois dans le même champ alternatif en modifiant chaque fois sa position initiale dans le porte échantillon tournant, par exemple, une fois avec son axe Ox dirigé initialement suivant celui de la bobine de champ et une deuxième fois antiparallèlement.

On procède de même avec Oy et Oz pour les autres opérations.

Après chaque opération de désaimantation, la direction de l'aimantation résiduelle est déterminée. L'écart entre les observations individuelles et la moyenne des valeurs obtenues peut être considéré comme un ordre de grandeur de la dispersion introduite par la désaimantation. Une étude détaillée des dispersions introduites par la désaimantation dans un dispositif comportant un porte-échantillon tournant a été exécutée par R.R. DOELL et A. COX (42).

6-4.- Résultats

Les tableaux suivants résument les valeurs trouvées expérimentalement pour trois catégories d'aimantation :

- aimantation "dure" : échantillon E 5-4
- aimantation de "dureté" moyenne : échantillon D 258-3
- aimantation "molle" : échantillon B 197-6

Tableau II-3

Différentes valeurs de la dispersion introduite
par la désaimantation par champs alternatifs

1) Echantillon E 5-4 $M_0 = 1,53 \text{ uém}$ $D_0 = -50,1$ $I_0 = -32,9$

H Oe	100	200	400	600
\bar{M}	1,51	1,37	0,98	0,49
D	-48,7	-47,3	-46,1	-44,3
I	-28,9	-27,2	-27,2	-29,8
k	25.000	16.667	757	485
θ_0	0,5	0,6	2,9	3,7
\bar{M}/M_0	0,99	0,89	0,64	0,32

2) Echantillon D 258-3 $M_0 = 8,87 \text{ uém}$ $D_0 = -1,7$ $I_0 = -48,9$

H Oe	100	200	400	600
\bar{M}	6,57	4,07	2,05	1,15
D	1,0	-0,2	-0,4	2,2
I	-56,3	-54,6	-55,5	-57,5
k	4.545	3.571	1.351	152
θ_0	1,2	1,3	2,2	6,6
\bar{M}/M_0	0,74	0,46	0,23	0,13

3) <u>Echantillon B 197-6</u>			
	$M_o = 20,68$	$D_o = -53,3$	$I_o = 0^\circ$
H Oe	100	200	400
\bar{M}	4,86	1,20	0,44
D	-63,3	-45,7	-18,4
I	-8,0	-29,7	-53,9
k	2.083	413	96
θ_o	1,8	4,0	8,0
\bar{M}/M_o	0,23	0,06	0,02

Dans les tableaux ci-dessus, les lettres ont les significations suivantes :

- \bar{M} : moment magnétique moyen
- M_o : moment magnétique naturel
- D_o et I_o : déclinaison et inclinaison de l'aimantation naturelle
- D et I : déclinaison et inclinaison de l'aimantation après chaque phase de désaimantation
- k ; paramètre de Fisher
- θ_o : dispersion angulaire

Ces diverses expériences montrent que des dispersions existent effectivement lorsque l'on soumet un échantillon à une désaimantation progressive par champs alternatifs. On peut cependant se demander si elles proviennent réellement des aimantations parasites que le traitement aurait créées ou si elles proviennent plutôt des erreurs de mesure.

J'ai donc comparé ces résultats avec les dispersions que j'ai obtenues lors de l'étude de la reproductibilité des mesures (§ 3-5).

a) Cas de l'échantillon E 5-4

L'examen des résultats montre que les valeurs de D et I au cours des

phases successives de la désaimantation sont pratiquement constantes. Ceci suggère que l'aimantation de cet échantillon est stable.

Jusqu'à 200 Oe environ, les dispersions observées sont inférieures à un degré, c'est à dire, en tenant compte de la valeur de l'aimantation résiduelle, du même ordre de grandeur que celles qu'engendreraient les erreurs de mesure seules.

On peut donc supposer que les dispersions sont dues uniquement aux erreurs de mesure.

Lorsque le champ appliqué atteint et dépasse 400 Oe, les dispersions deviennent supérieures à celles dues aux erreurs de mesure, compte tenu des valeurs des moments restant après application des champs.

Il est donc probable que la désaimantation créée à ce stade des dispersions supplémentaires qui semblent d'ailleurs augmenter avec l'intensité du champ appliqué.

b) Cas de l'échantillon D 258-3

L'analyse des résultats relatifs à cet échantillon conduit aux constatations suivantes :

L'aimantation restant après l'application d'un champ de 100 Oe est stable.

Jusqu'à 200 Oe, les dispersions observées sont légèrement supérieures à celles que l'on observerait par des mesures répétées d'une aimantation de même ordre de grandeur que celle de l'aimantation restante.

Lorsque le champ appliqué dépasse 400 Oe, les dispersions deviennent plus importantes que celles que pourraient introduire les erreurs de mesure.

Comme dans le cas précédent, il est probable qu'à partir de 400 Oe la désaimantation introduit des dispersions supplémentaires.

c) Cas de l'échantillon B 197-6

Dans le cas de cet échantillon, la comparaison montre que la désaimantation peut entraîner des dispersions supplémentaires dès que le champ appliqué dépasse 100 Oe.

6-5.- Conclusions

Ces diverses expériences tendent à montrer qu'à partir d'une certaine valeur du champ alternatif de désaimantation, des dispersions supplémentaires peuvent être introduites. Leur amplitude semble dépendre à la fois de la "dureté", de la valeur de l'aimantation et de la stabilité de celle-ci. Elle augmente avec l'intensité du champ appliqué.

Par suite de la diversité des cas que l'on peut rencontrer, il n'est évidemment pas possible de définir une seule valeur de champ pour laquelle les aimantations accidentelles apparaissent. On ne peut pas non plus déterminer la valeur de la dispersion que ces aimantations entraîneraient, d'autant plus qu'il ne paraît pas possible de séparer ces dispersions de celles dues aux erreurs de mesure.

Il semble cependant raisonnable de supposer que des dispersions n'apparaissent qu'au-delà de 200 Oe, pour les échantillons susceptibles d'être utilisés dans la recherche d'informations sur le champ ancien.

Les valeurs indiquées dans les tableaux précédents ne peuvent constituer qu'un ordre de grandeur de la dispersion à laquelle on pourrait s'attendre. En effet, dans les expériences courantes de désaimantation, les conditions sont sensiblement différentes de celles décrites. Il me paraît cependant raisonnable, d'après ces expériences, de prendre plus ou moins 5 degrés comme valeur limite de la dispersion totale lors d'une désaimantation par champs alternatifs. Lorsque les fluctuations des directions

n'ont pas dépassé cette valeur, j'ai admis que l'aimantation restante était stable.

C H A P I T R E I I I

ANALYSE DES RESULTATS

Ayant établi aussi bien que possible la stabilité et le caractère thermorémanent de l'aimantation portée par un échantillon de roche, le problème qui reste à résoudre concerne la manière dont les résultats vont être présentés et analysés.

Ce sera l'objet de ce chapitre.

I. - PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats obtenus jusqu'à présent sont essentiellement des directions d'aimantation (D, I). La manière la plus commode de les présenter, qui est également la plus employée, consiste à utiliser une projection stéréographique : les déclinaisons se lisent sur le cercle et les inclinaisons, suivant les rayons.

J'ai adopté ce mode de présentation. Lorsque l'aimantation a une inclinaison négative (normale à Madagascar), le point représentatif est indiqué par un petit cercle noir; dans le cas contraire, j'ai utilisé une petite circonférence.

Ce mode de présentation possède l'avantage de permettre d'apprécier immédiatement le degré de dispersion des résultats. En effet, les directions relatives à des échantillons appartenant à un même site de prélèvement, ou celles de sites d'une même formation géologique, formeront un "nuage". Celui-ci sera plus ou moins serré, suivant que les directions sont plus ou moins cohérentes.

Avant de rattacher les dispersions observées aux changements éventuels dans la direction du champ magnétique terrestre, il est donc nécessaire d'étudier en détail leurs origines et leur amplitude.

II. - ETUDE DES DISPERSIONS

1. - Dispersions entre échantillons

Les dispersions entre échantillons sont dues essentiellement

- à une imprécision dans le report de l'orientation,
- à une hétérogénéité de l'aimantation,
- à une erreur dans les mesures,
- à une réaimantation accidentelle, telle que celle que pourraient introduire les expériences de désaimantation par champs alternatifs ou l'altération.

Les dispersions dues aux deux premières sources peuvent être réduites par les moyennes. En ce qui concerne les deux autres sources, leurs effets peuvent également être réduits en prenant des précautions appropriées, comme celles évoquées précédemment. Les dispersions dues à l'altération peuvent être évitées en ne considérant que des échantillons frais. C'est pour cette raison qu'un examen systématique en lame mince d'un certain nombre d'échantillons par site de prélèvement a été effectué. Les échantillons qui paraissaient douteux ont été éliminés de l'analyse finale.

2. - Dispersions entre blocs

Des dispersions peuvent provenir du non parallélisme entre les directions mesurées et le champ magnétique présent au moment du refroidissement, par suite de légers mouvements entre blocs, les uns par rapport aux autres.

J'ai évité ce genre de dispersion en effectuant des prélèvements loin des endroits pleins de cassures et de toute zone susceptible d'avoir bougé.

On peut également évoquer les dispersions engendrées par les coups de foudre. Pour les réduire, les blocs ont été espacés au maximum, les uns des autres.

Les dispersions entre blocs peuvent également provenir de la variation de place en place de la direction du champ magnétique. L'étude sur le terrain de la variation de l'aiguille aimantée d'une boussole m'a fourni des informations utiles à ce sujet. Les blocs pour lesquels la déviation observée était trop différente de celle qui paraissait être la normale, ont été éliminés.

Dans tous les cas, j'ai éliminé du calcul de la direction moyenne les directions qui s'écartaient trop du groupe principal.

3. - Dispersions entre sites

Les écarts entre les directions d'aimantation des sites appartenant à une même formation géologique peuvent avoir plusieurs origines, parmi lesquelles les plus importantes sont :

- le non parallélisme entre le champ local et le champ magnétique régional,
- et les variations du champ magnétique terrestre.

3-1.- Non parallélisme entre le champ magnétique local et le champ magnétique régional

L'intérêt d'une étude paléomagnétique est centré sur la direction du champ magnétique régional, c'est à dire la direction d'aimantation de toute une formation, plutôt que sur la direction du champ magnétique local, celle que l'on mesure dans un site de prélèvement.

L'écart entre ces deux directions peut être important lorsque le site étudié s'est refroidi dans une zone où une anomalie magnétique est déjà préexistante. Cela pourrait être le cas dans une formation complexe constituée par une superposition de plusieurs coulées. Mais l'écart peut être insignifiant lorsque la formation ne comprend qu'une seule coulée bien homogène et uniformément aimantée.

3-2.- Variation du champ magnétique terrestre

Les variations rapides du champ magnétique terrestre, comme les variations diurnes, n'ont évidemment aucune influence décelable en paléomagnétisme. Mais si l'on suppose qu'un site représente un volume de roche qui s'est aimanté pendant une période négligeable devant le temps que met toute une formation pour acquérir son aimantation, la variation du champ magnétique terrestre pourrait engendrer des dispersions dans les diverses directions observées pour chaque site. Il en est de même dans le cas d'une formation dont les différentes parties, qui ne sont pas nécessairement bien distinguées, se sont mises en place à des époques différentes, à l'échelle des temps de la variation séculaire.

Si la formation est composée d'une superposition de coulées, les analyses des résultats sont complexes, car un site peut se trouver sur un terrain volcanique préexistant qui constitue une source supplémentaire de dispersion. Dans ces conditions, aucune méthode d'analyse simple ne permet de séparer les dispersions dues à une anomalie magnétique préexistante de celles engendrées par la variation du champ magnétique terrestre pendant le refroidissement de toute la formation.

3-3.- Estimation de la variation séculaire

L'amplitude de la variation séculaire peut donc, en principe, être déduite de la connaissance de la dispersion des directions d'aimantation des

sites de prélèvement. Il est toutefois nécessaire que ces dispersions soient débarrassées des erreurs dues à d'autres sources.

Cette méthode n'offre cependant qu'une estimation de l'amplitude maximum de la variation séculaire. Elle ne peut, par contre, fournir aucune indication sur sa périodicité ou sa source, du fait du caractère fragmentaire des informations que peut donner le paléomagnétisme et de l'importance de l'erreur introduite dans les âges, par rapport à l'échelle des temps de la variation séculaire. De plus, la fidélité des roches volcaniques est faible, par conséquent les variations séculaires peuvent ne pas être convenablement reproduites.

Les estimations déduites du paléomagnétisme peuvent ensuite être comparées avec les dispersions observées relatives au champ géomagnétique actuel.

K.M. CREER (35) suggère que la dispersion angulaire peut fournir une estimation de la variation du champ paléomagnétique pendant le temps d'aimantation d'une formation.

III. - CALCUL DE LA DIRECTION MOYENNE D'AIMANTATION D'UNE FORMATION

L'estimation de la direction moyenne est d'une importance considérable, car c'est d'elle que découlent tous les calculs géophysiques. Elle doit donc être faite avec la plus grande précision possible.

Diverses sources de dispersions, on l'a vu, peuvent affecter les observations paléomagnétiques. L'effet de certaines d'entre elles peut être réduit soit par un mode d'échantillonnage approprié, soit en prenant les précautions nécessaires. Mais il existe d'autres facteurs de dispersion plus ou moins contrôlables, dont les effets peuvent suivre les lois du hasard.

Pour toutes ces raisons, les résultats paléomagnétiques sont généralement traités de façon statistique. J'ai adopté dans ce travail la méthode statistique préconisée par R.A. FISHER, que j'ai rappelée brièvement au paragraphe 3-5 du chapitre précédent.

Dans ce qui va suivre, je continue à admettre non seulement que la stabilité de l'aimantation, ainsi que sa qualité de thermorémanence, sont établies, mais également que les directions déterminées représentent les directions du champ magnétique terrestre en un moment donné dans le passé géologique.

Il importe à présent de savoir la manière dont les données vont être analysées pour obtenir une direction moyenne, par rapport à laquelle on pourra estimer la dispersion des observations.

On peut pour cela envisager différents modes de calcul (28, 62, 101).

Le premier consisterait à considérer la direction d'aimantation de chaque bloc de roche orienté comme une observation individuelle, sans tenir compte de leur appartenance à un même site. En d'autres termes, on considère que chaque bloc s'est aimanté à une époque différente de celle du bloc adjacent, et ce pendant un intervalle de temps court par rapport à l'échelle des temps de la variation séculaire. On admet donc, dans cette méthode, que chaque bloc fossilise la direction du champ magnétique au moment du refroidissement.

Ce mode de calcul ne me paraît pas applicable dans le cas des formations étudiées où l'hypothèse la plus probable est, au contraire, que la thermorémanence, dans chaque site de prélèvement, a été acquise en même temps.

La deuxième méthode qui paraît la plus valable, consiste à traiter chaque direction moyenne calculée pour un site de prélèvement, comme une observation individuelle.

C'est cette méthode qui semble la plus appropriée pour donner aux résultats expérimentaux la meilleure signification paléomagnétique. C'est donc cette méthode que j'ai adoptée. La détermination de la direction moyenne d'aimantation d'une formation a été ensuite obtenue de la manière suivante.

Supposons une formation géologique comportant S sites de prélèvement; Dans chaque site, N blocs de roche orientés ont été prélevés, et supposons que n représente le nombre d'échantillons extraits de chaque bloc.

Pour chaque échantillon, j'ai mesuré la direction d'aimantation D_e, I_e . La méthode statistique de R.A. FISHER a été appliquée à ces n directions pour obtenir la direction d'aimantation D_b, I_b d'un bloc.

A leur tour, les N directions D_b, I_b ont été analysées par le même procédé pour obtenir la direction D_s, I_s relative à un site de prélèvement.

Enfin dans un dernier stade et de la même manière que dans les stades précédents, les directions d'aimantation des sites ont été moyennées pour déterminer la direction d'aimantation de la formation géologique, à laquelle ils appartiennent.

Une telle manière d'opérer possède, en outre, l'avantage de réduire les dispersions dues aux erreurs expérimentales. Ce n'est cependant qu'un compromis puisque le nombre d'échantillons tirés par blocs ou le nombre de blocs prélevés par site peuvent varier beaucoup. L'idéal serait que N et n soient constants.

IV.- MODE-DE COMPARAISON DES RESULTATS

La connaissance des directions moyennes d'aimantation permet, d'une part la comparaison des résultats tirés d'une même formation géologique ou d'une même région, et d'autre part la comparaison des résultats se rapportant à des formations géologiques différentes.

Dans ce second aspect du problème les formations envisagées peuvent ne pas appartenir à une même région ou à un même pays. La comparaison doit être faite au niveau des pôles géomagnétiques virtuels, car il est nécessaire de tenir compte de la situation géographique des pays envisagés

1. - Comparaison de deux directions

Pour comparer une direction déterminée par la méthode paléomagnétique à une direction connue, par exemple celle du champ magnétique terrestre actuel, j'ai utilisé directement la quantité α définie par la relation (2-6).

La différence entre les deux directions a été considérée comme significative lorsqu'il existait entre elles une distance angulaire supérieure à cette quantité. Dans le cas contraire, je les ai considérées comme identiques.

2. - Calcul du pôle géomagnétique virtuel

Lorsqu'il s'agit d'études menées dans une région restreinte, les directions d'aimantation peuvent être comparées directement entre elles de la façon qui vient d'être décrite. Mais si les résultats se rapportent à une vaste région ou, a fortiori, proviennent de pays différents, il est nécessaire d'adopter une autre méthode de comparaison, méthode qui tient compte des situations géographiques de chaque point de comparaison.

Cette méthode consiste à calculer la position du pôle géomagnétique virtuel, correspondant à chaque région échantillonnée.

En paléomagnétisme on suppose que l'aimantation acquise par une formation géologique donnée est dirigée suivant la direction du champ magnétique terrestre qui régnait au moment de sa mise en place. Si la formation couvre une période de quelques dizaines de milliers d'années, le champ magnétique moyen est débarrassé de la variation séculaire et peut être assimilé à celui d'un dipôle géocentrique axial. En d'autres termes, comme cela a déjà été souligné, les pôles géomagnétiques moyens peuvent être confondus avec les pôles géographiques.

Dans une telle hypothèse, la direction du champ (D, I) en un point quelconque de la terre de coordonnées ϕ_0 et λ_0 est donnée par la relation :

$$D = 0$$

et

$$\text{tg } I = 2 \text{ tg } \phi_0 \quad (3-1)$$

En pratique on connaît les valeurs de D et I et le problème consiste à calculer l'orientation du dipôle fictif géocentrique correspondant.

Si ϕ_0 et λ_0 sont les coordonnées géographiques d'une région d'échantillonnage S où l'on a déterminé la direction moyenne d'aimantation D_m, I_m , les coordonnées géographiques (ϕ', λ') du pôle P correspondant sont données par les relations :

$$\sin \phi' = \sin \phi_0 \cos p + \cos \phi_0 \sin p \cos D_m$$

$$\sin(\lambda' - \lambda_0) = \sin p \sin D_m / \cos \phi' \quad (3-2)$$

p étant la colatitude magnétique du lieu, donnée par la formule

$$\text{tg } I_m = 2 \text{ cotg } p \quad (3-3)$$

La position du pôle géomagnétique virtuel moyen relatif à une formation géologique donnée s'obtient en appliquant sur la sphère terrestre un calcul analogue à celui développé par R.A. FISHER relatif à des points de la sphère; D et I sont remplacés par les coordonnées géographiques de chaque pôle.

La position moyenne n'est cependant pas déterminée avec exactitude, elle est soumise à une erreur. Chaque pôle peut subir des oscillations autour du pôle moyen et la zone polaire d'erreur est un cercle de rayon égal au paramètre α de R.A. FISHER (62).

3. - Trajectoire du pôle

L'emploi du pôle géomagnétique virtuel rend les résultats de différents continents comparables entre eux. En effet, si l'on mesure en des lieux différents les directions moyennes d'aimantation de formation géologiques de même âge, on peut en déduire pour chacun des continents où se trouvent ces lieux, les positions des pôles géographiques de l'époque.

En pratique il est cependant impossible de dater deux formations appartenant à deux continents différents, avec une précision suffisante. Pour cette raison on trace habituellement, pour chaque continent, une courbe montrant la trajectoire suivie par le pôle au cours des différentes périodes géologiques.

En l'absence de changement de position des continents les uns par rapport aux autres, on devrait obtenir la même trajectoire des pôles sur une surface de référence commune (la surface du Globe actuel), pour les différents continents. Dans le cas contraire, les continents auraient dérivé les uns par rapport aux autres.

Les résultats paléomagnétiques fournissent donc un test pour l'hypothèse du déplacement des continents.

DEUXIEME PARTIE

Résultats et interprétations

INTRODUCTION

Cette deuxième partie du mémoire sera consacrée successivement à l'exposé des résultats relatifs :

- aux formations volcaniques du Tertiaire et du Quaternaire
- et aux formations volcaniques crétacées.

Pour ne pas alourdir l'exposé, seuls les faits expérimentaux les plus importants seront décrits; mais on trouvera à l'annexe des détails sur :

- chaque site de prélèvement,
- les résultats des études pétrographiques des échantillons,
- les directions des aimantations naturelles,
- les intensités des aimantations spécifiques.

Pour la présentation des résultats, il est plus commode de considérer les régions séparément. Des tableaux résumeront les principales données paléomagnétiques obtenues et de la façon suivante :

- colonne 1 : nom du site de prélèvement
- colonnes 2 et 3 : coordonnées géographiques du site de prélèvement
- colonne 4 : nombre de blocs orientés prélevés
- colonnes 5 et 6 : directions des aimantations caractéristiques des sites
- colonne 7 : valeur du "cercle de confiance" α_{95} relatif aux directions d'aimantation
- colonnes 8 et 9 : coordonnées géographiques des pôles géomagnétiques virtuels

Un histogramme des intensités d'aimantation spécifiques sera également donné. Il sera ainsi possible d'apprécier les limites entre lesquelles varient les valeurs rencontrées. Les fortes valeurs peuvent résulter des effets de la foudre.

CHAPITRE IV

LE PALEOMAGNETISME DE QUELQUES FORMATIONS VOLCANIQUES

PLIO-QUATERNAIRES DE MADAGASCAR

L'étude paléomagnétique des formations volcaniques plio-quaternaires a comporté l'examen de 220 échantillons orientés répartis de la façon suivante :

- 27 dans le massif de la Montagne d'Ambre, dans le Nord
- 150 dans les régions volcaniques de Betafo-Antsirabe et de l'Itasy, dans le Centre
- 43 dans les formations d'Andreforefo et de Bevoay, sur la côte Ouest.

I. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DE LA MONTAGNE D'AMBRE (*)

1. - Géologie

Le Nord de Madagascar est caractérisé par trois phases volcaniques différentes : une première phase ancienne d'âge Turonien-Coniacien et deux phases récentes, aquitanienne et surtout quaternaire (90). Ces deux dernières phases ont donné naissance au massif de la Montagne d'Ambre.

Situé à l'extrême Nord de la Grande Ile, le massif de la Montagne d'Ambre occupe une surface subcirculaire de 85 km environ de diamètre. Au massif proprement dit, il faut rattacher la presqu'île du Bobaomby qui termine l'île vers le Nord (Fig. IV-1).

(*) Cette formation a été échantillonnée par J.P. KARCHE du laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Tananarive. Il en a également fait l'étude pétrographique des échantillons.

ESQUISSE GEOLOGIQUE DE L'EXTREME NORD DE MADAGASCAR

D'après H. BESAIRIE

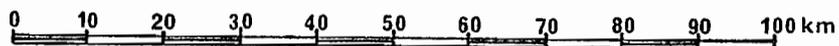
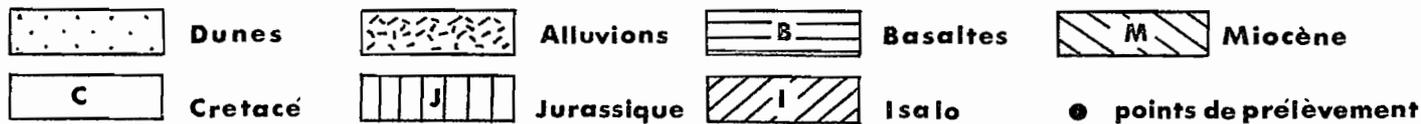
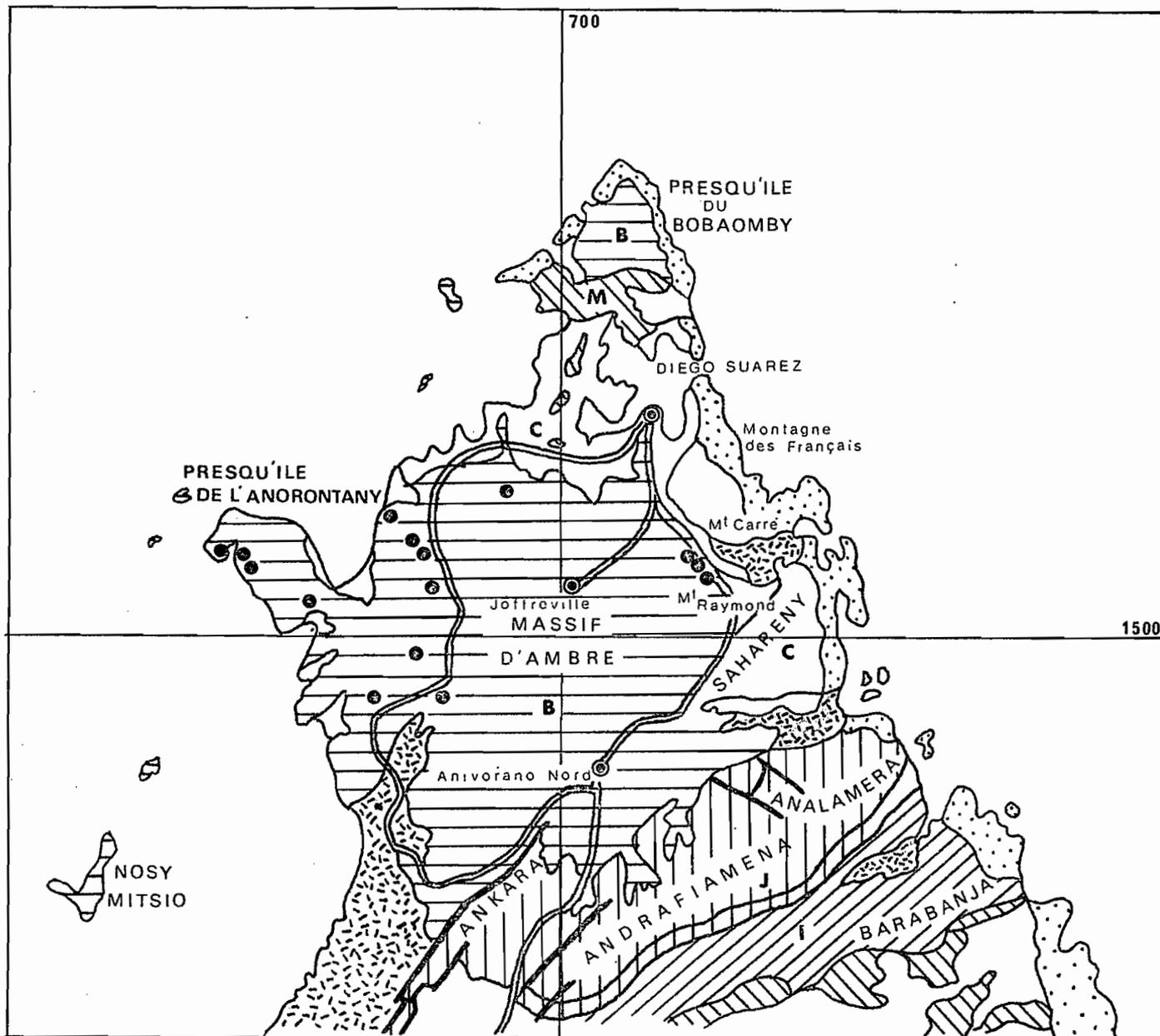


Fig. IV-1

Le massif est essentiellement basaltique et comprend trois aspects morphologiques bien distincts :

- une zone axiale élevée, d'altitude moyenne égale à 1000 mètres,
- en bordure Est et Sud, un plateau faiblement érodé,
- et à l'Ouest, un autre plateau profondément disséqué.

La zone axiale a un relief complexe, comportant de nombreux petits cônes et cratères, aujourd'hui devenus des lacs. C'est de là que sont venues les coulées d'aspect très frais que l'on observe au fond des diverses vallées de la bordure orientale. L'état de grande fraîcheur de ces coulées indique un âge très récent, probablement Quaternaire récent.

Le plateau situé en bordure Ouest de cette zone est beaucoup plus érodé, laissant parfois apparaître le substratum Crétacé. La presqu'île de l'Anorontany correspond vraisemblablement à un centre d'émission; mais aucun appareil n'est plus visible.

Dans le Bobaomby, à l'extrémité Nord, l'érosion est également avancée. Cette zone présente une analogie morphologique et pétrographique avec la presqu'île de l'Anorontany. C'est dans cette région que les épanchements sont datés avec précision grâce aux calcaires à microfaune aquitano-burdigalienne, dans lesquels sont interstratifiés les tufs qui accompagnent les coulées.

Au total 27 échantillons orientés ont été prélevés. Ils peuvent se répartir en trois groupes bien distincts :

- Miocène supérieur - Pliocène inférieur
- Pliocène supérieur - Pléistocène
- Quaternaire récent.

Le premier groupe d'échantillons provient de la presqu'île de l'Anorontany. Ce sont des trachytes calco-alcalins, à structure fluidale et des

basaltes à phénocristaux de plagioclases, pauvres en olivine.

Le deuxième groupe d'échantillons constitué par des basaltes à olivine à structure fluidale ou doléritique, provient des coulées du Nord et de l'Ouest.

Le troisième groupe d'échantillons provient des coulées de vallées situées à l'Est de la zone axiale du centre du massif. Ce sont des basaltes, souvent fluidaux, à augite, olivine et magnétite.

2. - Etude magnétique

La détermination des intensités d'aimantation spécifique des échantillons montre des valeurs généralement comprise entre 1 et $4 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g (Fig. IV-2).

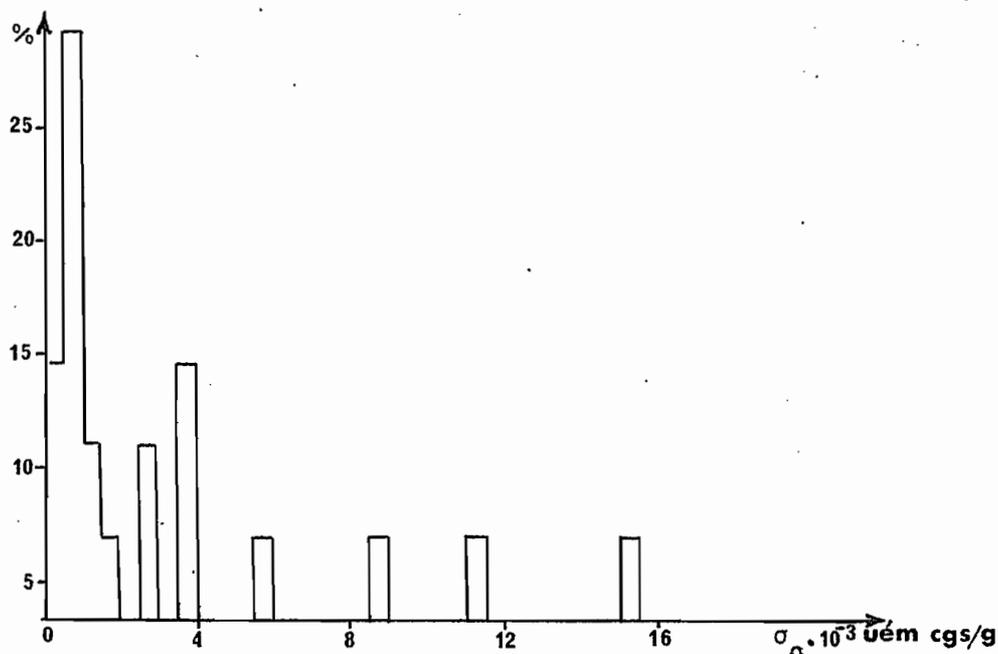


Fig. IV-2 Histogramme des intensités d'aimantation spécifique

Du point de vue directions d'aimantation leur étude permet de faire une distinction entre les différents groupes d'échantillons. Les échantillons du Quaternaire récent présentent des valeurs nettement mieux groupées que celles

des autres groupes (Fig. IV-3).

L'analyse des aimantations naturelles révèle trois catégories d'aimantation dont les courbes de variations sous l'action de champs alternatifs d'intensité croissante peuvent se ramener aux types b, d et e de la figure II-8.

Dans certains cas, l'aimantation rémanente naturelle s'est avérée moyennement "dure" et stable tout au long de la désaimantation. Le cas le plus fréquent est cependant celui où des aimantations secondaires sont superposées à l'aimantation stable. Mais il y a eu aussi des aimantations naturelles complexes "molles" et instables.

Les aimantations stables, naturelles ou déterminées après désaimantation partielle des échantillons, ont été considérées comme étant d'origine thermoraménente. La direction moyenne de l'aimantation caractéristique de chaque groupe d'échantillons, ainsi que la position des pôles géomagnétiques virtuels correspondants, sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV-1

	Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels					
	N	D	I	α_{95}	ϕ'	λ'
Groupe 1	4	354°	-45°	23°		
Groupe 2	9	187°	25°	8°	-82°	340°
Groupe 3	14	4°	-34°	5°	83°	197°

3. - Discussion

Ces résultats montrent que les coulées du Miocène supérieur (groupe 1) et celles du Quaternaire récent (groupe 3) sont aimantées dans le sens du champ magnétique terrestre actuel à Madagascar. Toutefois le nombre des échantillons du premier groupe est trop limité (un par point de prélèvement),

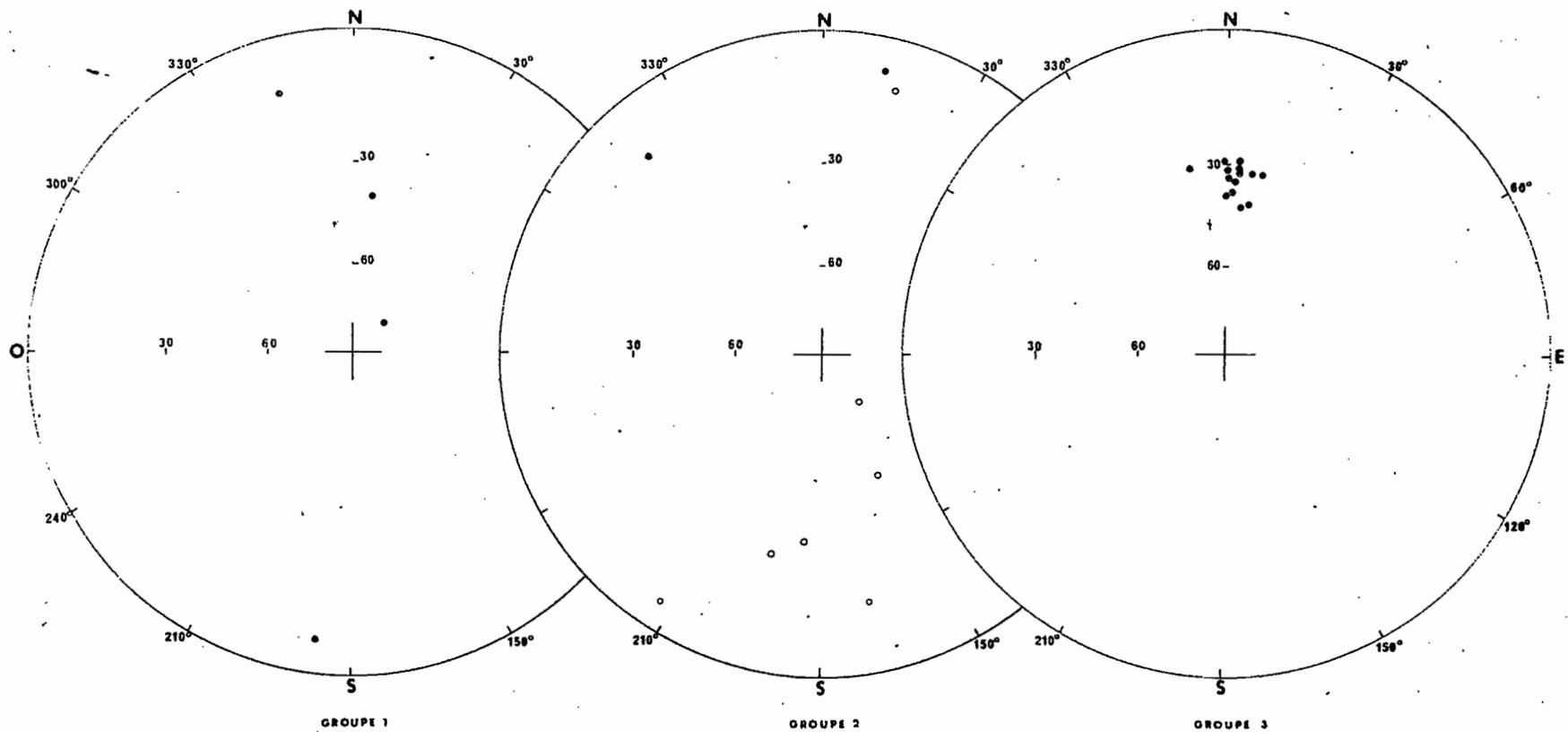


FIG. IV-3. - MONTAGNE D'AMBRE

Directions des aimantations rémanentes naturelles

*: Direction du champ magnétique terrestre actuel

●: Inclinaison négative (normale)

○: Inclinaison positive

ceci rend le résultat correspondant peu représentatif. Ce groupe sera exclu de la suite de la discussion.

Contrairement aux cas précédents, les coulées du Plio-pléistocène (groupe 2) ont une aimantation inversée. L'aimantation mesurée après "nettoyage" éventuel par champs alternatifs étant considérée comme thermorémanente, ce résultat amène à supposer qu'au moment du refroidissement de ces coulées, le champ magnétique terrestre était renversé par rapport à l'actuel.

Les directions observées pour les groupes 2 et 3 sont plus proches de la direction qu'aurait un champ dipolaire géocentrique axial que de celle du champ magnétique actuel à Diego-Suarez par exemple.

En ce qui concerne la position des pôles virtuels correspondants, les écarts observés avec le pôle géographique actuel sont de l'ordre de grandeur de l'erreur, de sorte qu'aucune conclusion précise ne peut être tirée. Ils sont voisins de ceux qui ont été obtenus à l'île de La Réunion pour les périodes de Brunhes et de Matuyama (2, 23, 24).

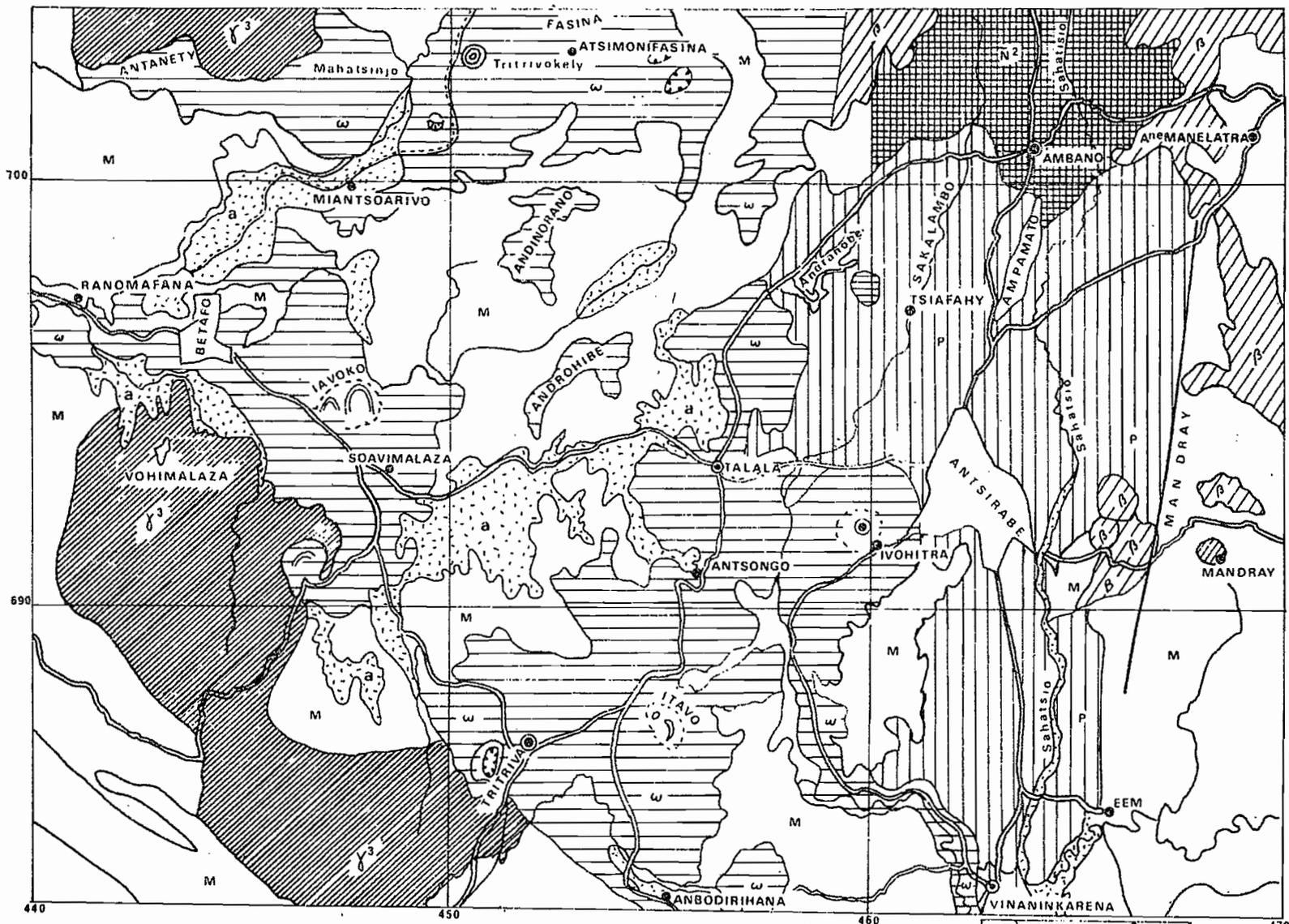
II. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DES LAVES DE BETAFO-ANTSIRABE

1. - Géologie

La région de Betafo-Antsirabe est située à 100 km environ au Sud-Ouest de Tananarive. Elle fait partie de l'important massif volcanique de l'Ankaratra dont elle occupe la partie méridionale. Une esquisse géologique de la région est donnée sur la figure IV-4.

Les manifestations volcaniques dans l'Ankaratra comprennent plusieurs phases. Selon A. LENOBLE (69), l'ordre chronologique des émissions serait le suivant :

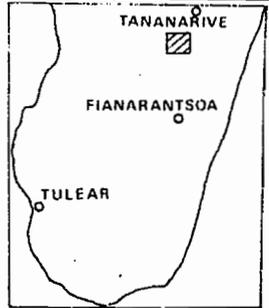
- éruptions trachytiques et rhyolitiques



- | | | | |
|--|---------------------------|--|---------------------|
| | Alluvions | | Granite de Vavavato |
| | Basanites
Basanitoides | | Migmatites |
| | Basaltes | | Lacustre récent |
| | Sites de prélèvement | | Lacustre ancien |

ESQUISSE GEOLOGIQUE
DE LA REGION DE BETAFO - ANT SIRABE
D'après H Besairie 1963

FIG IV - 4



- première éruption basaltique interstratifiée dans les parties moyenne et supérieure du Néogène
- éruptions andésitiques et basaltiques, au début du Pléistocène
- éruptions basanitiques puis ankaratritiques, recouvrant les dépôts pléistocènes
- éruptions basanitiques à formes parfaitement bien conservées.

Les dernières éruptions basanitiques sont datées du Quaternaire récent. La morphologie est en bon accord avec cette conclusion. Les appareils volcaniques frappent par leur grande fraîcheur. J. GUIGUES (57) compare les puy à cratères bien conservés de la région à ceux de la chaîne des puy français.

La région de Betafo-Antsirabe, qui est constituée presque exclusivement de basanites, est le témoin des dernières manifestations volcaniques dans le centre de Madagascar.

Une cinquantaine d'échantillons orientés, répartis sur dix sites, ont été prélevés dans cette région. L'étude pétrographique d'un certain nombre d'entre eux ne fait apparaître aucune différence essentielle entre les différents sites de prélèvement.

2. - Etude magnétique

L'étude des intensités d'aimantation montre quelques valeurs élevées (Fig. IV-5).

Les directions des aimantations rémanentes naturelles sont peu sensibles à l'action du champ magnétique du laboratoire. Les variations observées, après retournement des échantillons dans le champ magnétique terrestre pendant 5 à 6 semaines, ne dépassent que très rarement 5°.

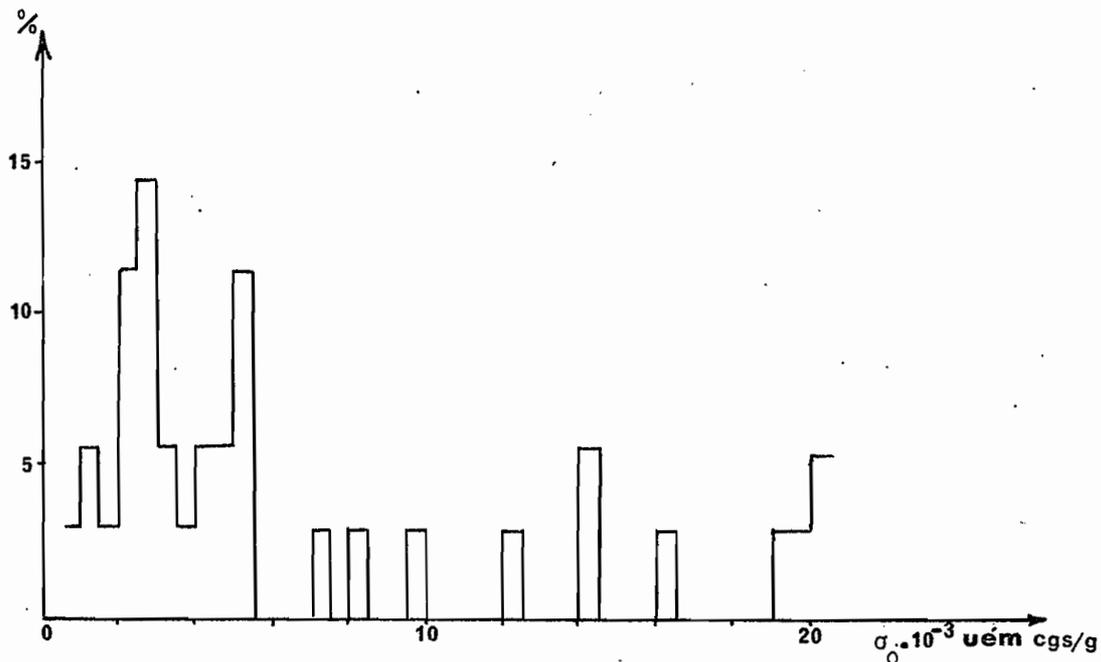


FIG. IV-5 Histogramme des intensités d'aimantation spécifique

Les directions observées sont cependant très dispersées. Certaines inclinaisons sont anormales (Fig. IV-6a).

L'analyse des aimantations montre que dans la plupart des cas la désaimantation introduit, dès sa phase initiale, une diminution sensible de l'aimantation.

Certaines courbes sont du type e de la figure II-8 et suggèrent la présence d'une forte proportion d'aimantation "molle" probablement du type A.R.I. qui masque entièrement l'aimantation stable. Elles ont été obtenues principalement avec des échantillons ayant montré une aimantation spécifique élevée. Ceci semble en accord avec l'hypothèse d'une aimantation du type ARI.

D'autres courbes révèlent des aimantations secondaires superposées à l'aimantation caractéristique de l'échantillon. Dans ce cas, les courbes de désaimantation présentent l'allure de la courbe d (Fig. II-8).

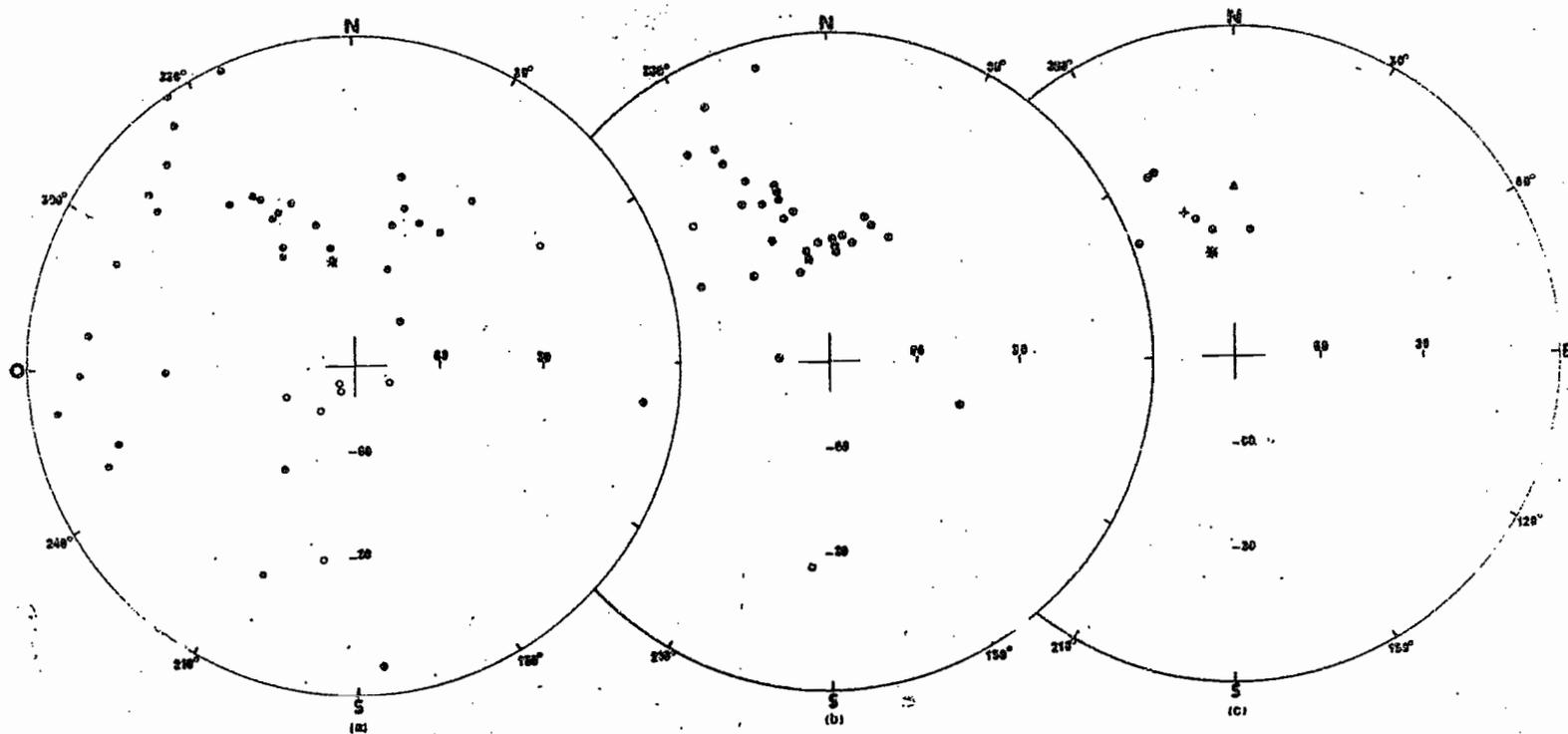


FIG. IV-6. - BETAFO-ANTSIRABE

Directions des aimantations

a) rémanentes naturelles

b) stables, caractéristiques des échantillons

c) caractéristiques des sites

* : Direction du champ magnétique terrestre actuel

+ : Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

▲ : Direction du champ dipolaire

Quelques aimantations naturelles se sont montrées stables au cours des phases successives de la désaimantation, les courbes se rangent alors suivant le type b indiqué sur la figure II-8.

Les aimantations stables caractéristiques des échantillons ont été interprétées comme étant d'origine thermorémnente. Leurs directions sont nettement mieux groupées que celles des aimantations naturelles (Fig. IV-6b). Elles se rapportent à 57 % des échantillons analysés.

J'ai retenu comme caractéristique de l'aimantation d'un site la moyenne des directions d'aimantation stable des blocs orientés prélevés dans ce site. Il a été ainsi possible de déterminer la direction moyenne d'aimantation de six sites (Fig. IV-6c).

Les directions moyennes sont indiquées dans le tableau suivant, ainsi que les coordonnées des pôles virtuels correspondants :

Tableau IV-2
Directions moyennes d'aimantation
et position des pôles virtuels

SITE				Aimantation			Pôle	
	ϕ'_0	λ'_0	N	D	I	α_{95}	ϕ'_c	λ'_c
Atsimonifasina	-19°46	46°56	5	Valeurs non significatives				
Miantsoarivo	-19°48	46°53	8	344°	-44°	13°	74°	292°
Ranomafana	-19°50	46°50	4	336°	-28°	12°	66°	325°
Tsiafahy	-19°50	47°01	5	350°	-48°	12°	77°	269°
Soavimalaza	-19°52	46°54	6	8°	-49°	6°	78°	192°
Mandray	-19°53	47°05	6	334°	-28°	9°	65°	323°
Ivohitra	-19°53	47°00	5	319°	-43°	26°	52°	301°
Antsongo	-19°53	46°59	5	Valeurs non significatives				
Vinaninkarena	-19°57	47°02	5	Valeurs non significatives				
Ambodirihana	-19°58	46°58	5	Valeurs non significatives				

3. - Discussion

Les résultats ci-dessus montrent que tous les sites retenus sont aimantés dans le sens actuel du champ magnétique terrestre à Madagascar. Si l'on considère la moyenne de ces directions comme étant représentative du champ magnétique au moment du refroidissement des roches, on obtient la direction suivante :

$$D = 340^{\circ} \quad I = -41^{\circ}$$

avec $k = 28,2$ et $\alpha_{95} = 13^{\circ}$.

Cette direction moyenne est différente de la direction du champ magnétique actuelle à Antsirabe, dont elle est séparée par un écart angulaire de 1^{er} ordre de 15° .

La position du pôle géomagnétique virtuel moyen a pour coordonnées :

latitude Nord 72°

longitude Est 300°

la valeur du rayon du "cercle d'erreur" est de 14° .

Elle est décalée par rapport au pôle Nord géographique actuel.

III. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DU MASSIF VOLCANIQUE DE L'ITASY

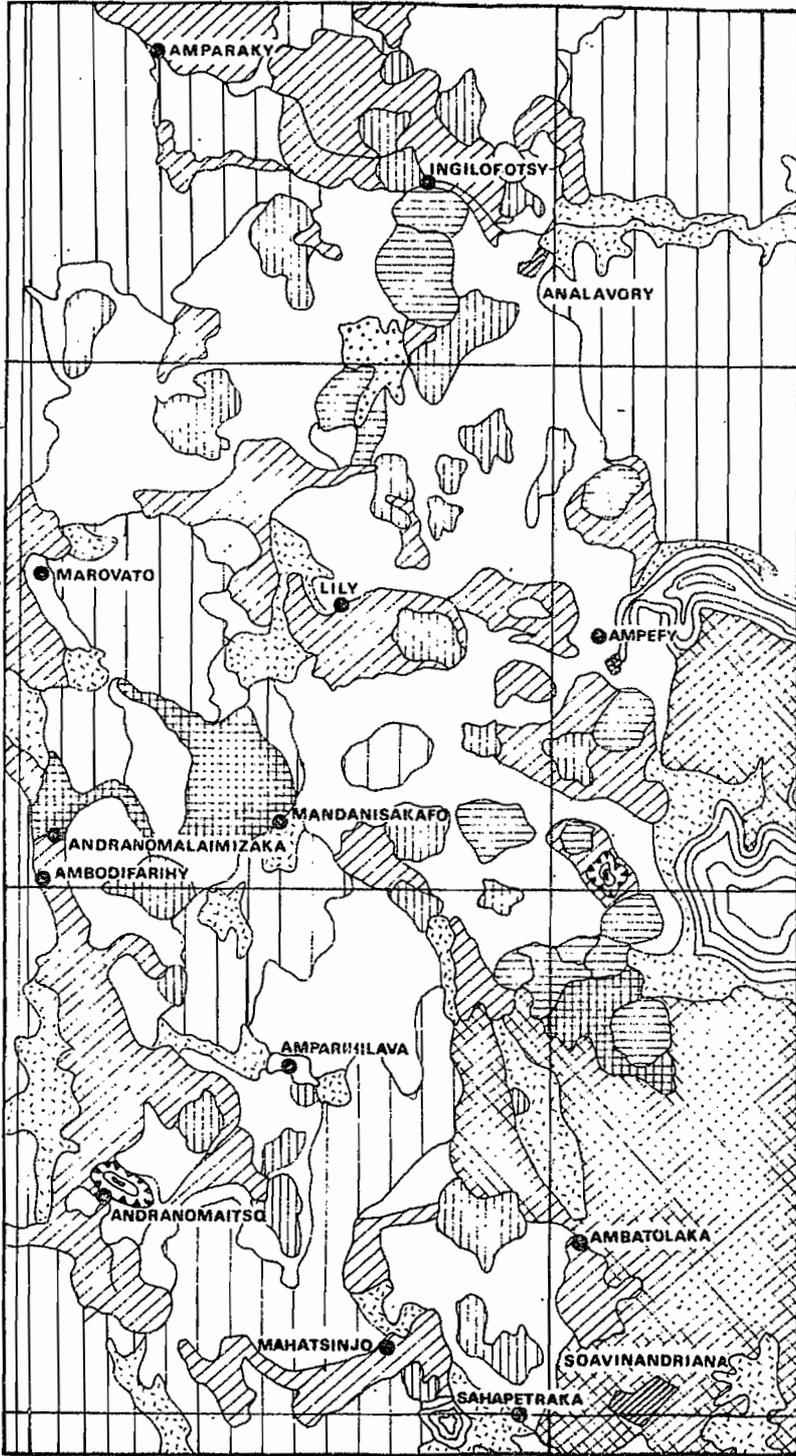
1. - Géologie

La région de l'Itasy est située à 60 km environ à l'Ouest-Sud-Ouest de Tananarive.

Le massif volcanique de l'Itasy commande le relief de cette partie des Hauts Plateaux malgaches par ses multiples puys et ses nombreux cônes (Fig. IV-7).

Les appareils volcaniques y sont également très frais, comme dans la région de Betafo-Antsirabe. Ils ont des morphologies diverses, mais ont

ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA REGION DE L'ITASY



-  ALLUVIONS
-  PROJECTIONS STROMBOLIENNES SCORIES BASANITIQUES
-  BASANITES
-  ORDANCHITES
-  TRACHYPHONOLITES
-  COULEES ET PROJECTIONS NON DIFFERENCIEES BASANITOIDES
-  DOMES TRACHYTIQUES
-  GRANITE MIGMATITIQUE
-  MIGMATITES
-  POINT DE PRELEVEMENT

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 km

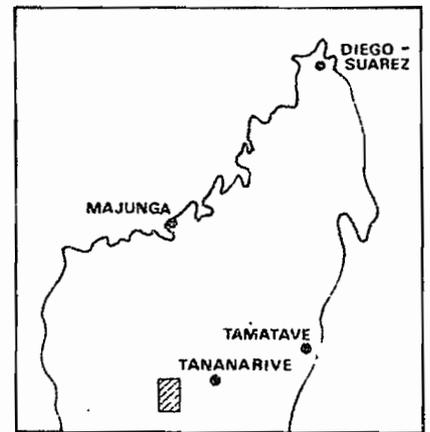


FIG. IV - 7

cependant un point commun, c'est celui de n'avoir émis que de faibles quantités de matériaux.

L'activité volcanique dans l'Itasy est caractérisée par des éruptions en plusieurs périodes, probablement peu éloignées les unes des autres, chacune n'ayant fourni que des volcans de brève activité.

L'ordre chronologique des éruptions serait le suivant :

- éruptions trachytiques
- éruptions basanitiques anciennes et de limburgites
- éruptions ordanchitiques
- éruptions basanitiques récentes.

L'âge de ces éruptions n'est pas défini avec précision. On sait cependant que les dernières éruptions sont antérieures aux dépôts à faune sub-fossiles (Hippopotames, Lémuriens, Aepyornis) d'Ampasimbazimba, ou sont de même âge qu'eux (70).

Les deux éruptions basanitiques ne peuvent se distinguer entre elles que par la seule différence d'état de conservation des appareils et des coulées.

Un temps assez long se serait écoulé entre les deux premières éruptions, les autres au contraire seraient à peu près contemporaines.

Bien qu'il ne soit pas possible de donner un âge absolu à ce massif, on admet, par comparaisons morphologiques avec les autres massifs volcaniques de Madagascar, un âge Pléistocène (22, 90).

Plus de quatre vingt dix échantillons orientés ont été prélevés dans treize sites répartis aussi largement que possible sur toute l'étendue du massif.

Plusieurs de ces échantillons ont été examinés en lame mince. Aucun faciès de trachyte ou d'ordanchite n'a été observé. Les échantillons sont constitués par des basanites ou basanitoïdes à tendance variable vers les limburgites, en particulier dans les cinq sites suivants :

Sahapetraka, Amparaky, Mahatsinjo, Andranomalaimizaka et Amparihilava.

2. - Etude magnétique

L'analyse des aimantations rémanentes naturelles par le procédé habituel de désaimantation par champs alternatifs d'intensité croissante, permet de définir trois types d'aimantation :

- aimantation "molle" et instable, l'aimantation stable, caractéristique de l'échantillon n'a pu être définie. Les courbes de désaimantation se rangent suivant le type e de la figure II-8.
- aimantation "douce" comportant une fraction stable, la variation de l'intensité d'aimantation en fonction du champ alternatif est alors du type d de la même figure.
- aimantation moyennement "dure" mais dont la direction ne subit aucun changement significatif tout au long de la désaimantation (courbe b de la figure II-8).

Les aimantations stables, caractéristiques des échantillons, ont été considérées comme étant d'origine thermorémanente. Leurs directions sont indiquées sur la figure IV-8a. Elles se rapportent à 48 % des échantillons prélevés.

La moyenne des directions des aimantations stables correspondant à des blocs prélevés dans un même site a été retenue comme caractéristique de l'aimantation de ce site. Il n'a pas été possible cependant de déterminer cette direction pour tous les sites étudiés, certains n'ayant présenté aucun échantillon porteur d'aimantation stable (Fig. IV-8b).

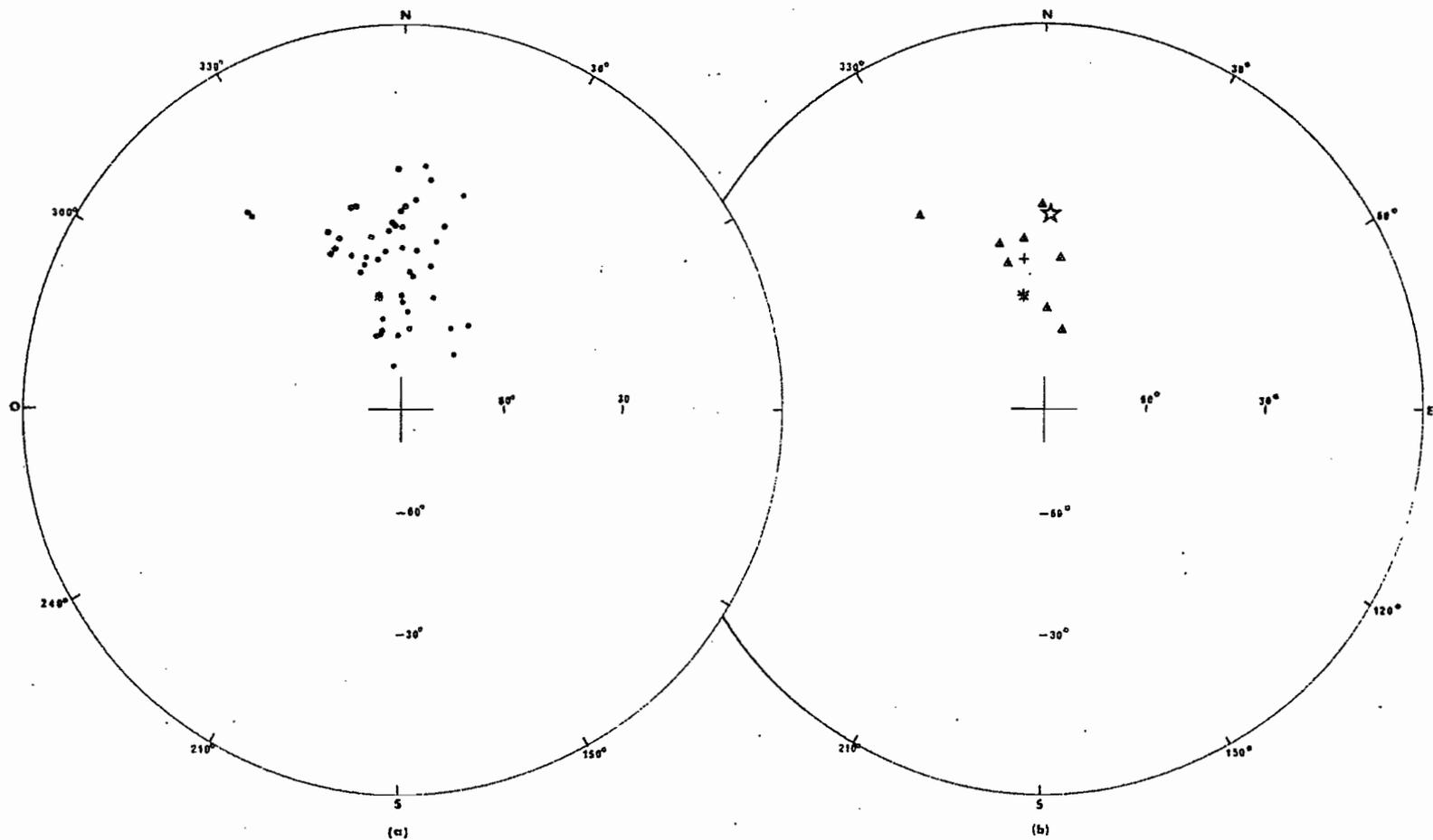


FIG. IV-8. - ITASY

Directions des aimantations caractéristiques

a) des échantillons

b) des sites

* : Direction du champ magnétique terrestre actuel

+ : Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

☆ : Direction du champ dipolaire

Tableau IV-3

Directions moyennes d'aimantation et positions
des pôles virtuels

SITE	ϕ_0	λ_0	N	Aimantation			Pôle	
				D	I	α_{95}	ϕ'	λ'
Amparaky*	-18°56	46°39	5	352°	-42°	8°	81°	280°
Ingilofotsy	-18°57	46°52	4	6°	-47°	9°	79°	196°
Rivière Lily	-19°01	46°41	8	12°	-66°	11°	58°	211°
Ampefy	-19°02	46°44	8	345°	-48°	2°	73°	278°
Marovato	-19°03	46°37	3	Valeurs non significatives				
Mandanisakafo	-19°04	46°37	10	1°	-61°	66°	67°	224°
Andranomalaimizaka*	-19°04	46°38	24	Valeurs non significatives				
Ambodifarihy	-19°04	46°41	7	Valeurs non significatives				
Amparihilava *	-19°06	46°40	4	Valeurs non significatives				
Andranomaitso	-19°08	46°38	14	359°	-34°	5°	89°	339°
Mahatsinjo *	-19°09	46°42	4	Valeurs non significatives				
Ambatolaka	-19°09	46°44	4	344°	-43°	9°	74°	293°
Sahapetraka *	-19°10	46°43	3	326°	-28°	16°	57°	318°

Dans les sites marqués d'un astérisque, les roches ont une tendance vers les limburgites.

3. - Discussion

L'examen de ces résultats montre qu'un nombre assez important de sites ne comporte pas d'aimantation caractéristique. Parmi ces sites, trois correspondent à des roches plus ou moins limburgitiques. Ceci tend à montrer que ces dernières sont plus instables du point de vue magnétique que les basanites franches.

Cependant aucune différence systématique n'apparaît dans les directions d'aimantation des sites retenus. Toutes les aimantations sont acquises dans le sens du champ magnétique actuel, indiquant un comportement normal du champ magnétique ancien.

La moyenne des directions de ces aimantations devrait représenter la direction du champ magnétique régional au moment du refroidissement des roches étudiées. Cette valeur moyenne est :

$$D = 351^{\circ} \quad I = -47^{\circ}$$

avec $k = 25,1$ et $\alpha_{95} = 11^{\circ}$

Cette direction n'est pas très différente de celle du champ magnétique actuel à Tananarive avec laquelle elle ne présente qu'une distance angulaire de 8° (Fig. IV-18b).

Dans le tableau précédent sont également indiquées les positions des pôles virtuels correspondant aux sites retenus. Leur moyenne devrait représenter la position du pôle géomagnétique virtuel relatif à la région; elle a pour coordonnées :

Latitude Nord 77°

Longitude Est 260°

la valeur du rayon du "cercle d'erreur" est de 12° .

L'écart angulaire entre ce pôle et le pôle Nord géographique actuel est du même ordre de grandeur que l'erreur, de sorte qu'aucune conclusion précise ne peut être tirée.

IV. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DES FORMATIONS VOLCANIQUES D'ANDREFOREFO ET DE BEVOAY

1. - Géologie

Un certain nombre de petits pointements volcaniques ont été reconnus au milieu de la grande carapace sableuse de la côte occidentale, principalement entre les parallèles de Manombo et de Befandriana ($X = 350$ et $X = 450$). Des sondages récents effectués dans la région permettent de leur attribuer un âge Pliocène récent (12).

Les deux formations envisagées ici sont celles d'Andreforefo et de Bevoay, situées respectivement à 80 et 175 km environ au Nord de Tuléar. Les roches affleurent sur une faible étendue.

Au total 43 échantillons orientés ont été étudiés (dix en provenance d'Andreforefo et 33 de Bevoay). L'étude pétrographique, par examen en lame mince de plusieurs échantillons, montre que dans l'une et l'autre formation la roche est constituée par du basalte à olivine et augite, présentant une structure microlitique. Elle est fraîche.

2. - Etude magnétique

L'histogramme de la figure IV-9 indique des valeurs d'aimantation spécifique, généralement inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g.

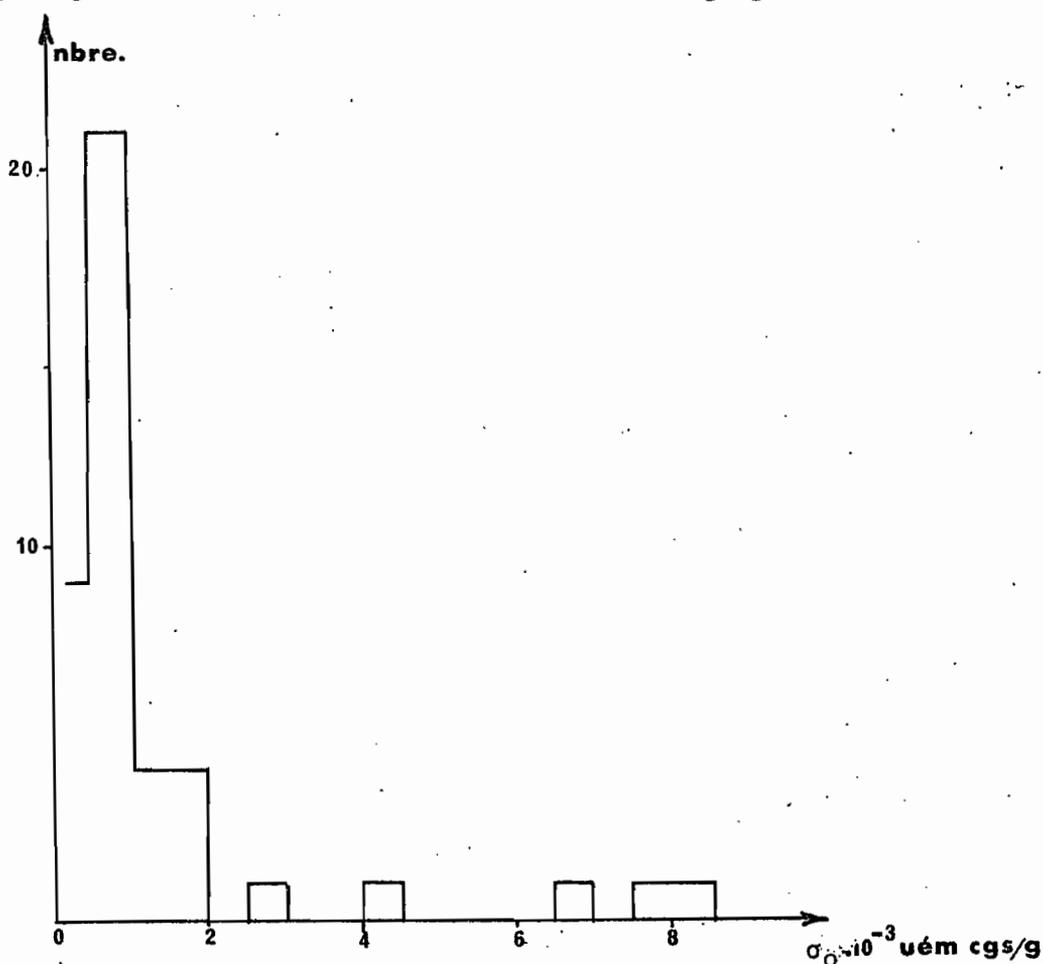


Fig. IV-9 Histogramme des intensités d'aimantation spécifique.

Au point de vue directions d'aimantation, leur examen révèle que les échantillons en provenance d'Andreforefo montrent des valeurs caractérisées par une large dispersion. Par contre, ceux de Bevoay présentent des directions parfaitement bien groupées (Fig. IV-10).

Les deux groupes d'échantillons ont cependant un point commun : les directions de leurs aimantations naturelles varient peu sous l'action du champ magnétique terrestre actuel. Le retournement des échantillons dans ce champ n'entraîne aucun changement important dans les directions d'aimantation.

L'analyse des aimantations a été faite en soumettant tous les échantillons à l'action de champs alternatifs de plus en plus intenses.

Pour Bevoay, les courbes de désaimantation obtenues sont caractéristiques d'une thermorémanence (courbe a de la figure II-8). Les aimantations naturelles se sont montrées très peu sensibles à l'action du champ alternatif. Les vecteurs aimantation correspondants sont restés fixes d'un bout à l'autre de l'opération.

En ce qui concerne les échantillons relatifs à Andreforefo, lorsque les aimantations naturelles sont soumises à la désaimantation progressive, les courbes obtenues sont du type c et e indiqué sur la figure II-8.

L'augmentation initiale de l'aimantation est toujours accompagnée d'une rotation du vecteur aimantation correspondant. La poursuite de la désaimantation montre cependant que les directions tendent vers la direction de l'aimantation la plus stable (Fig. IV-10).

Certaines aimantations naturelles ne montrent aucune fraction stable et l'aimantation caractéristique des échantillons n'a pas pu être définie. Les courbes de désaimantation de type analogue à celui de la courbe e sont

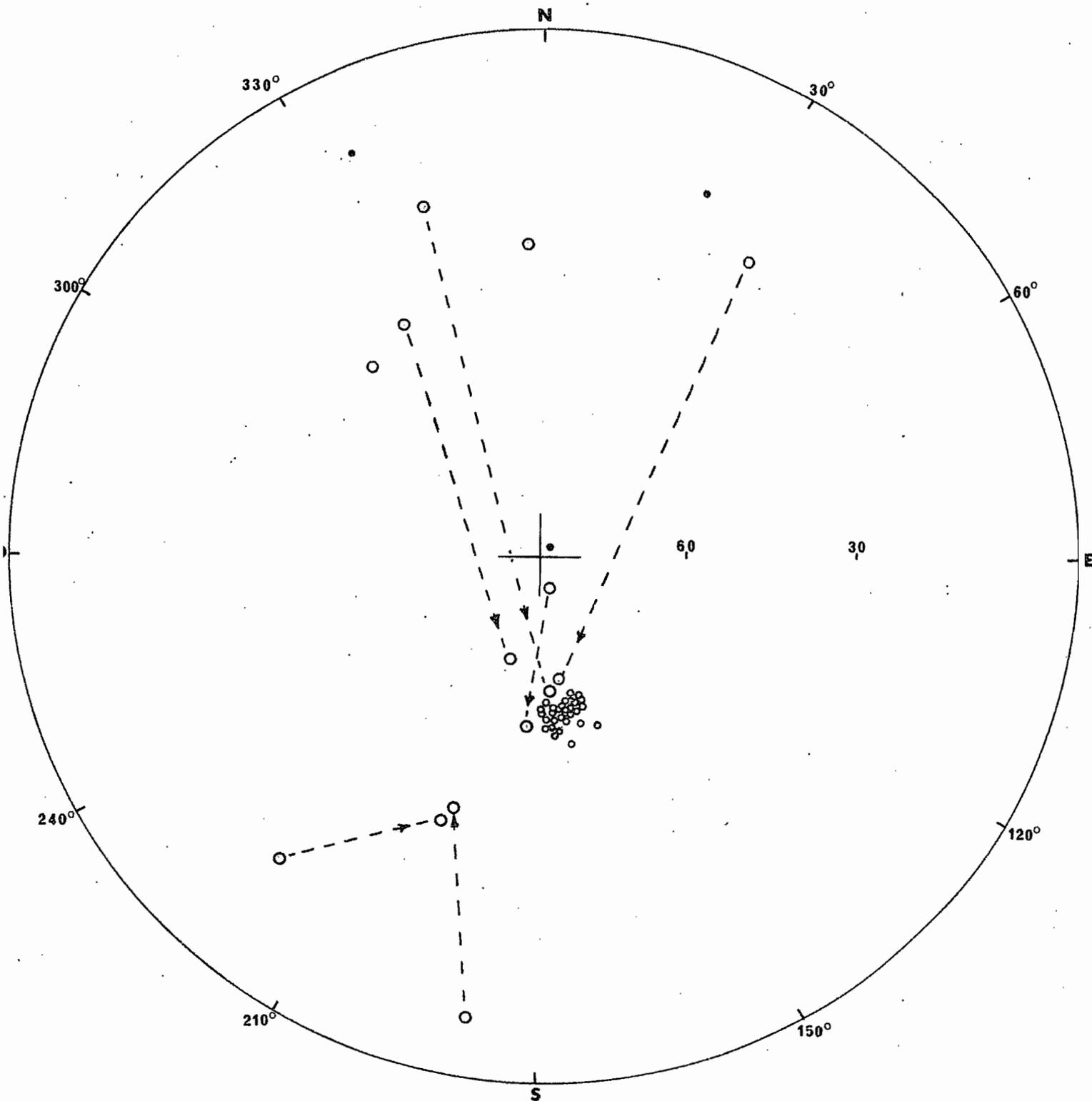


Fig. IV.10 ANDRÉFOREFO - BEVOAY .- DIRECTIONS D'AIMANTATION AVANT ET APRES DESAIMANTATION.

- ○ Directions relatives à des échantillons appartenant à Andreforefo ayant des inclinaisons négatives ou positives.
- ○ Directions relatives à des échantillons appartenant à Bevoay.

caractéristiques des échantillons ayant montré des aimantations spécifiques élevées. La comparaison avec les échantillons prélevés à Bevoay suggère qu'Andreforefo aurait pu être foudroyé. Dans ces conditions, l'aimantation naturelle peut comporter une forte composante d'aimantation du type A.R.I. masquant l'aimantation stable.

Le tableau suivant indique les directions moyennes d'aimantation des deux formations étudiées, ainsi que les coordonnées des pôles virtuels correspondants :

Tableau IV-4

Directions moyennes d'aimantation
et position des pôles virtuels

SITE	ϕ_0	λ_0	N	D	I	α_{95}	ϕ'	λ'
Andreforefo	-22°41	43°37	10	181°	63°	8°	-68°	41°
Bevoay	-21°52	43°53	33	172°	57°	1°	-73°	66°

3. - Discussion

Chacune des formations étudiées, n'ayant pu être échantillonnée que sur une faible étendue, les résultats obtenus peuvent ne pas paraître suffisamment représentatifs. Néanmoins, on peut remarquer que les aimantations sont inversées par rapport au champ magnétique terrestre actuel.

V. - DISCUSSION SUR L'ENSEMBLE DES RESULTATS PALEOMAGNETIQUES RELATIFS AUX FORMATIONS PLIO-QUATERNAIRES

Le tableau IV-5 ci-dessous résume l'ensemble des résultats exposés dans les paragraphes précédents :

Tableau IV-5

Résumé des résultats paléomagnétiques relatifs
aux formations plio-quaternaires

REGION	ϕ_0	λ_0	Age	N	D	Aimantation			Pôle		
						I	k	α_{95}	ϕ'	λ'	α_{95}
Montagne d'Ambre 3	-12°5	49°1	Qr	7	4°	-34°	157,9	5°	83°	197°	5°
Betafo Antsirabe	-19°9	47°0	Qr	6	341°	-41°	28,2	13°	72°	300°	14°
Itasy	-19°1	46°7	Qp	8	351°	-47°	25,1	11°	77°	260°	12°
Montagne d'Ambre 2	-12°5	49°0	PP	5	187°	25°	88,9	8°	82°	160°	5°
Bevoay	-21°9	43°9	Pr	1	172°	57°	-	-	73°	246°	
Andreforefo	-22°7	43°6	Pr	1	181°	63°	-	-	68°	221°	
Montagne d'Ambre 1	-12°5	48°9	Ms	3	354°	-45°	peu représentatif				

- Qr : Quaternaire récent
- Qp : ~~Quaternaire~~-pléistocène
- PP : Plio-pléistocène
- Pr : Pliocène récent
- Ms : Miocène supérieur

L'étude plus précise du Miocène supérieur nécessite de nouvelles recherches, le résultat indiqué n'étant pas assez représentatif par suite du nombre limité des échantillons considérés. Par conséquent, cette période ne sera pas envisagée dans la discussion qui va suivre.

I. - Directions d'aimantation

Les directions indiquées dans le tableau IV-5 se rapportent à des aimantations supposées d'origine thermorémanente. Elles doivent par conséquent correspondre aux champs magnétiques anciens. La présence de deux aimantations à caractères opposés suggère l'existence de deux sens différents du champ magnétique terrestre au moment du refroidissement des formations étudiées.

La comparaison avec l'échelle des inversions du champ magnétique terrestre au cours des quatre derniers millions d'années permet de supposer que les formations à aimantations normales de la Montagne d'Ambre (groupe 3), de Betafo-Antsirabe et probablement de l'Itasy se seraient mises en place pendant une période de champ normal du Quaternaire, pendant la période de Brunhes par exemple. La même comparaison pour les formations de la Montagne d'Ambre (groupe 2) d'une part, et celles d'Andreforefo et de Bevoay de l'autre, suggère que les éruptions correspondantes se seraient produites pendant l'une des intervalles de temps à champ inverse, par exemple pendant les périodes de Matuyama et de Gilbert ou l'un des "événements" parsemant la période de Gauss (2, 29, 38).

Une estimation de la direction du champ magnétique pendant une partie du Quaternaire peut être obtenue par la moyenne des directions d'aimantation de la Montagne d'Ambre 3, de Betafo-Antsirabe et de l'Itasy. De même, la moyenne des directions d'aimantation relatives aux trois autres formations doit représenter la direction du champ magnétique pendant une période du Plio-pléistocène.

Les calculs donnent les résultats suivants :

- Pour la période du Quaternaire récent :

$$D = 352^{\circ} \quad I = -41^{\circ}$$

avec N (nombre de régions étudiées) = 3 $k = 53,0$ $\alpha_{95} = 17^{\circ}$

- Pour la période du Plio-pléistocène :

$$D = 182^{\circ} \quad I = 49^{\circ}$$

avec $N = 3$ $k = 15,2$ $\alpha_{95} = 33^{\circ}$

Les déclinaisons ainsi obtenues sont voisines du Nord vrai en faisant abstraction du signe pour le Plio-pléistocène. Les inclinaisons sont légèrement supérieures à celles qu'aurait un champ magnétique engendré par un dipôle géocentrique axial à la latitude de Tananarive, par exemple.

Cependant, compte tenu des erreurs, l'écart angulaire qui existe entre chacune de ces directions et la direction d'un champ dipolaire géocentrique axial, à la latitude de Tananarive par exemple, n'est pas significatif.

2. - Pôles virtuels

Aucune distinction précise entre les âges des diverses formations étudiées ne peut être faite, mais la classification adoptée précédemment pour les directions d'aimantation demeure valable en ce qui concerne les pôles virtuels.

Dans ces conditions, on obtient les coordonnées suivantes des pôles géomagnétiques virtuels moyens :

- Quaternaire :

$$\text{Latitude Nord } 80^{\circ} \quad \text{Longitude Est } 269^{\circ} \quad \alpha_{95} = 16^{\circ}$$

- Plio-pléistocène :

$$\text{Latitude Nord } 76^{\circ} \quad \text{Longitude Est } 222^{\circ} \quad \alpha_{95} = 18^{\circ}$$

Ces deux pôles virtuels sont à 10° d'arc seulement l'un de l'autre.

Cette distance n'est pas significative et le résultat peut être interprété

par l'absence de mouvements importants de Madagascar entre ces deux périodes. La comparaison avec le pôle géographique actuel suggère en outre que la Grande Ile aurait occupé la même position qu'actuellement. Toutefois, l'imprécision avec laquelle les pôles sont définis ne permet pas de l'affirmer. L'étude de nouvelles formations paraît nécessaire pour mieux connaître la position qu'aurait pu avoir Madagascar.

3. - Essai de corrélation avec les pôles virtuels des pays encadrant l'Océan

Indien

Les pôles virtuels ainsi déterminés peuvent être utilement comparés avec les pôles d'âges comparables des autres pays qui entourent l'Océan Indien.

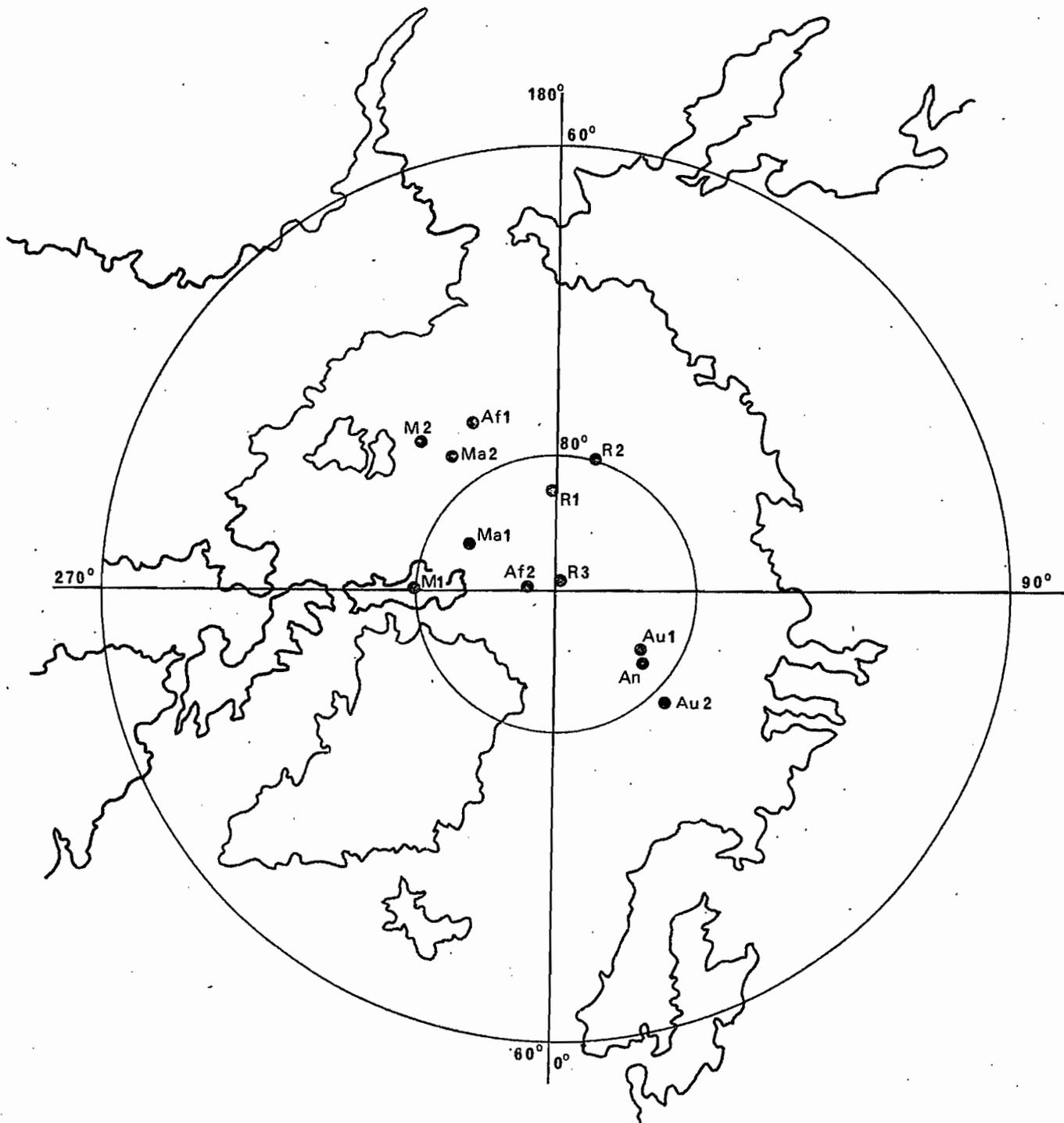
La comparaison peut être effectuée avec les pôles indiqués sur la figure IV-11 et dont les coordonnées sont données dans le tableau IV-6.

Tableau IV-6

Positions des pôles virtuels de divers pays de l'Océan Indien pour les périodes récentes

PAYS	AGE	FORMATION		ϕ'	λ'	α_{95}	REFERENCE
Afrique	Qp	Rift valley Kenya	Af ₁	77°	207°	4°	(75)
	1,9 MA	Olduvai Tanzanie	Af ₂	88°	268°	6°	(53-54)
Antarctique	Qr	South Shetland Isl	An	82°	51°	6°	(62)
Australie	Tp-Qr	Newer Volcanics	Au ₁	83°	56°	8°	(75)
	T-Qr	Heard Island	Au ₂	79°	45°	10°	(63)
Madagascar	Qr	M. Ambre 3 Bfo-Itasy	M ₁	80°	269°	16°	} cette étude
	Tp-Qp	M. Ambre 2 Bevoay-Afo	M ₂	76°	222°	18°	
Ile Maurice	0,17-0,7 MA	Volcanics 13 sites	Ma ₁	83°	242°	4°	(71)
	1,96-3,4 MA	Volcanics 10 sites	Ma ₂	78°	217°	13°	(71)
Ile de la Réunion	0,1-0,6 MA	Groupe 1	R ₁	83°	184°	5°	(23-24)
	1,0-1,3 MA	Groupe 2	R ₂	80°	165°	23°	(23-24)
	1,9-2,0 MA	Groupe 3	R ₃	89°	172°	6°	(23-24)

Dans ce tableau Qr, Qp ont les mêmes significations que dans le tableau IV-5. Tp signifie Pliocène et T Tertiaire.



POSITION DES POLES VIRTUELS RELATIFS A DIVERS PAYS DE L'OCEAN INDIEN POUR LE TERTIAIRE SUPERIEUR ET LE QUATERNAIRE.

Afrique	Af2 : 1,9MA; Af1: Qp.
Antartique	An : Qr
Australie	Au2 : T-Qr; Au1: Tp-Qr
Madagascar	M2 : Tp-Qp; M1 : Qr
Ile Maurice	Ma2 : 1,96 - 3,4 Ma1: 0,17 - 0,7MA.
Ile de la Réunion	R3 : 1,9 - 2,0MA; R2: 1,0 - 1,3MA; R1 : 0,1 - 0,6 MA.

La comparaison entre ces différents pôles peut être faite en calculant les distances angulaires qui les séparent les uns des autres.

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV-7

Distances angulaires entre les pôles virtuels du tableau IV-6

	M ₁	M ₂	Af ₁	Af ₂	An	Au ₁	Au ₂	Ma ₁	Ma ₂	R ₁	R ₂	R ₃
M ₁												
M ₂	10°											
Af ₁	12°	3°										
Af ₂	8°	12°	12°									
An	17°	21°	<u>21°</u>	10°								
Au ₁	16°	20°	<u>19°</u>	9°	1°							
Au ₂	19°	25°	<u>24°</u>	12°	3°	4°						
Ma ₁	5°	7°	8°	5°	<u>15°</u>	<u>14°</u>	<u>18°</u>					
Ma ₂	10°	2°	2°	11°	<u>20°</u>	19°	<u>23°</u>	6°				
R ₁	12°	9°	7°	7°	<u>14°</u>	12°	<u>17°</u>	7°	7°			
R ₂	16°	11°	9°	10°	15°	14°	18°	11°	10°	4°		
R ₃	10°	13°	<u>12°</u>	2°	9°	7°	12°	7°	11°	6°	9°	

Dans le tableau précédent, les nombres soulignés indiquent que la distance angulaire entre les deux pôles considérés est supérieure (ou tout au moins égale) à la somme des valeurs de l'angle α correspondant à ces pôles.

Si l'on considère que l'écart entre deux pôles est significatif lorsque leur distance angulaire est supérieure à la somme des rayons de leur "cercle d'erreur" respectif, on peut dégager de l'examen des résultats ci-dessus la remarque suivante :

Les pôles relatifs à l'Australie et l'Antarctique s'écartent du groupe formé par ceux correspondant à l'Afrique, Madagascar, l'île Maurice et l'île de La Réunion.

Pour expliquer un tel écart, on peut envisager les hypothèses suivantes :

a) Il existe une différence entre les positions géographiques relatives actuelles de ces pays et celles qu'ils auraient eues au Plio-pléistocène et au Quaternaire récent.

b) Le champ magnétique terrestre n'était pas dipolaire au moment où les formations envisagées se sont mises en place et l'influence des termes non dipolaires n'a pas été éliminées dans le champ moyen.

c) Il existe une différence dans l'âge des formations considérées.

a) La première hypothèse nous amène à envisager un déplacement relatif de ces pays de plus de 10° . Ceci nécessite, en supposant un mouvement uniforme et compte tenu de la période concernée (de l'ordre de 2 MA), une vitesse de déplacement relatif de plus de 50 cm par an, c'est à dire plus de 10 fois le taux maximum de l'expansion actuelle des fonds océaniques (26). Cette hypothèse ne semble donc pas acceptable.

b) L'écart observé entre les deux groupes peut s'expliquer par l'influence des termes non dipolaires du champ magnétique terrestre; les formations étudiées étant peu nombreuses et irrégulièrement réparties dans le temps, il est concevable que ces termes n'aient pas été éliminés dans la valeur moyenne retenue comme caractéristique du champ.

c) La troisième hypothèse, compte tenu de la jeunesse de toutes les formations considérées, ne donne pas une explication plus satisfaisante de l'écart observé que la première hypothèse, si les résultats correspondaient réellement à un champ dipolaire. Par contre, si les composantes non dipolaires du champ magnétique terrestre ont une influence dans les résultats, on conçoit qu'elles aient pu jouer différemment à des périodes correspondants à des âges différents.

C H A P I T R E V

LE PALEOMAGNETISME DES PRINCIPALES FORMATIONS VOLCANIQUES

~~666~~-----

CRETACEES DE MADAGASCAR

I. - INTRODUCTION

Les recherches paléomagnétiques sur les formations volcaniques crétacées de Madagascar en permettant de connaître la position de l'axe du-dipôle correspondant au champ magnétique terrestre ancien, sont susceptibles de fournir des indications sur la dérive éventuelle de la Grande Ile depuis cette époque.

L'étendue et le nombre des formations étudiées permettent de considérer les résultats obtenus comme étant suffisamment représentatifs. Les formations ayant fait l'objet de recherches proviennent de plusieurs régions de l'île, principalement le long des côtes et dans le Sud. Au total 430 échantillons orientés ont été examinés. Ils ont été prélevés dans 72 sites différents, appartenant à 6 grandes régions volcaniques.

Sur la côte Est, les recherches ont porté successivement sur les formations filoniennes qui s'étendent entre Fénérive et Brickaville, ainsi que sur la grande bande volcanique qui longe le littoral sur 450 km, depuis Mahanoro, jusqu'à Vangaindrano.

Dans le Sud, le massif volcanique de l'Androy a fourni des éléments de recherche appréciables.

Sur la côte Ouest, les formations étudiées s'étendent de la région de Majunga à celle de Tuléar et comprennent de grands ensembles volcaniques,

comme le groupe volcanique du Mangoky-Onilahy, les plateaux basaltiques du Mailaka et de l'Antanimena.

II. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DES FILONS DOLERITIQUES DE LA COTE CENTRE NORD-EST

1. - Géologie

Sur la zone bordière de la côte Centre Nord-Est, on rencontre de nombreux filons doléritiques ayant généralement une direction subméridienne, parallèle à la côte. Ils sont de puissance variable, s'épaississant par endroits pour former des amas (13, 61, 90).

Au Nord, les filons se trouvent dans les migmatites qui bordent la côte. Ils sont également fréquents dans le bassin du bas Maningory dans la région de Fénériverive (Fig. V-1).

Un premier groupe d'échantillons provient de cette zone. Ce sont des dolérites sans olivine, à labrador et augite. Leur structure est ophitique ou poecilitique. On rencontre également des roches trachytiques et andésitiques.

Au Sud de l'Onibe, les filons sont encore fréquents, en particulier dans les régions de l'Ivoloina et du bas Ivondro. Un second groupe d'échantillons orientés a été prélevé dans ces régions. Il s'agit également de dolérites dépourvues d'olivine, ayant une structure ophitique ou microlitique.

Plus au Sud, les formations filoniennes restent abondantes, notamment dans les paragneiss du groupe du Manampotsy. Un autre groupe d'échantillons provient de cette zone dans les régions de Seranantsara et de Brickaville. Ce sont toujours des dolérites sans olivine, à structure ophitique, mais il y a aussi des basaltes sans olivine, à structure microlitique.

Les variétés de structure ne correspondent pas à des modifications magmatiques, mais sont dues à des conditions différentes de solidification. Sur

ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA COTE CENTRE NORD-EST

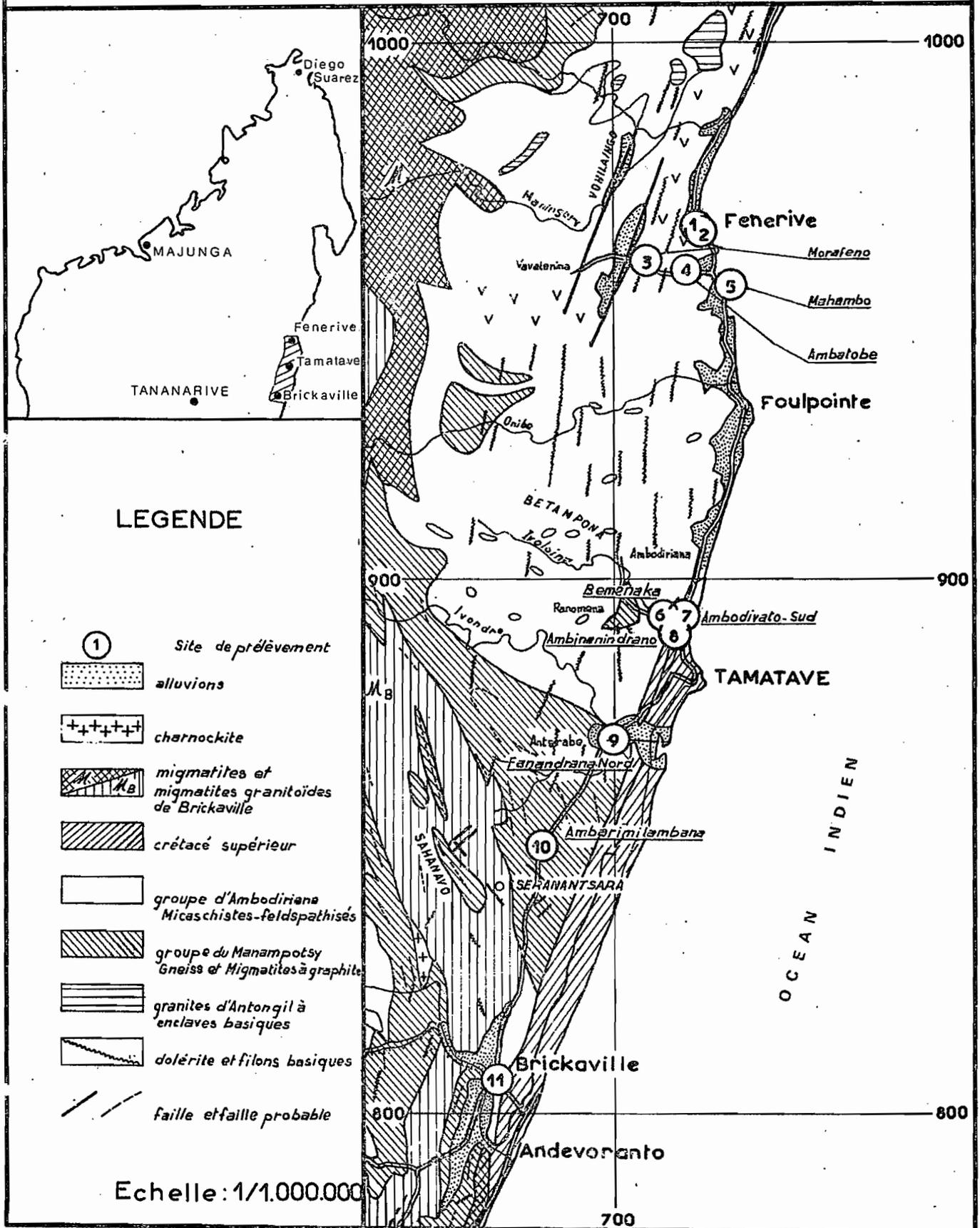


FIG. V-1

les bords des filons par exemple, les roches deviennent généralement basaltiques (13).

Ces roches sont rapportées au grand cycle crétacé moyen qui affecte Madagascar.

Des datations récentes par la méthode K/A, ont permis de connaître leur âge avec plus de précision. Les échantillons analysés donnent un âge moyen de 74 millions d'années (17).

L'étude paléomagnétique de ces formations a porté sur l'examen détaillé de 70 échantillons orientés, prélevés dans 11 sites répartis aussi uniformément que possible entre Fénérive et Brickaville.

2. - Etude magnétique

L'histogramme des aimantations spécifiques est représenté sur la figure V-2, la majorité des valeurs obtenues sont comprises entre 0,5 et $3 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g.

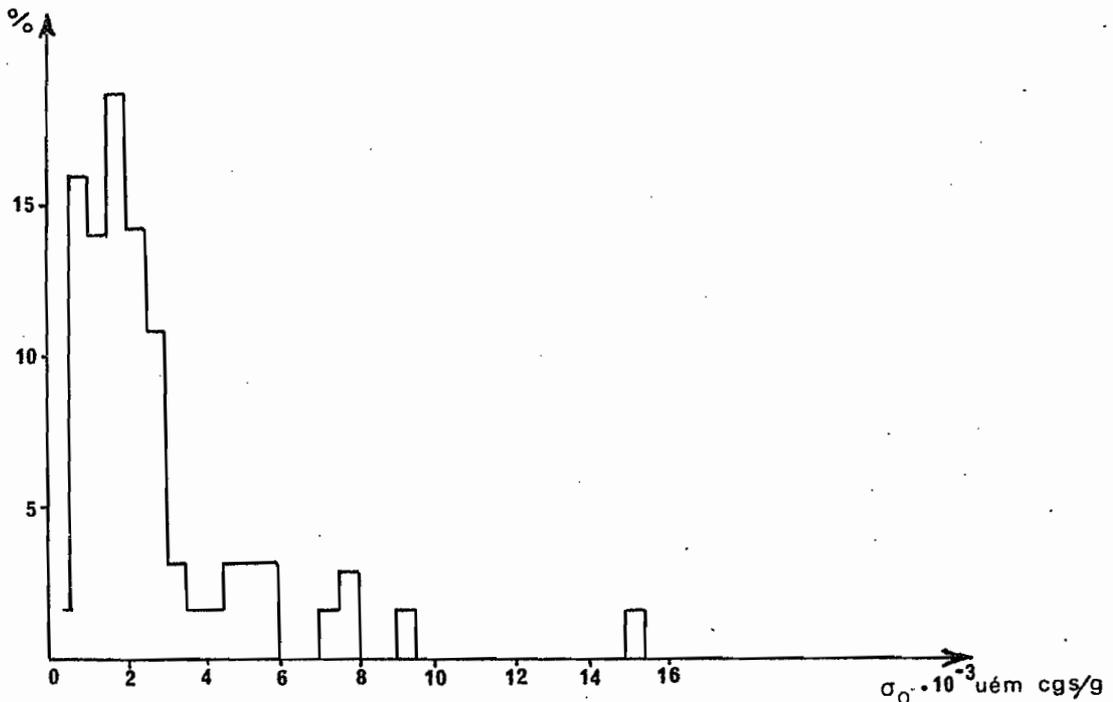


Fig.V.2 HISTOGRAMME DES INTENSITES D'AIMANTATION SPECIFIQUE

Le retournement des échantillons dans le champ magnétique terrestre actuel ne modifie pas de façon significative les directions des aimantations rémanentes naturelles.

Toutes les directions observées sont de sens normal. Les déclinaisons sont surtout orientales, et les inclinaisons sont souvent supérieures à la valeur actuelle de l'inclinaison dans la région (-53°). Très peu de directions sont semblables à la direction actuelle du champ magnétique ($350^\circ - 53^\circ$) (Fig. V-3a).

Les courbes de désaimantation peuvent se ramener aux types b, d et e de la figure II-8.

L'étude du comportement du vecteur aimantation dans chaque cas révèle des aimantations naturelles stables ou partiellement stables, mais aussi des aimantations complexes et instables.

La désaimantation a permis de mettre en évidence l'aimantation caractéristique de 69 % des échantillons prélevés. Les directions de ces aimantations sont nettement mieux groupées que celles des aimantations naturelles. De plus elles sont franchement différentes de la direction du champ magnétique actuel dans la région (Fig. V-3b). On remarque toutefois la présence de deux échantillons dont les aimantations stables sont orientées pratiquement à 180° de l'ensemble des valeurs observées; mais il s'agit vraisemblablement d'une erreur dans l'orientation des échantillons. Ils ont été éliminés des calculs de la moyenne.

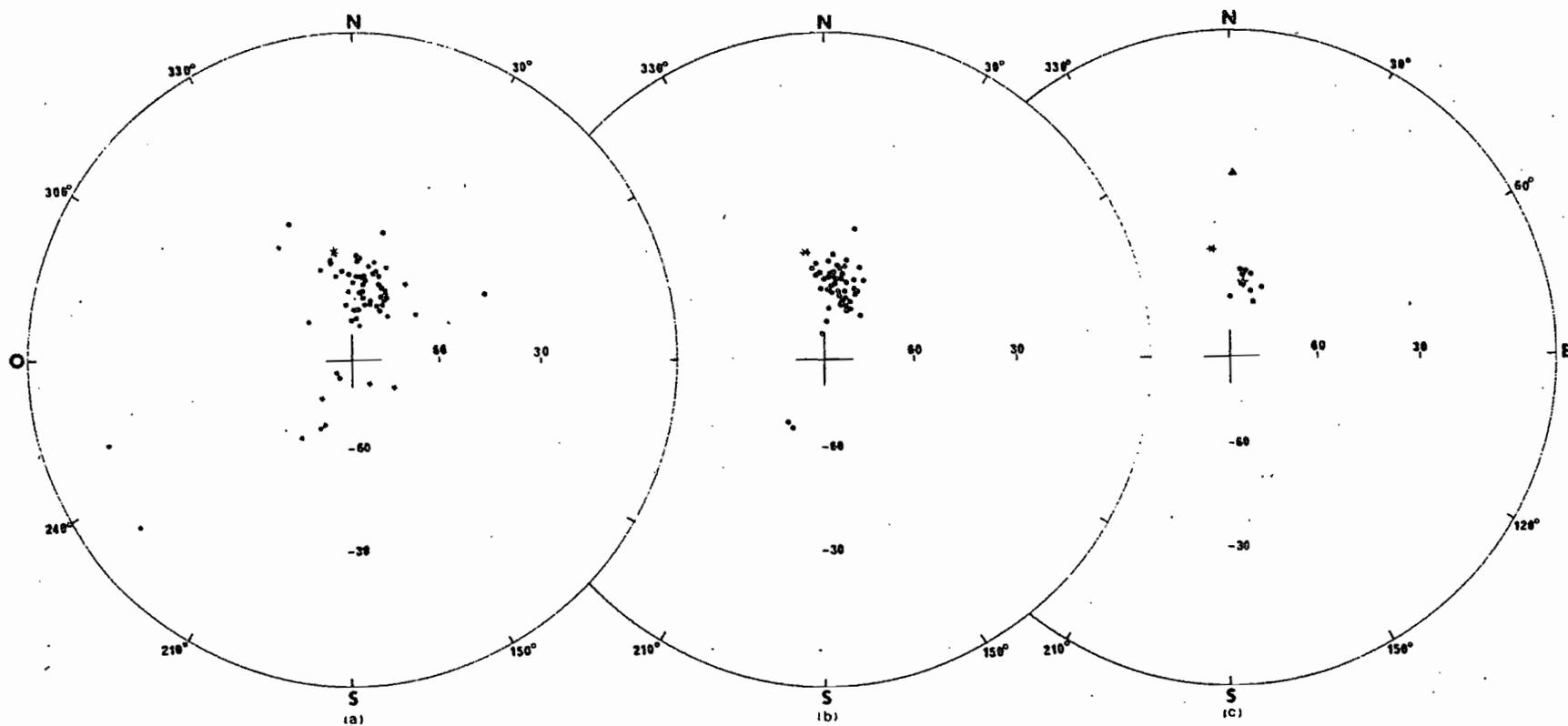


FIG. V-3. - CÔTE CENTRE NORD-EST

Directions des aimantations

a) rémanentes naturelles

b) stables caractéristiques des échantillons

c) caractéristiques des sites

* : Direction du champ magnétique terrestre actuel

+ : Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

▲ : Direction du champ dipolaire

Si l'on considère comme direction caractéristique de l'aimantation d'un site la moyenne des directions des aimantations stables relatives aux échantillons prélevés dans ce site, on obtient les valeurs indiquées dans le tableau suivant, qui comporte également les coordonnées des pôles virtuels correspondants :

Tableau V-1.

Directions moyennes d'aimantation et position des pôles virtuels

SITE				Aimantation			Pôle	
	ϕ_0	λ_0	N	D	I	α_{95}	ϕ'	λ'
Fénériverie-Plage	-17°22	47°05	9	20°	-70°	6°	50°	208°
Fénériverie-Carrière	-17°23	47°06	12	9°	-65°	5°	60°	215°
Morafeno	-17°27	46°58	4	358°	-70°	15°	54°	229°
Ambatobe	-17°27	47°02	7	8°	-65°	8°	60°	216°
Mahambo	-17°28	49°28	5	valeurs non significatives				
Bemenaka	-18°02	47°01	6	7°	-62°	5°	64°	215°
Ambodivato-Sud	-18°02	47°03	4	8°	-60°	4°	66°	212°
Ambinanindrano	-18°06	47°03	4	6°	-60°	13°	66°	216°
Fanandrana	-18°15	46°56	3	15°	-67°	6°	56°	210°
Ambarimilambana	-18°26	46°49	4	23°	-64°	5°	56°	198°
Brickaville	-18°49	46°44	11	13°	-61°	4°	64°	204°

3. - Discussion

Deux faits essentiels peuvent être tirés de l'examen de ce tableau :

a) Toutes les déclinaisons, sauf une, sont orientales, différant ainsi nettement de la déclinaison magnétique actuelle dans la région, qui est occidentale.

b) Toutes les inclinaisons ont un même signe, celui de l'inclinaison magnétique actuelle, leurs valeurs par contre en sont nettement différentes.

Le fait que toutes les aimantations soient dirigées suivant des directions différentes de la direction actuelle du champ magnétique dans la région, ainsi que le bon accord entre les directions observées, constituent des arguments de plus en faveur de l'hypothèse faite sur l'origine de ces aimantations.

La moyenne de ces directions doit représenter la direction du champ magnétique au moment où ces roches se sont mises en place. Les calculs donnent le résultat suivant :

$$D = 11^{\circ} \quad I = -65^{\circ}$$

avec N (nombre de sites retenus pour le calcul de la moyenne) = 10,
 $k = 306,6$ et $\alpha_{95} = 3^{\circ}$.

Cette direction présente un écart angulaire de 15° environ avec la direction actuelle du champ magnétique à Fénériver et 34° avec la direction qu'aurait un champ dipolaire géocentrique axial à la même latitude. L'une et l'autre de ces distances sont significatives.

Les pôles virtuels sont également décalés de façon significative par rapport au pôle géographique actuel. Il en est de même de leur moyenne (Fig. V-4) dont les coordonnées sont :

Latitude Nord 60°

Longitude Est 212°

avec $\alpha_{95} = 4^{\circ}$.

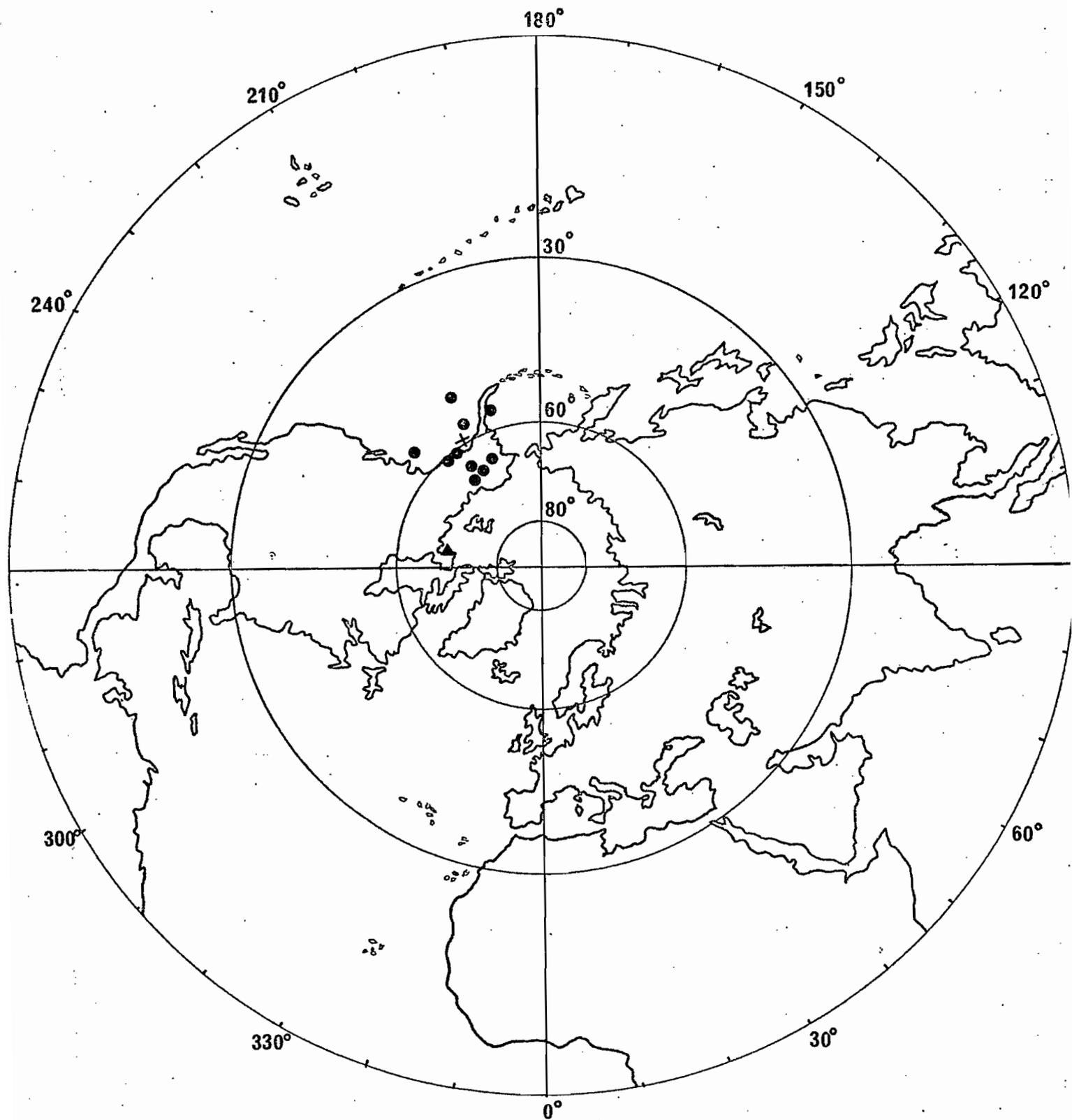


Fig.V-4

CÔTE CENTRE NORD-EST : POSITION DES PÔLES VIRTUELS

● : pôle virtuel relatif à un site

† : position moyenne

▲ : pôle virtuel actuel relatif à Madagascar

III. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DES COULEES VOLCANIQUES DE LA CÔTE SUD-EST.

1. - Géologie

Sur la côte orientale de Madagascar, depuis le parallèle de Mahanoro (X = 690) jusqu'au Sud de Vangaindrano (X = 240), soit sur une longueur de 450 km environ, s'étalent de grands épanchements volcaniques d'origine fissurale, constitués par des laves acides et basiques (Fig. V-5) (13).

Les laves basiques sont plus développées que les laves acides. Elles s'étendent de façon quasiment continue du Nord au Sud. Elles comprennent des sakalavites, des basaltes et des labradorites.

Au Nord, entre Mahanoro et Sakaleona, on rencontre principalement des sakalavites, des andésites et des basaltes doléritiques, ces derniers forment la grande masse des coulées à l'Ouest.

Vers Mananjary, les coulées sont constituées par des basaltes doléritiques et des sakalavites. Plus au Sud, entre le Namorona et Manakara, les basaltes sont plus ou moins doléritiques. Plus au Sud encore, entre Vohipeno et Farafangana, on voit des andésites, des labradorites, des basaltes compacts ou doléritiques. Au Sud de Vangaindrano enfin, les coulées sont surtout constituées de sakalavites doléritiques.

Les venues acides sont moins étendues et sont localisées principalement dans le secteur Mahanoro-Mananjary. Vers le Sud, on ne les rencontre que très sporadiquement.

Les laves acides se rapportent à deux types : rhyolites et dacites, qui se distinguent difficilement entre elles.

Il semble que les dacites prédominent dans la partie Nord, entre le Mangoro et le Namorona, et qu'au Sud ce sont surtout les rhyolites qui forment la grande masse des coulées acides.

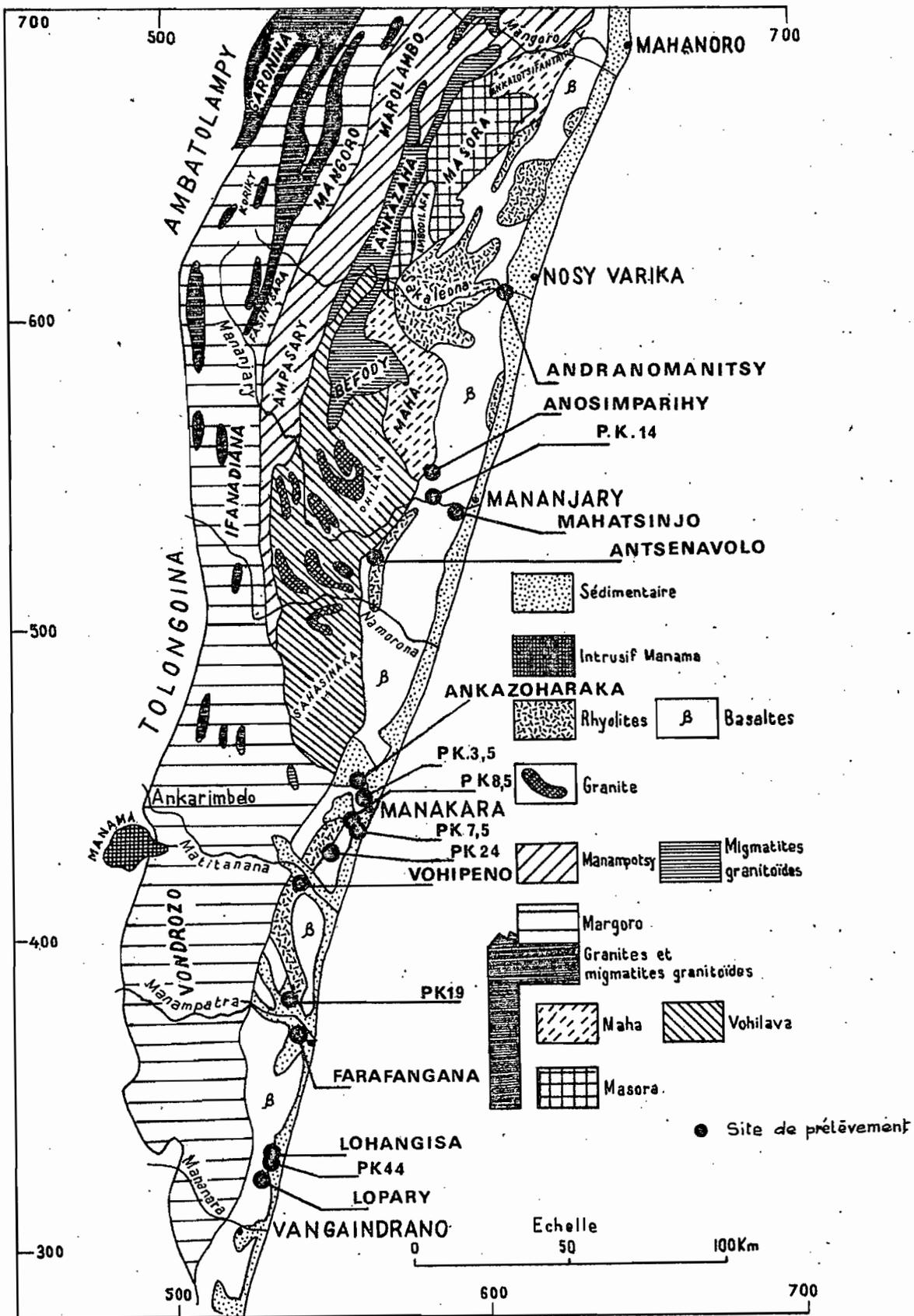


FIG. V-5

L'âge exact des émissions n'est pas connu, la seule chose certaine est qu'elles sont anté-maestrichtiennes. Elles reposent sur le socle cristallin précambrien, et sont recouvertes par des sédiments marins du Crétacé supérieur essentiellement grés-marneux avec bancs calcaires. Ces sédiments renferment une faune maestrichtienne: avec ammonites (10, 90).

Au Nord entre le Mangoro et le Namorona (X = 670 et X = 490) la chronologie relative des émissions est bien connue. Elles débutent par une phase acide et se poursuivent par une phase basique. Cette superposition est bien établie par le recouvrement basaltique et par les intrusions filoniennes qui recoupent les venues acides. Au Sud d'Antsenavolo, on observe sous les basaltes un substratum dacitique.

Dans le secteur Manakara-Farafangana (X = 450 et X = 370) on a défini trois phases d'émission : une phase inférieure basaltique, une phase médiane rhyolitique et une phase terminale basaltique.

Les coulées rhyolitiques sont limitées à l'Ouest par les coulées basaltiques inférieures. A l'Est vers l'Océan, les basaltes supérieurs sont disposés en bandes concentriques à l'intérieur de la concavité du grand croissant formé par les rhyolites.

Au total 131 échantillons ont été prélevés dans 16 sites répartis aussi largement que possible sur toute l'étendue des coulées (Fig. V-5).

L'examen pétrographique systématique d'un certain nombre d'échantillons par site de prélèvement montre que parmi les échantillons figurent des roches dacitiques et des basaltes plus ou moins doléritiques. Il existe également des labradorites.

Les dacites proviennent d'Antsenavolo au centre, et d'une carrière près de Farafangana au Sud. Ce sont des roches grises compactes avec d'assez

nombreux phénocristaux blanchâtres ou jaunâtres de feldspaths. Au microscope, on reconnaît dans une pâte microcristalline, la présence de quartz et quelques rares hornblendes vertes.

Les basaltes de la partie Nord et de la partie Sud sont sensiblement identiques.

Des mesures d'âge par la méthode K/A, exécutées aussi bien sur roche acide (dacite) que sur roche basique (basalte) semblent donner des âges compris entre 70 et 75 millions d'années. Elles n'ont pas permis, cependant, de mettre en évidence l'antériorité relative des laves acides et des laves basiques. (17).

2. - Etude magnétique

L'analyse de l'histogramme des aimantations spécifiques révèle que la majorité des valeurs (70 %) sont inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g. La plupart des dacites présentent des valeurs inférieures à $0,5 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g (Fig. V-6).

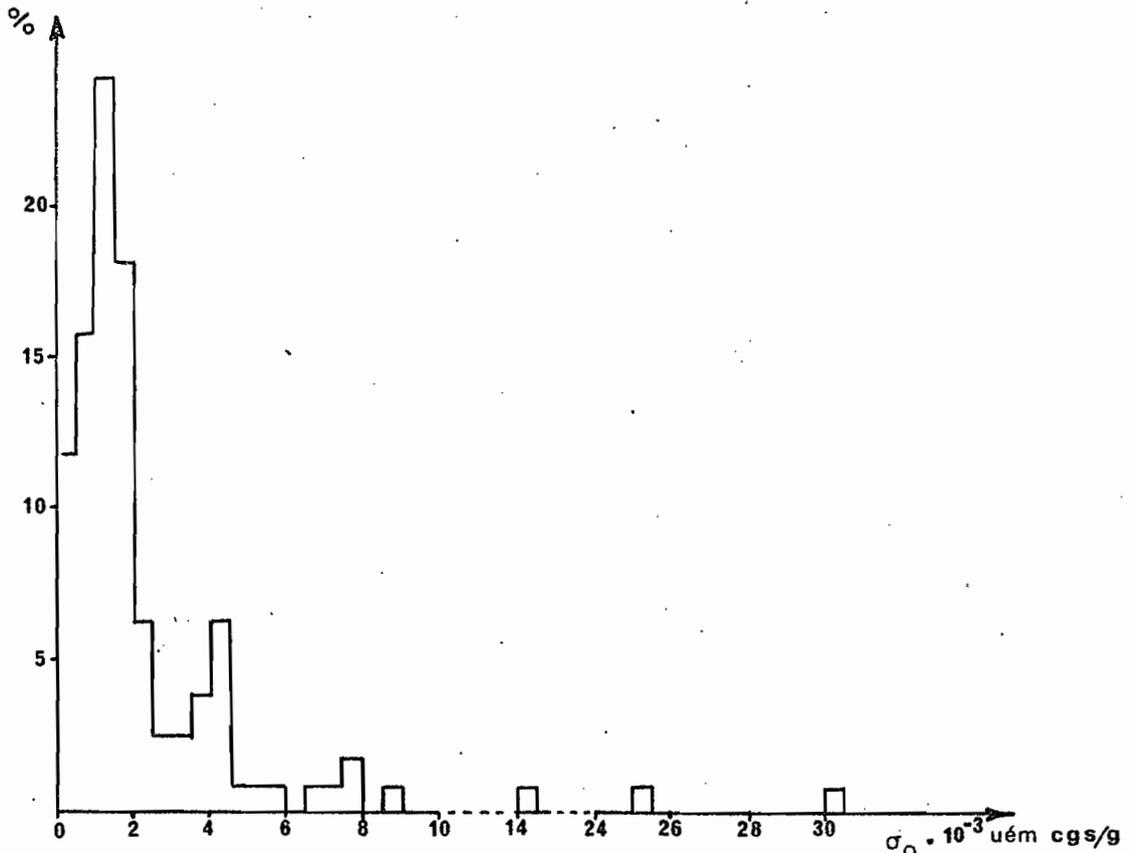


Fig. V-6 HISTOGRAMME DES INTENSITES D'AIMANTATION SPECIFIQUE

Les directions des aimantations rémanentes naturelles sont peu modifiées par l'action du champ magnétique actuel. En effet, le retournement des échantillons n'affecte pas de façon significative la direction des aimantations.

Les directions observées montrent cependant une certaine dispersion (Fig. V-7a).

L'analyse des aimantations naturelles, faite par désaimantation progressive par action de champs alternatifs, a permis de distinguer trois groupes semblables à ceux décrits au paragraphe 5-6 du chapitre II. Les courbes obtenues se ramènent aux types b, d, e (Fig. II-8).

Les directions des aimantations stables caractéristiques des échantillons sont nettement mieux groupées que celles des aimantations naturelles (Fig. V-7b). Elles se rapportent à 75 % des échantillons étudiés.

La moyenne des directions des aimantations stables se rapportant à des blocs d'un même site a été considérée comme caractéristique de l'aimantation de ce site (Fig. V-7c). Dans ces conditions, on obtient pour chaque site de prélèvement les résultats figurant au Tableau V-2.

3. - Discussion

On note, d'après ces résultats, les caractères différents des déclinaisons qui sont tantôt occidentales, comme l'est actuellement la déclinaison magnétique à Madagascar, tantôt orientales. Ce dernier fait les rapproche des résultats obtenus pour les formations filoniennes de la partie septentrionale de la côte Est.

On peut faire apparaître différents groupes de directions, en tenant compte d'une part de la nature des échantillons, et d'autre part de la situation géographique des différents sites où ils ont été prélevés.

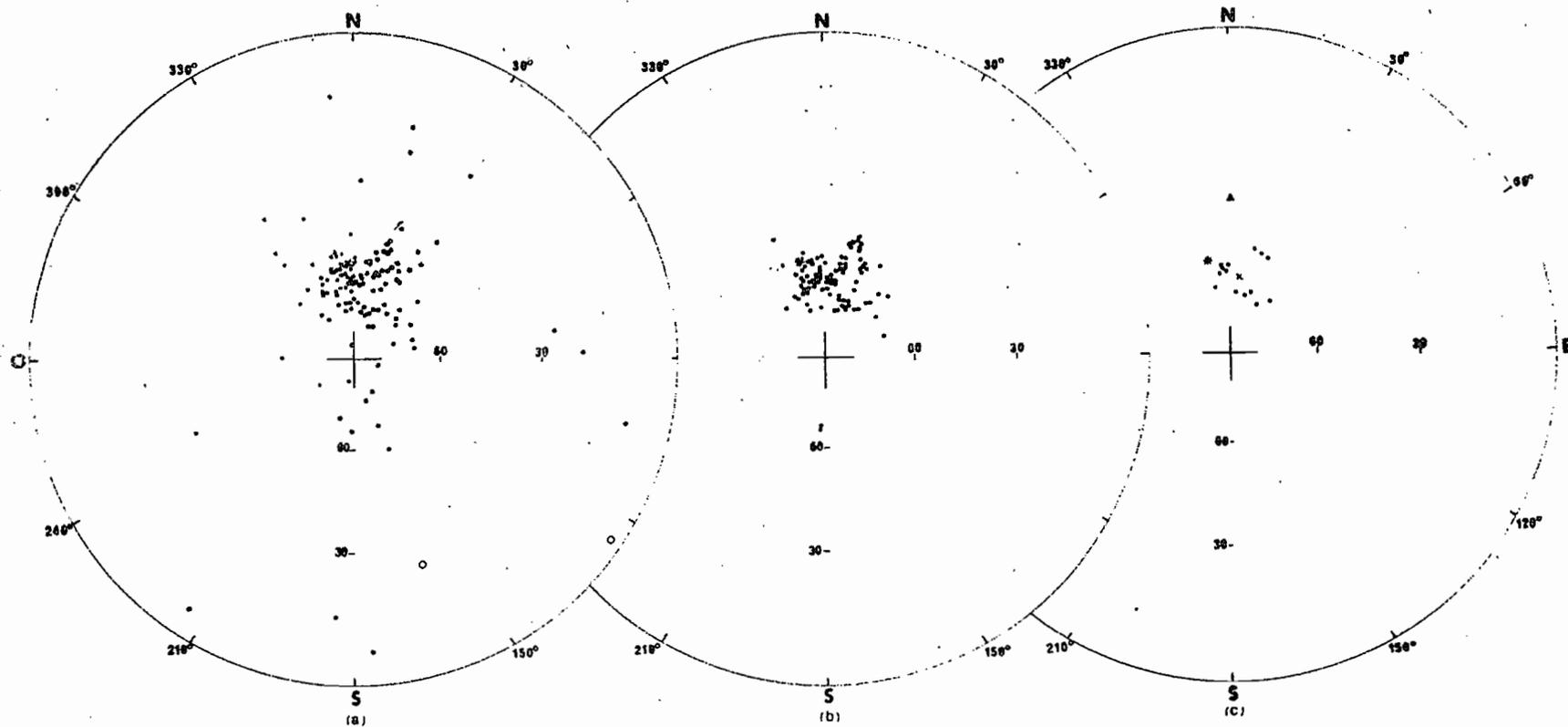


FIG. V-7. - CÔTE SUD-EST

Directions des aimantations

a) rémanentes naturelles

b) stables, caractéristiques des échantillons

c) caractéristiques des sites

*: Direction du champ magnétique terrestre actuel

*: Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

▲: Direction du champ dipolaire

●: Inclinaison négative (normale)

○: Inclinaison positive

Tableau V-2
Directions moyennes d'aimantation et position
des pôles virtuels

SITE	ϕ_0	λ_0	N	Aimantation			Pôle	
				D	I	α_{95}	ϕ'	λ'
Andranomanitsy	-20°37	48°26	5	353°	-61°	3°	68°	242°
Anosimparihy	-21°09	48°14	6	350°	-62°	3°	66°	247°
Pk 14 - Mananjary	-21°13	48°15	5	38°	-68°	7°	47°	193°
Mahatsinjo	-21°15	48°19	4	357°	-60°	7°	70°	235°
Antsenavolo	-21°23	48°03	5	5°	-69°	13°	59°	222°
Ankazoharaka	-22°03	47°59	12	17°	-68°	6°	59°	208°
Manakara-Irondro Pk 3,5	-22°05	48°00	6	17°	-55°	8°	70°	183°
Manakara-Vohipeno Pk 8,5	-22°10	47°58	8	29°	-71°	2°	50°	203°
Manakara-Vohipeno Pk 7,5	-22°11	47°58	7	Valeurs non significatives				
Manakara-Vohipeno Pk 24	-22°14	47°53	12	22°	-55°	4°	67°	177°
Vohipeno	-22°20	47°51	5	13°	-69°	6°	58°	212°
Vohipeno Farafangana Pk 19	-22°40	47°48	3	13°	-54°	3°	74°	187°
Farafangana	-22°46	47°47	38	356°	-62°	3°	69°	235°
Lohangisa	-23°07	47°43	3	346°	-66°	10°	62°	248°
Farafangana-Vangaindrano Pk 44	-23°08	47°42	8	Valeurs non significatives				
Lopary	-23°11	47°41	4	353°	-60°	6°	71°	244°

On peut, par exemple, déterminer une direction moyenne pour chacun des groupes suivants :

- ensemble des sites de la partie Nord
- ensemble des sites compris entre Manakara et Vohipeno, au centre
- ensemble des sites dacitiques
- ensemble des sites dans le secteur de Farafangana, au Sud

Les calculs donnent les résultats suivants :

- partie Nord	N = 4	D = 2°	I = -64°	$\alpha_{95} = 11^\circ$ (P1)
- partie centrale	N = 5	D = 19°	I = -63°	$\alpha_{95} = 8^\circ$ (P2)
- sites dacitiques	N = 2	D = 10°	I = -61°	$\alpha_{95} = 33^\circ$ (P3)
- partie Sud	N = 3	D = 352°	I = -63°	$\alpha_{95} = 6^\circ$ (P4)

Dans ces résultats N représente le nombre de sites dans chaque groupe.

Les inclinaisons ont toutes le même signe, celui de l'inclinaison magnétique actuelle à Madagascar. Leurs valeurs sont en outre d'un même ordre de grandeur. Ces résultats montrent aussi les caractères différents des déclinaisons.

Il est à présent intéressant de comparer ces directions entre elles. Il est commode pour cela de calculer les distances angulaires qui les séparent les unes des autres.

Tableau V-3

Distances angulaires entre les pôles calculés pour la côte Sud-Est

	P1	P2	P3	P4
P1				
P2	8°			
P3	4°	5°		
P4	5°	12°	8°	

L'examen de ce tableau et des différentes valeurs de α indiquées plus haut montre qu'aucune des distances angulaires n'est significative. Il en

résulte que du point de vue paléomagnétique, il n'est pas possible de distinguer les dacites des basaltes, l'intervalle de temps séparant les deux émissions ne devant pas être suffisant pour que la variation du champ soit décelable par la méthode paléomagnétique.

Les mesures d'âge par la méthode du potassium argon sur trois échantillons (un échantillon dacitique et deux échantillons de basalte) n'ont également montré aucune différence significative. Les trois âges trouvés s'alignent sur la même isochrone (17).

Dans ces conditions, on peut, pour déterminer la direction du champ magnétique régional de l'époque, faire la moyenne de toutes les directions. Le calcul donne la valeur suivante :

$$D = 7^{\circ} \quad I = -64^{\circ}$$

avec $N = 14$ $k = 80,9$ $\alpha_{95} = 4^{\circ}$

N étant le nombre de sites retenus pour le calcul de la moyenne.

Cette direction est différente de la direction du champ magnétique actuel dans la région (345° - 57°) (Fig. V-7c), avec laquelle elle présente un écart angulaire de 13° . Sa distance angulaire avec le champ dipolaire à Manakara atteint 25° .

La position du pôle virtuel correspondant à chaque site est également indiquée dans le tableau précédent. Tous ces pôles sont nettement différents du pôle géographique actuel (Fig. V-8).

La position du pôle géomagnétique virtuel moyen a pour coordonnées :

Latitude Nord	66°
Longitude Est	218°

Le rayon du "cercle d'erreur" correspondant est de 7° .

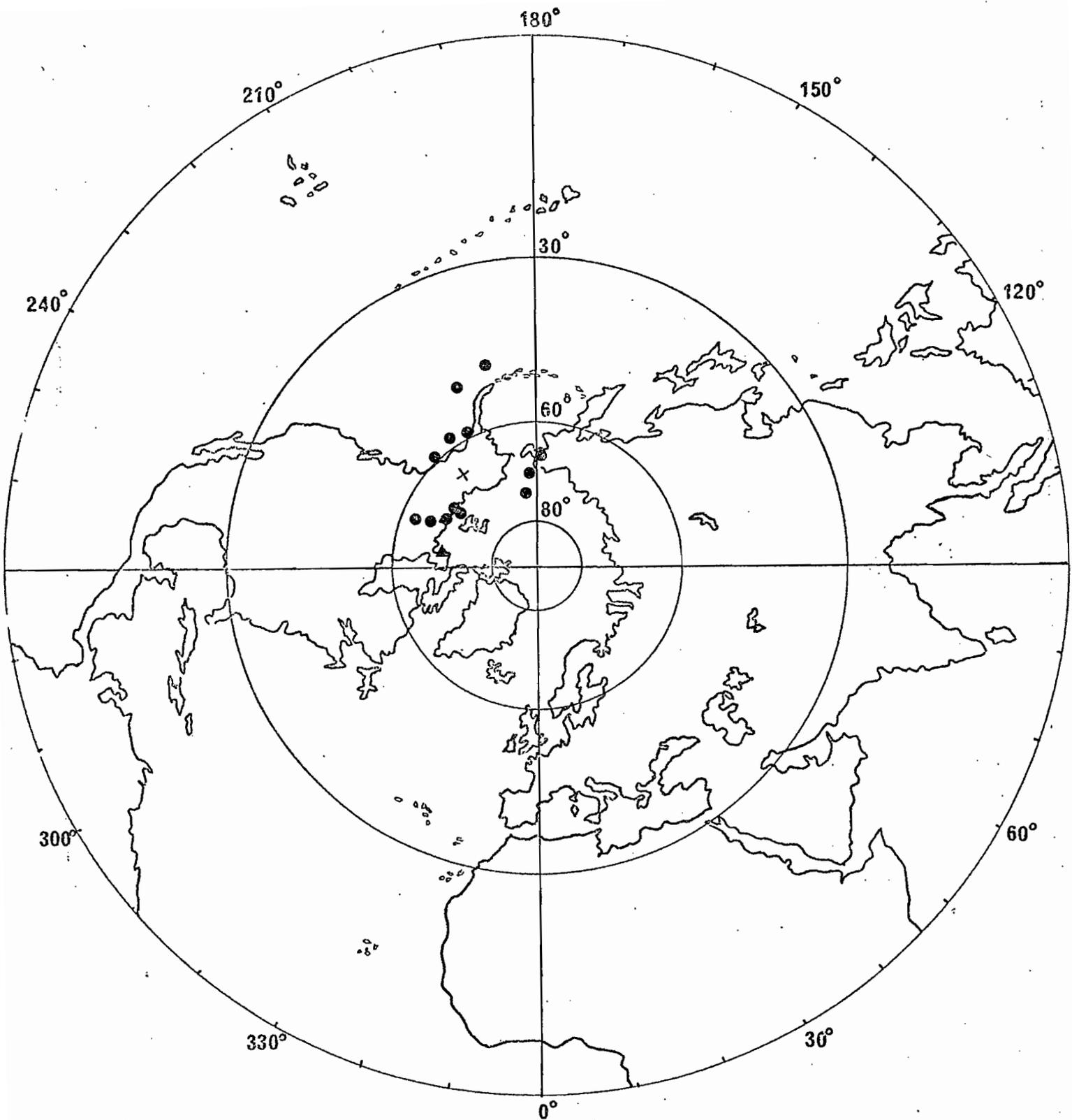


Fig. V. 8

CÔTE SUD-EST : POSITION DES PÔLES VIRTUELS

● : pôle virtuel relatif à un site

+ : position moyenne

▲ : pôle virtuel actuel relatif à Madagascar

IV. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DU MASSIF VOLCANIQUE DE L'ANDROY

1. - Géologie

Situé à l'extrême Sud de Madagascar, le massif volcanique de l'Androy se présente en un vaste ovale, dont le grand axe, d'une longueur de 90 km environ, est orienté Nord-Sud (Fig. V-9).

Il est composé principalement d'épanchements basaltiques et rhyolitiques, ceux-ci recouvrant ceux-là (9).

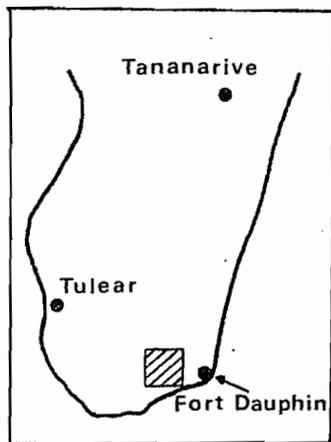
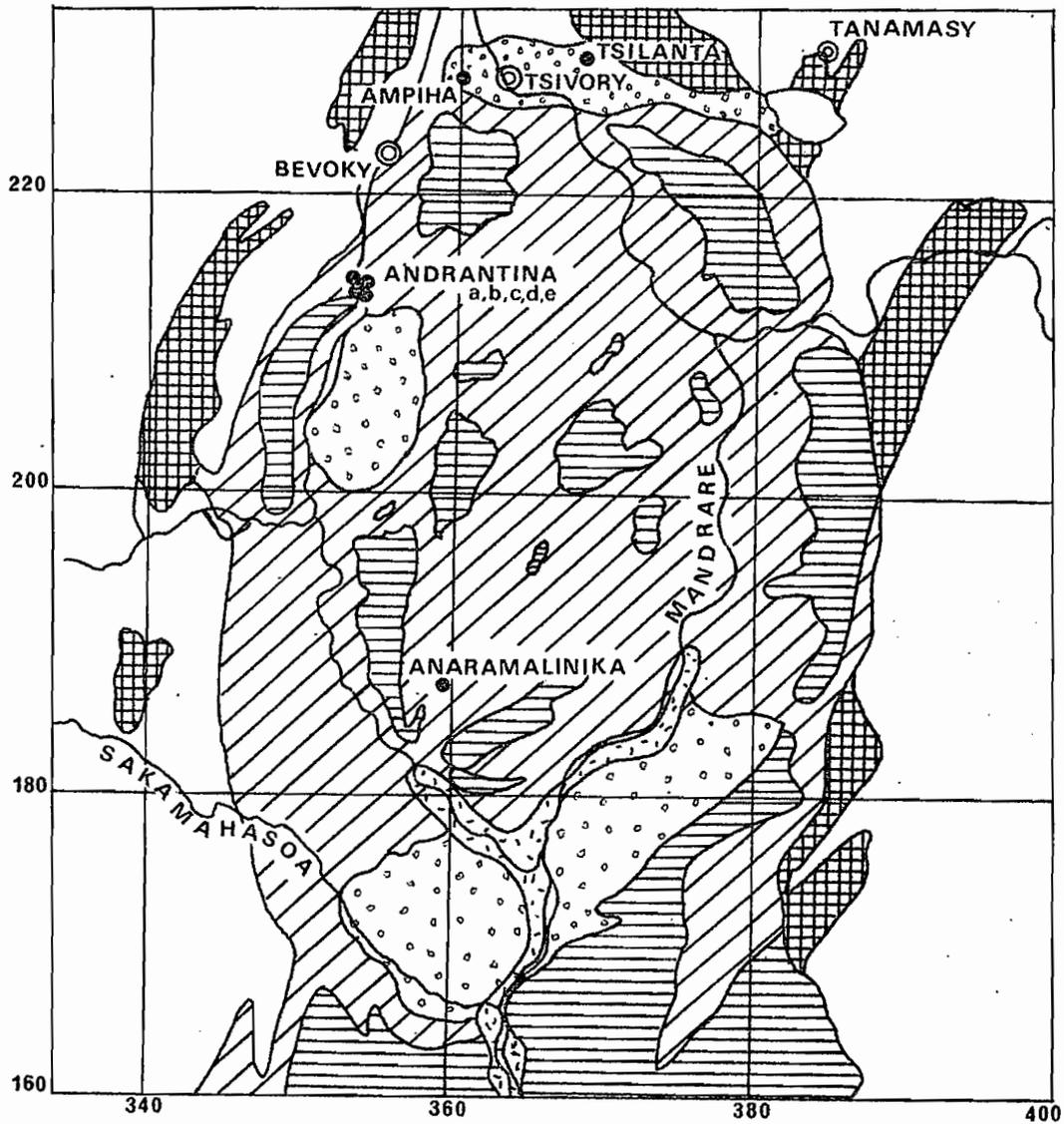
R. BATTISTINI (7), comme il a été dit déjà, fait cependant état d'une structure moins simple, dont la caractéristique serait la superposition d'un grand nombre de coulées successives, à savoir trois phases acides (rhyolites inférieures, moyennes et supérieures) et deux grandes phases basiques (basaltes inférieurs et supérieurs). Les basaltes inférieurs, épanchés sur le socle cristallin, seraient sous-jacents aux rhyolites qui forment la ceinture externe du massif, tandis que les basaltes supérieurs reposent sur ces rhyolites.

Les coulées basaltiques comprennent des sakalavites, des basaltes et des basaltes andésitiques. Ces roches sont généralement dépourvues d'olivine. Leur structure est variée, microlitique ou vitreuse.

Les coulées rhyolitiques ont une composition plus complexe.

En ce qui concerne l'âge, l'analogie pétrographique avec les coulées de l'Ouest a conduit à rattacher le massif au Crétacé supérieur. Cependant, des récentes mesures d'âge, par la méthode K/A, donnent un âge moyen de 70 millions d'années. Aucune distinction entre les basaltes n'a été possible (17).

Plus de 40 échantillons orientés, répartis sur huit sites, ont été prélevés dans ce massif. Près de la moitié de ces échantillons ont été examinés en lame mince.



-  Alluvions
-  Sables roux
-  Microgranite
-  Rhyolites
-  Basaltes
-  Leptynites - pyroxenites
-  Point de prélèvement

0 10 20 30 40 km

FIG. V - 9 ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA REGION DE L'ANDROY

Les échantillons ne comprennent aucune roche rhyolitique. La majorité des lames (63 %) correspondent à des basaltes francs.

Quelques unes présentent une tendance vers les basaltes labradoritiques.

2. - Etude magnétique

La plupart des aimantations spécifiques sont inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g, comme le montre l'histogramme indiqué sur la figure V-10.

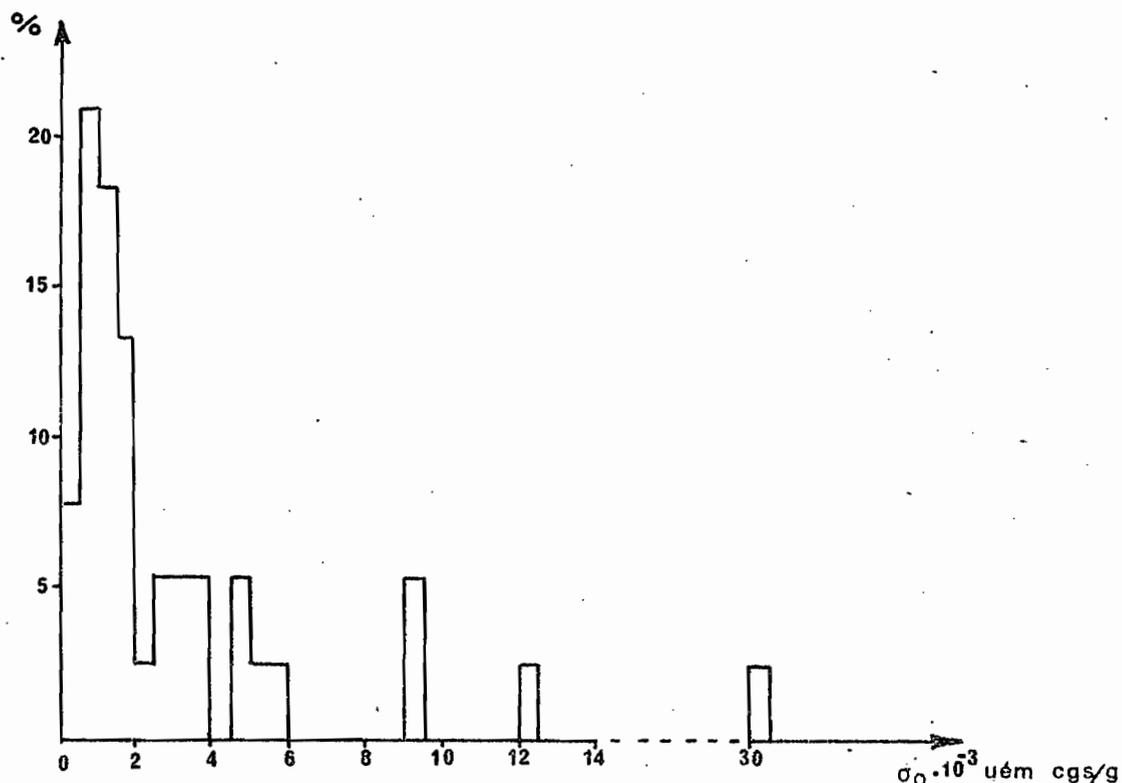


Fig. V-10 HISTOGRAMME DES INTENSITES D'AIMANTATION SPECIFIQUE

Les aimantations naturelles sont caractérisées par des directions dispersées; quelques unes montrent des inclinaisons ayant un signe contraire à celui de l'inclinaison magnétique actuelle (Fig. V-11a).

Elles sont également assez sensibles à l'action du champ alternatif. Les courbes de variation des aimantations peuvent être classées en trois types principaux comparables aux types b, d et e de la figure II-8.

Les aimantations stables, naturelles ou obtenues après désaimantation

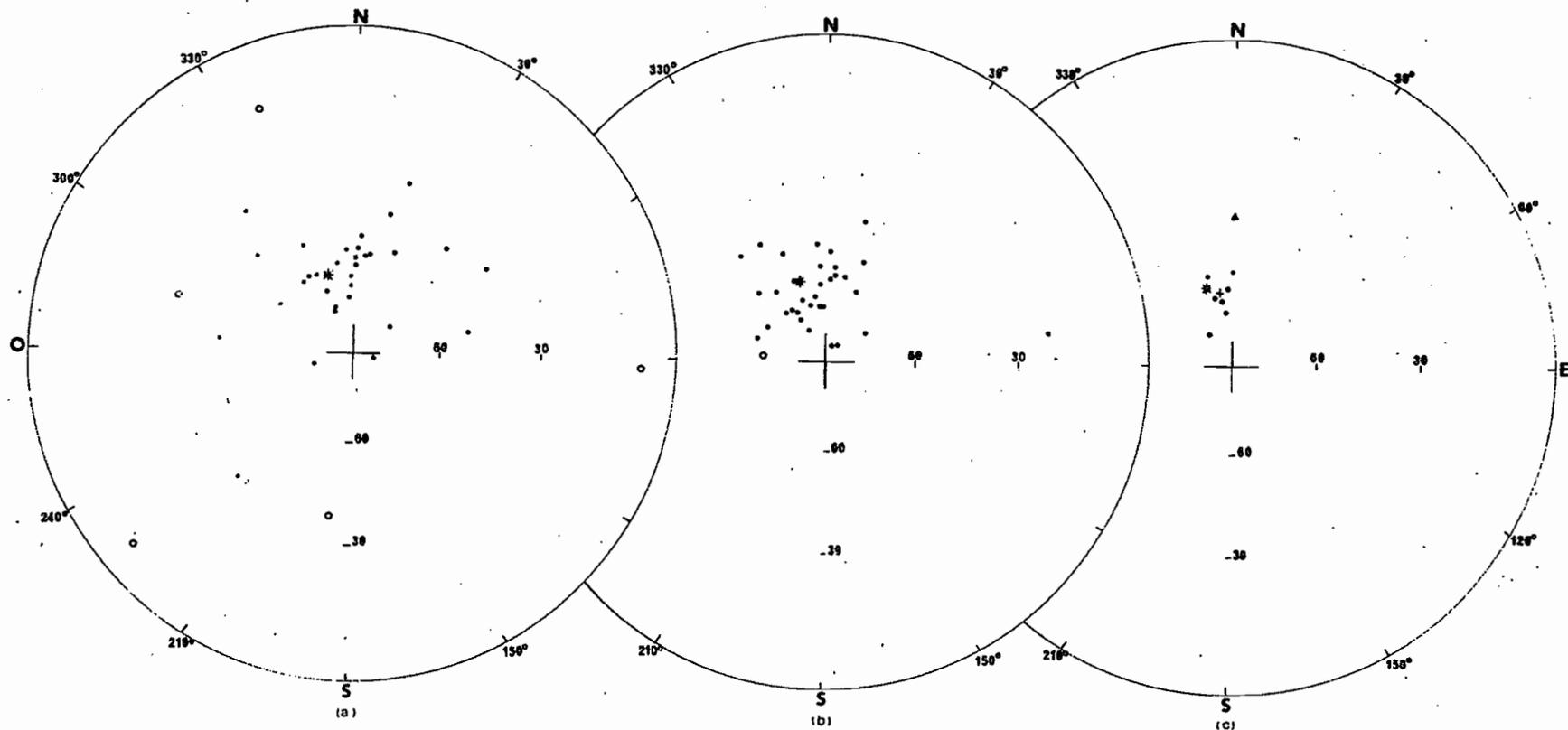


FIG. V-11. - ANDROY

Directions des aimantations

a) rémanentes naturelles

b) stables caractéristiques des échantillons

c) caractéristiques des sites

✱: Direction du champ magnétique terrestre actuel

✚: Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

▲: Direction du champ dipolaire à la latitude de Tsivory

●: Inclinaison négative (normale)

○: Inclinaison positive

partielle des échantillons ont des directions moins dispersées. Elles se rapportent à 81 % des échantillons examinés (Fig. V-11b).

En groupant les échantillons par site de prélèvement, on obtient les résultats indiqués dans le tableau suivant et sur la figure V-11c. Dans le même tableau sont également indiquées les coordonnées des pôles virtuels correspondant aux sites retenus.

Tableau V-4
Directions moyennes d'aimantation et positions
des pôles virtuels

SITE	ϕ_0	λ_0	N	Aimantation			Pôle	
				D	I	α_{95}	ϕ'	λ'
Tsilanja	-24°03	46°08	5	valeurs non significatives				
Ampiha	-24°04	46°03	10	321°	-77°	8°	42°	247°
Andrantina a	-24°11	45°59	5	345°	-67°	9°	62°	247°
Andrantina b	-24°12	45°59	5	valeurs non significatives				
Andrantina c	-24°12	45°58	4	356°	-64°	16°	68°	234°
Andrantina d	-24°12	45°59	5	355°	-72°	13°	58°	231°
Andrantina e	-24°12	45°59	3	343°	-58°	15°	69°	266°
Anaramalinika	-24°26	46°02	4	359°	-57°	7°	78°	229°

3. - Discussion

Ce tableau montre que l'aimantation caractéristique de deux sites de prélèvement n'a pu être déterminée. Tous les autres sont caractérisés par des déclinaisons occidentales. Toutes les aimantations sont également dans le sens actuel du champ magnétique.

On peut considérer que la moyenne des directions indiquées représente la direction de ~~un~~ champ ancien. Les calculs donnent le résultat suivant :

$$D = 349^\circ \quad I = -66^\circ$$

avec $N = 6$ $k = 81,8$ et $\alpha_{95} = 7^\circ$

N représente ici le nombre de sites retenus pour le calcul de la moyenne.

La direction ainsi déterminée est à 5° d'arc seulement de la direction actuelle du champ magnétique à Tsivory ($341^\circ-62^\circ$), localité située dans la partie Nord du massif. Par contre, elle présente un écart angulaire de plus de 25° avec la direction qu'aurait, à la latitude moyenne des sites, un champ dipolaire géocentrique axial (Fig. V-11c).

En ce qui concerne le pôle géomagnétique virtuel moyen, sa position peut être définie en faisant la moyenne des différentes positions indiquées dans le tableau précédent. Ses coordonnées seraient :

Latitude Nord 63°

Longitude Est 243°

avec $\alpha_{95} = 11^\circ$

Cette position est nettement décalée par rapport au pôle géographique actuel (Fig. V-12).

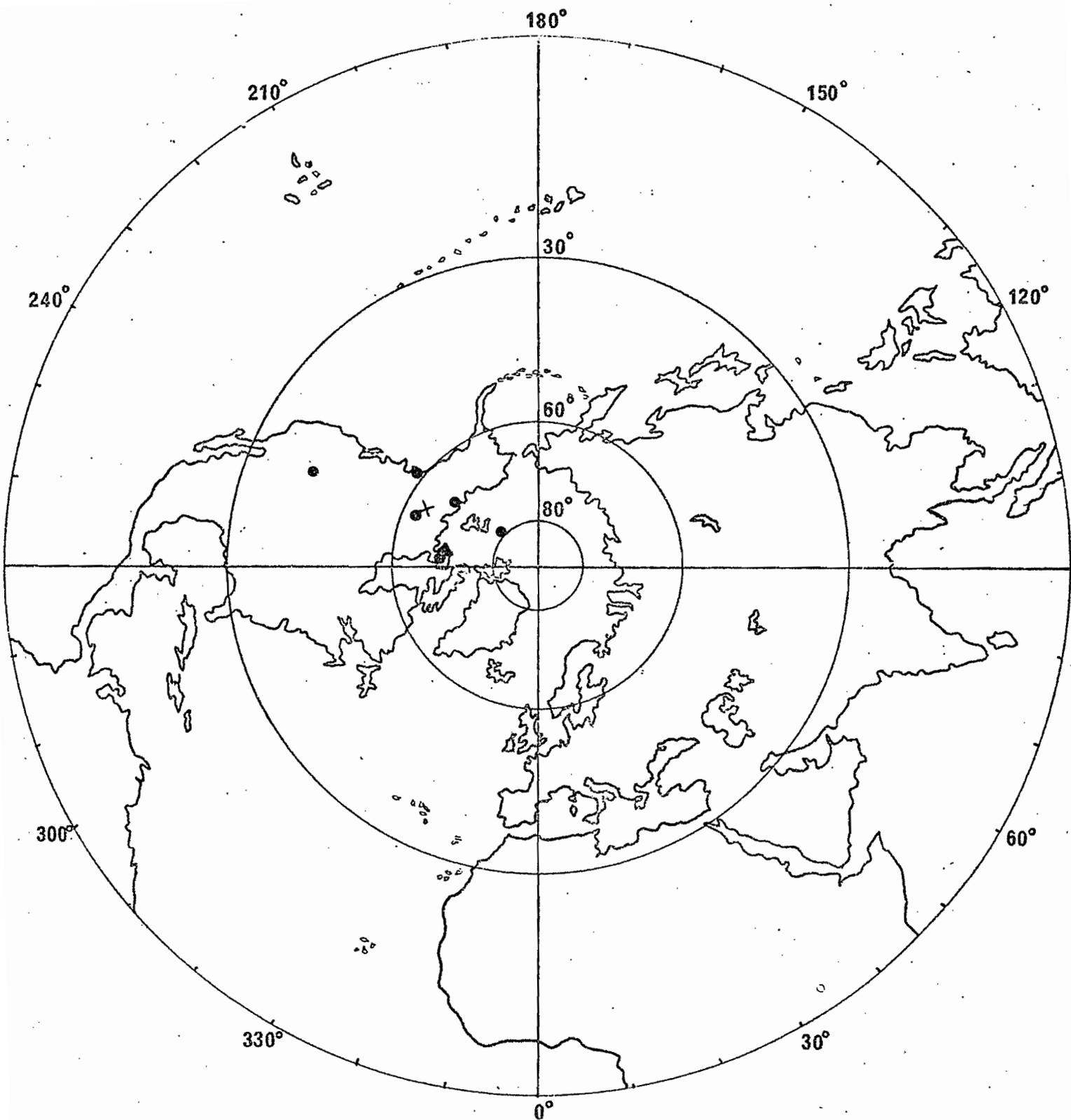


FIG. V-12. - ANDROY : POSITION DES PÔLES VIRTUELS

●: pôle virtuel relatif à un site

+ : position moyenne

▲: pôle virtuel actuel relatif à Madagascar

V. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DU GROUPE BASALTIQUE DU MANGOKY-ONILAHY

1. - Géologie

Les manifestations volcaniques sur la côte Sud-Ouest de Madagascar comprennent trois périodes d'éruptions, la première ayant eu lieu au milieu du Turonien (basaltes inférieurs), la seconde à l'extrême base du Campanien (basaltes moyens) et la troisième au Pliocène récent (12).

Les deux premières sont de loin les plus importantes. Elles ont donné naissance à de grands épanchements basaltiques qui s'étendent depuis le Mangoky, jusqu'au Sud de l'Onilahy. Le volcanisme pliocène récent a fourni de petites formations basaltiques se présentant en necks arrondis. Elles sont localisées principalement entre Manombo et Befandriana.

Le niveau inférieur est constitué de sakalavites et de basaltes. Il est inclus dans une série gréseuse ayant fourni à la base une faune du Turonien inférieur; mais au-dessus des basaltes, la série ne renferme aucun fossile, de sorte que l'âge des basaltes inférieurs n'est pas connu de façon rigoureuse. Cette position permet néanmoins de les rattacher au grand cycle basaltique du Mailaka compris entre le Turonien inférieur et le Turonien supérieur.

Les basaltes inférieurs forment une seule coulée. Ils sont localisés dans la partie Nord-Est du groupe, principalement à l'Ouest du Sikily et dans le secteur de Manamana (Fig. V-13). De nombreuses intrusions, en rapport avec la coulée, existent autour de Manamana où elles se présentent sous forme de necks arrondis et dénudés. Une autre intrusion importante se trouve sur la rive gauche du Mangoky à Tsiarimpioky.

Le niveau moyen, plus important, est composé d'une superposition de coulées dont l'épaisseur totale atteint 150 mètres, dans le secteur de Mikoboka - Analavelona où les épanchements sont les plus étendus.

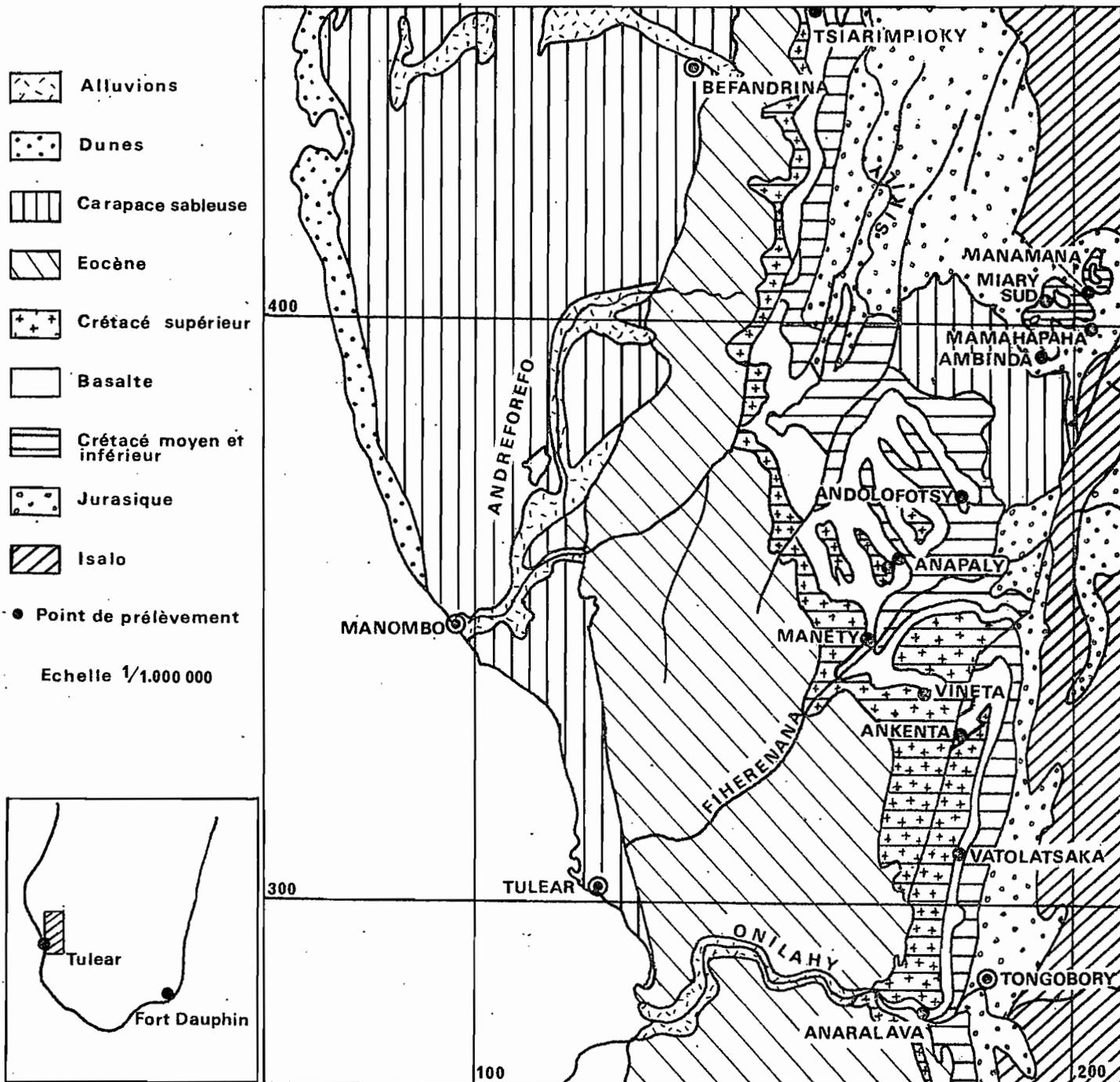


FIG. V-13 ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA REGION MANGOKY-ONILAHY
 d'après H. Besairie 1964

Près de Mikoboka, le relief est très découpé par l'érosion, tandis que dans l'Analavelona, il présente un style bien tabulaire.

L'épaisseur des coulées diminue progressivement vers le Sud. A Fotivolo, sur le Fiherenana, elle est réduite à 80 mètres. Plus au Sud, sur les rives du Sakondry et de l'Onilahy, elle n'est plus que de quelques mètres.

Les basaltes moyens sont des roches noires et compactes, le plus souvent dépourvues d'olivine et de phénocristaux. Leur âge est fixé avec exactitude. Ils se placent au-dessus du Santonien supérieur, dans des couches bien datées de la base du Campanien inférieur. Les coupes de la figure V-14 montrent clairement la position des basaltes.

74 échantillons orientés proviennent des niveaux inférieur et moyen du groupe basaltique du Mangoky Onilahy. Le niveau supérieur a été également échantillonné, à Andreforefo et à Bevoay. L'étude paléomagnétique de ces dernières formations a été traitée dans le chapitre précédent.

La répartition des sites de prélèvement est indiquée sur le schéma géologique de la figure V-13.

L'étude pétrographique, par lame mince, de plusieurs échantillons, montre que la roche est essentiellement du basalte, généralement sain. Sa structure est microlitique avec prédominance de plagioclase. L'olivine est souvent absente.

Des datations radiochronologiques (17) par la méthode K/A ont donné pour des échantillons prélevés à Vatolatsaka, les résultats suivants :

Echantillon D 135 : 86 + ou - 10 MA

Echantillon D 137 : 88 + ou - 10 MA

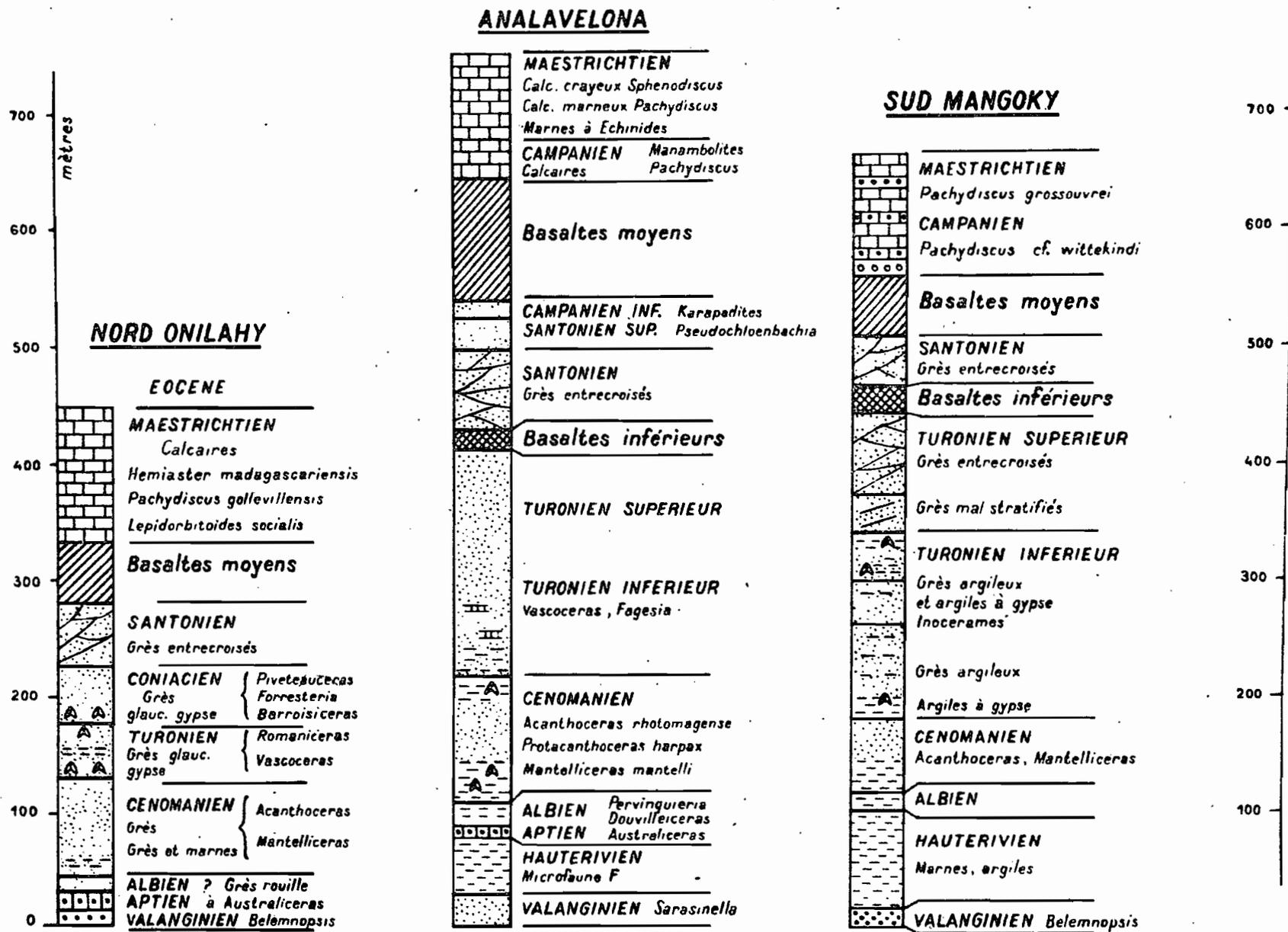


FIG. V-14

2. - Etude magnétique

L'histogramme des aimantations spécifiques représenté sur la figure V-15 montre que les valeurs obtenues sont assez bien groupées, avec toutefois un net maximum vers $4 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g.

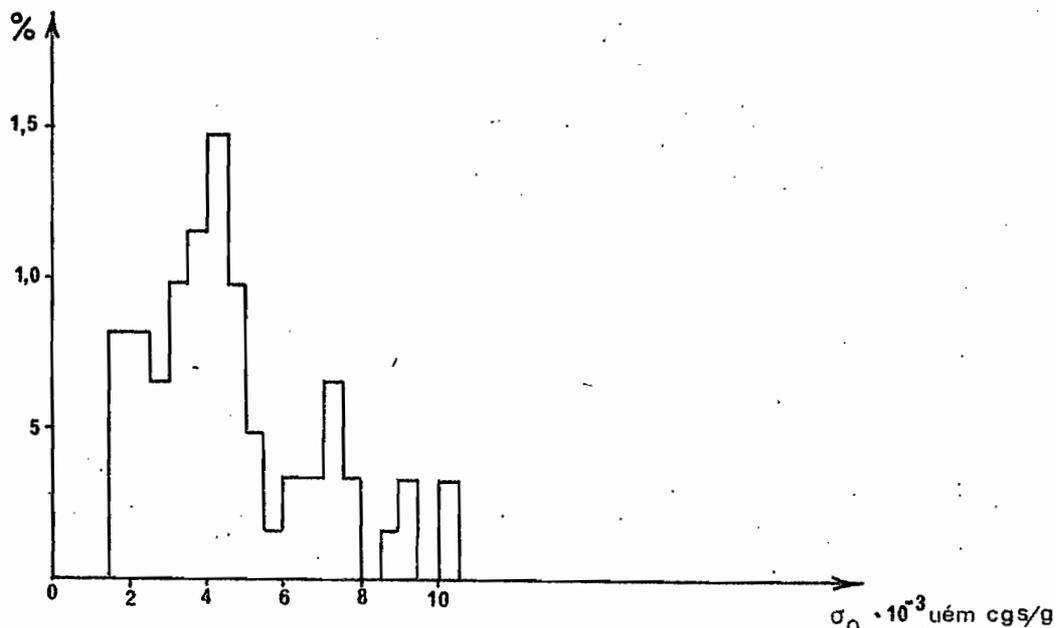


Fig.V-15 HISTOGRAMME DES INTENSITES D'AIMANTATION SPECIFIQUE

Au point de vue directions, certaines sont groupées loin de la direction du champ magnétique actuel dans la région. D'autres, au contraire, se sont montrées très dispersées (Fig. V-16a).

L'action du champ magnétique du laboratoire sur les directions des aimantations rémanentes naturelles est faible. En effet, des mesures répétées à 2 ou 3 semaines d'intervalle ne montrent aucun changement significatif des directions.

Pour analyser les aimantations naturelles, tous les échantillons ont été soumis à une désaimantation progressive par champs alternatifs croissants.

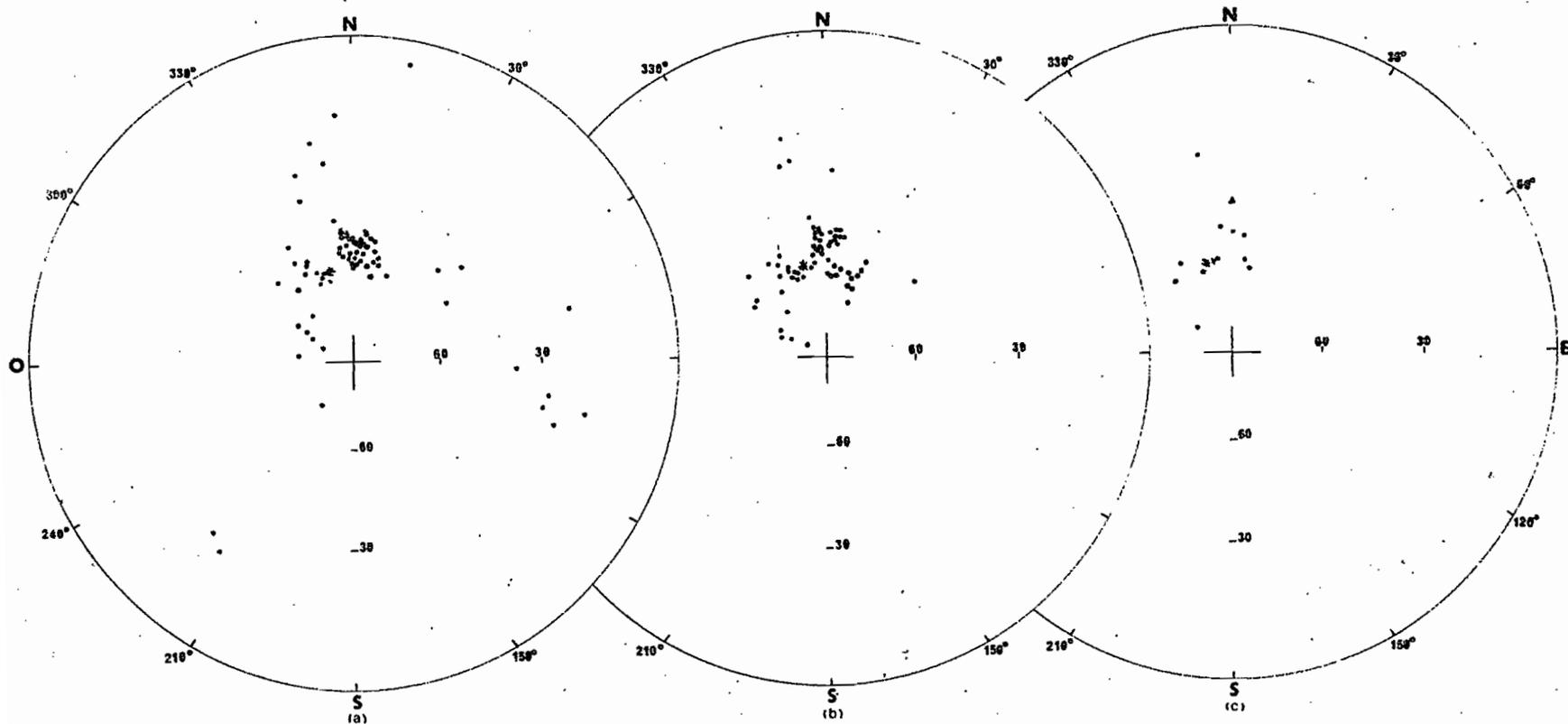


FIG. V-16. - MANGOKY-ONILAHY

Directions des aimantations

a) rémanentes naturelles

b) stables caractéristiques des échantillons

c) caractéristiques des sites

*: Direction du champ magnétique terrestre actuel

+: Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

Δ: Direction du champ dipolaire

Les courbes de variation de l'aimantation peuvent se ranger suivant les types c, d et e de la figure II-8.

Les échantillons ayant un comportement magnétique du type e n'ont fourni aucun renseignement paléomagnétique utile. La désaimantation révèle, dans le cas de la courbe c, la présence d'une fraction d'aimantation stable. Le cas le plus fréquent est celui des courbes ayant le type d.

Cette série d'expériences a permis de déterminer l'aimantation caractéristique de 89 % des échantillons. Ces aimantations sont considérées comme étant d'origine thermorémanente. La moyenne des directions de ces aimantations stables a été calculée pour chaque site de prélèvement. Cette valeur a été ensuite retenue comme caractéristique de l'aimantation du site.

Tableau V-5

Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels

SITE	ϕ_0	λ_0	N	D	Aimantation		Pôle	
					I	α_{95}	ϕ'	λ'
Tsiarimpioky	-21°57	44°02	5	340°	-61°	2°	64°	259°
Manamana	-22°27	44°31	4	351	-27°	8°	78°	358°
Miary-Sud	-22°27	44°27	5	330°	-56°	6°	61°	280°
Mamahapaha	-22°30	44°13	5	304°	-75°	5°	36°	253°
Ambinda	-22°33	44°27	5	valeurs non significatives				
Andolofotsy	-22°46	44°19	6	321°	-59°	6°	53°	277°
Anapaly	-22°52	44°12	6	2°	-50°	2°	81°	212°
Manety	-22°59	44°10	6	7°	-51°	2°	79°	190°
Vineta	-23°03	44°16	12	11°	-60°	4°	69°	199°
Anketa	-23°07	44°17	6	355°	-48°	2°	83°	263°
Vatolatsaka	-23°19	44°17	3	351°	-58°	4°	73°	247°
Anaralava	-23°34	44°14	10	8°	-58°	6°	73°	203°

3. - Discussion

Un seul site a présenté des valeurs non significatives. Dans ce cas, la désaimantation n'a pas permis de déterminer l'aimantation caractéristique des échantillons.

En ce qui concerne les autres sites de prélèvement, les aimantations sont caractérisées par des déclinaisons généralement occidentales, ou voisines du Nord vrai (Fig. V-16c).

Les inclinaisons ont toutes le signe de l'inclinaison magnétique actuelle. Leurs valeurs sont supérieures à celles que donnerait un dipôle géocentrique axial. Par exemple, à la latitude de Tuléar, la valeur de l'inclinaison magnétique serait de l'ordre de -41° .

L'inclinaison relative à Manamana est nettement plus faible que l'ensemble des valeurs trouvées. Ce site n'appartenant pas à la grande coulée de l'Ouest (Fig. V-13), on peut penser que le résultat ainsi obtenu pourrait avoir une signification particulière (3).

Ceci m'a amené à effectuer de nouveaux prélèvements dans le même secteur.

Les résultats relatifs aux nouveaux sites tels que Miary-Sud et Mamahapaha, ne présentent cependant pas la même particularité.

L'anomalie constatée à Manamana pourrait donc, soit correspondre à un terme de passage du champ magnétique terrestre qui ne se serait marqué qu'à cet endroit, soit à une erreur consécutive à un déplacement de la roche qui n'a pas pu être observé lors du prélèvement.

L'origine de cette différence n'étant pas bien établie, les résultats relatifs à ce site seront exclus du calcul des moyennes.

La moyenne des directions d'aimantation indiquées doit représenter la direction du champ magnétique régional présent au moment où les roches

étudiées se sont refroidies. Cette direction serait :

$$D = 350^{\circ} \quad I = -59^{\circ}$$

$$\text{avec } N = 10 \quad k = 39,4 \quad \alpha_{95} = 8^{\circ}$$

N représente le nombre de sites retenus dans le calcul.

La direction ainsi déterminée est à 4° d'arc seulement de la direction du champ magnétique actuel dans la région. Par contre son écart angulaire avec la direction d'un champ géocentrique dipolaire axial, à la latitude de Tuléar par exemple, est significatif. Il atteint 19° environ (Fig. V-16c).

Les coordonnées des pôles virtuels relatifs aux différents sites sont également représentées dans le tableau précédent. Leur moyenne détermine la position du pôle géomagnétique virtuel pour la région étudiée. Ses coordonnées seraient :

Latitude Nord 70°

Longitude Est 248°

le rayon du "cercle d'erreur" est de 11° .

Ce pôle est décalé de façon significative par rapport à la position du pôle géographique actuel (Fig. V-17).

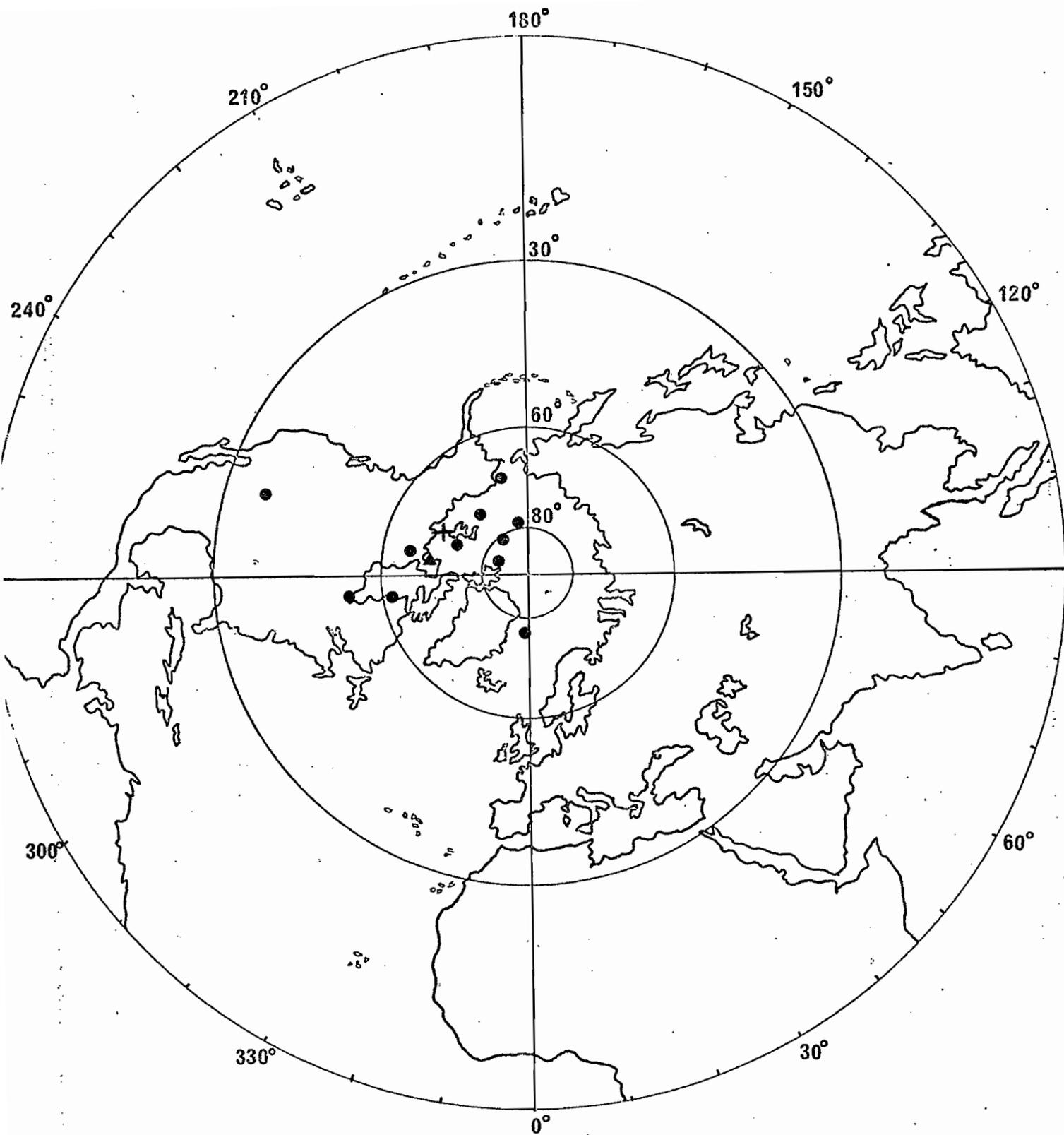


Fig. V-17

MANGOKY-ONILAHY : POSITION DES PÔLES VIRTUELS

● : pôle virtuel relatif à un site

+ : position moyenne

▲ : pôle virtuel actuel relatif à Madagascar

VI. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DU PLATEAU BASALTIQUE DU MAILAKA

1. - Géologie

Le plateau basaltique du Mailaka, comme le groupe basaltique du Mangoky-Onilahy, fait partie des importantes coulées volcaniques qui se sont épanchées durant le Crétacé supérieur sur la côte Ouest de Madagascar (12).

Situé au Sud du Cap Saint André, le plateau du Mailaka s'allonge du Nord au Sud sur plus de 200 km avec des largeurs moyennes de 25 km au Nord et de 40 km dans sa partie centrale, sur le parallèle de Maintirano. Vers le Sud, la largeur des coulées se rétrécit et au passage de Manambolo par exemple, elle n'est plus que de 1 à 2 km (Fig. V-18).

Les coulées sont essentiellement composées de basaltes, de sakalavites et de labradorites. De petits épanchements rhyolitiques sont localisés dans le secteur du bas Manambao, où ils recouvrent les basaltes par endroits.

L'épaisseur des basaltes est variable. Sur le parallèle de Tambohorano au Nord, ainsi qu'à Maintirano et à Antsalova, vers le Sud, elle atteint 150 mètres. A Manambao, au Nord de Maintirano, elle est réduite à 100 mètres.

Ces grands épanchements volcaniques sont bien datés dans la région d'Antsalova où les coulées s'intercalent entre le Turonien et le Coniacien inférieur.

Douze points de prélèvement ont été répartis aussi uniformément que possible sur toute l'étendue du plateau. Le nombre total d'échantillons orientés prélevés s'élève à 53.

L'examen de plusieurs lames minces montre que les échantillons sont constitués exclusivement de basaltes avec ou sans olivine. Les lames sont pratiquement identiques les unes aux autres, ne laissant apparaître aucune

ESQUISSE GEOLOGIQUE DE LA REGION DU MAILAKA D'après H. Besairie 1964

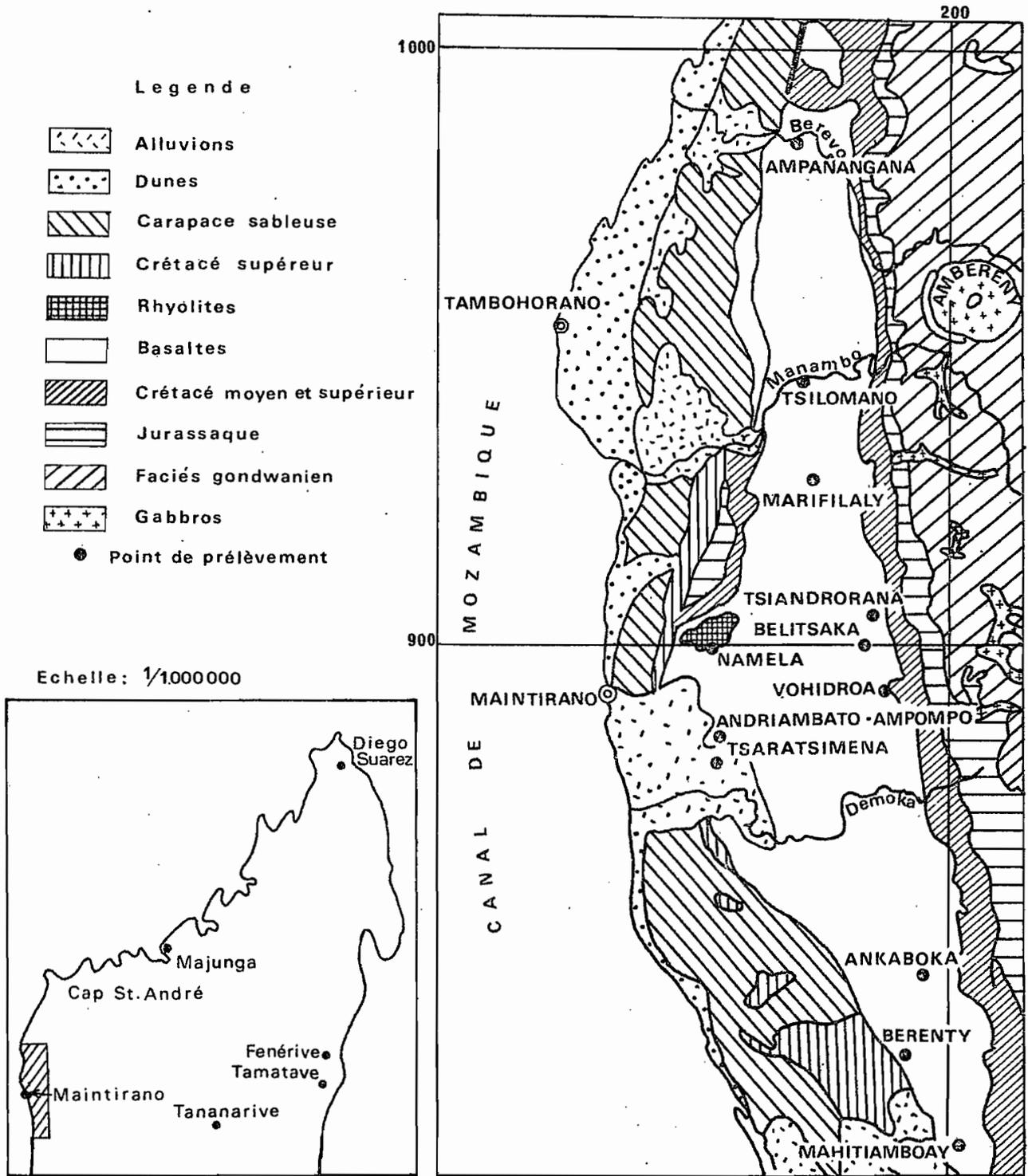


FIG. V - 18

d'ifférence notable dans la composition de la roche. De sorte que l'on peut considérer cette dernière comme uniforme dans tous les sites visités.

2. - Etude magnétique

La mesure de l'intensité des aimantations rémanentes naturelles révèle une gamme étendue de valeurs, comme le montre l'histogramme des aimantations spécifiques (Fig. V-19). On remarque toutefois que la majeure partie des valeurs observées restent inférieures à $2 \cdot 10^{-3}$ uém cgs/g. Quelques valeurs élevées existent également.

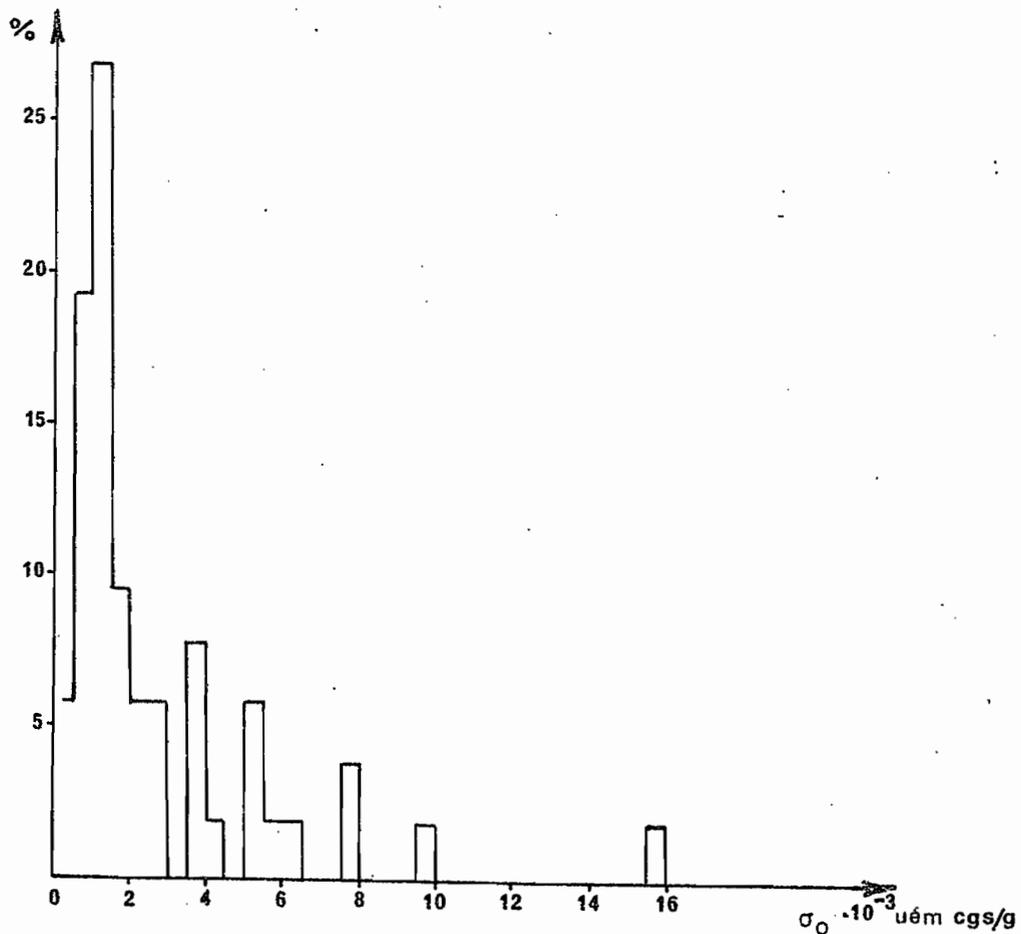


Fig.V-19 HISTOGRAMME DES INTENSITES D'AIMANTATION SPECIFIQUE

Les aimantations rémanentes naturelles sont caractérisées par la grande dispersion de leurs directions (Fig. V-20a). Sauf dans de rares cas, celles-ci sont peu sensibles à l'action du champ magnétique terrestre actuel.

Lorsque les échantillons sont soumis à l'action du champ alternatif dont on fait croître progressivement l'intensité, on observe pour certains une décroissance rapide de l'aimantation dès la phase initiale de l'opération; pour d'autres, la perte d'aimantation est moins importante.

Dans les premiers cas les aimantations naturelles sont essentiellement constituées d'aimantations instables pouvant être du type ARI. Les courbes obtenues dans ces cas se ramènent au type e de la figure II-8. Ce genre de courbe se rapporte le plus souvent à des échantillons à forte aimantation spécifique.

Dans les seconds cas, on a affaire à des aimantations stables superposées à des aimantations parasites. Dans d'autres encore, les aimantations naturelles sont stables d'un bout à l'autre de la désaimantation. Les courbes de désaimantation dans ces deux derniers cas présentent l'allure de la courbe d de la figure II-8. 64 % des échantillons examinés sont porteurs d'aimantation stable.

Les aimantations stables caractéristiques des échantillons, ont été considérées comme étant d'origine thermorémanente. Leurs directions sont nettement mieux groupées que celles des aimantations rémanentes naturelles (Fig. V-20b).

Pour trouver la direction de l'aimantation caractéristique d'un site, la moyenne des directions des aimantations stables relatives aux blocs de

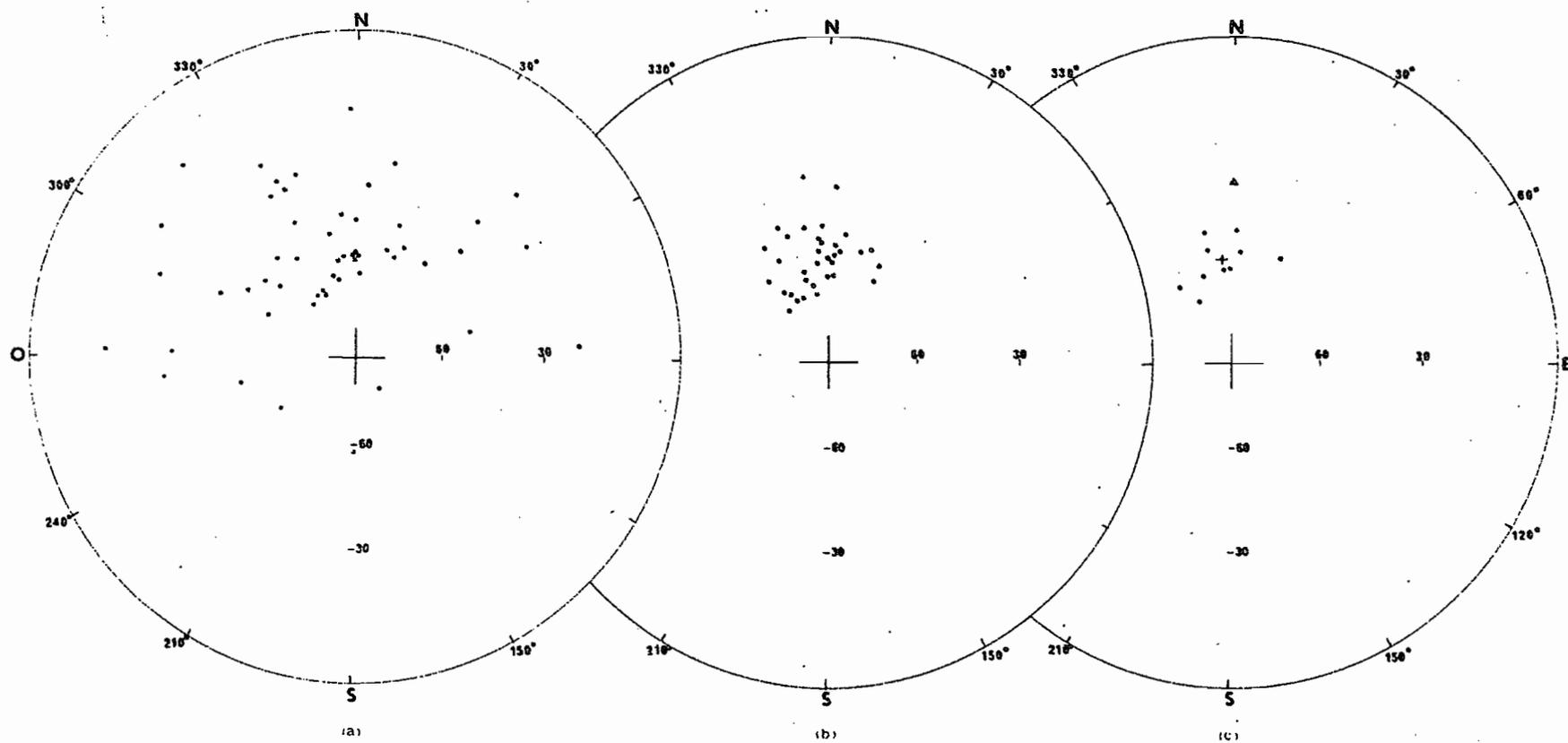


FIG. V-20. - MAILAKA

Directions des aimantations

- a) rémanentes naturelles
- b) stables, caractéristiques des échantillons
- c) caractéristiques des sites

+ : Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

▲ : Direction du champ dipolaire

roche orientés prélevés dans ce site, a été calculée. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V-6
Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels

SITE	ϕ_0	λ_0	N	D	Aimantation		Pôle	
					I	α_{95}	ϕ'	λ'
Ampanangana	-17°12	44°19	5	4°	-53°	9°	73°	212°
Tsilomano	-17°34	44°19	5	24°	-52°	15°	64°	174°
Marifilaly	-17°44	44°20	5	355°	-58°	6°	69°	235°
Mangily	-17°57	44°21	4	1°	-46°	10°	80°	221°
Belitsaka	-17°58	44°21	3	324°	-59°	15°	52°	271°
Ambizy	-17°59	44°11	5	valeurs non significatives				
Vohidroa	-18°04	44°27	4	330°	-66°	3°	51°	257°
Andriambato	-18°08	44°12	3	valeurs non significatives				
Tsaratsimena	-18°09	44°11	5	358°	-58°	11°	69°	229°
Ankaboka	-18°29	44°31	5	347°	-46°	14°	75°	275°
Berevo	-18°36	44°28	5	340°	-59°	30°	63°	259°
Mahitiamboay	-18°45	44°33	4	347°	-51°	11°	72°	263°

3. - Discussion

Il n'a pas été possible de définir la direction d'aimantation caractéristique pour deux sites, les valeurs ont été trop dispersées et non significatives.

En ce qui concerne les autres sites, on remarque que la plupart des déclinaisons sont occidentales et assez éloignées du Nord vrai.

Du point de vue inclinaison, le signe est identique pour tous les sites retenus. Il est, en outre, conforme avec le signe actuel de l'inclinaison magnétique à Madagascar. Leurs valeurs sont nettement supérieures à celles qu'aurait un champ dipolaire géocentrique axial (Fig. V-20c).

La moyenne de ces directions devrait représenter la direction du champ

magnétique régional ancien, à savoir :

$$D = 352^\circ \quad I = -56^\circ$$

avec $N = 10$ $k = 50,0$ et $\alpha_{95} = 7^\circ$

N étant le nombre de sites retenus pour le calcul de la moyenne.

La direction ainsi définie n'est pas très différente de celle que l'on observe actuellement dans la région.

Les coordonnées des pôles virtuels correspondant à chacun des sites retenus sont également indiquées dans le tableau précédent. Leur moyenne détermine la position du pôle géomagnétique virtuel moyen relatif à la région étudiée. Les calculs donnent les valeurs suivantes :

Latitude Nord 70°

Longitude Est 244°

avec $N = 10$ et $\alpha_{95} = 9^\circ$

Cette position est éloignée de celle du pôle Nord géographique actuel (Fig. V-21).

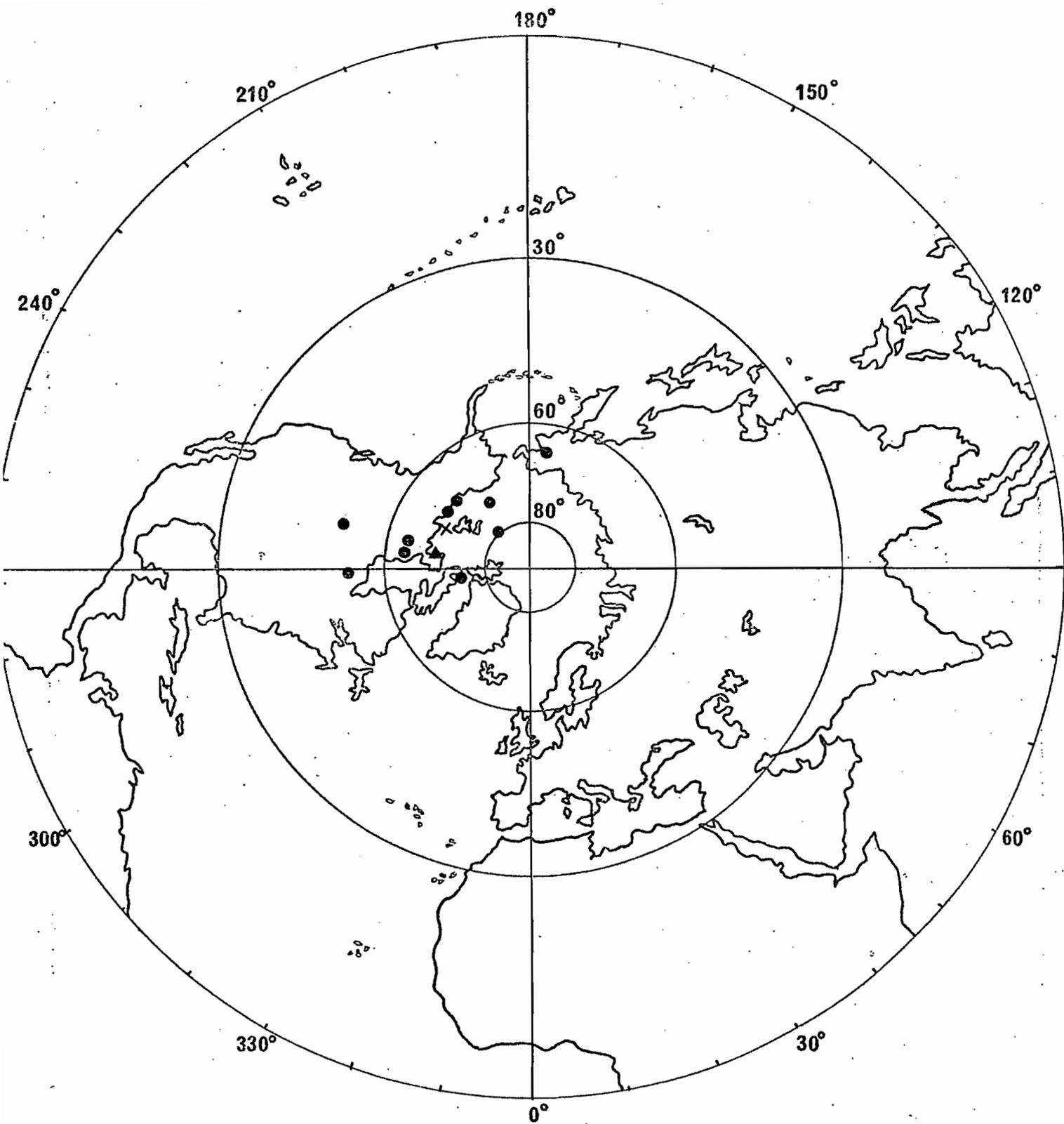


Fig. V-21

MAILAKA : POSITION DES PÔLES VIRTUELS

● : pôle virtuel relatif à un site

+ : position moyenne

▲ : pôle virtuel actuel relatif à un site

VII. - ETUDE PALEOMAGNETIQUE DU PLATEAU BASALTIQUE DE L'ANTANIMENA

1. - Géologie

Situé à une soixantaine de km au Sud de Majunga, le plateau de l'Antanimena s'étend entre la Betsiboka à l'Est et le Cap Saint André à l'Ouest, sur une longueur d'environ 100 km. Sa largeur moyenne est de 20 km environ (Fig. V-22).

Le plateau de l'Antanimena est constitué par une succession de coulées de basaltes, sans que des tufs ou cinérites aient été reconnus entre elles. Leur puissance est de l'ordre de 200 mètres. Elles se différencient uniquement par leur couleur, leur structure et leur degré d'altération. Les basaltes peuvent être gris compacts à grain fin, ou noirs verdâtre, à gros éléments.

Leur âge est connu avec précision. Ils reposent sur des grès Cénomaniens et sont recouverts par le Turonien supérieur (11).

Le Cénomalien est essentiellement constitué par des grès grossiers, d'épaisseur variable. Celle-ci atteint 120 mètres, près de la Betsiboka, puis diminue à mesure que l'on s'éloigne vers l'Ouest. Le Cénomalien disparaît complètement à l'Ouest de l'Ihopy, où les basaltes reposent directement sur l'Albien.

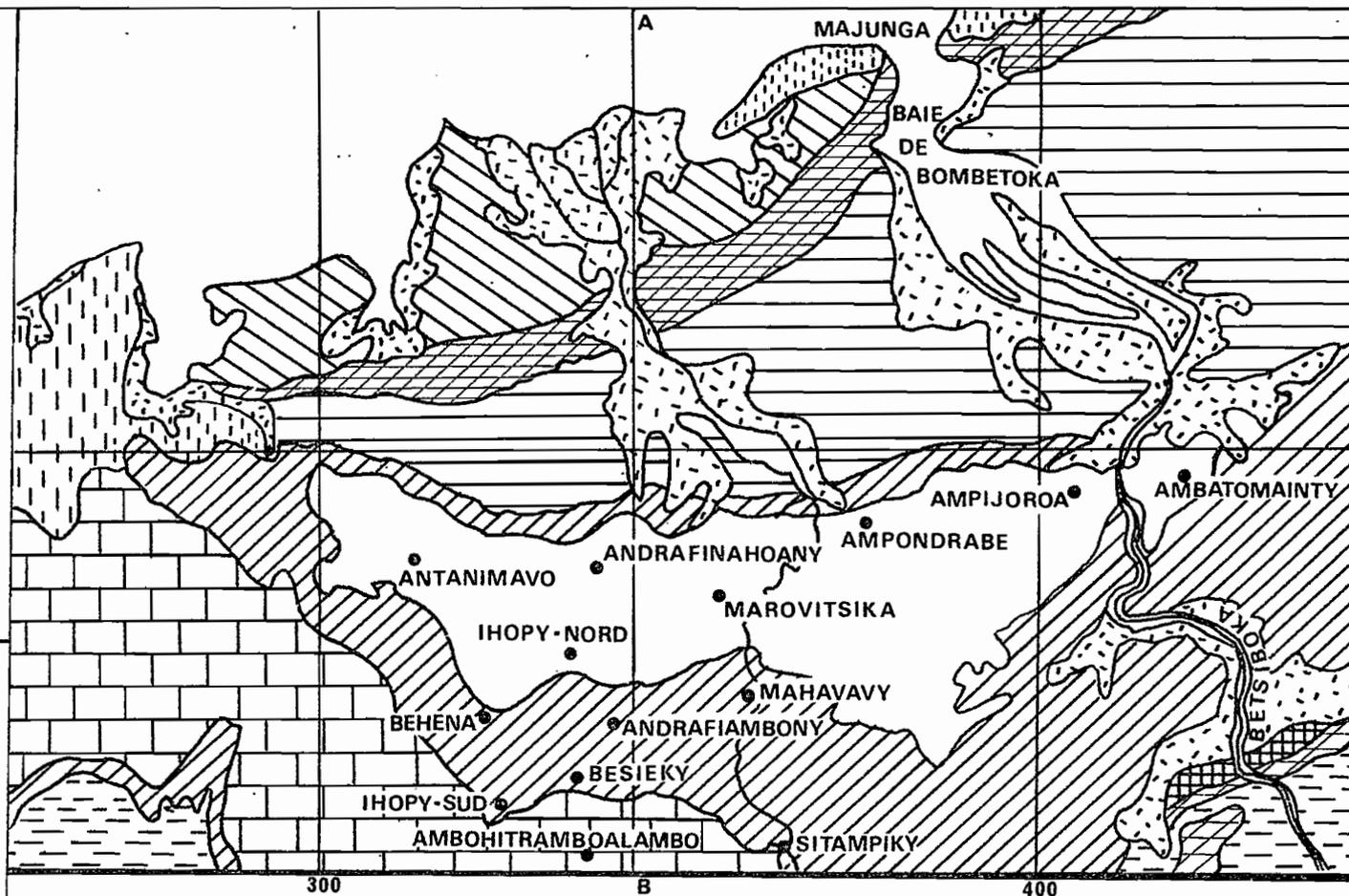
Le Turonien suprabasaltique renferme une riche faune du Turonien supérieur.

Une esquisse géologique de la région étudiée et une coupe géologique Nord-Sud, mettant en évidence la position des coulées, sont présentées (Fig. V-22).

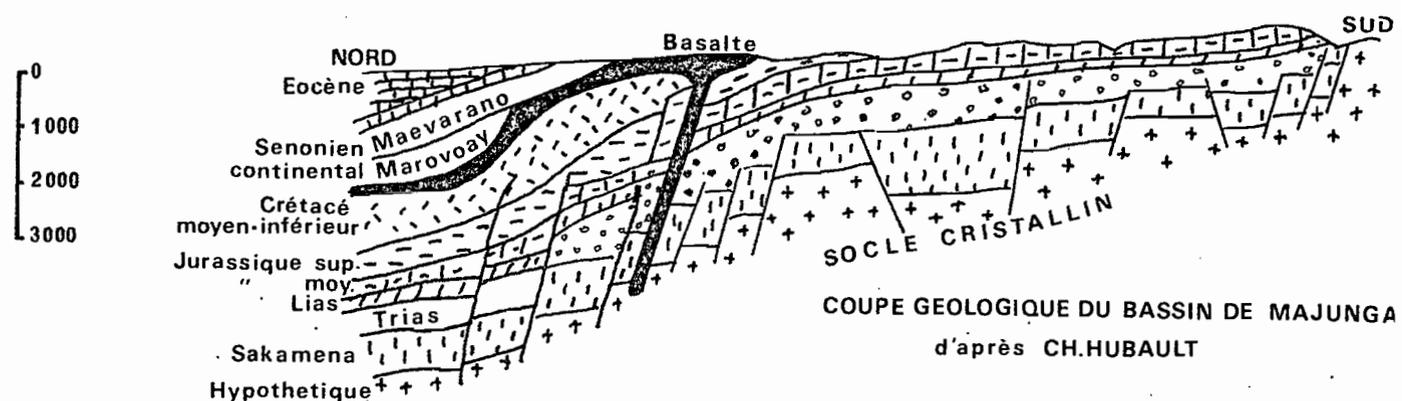
Un premier groupe d'échantillons orientés provient de ces coulées. Ils ont été prélevés dans sept sites répartis aussi uniformément que

ESQUISSE GEOLOGIQUE
DE L'ANTANIMENA

-  Alluvions
 -  Carapace sableuse
 -  Pliocène
 -  Eocène
 -  Crétacé supérieur
 -  Basaltes
 -  Crétacé moyen et inférieur
 -  Jurassique
 -  Faciès gondwanien
 - Point de prélèvement
- Echelle : 1/1.000.000



COUPE SUIVANT AB



COUPE GEOLOGIQUE DU BASSIN DE MAJUNGA
d'après CH.HUBAULT

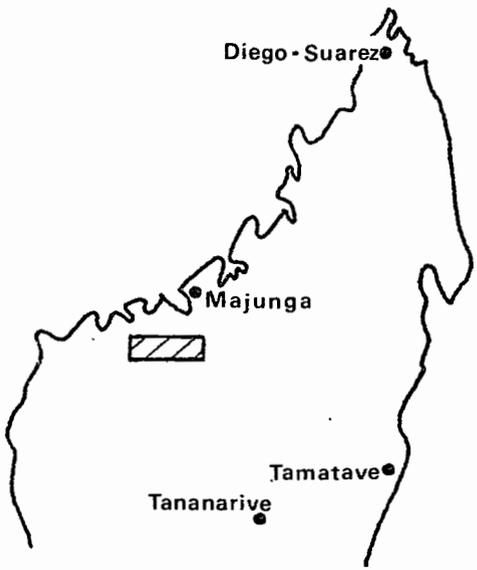


FIG. V - 22

possible d'Est en Ouest, sur toute la longueur du plateau.

L'étude pétrographique d'un certain nombre de ces échantillons montre que les basaltes sont frais ou peu altérés. Ils sont riches en plagioclases et renferment des phénocristaux d'augite et parfois de l'olivine. Ils sont à grain fin.

Un second groupe d'échantillons a été prélevé dans les filons situés au Sud du plateau. L'épaisseur de ces filons est variable, elle atteint parfois l'hectomètre.

Ils sont constitués par des basaltes doléritiques ou des dolérites de composition analogue à celle des coulées, avec du labrador et de l'augite. L'olivine est plus fréquente.

Ces filons recoupent toute la série antéturonienne.

Le nombre total d'échantillons prélevés s'élève à 61, ils ont été répartis dans 13 sites, dont sept appartiennent aux coulées proprement dites et six aux formations filoniennes.

La position de chaque site de prélèvement est indiquée sur le schéma de la figure V-22.

2. - Etude magnétique

L'action du champ magnétique terrestre modifie peu les directions des aimantations naturelles. En effet, deux mesures de direction d'aimantation, faites à deux ou trois mois d'intervalle, ne montrent aucun changement significatif des valeurs observées. Entre les deux mesures, les échantillons ont été retournés dans le champ magnétique du laboratoire.

En ce qui concerne les intensités d'aimantation, l'histogramme de la figure V-23, relatif aux aimantations spécifiques, montre un net maximum vers 10^{-3} uém. Très peu de valeurs élevées sont observées.

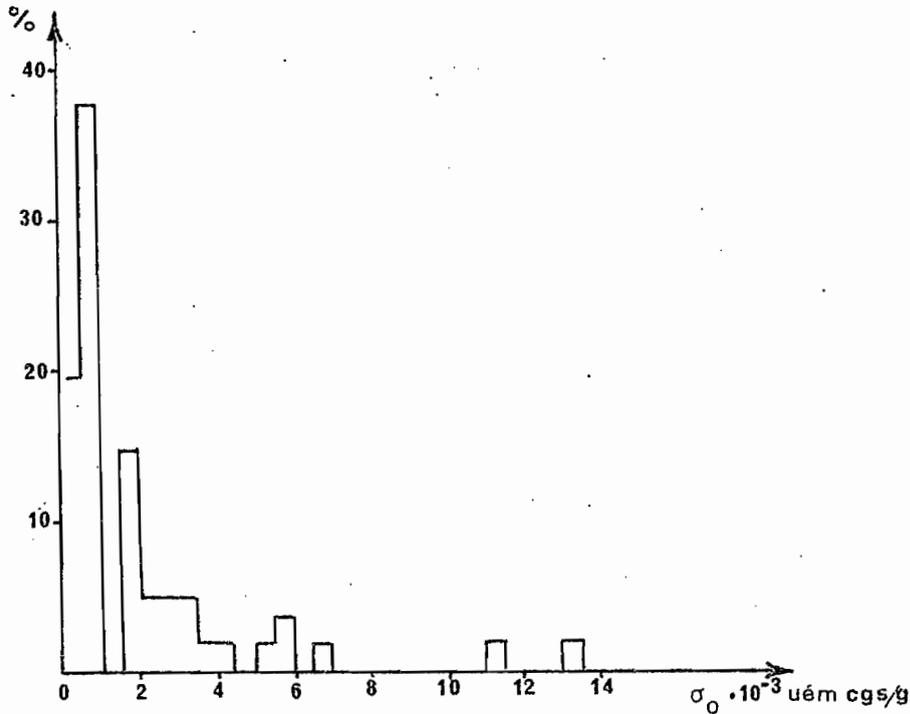


Fig.V-23 HISTOGRAMME DES INTENSITES D'AIMANTATION SPECIFIQUE.

La figure V-24a représente la répartition des directions des aimantations rémanentes naturelles. On remarque une grande dispersion tant des déclinaisons que des inclinaisons. Toutefois, peu d'aimantations sont dirigées suivant la direction du champ magnétique actuel dans la région.

Pour analyser les aimantations naturelles, chaque échantillon a été soumis à une désaimantation progressive par champs alternatifs. Pour chaque échantillon et pour chaque valeur du champ appliqué, le rapport de l'aimantation restante à l'aimantation initiale a été calculé. Les courbes obtenues peuvent se ramener aux types b, c et e décrits dans le chapitre II.

Cette série d'expériences a montré que peu d'aimantations naturelles sont stables, la plupart comportent des fractions instables, dont les champs coercitifs varient entre 50 et 100 Oe. Dans la majorité des cas, la fraction

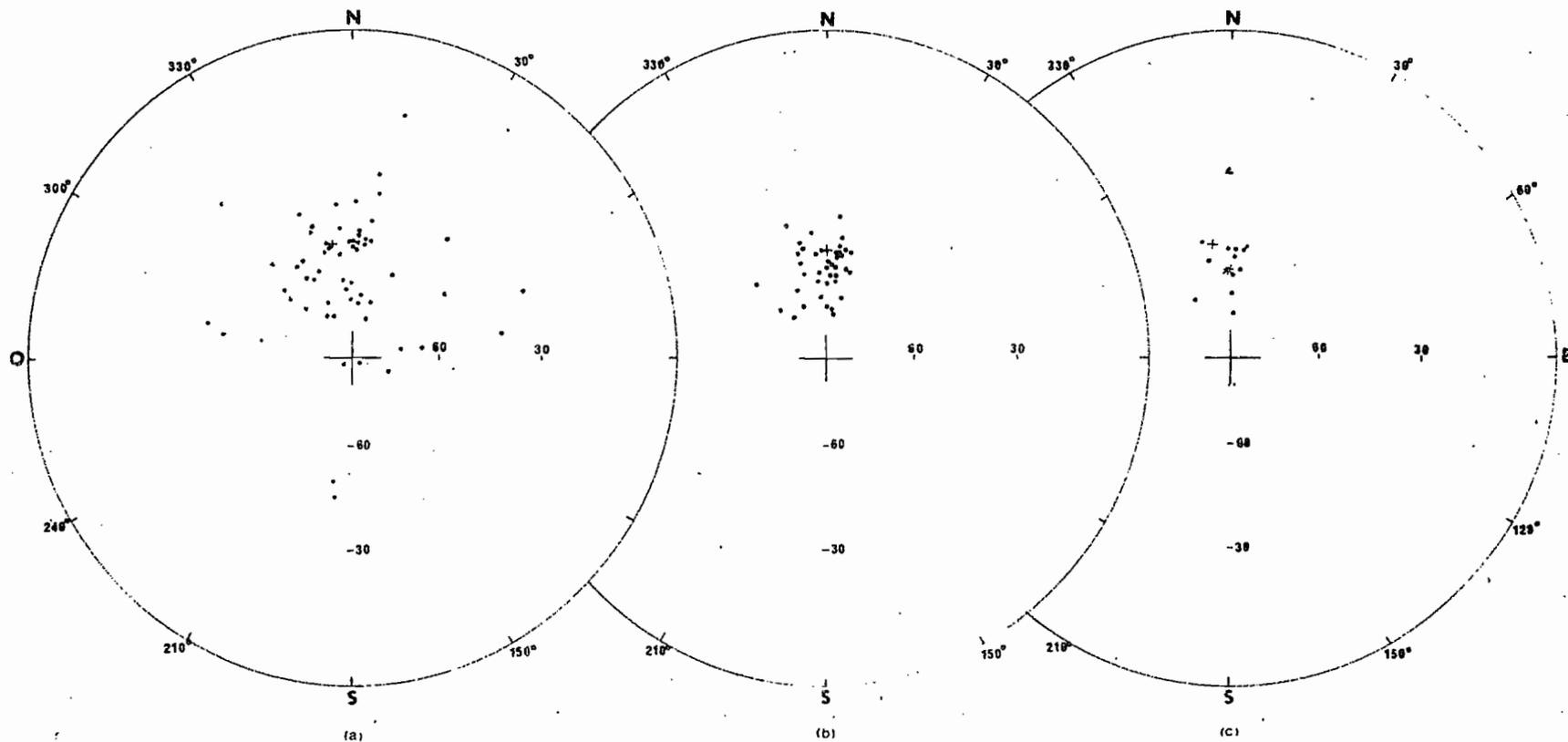


FIG. V-24. - ANTANIMENA

Directions des aimantations

a) rémanentes naturelles

b) stables, caractéristiques des échantillons

c) caractéristiques des sites

+ : Direction du champ magnétique terrestre actuel

* : Direction moyenne d'aimantation de l'ensemble des sites

▲ : Direction du champ dipolaire

stable représente plus de la moitié de l'aimantation initiale. 72 % des échantillons examinés présentent une aimantation stable caractéristique. Leurs directions sont nettement mieux groupées que celles des aimantations rémanentes naturelles (Fig. V-24b).

J'ai retenu comme caractéristique de l'aimantation d'un site la moyenne des directions des aimantations stables relatives aux échantillons prélevés dans ce site. Ces aimantations stables peuvent être, soit des aimantations naturelles, soit des aimantations déterminées après désaimantation partielle des échantillons.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

Tableau V-7

Directions moyennes d'aimantation et positions des pôles virtuels

SITE	ϕ_0	λ_0	N	Aimantation			Pôle	
				D	I	α_{95}	ϕ'	λ'
Ambatomainy *	-16°13	46°38	6	8°	-53°	6°	71°	206°
Ampijoroa *	-16°14	46°30	5	6°	-54°	2°	71°	211°
Ampondrabe *	-16°16	46°13	4	358°	-54°	6°	71°	232°
Antanimavo *	-16°19	45°37	5	346°	-50°	4°	70°	264°
Andrafinahoany *	-16°20	45°52	4	360°	-62°	5°	62°	225°
Marovitsika *	-16°21	46°01	5	3°	-54°	6°	72°	217°
Ihopy-Nord *	-16°27	45°50	4	2°	-68°	6°	55°	224°
Mahavavy	-16°31	46°04	3	3°	-56°	4°	70°	220°
Andrafiambony	-16°32	45°53	3	4°	-74°	2°	46°	223°
Behena	-16°32	45°43	4	valeurs non significatives				
Besieky	-16°36	45°50	9	329°	-66°	7°	49°	257°
Ihopy-Sud	-16°38	45°46	5	7°	-60°	5°	65°	213°
Ambotramboalambo	-16°42	45°51	4	347°	-57°	5°	66°	251°

Les sites marqués (*) appartiennent aux coulées de basaltes.

3. - Discussion

Les valeurs relatives au site Behena ayant été trop dispersées, il n'a pas été possible de déterminer sa direction d'aimantation caractéristique.

En ce qui concerne les autres sites, on remarque que la majorité des déclinaisons observées sont soit voisines de zéro, soit faiblement orientales. Peu de valeurs se rapprochent de la déclinaison magnétique actuelle (Fig. V-24c).

Toutes les inclinaisons sont négatives, c'est à dire du même signe que l'inclinaison magnétique actuelle à Madagascar. Leurs valeurs sont nettement plus élevées que celles qu'aurait un champ dipolaire géocentrique axial (-30° à la latitude moyenne des sites).

L'étude comparative des directions d'aimantation des échantillons en provenance des coulées et de ceux qui ont été prélevés dans les formations filoniennes, ne montre aucune différence systématique. Ceci paraît normal, puisqu'il n'existe entre les deux groupes d'échantillons, ni une différence d'âge, ni une différence dans leur constitution minéralogique.

Dans ces conditions, on peut considérer la moyenne de toutes les directions ainsi déterminées comme représentative de la direction du champ magnétique régional, au moment du refroidissement des roches. Cette direction serait :

$$D = 358^\circ \quad I = -60^\circ$$

avec $N = 12$, $k = 78,8$ et $\alpha_{95} = 5^\circ$

N représente le nombre de sites retenus pour le calcul de la moyenne.

La direction ainsi déterminée présente un écart angulaire de près de 9° avec la direction du champ magnétique actuel dans la région étudiée

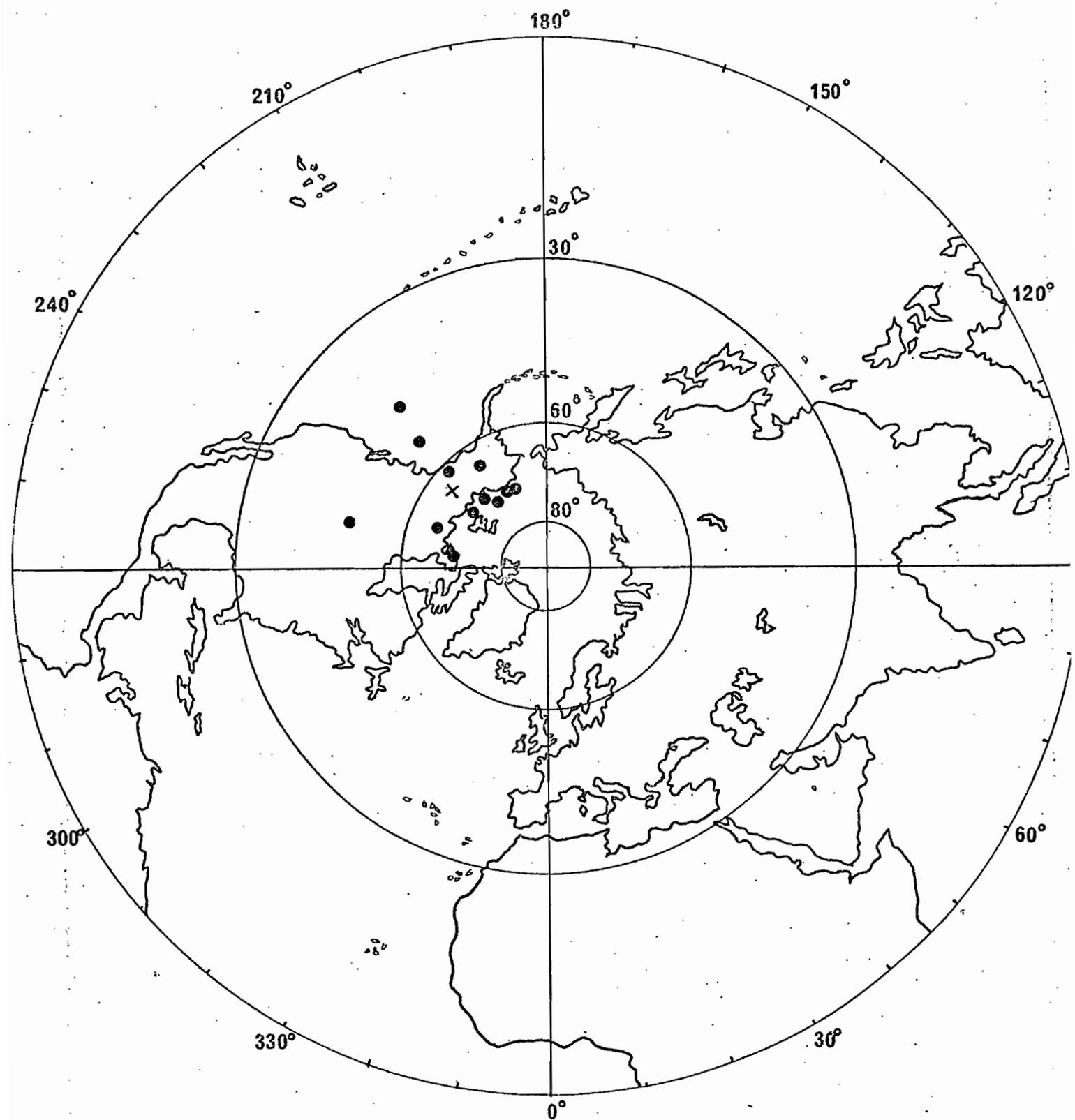


Fig. V-25

ANTANIMENA : POSITION DES PÔLES VIRTUELS

●: pôle virtuel relatif à un site

+: position moyenne

▲: pôle virtuel actuel relatif à Madagascar

($D = 350^\circ$, $I = -51^\circ$), et de 29° , avec celle qu'aurait un champ dipolaire axial à la latitude moyenne des sites.

La position du pôle virtuel relatif à chaque site retenu a été également calculée. Les résultats sont indiqués dans le tableau précédent et sur la figure V-25.

Les positions trouvées sont toutes décalées par rapport au pôle Nord géographique actuel. Il en est de même de leur moyenne qui doit représenter la position du pôle géomagnétique virtuel moyen correspondant à la période de mise en place des roches étudiées. Cette position moyenne aurait pour coordonnées :

Latitude Nord 65°

Longitude Est 230°

avec $N = 12$, $\alpha_{95} = 6^\circ$.

VIII. - DISCUSSION SUR L'ENSEMBLE DES RESULTATS PALEOMAGNETIQUES RELATIFS AU CRETACE

1. - Résumé des résultats

L'étendue et le nombre des formations géologiques étudiées permettent de considérer les résultats obtenus comme étant représentatifs, aussi bien de l'ensemble de la Grande Ile que des périodes géologiques concernées.

L'ensemble des résultats exposés séparément dans les paragraphes précédents est résumé dans le tableau suivant :

Tableau V-8

Résumé des résultats paléomagnétiques relatifs
aux formations crétacées

REGION	AGE	N	D	Aimantation		α_{95}	ϕ'	Pôle	
				I	k			λ'	α_{95}
Côte centre N-E	74 ± 7 MA	11	11°	-65°	306,6	3°	60°	212°	4°
Côte Sud-Est	73 ± 7 MA	16	7°	-64°	80,8	4°	66°	218°	7°
Massif de l'Androy	70 ± 7 MA	8	349°	-66°	81,8	7°	63°	243°	11°
Mangoky-Onilahy	87 ± 10 MA	12	350°	-59°	39,4	8°	70°	248°	11°
Mailaka	88 MA	12	352°	-56°	50,0	7°	70°	244°	9°
Antanimena	90 MA	13	358°	-60°	78,8	5°	65°	230°	6°

Dans ce tableau :

N représente le nombre de sites examinés dans chaque région

k et α_{95} sont les paramètres de R.A. FISHER définis par les relations 2-5 et 2-6.

Le tableau comporte également des indications sur l'âge des diverses formations. Les unes proviennent de datations radiochronologiques, les autres d'une corrélation entre les données stratigraphiques et l'échelle de temps géologique publiée dans "The Phanerozoic Time Scale" de la Société Géologique de Londres (49).

Les données permettent d'attribuer aux formations du Sud et de la côte Est un âge moyen de 73 millions d'années et aux formations de la côte Ouest un âge moyen de 90 millions d'années.

2. - Directions d'aimantation

L'examen des résultats ci-dessus appelle un certain nombre de remarques.

On note en premier lieu que toutes les aimantations ont un sens conforme à celui du champ magnétique actuel à Madagascar.

Ce premier résultat suggère qu'au moment où les formations envisagées se sont mises en place, le sens du champ magnétique aurait été identique à

celui qu'il a actuellement.

Le fait que toutes les aimantations aient été acquises dans le même sens ne permet pas, cependant, d'affirmer que le champ magnétique a gardé la même polarité pendant l'intervalle de temps compris entre les âges moyens des éruptions. En effet, du fait de la discontinuité des activités volcaniques, les renseignements paléomagnétiques que l'on peut en tirer, sont nécessairement fragmentaires.

La précision avec laquelle les âges des formations du Sud et de la côte Est ont été obtenus par datations radiochronologiques, ainsi que l'insuffisance des données stratigraphiques dans ces régions, ne permettent pas de définir s'il y a eu une ou plusieurs éruptions dans ces secteurs.

En ce qui concerne la côte Ouest par contre, des arguments stratigraphiques précis permettent de définir trois périodes d'éruptions :

- l'une ayant eu lieu au Turonien moyen, c'est à dire vers 90 MA, d'après l'échelle de temps publiée par la Société Géologique de Londres,
- la deuxième, à la limite du Turonien et du Coniacien (vers 88 MA, d'après la même échelle que ci-dessus),
- et la troisième, à la limite du Santonien et du Campanien (76 MA).

Il en résulte que le champ magnétique terrestre aurait eu au moins trois fois, un sens identique à celui qu'il a actuellement, entre 90 et 76 MA.

La synthèse de l'ensemble des résultats paléomagnétiques relatifs au Crétacé, faite par C.E. HELSLEY et M.B. STEINER (60), montre que le champ magnétique terrestre aurait eu une polarité normale depuis l'Albien jusqu'au Santonien moyen et même jusqu'au Campanien, si l'on excepte la formation japonaise d'Akoh, datée du Santonien moyen, la seule connue pour avoir présenté un sens inversé vers cette période.

Les résultats relatifs à Madagascar semblent confirmer cette hypothèse, notamment entre 90 et 70 MA.

Une seconde remarque peut être faite, en ce qui concerne les valeurs des inclinaisons. Celles-ci sont toutes supérieures à celles qu'aurait un champ géocentrique dipolaire axial aux différentes latitudes moyennes des formations étudiées.

En ce qui concerne les déclinaisons, l'examen des résultats fait apparaître une différence qui semble systématique entre les formations de la côte Est et celles de la côte Ouest. Les résultats suggèrent une dérive moyenne vers l'Est de la déclinaison magnétique entre 90 et 70 millions d'années.

La déclinaison relative à l'Androy se rapproche davantage de celle qui se rapporte aux formations plus anciennes de la côte Ouest, que de celle trouvée pour les formations d'âge équivalent de la côte Est. Les sites étudiés sont limités dans un secteur d'étendue trop réduite par rapport à celle de la formation toute entière (Fig. V-9). Dans ces conditions, les résultats obtenus pourraient ne pas être suffisamment représentatifs de toute la formation. Dans le stade actuel des recherches, aucune explication concernant ce résultat ne peut être avancée.

3. - Pôles virtuels

La position du pôle géomagnétique virtuel correspondant à chacune des régions étudiées est également indiquée dans le tableau V-8. Tous les pôles présentent des écarts significatifs avec le pôle géographique actuel. Ils sont tous groupés dans la zone incluant l'Alaska et le Nord-Ouest du Canada, entre les latitudes 60° et 70° Nord (Fig. V-26).

La moyenne des positions ainsi définies peut être considérée comme étant représentative du pôle géomagnétique virtuel moyen relatif à Madagascar pendant une fraction du Crétacé supérieur.

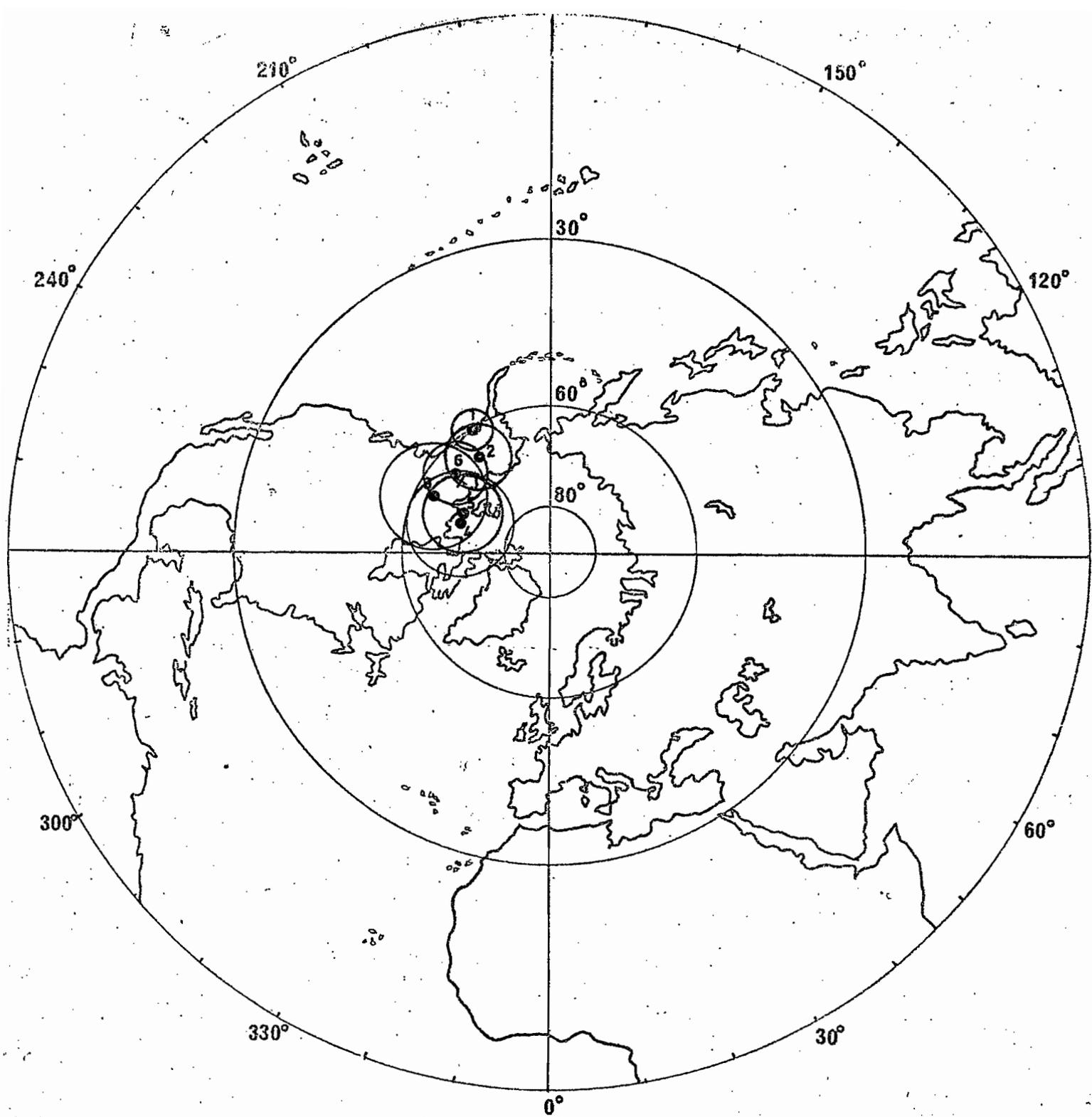


FIG. V-26.- POSITION DES POLES VIRTUELS DE MADAGASCAR POUR LE CRETACE SUPERIEUR

+: position moyenne

1. pôle relatif aux formations de la côte Centre Nord-Est
2. pôle relatif aux formations de la côte Sud-Est
3. pôle relatif au massif volcanique de l'Androy
4. pôle relatif aux formations du Mangoky-Onilahy
5. pôle relatif au plateau basaltique du Mailaka
6. pôle relatif au plateau basaltique de l'Antanimena

Les pôles sont donnés avec leur "cercle d'erreur" respectif

Cette position moyenne de coordonnées 66°N et 231°E (avec $\alpha_{95} = 6^{\circ}$) est aussi nettement décalée par rapport au pôle géographique actuel. Ce résultat pourrait s'expliquer, comme on le verra dans le chapitre suivant, par une différence entre la position géographique actuelle de Madagascar et celle qu'elle avait pendant le Crétacé supérieur.

L'étude de la dispersion des pôles par rapport à leur moyenne montre une stabilité comparable à celle obtenue pour l'Amérique du Nord pour le Crétacé (30, 55, 56, 59, 62), et pour l'Afrique au Mésozoïque (19, 52, 73, 77).

On est tenté, pour tracer la trajectoire du pôle, de joindre les différents pôles entre eux. Cela, à première vue, paraît justifié, compte tenu de l'âge relatif des formations envisagées.

La trajectoire obtenue de cette façon n'est pas régulière, car du fait de la discontinuité des activités volcaniques, chaque position doit représenter celle du pôle à un moment donné du Crétacé supérieur. En outre, les pôles ne se rangent pas dans l'ordre chronologique des éruptions. L'examen détaillé de ces pôles fait cependant apparaître un certain écart entre les pôles obtenus à partir des formations de la côte Ouest, qui sont plus anciennes, et ceux qui se rapportent aux formations plus jeunes de la côte Est. Leurs latitudes géographiques sont approximativement identiques; mais tel ne semble pas être le cas en longitude, les pôles relatifs à la côte Est sont systématiquement situés à l'Est de ceux de l'autre littoral.

Il en résulte que, s'il y avait déplacement du pôle, l'étude comparative des deux groupes de pôles suggère un déplacement vers l'Est.

Mais cet écart pourrait aussi avoir une autre signification. De même l'écart qui existe entre le pôle moyen et le pôle géographique actuel pourrait être dû à une dérive de la Grande Ile depuis le Crétacé supérieur.

Ces problèmes vont être abordés dans le chapitre suivant.

4. - Conclusion

Ainsi l'étude paléomagnétique des formations volcaniques du Crétacé supérieur suggère l'existence vers cette époque d'un champ magnétique de sens normal. Ce résultat contraste avec celui qui a été obtenu pour le Tertiaire et le Quaternaire, où le champ magnétique aurait été tantôt normal, tantôt inverse. Les résultats obtenus à Madagascar apportent donc de nouveaux arguments en faveur de l'existence d'un champ magnétique normal pendant de longues périodes du Crétacé.

CHAPITRE VI

ESSAI D'INTERPRETATION DES RESULTATS

I. - MADAGASCAR - UN FRAGMENT DU GONDWANA

Selon A. WEGENER (102), tous les continents actuels auraient formé, primitivement, une seule et unique masse qu'il appela Pangée. Celle-ci se serait rompue par la suite, donnant naissance à des continents qui auraient dérivé ensuite vers leur position actuelle.

Dans l'hypothèse de A.L. DU TOIT (43), les continents actuels proviendraient de la dislocation non pas d'un seul, mais plutôt de deux supercontinents : la Laurasia dans l'hémisphère Nord et le Gondwana dans l'hémisphère Sud.

Divers arguments morphologiques, géologiques et paléontologiques ont été avancés à l'appui de ces théories. Par exemple, les analogies entre les faunes et les flores fossiles d'Amérique du Sud, d'Afrique, de Madagascar, de l'Inde et de l'Australie, ainsi que divers témoignages de glaciations, ont conduit à l'idée du Gondwana.

Si l'existence du Gondwana est presque unanimement admise actuellement, de nombreuses divergences existent encore en ce qui concerne la position relative des divers éléments qui le constituent. Ce sujet préoccupe beaucoup d'auteurs et diverses reconstructions de ce supercontinent ont été proposées à maintes occasions (31, 32, 36, 37, 43, 52, 66, 73, 76, 92).

Du point de vue qui nous occupe, selon L.C. KING (67), primitivement la Grande Ile était accolée par sa côte occidentale actuelle, au Tanzanie-Kenya (figure VI-1). Il existe pour cela quelques arguments géologiques solides.

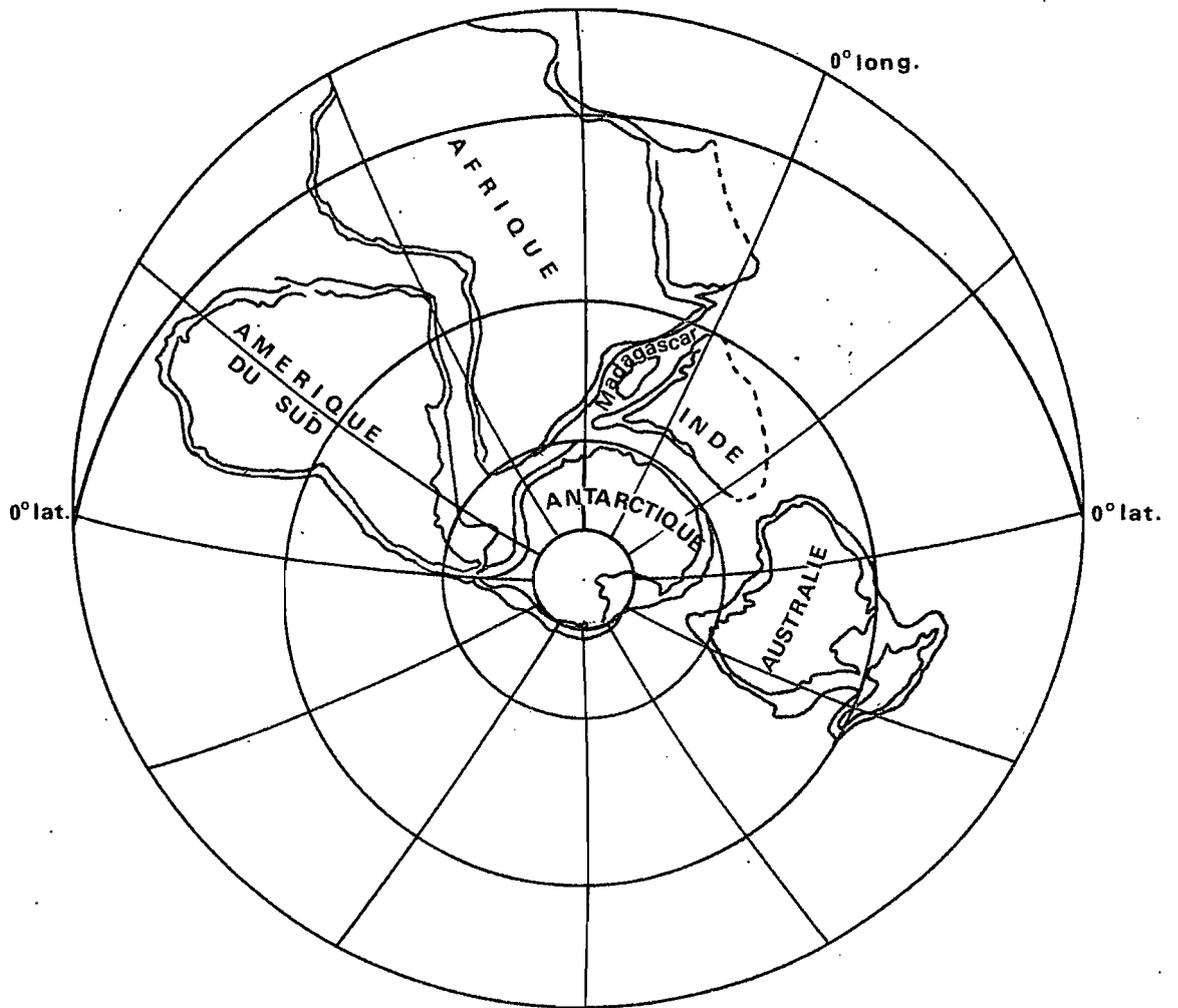


FIG.VI - 1 LE GONDWANA AU DEBUT DU PERMIEN d'après L.C. KING

Dans une telle reconstruction, les analogies du Karroo malgache et du Karroo africain deviennent précises. Les couches de la Sakoa ressemblent d'une façon remarquable aux couches de la série de Songea dont les schistes sont également comparables aux schistes noirs malgaches (10, 44, 48).

A.G. SMITH et A. HALLAM (91) en appliquant la méthode de E. BULLARD et ses collaborateurs (21) sur les côtes occidentales de Madagascar et orientale du Tanzanie-Kenya, aboutissent à une reconstitution analogue à celle de L.C. KING (figure VI-2).

Les analogies géologiques entre les deux pays, selon F. DIXEY (41), n'indiquent pas nécessairement l'existence d'une liaison ancienne entre eux mais s'expliquent plutôt par le fait que l'un et l'autre se trouvent de chaque côté d'un grand géosynclinal.

D'autres auteurs, en reprenant les mêmes arguments, supposent que primitivement il ne peut pas exister une liaison entre les deux pays, tout au moins dans cette zone (46, 92).

Une autre reconstitution due à M.W. Mc ELHINNY et G.R. LUCK (78) place Madagascar entre l'Inde et l'Australie, comme l'indique le schéma de la figure VI-3. Pour F. AHMAD (1), Madagascar aurait été incluse dans la grande baie australienne (figure VI-4).

Une liaison Inde-Madagascar n'est pas en contradiction avec les données géologiques dans ces deux pays. En effet, des analogies existent entre le socle cristallin malgache et celui de l'Inde, notamment en ce qui concerne le Dharwar, ses charnockites, khondalites et gondites. Ces dernières se retrouvent dans le système du Graphite malgache. L'abondance de la monazite au Travancore trouve son équivalent à Fort-Dauphin dans le Sud de la Grande Ile. L'orogénèse de 2.400 millions d'années qui a affecté le socle malgache se retrouve à Dharwar (1, 10, 47).

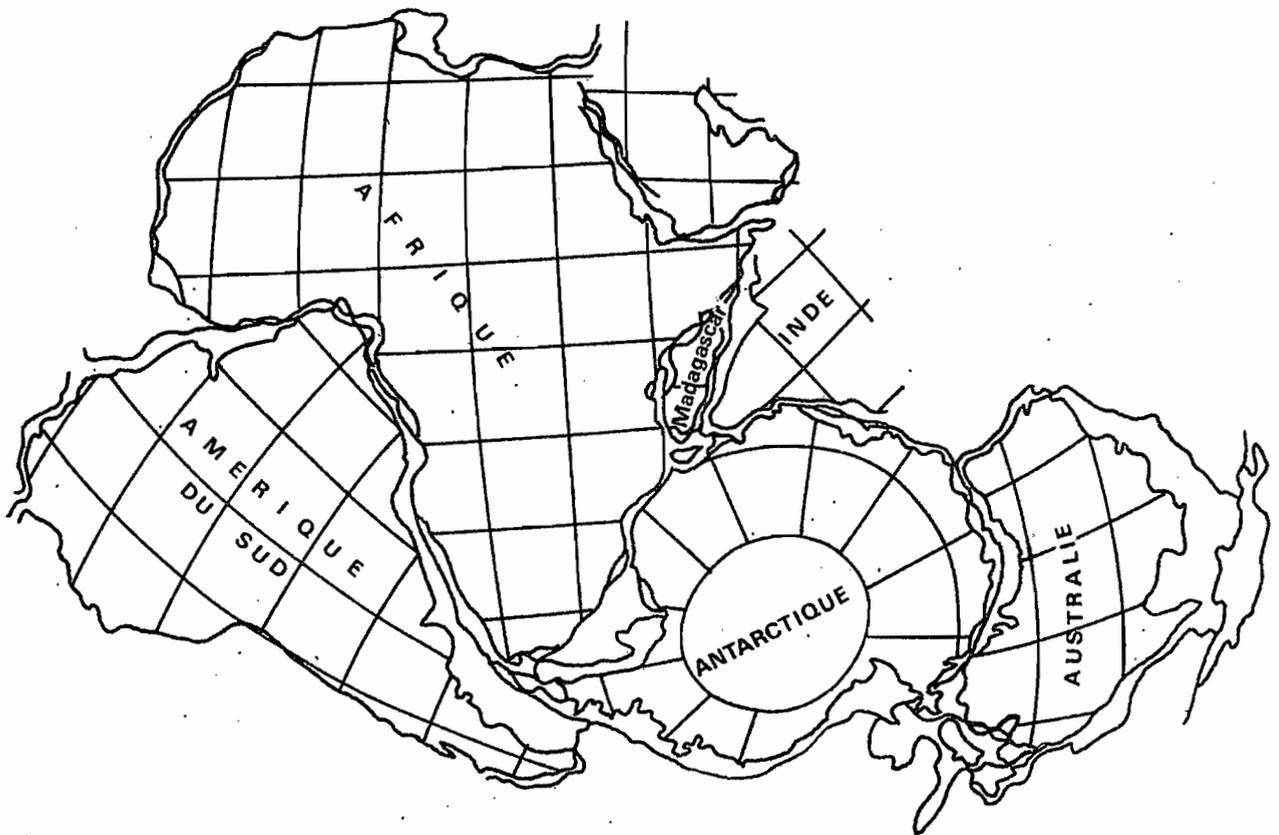


FIG. VI-2 POSITION RELATIVE DES ELEMENTS DU GONDWANA d'après A.G. SMITH et A. HALLAM

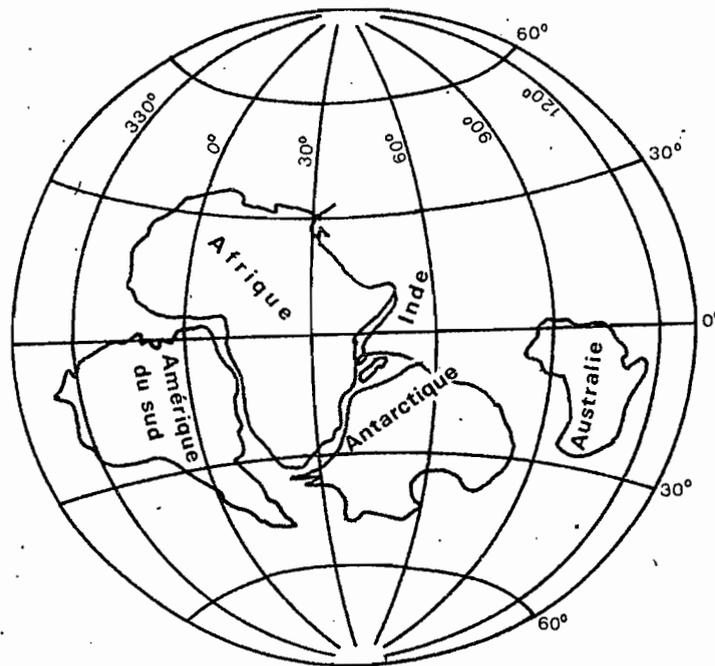
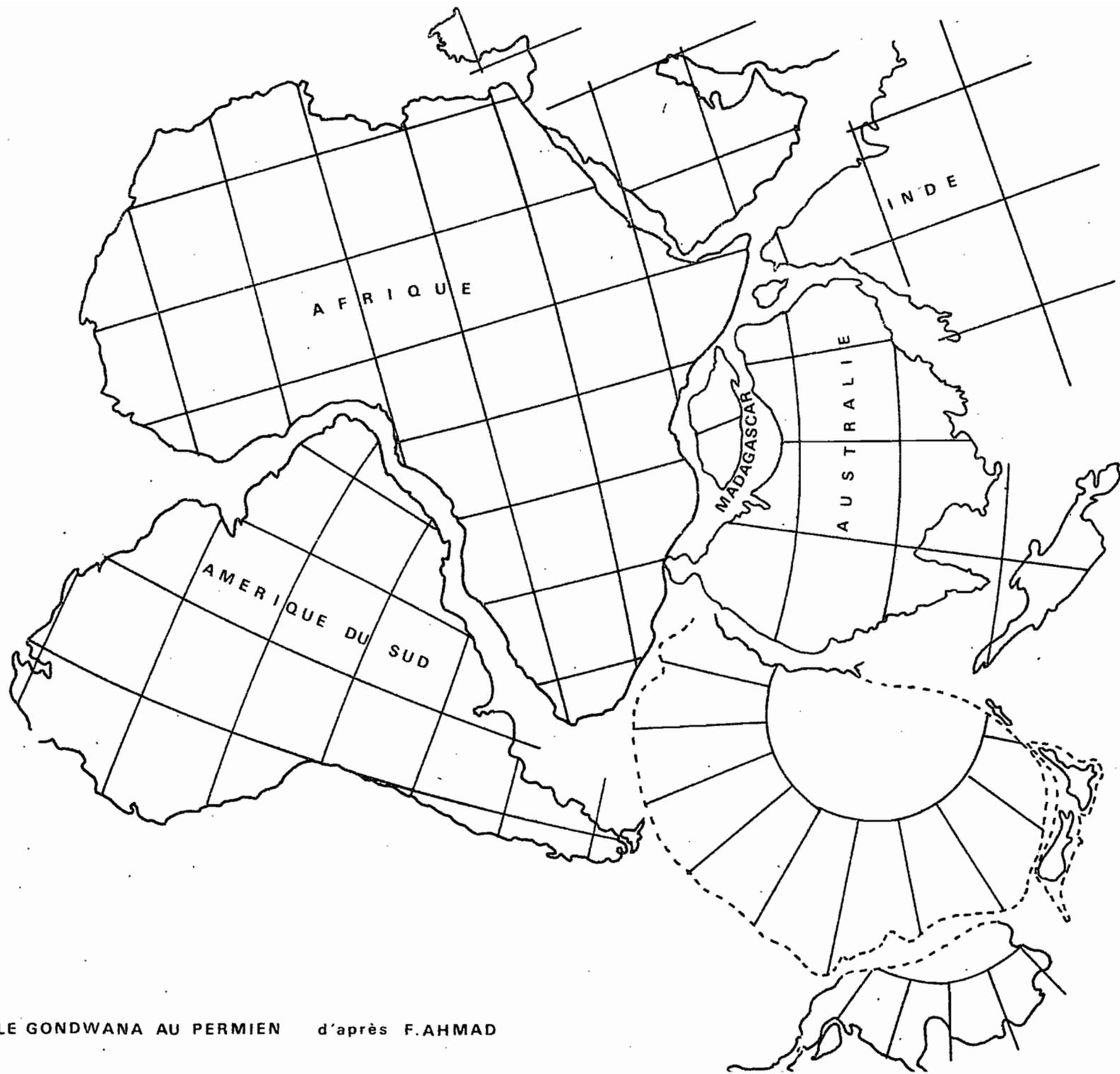


FIG. VI-3 LE GONDWANA AU PALEOZOIQUE d'après M.W. Mc.ELHINNY et GR. LUCK



VI-4 LE GONDWANA AU PERMIEN d'après F.AHMAD

Du point de vue tectonique, une juxtaposition Inde-Madagascar frappe l'attention par la concordance des directions générales observées dans les deux pays.

II. - DISLOCATION DU GONDWANA

Les résultats paléomagnétiques relatifs aux différents pays du Gondwana ont été largement exploités pour mettre en évidence la dislocation de ce grand continent.

La rupture serait intervenue vers le Mésozoïque et de la manière suivante :

En prenant comme référence la position de l'Afrique au Paléozoïque, l'Amérique du Sud aurait dérivé vers l'Ouest, tandis que l'Afrique se serait dirigée lentement vers le Nord, l'Inde vers le Nord-Est et l'Australie vers l'Est.

En ce qui concerne Madagascar, les renseignements manquent, et au stade actuel des connaissances, sa dérive éventuelle ne peut être connue que par l'analyse des diverses reconstitutions existantes.

Si les reconstitutions proposées par L.C. KING, A.G. SMITH et A. HALLAM (figures VI-1 et VI-2) sont exactes, on est amené à supposer une dérive de la Grande Ile vers le Sud par rapport à l'Afrique, après la rupture de la liaison qui aurait existé entre ces deux pays. Le déplacement relatif de l'Inde et de Madagascar apparaît plus difficilement.

Quelques hypothèses ont été formulées sur la période à laquelle la liaison Afrique-Madagascar aurait cessé. Selon X. LE PICHON et J.R. HEIRTZLER (82), Madagascar s'était séparée de l'Afrique dès la phase initiale de la dislocation du Gondwana qui se serait produite vers la fin du Jurassique où

le début du Crétacé. Pour H. BESAIRIE (10), la Grande Ile se serait détachée du continent africain au Permo-triás, à la première ouverture du Canal de Mozambique.

La liaison Inde-Madagascar aurait, par contre, cessé plus tard, l'insularité de Madagascar ne pourrait être affirmée qu'au Crétacé supérieur (47).

L'étude récente des anomalies magnétiques dans l'Océan Indien a apporté quelques éléments nouveaux sur le développement de la dislocation du Gondwana. Elles ont mis en évidence divers mouvements postérieurs au Crétacé, par exemple séparation de l'Inde et de l'Antarctique, diverses rotations dans le Nord et le centre vers l'Eocène, mais l'étude n'a apporté aucun renseignement sur l'histoire de l'évolution éventuelle de la Grande Ile (82).

III. - EXISTENCE D'UNE DERIVE DE MADAGASCAR

Toutes les divergences qui viennent d'être soulignées démontrent la complexité du problème et la nécessité de recueillir des indices susceptibles d'apporter des éléments nouveaux sur l'histoire de la dislocation du Gondwana.

L'absence de renseignements concernant Madagascar est manifeste. Les résultats paléomagnétiques obtenus dans le cadre de ce travail, en apportant des faits nouveaux, permettent de pallier en partie cette carence.

L'étude des formations volcaniques crétacées de Madagascar a montré que tous les pôles géomagnétiques virtuels correspondant aux régions étudiées, ainsi que leur moyenne, sont très nettement décalés par rapport au pôle géographique actuel.

Ce résultat contraste avec celui obtenu pour le Tertiaire et le Quaternaire, pour lesquels les pôles géomagnétiques virtuels moyens ne présentent

pas d'écarts significatifs avec le pôle géographique.

Le décalage des pôles crétacés peut avoir plusieurs significations :

a) Le champ magnétique terrestre, au Crétacé supérieur, était différent de celui d'un dipôle géocentrique axial, et ce sont les pôles magnétiques qui ont divagué.

b) Le champ magnétique terrestre n'était pas dipolaire.

c) En admettant le dogme paléomagnétique du champ moyen dipolaire géocentrique axial, Madagascar avait occupé une position géographique différente de celle qu'elle a actuellement.

L'examen des résultats paléomagnétiques mondiaux montre, que les pôles d'âge comparable ne coïncident pas (32, 34, 62, 88), comme cela devrait être, dans le cas de la première hypothèse. Celle-ci ne peut donc pas expliquer à elle seule les résultats paléomagnétiques.

En ce qui concerne la seconde hypothèse, P.M.S. BLACKET et ses collaborateurs (14) ont montré qu'il n'est pas possible, dans l'état actuel de nos connaissances, de l'exclure tout à fait.

Une explication possible des résultats est la dérive des continents. L'analyse des données paléomagnétiques sur des formations récentes, notamment quaternaires, a montré que le champ magnétique terrestre moyenné sur $10^4 - 10^5$ années est assimilable à celui d'un dipôle géocentrique dirigé suivant l'axe de rotation de la Terre. La coïncidence est moins bonne lorsque l'on examine les données relatives au Tertiaire supérieur et l'écart devient important pour les périodes antérieures.

En Paléomagnétisme, on considère que le champ magnétique terrestre est dipolaire axial et ce sont les continents qui dérivent. C'est ainsi que les écarts considérables observés entre les pôles permien sont expliqués. Cette

idée a été également retenue pour interpréter les résultats paléomagnétiques du Crétacé.

En admettant la même hypothèse d'un champ magnétique dipolaire axial, le décalage observé entre les pôles géomagnétiques virtuels relatifs à Madagascar et le pôle géographique actuel peut être interprété comme concrétisant sa dérive.

Il est possible, pour chacune des positions du pôle virtuel, de connaître l'ancienne latitude de la Grande Ile, en calculant par exemple la paléolatitude d'une ville référence, comme Tananarive. De même, la connaissance du paléoméridien de Tananarive fournit une indication sur son ancienne orientation. On pourrait ainsi suivre éventuellement sa variation en fonction du temps. Mais il faudrait pour cela que l'on soit sûr que la divagation du pôle soit négligeable pendant les intervalles de temps séparant la mise en place de chacune des formations étudiées. De plus, une erreur de datation est toujours possible, même dans le cas des subdivisions géologiques connues. Pour toutes ces raisons, la meilleure estimation de l'ancienne latitude me paraît être celle que l'on calculerait en utilisant le pôle moyen, c'est à dire, la moyenne des six pôles qui ont été déterminés.

Cela implique pour Tananarive une latitude de 42° Sud, soit à plus de 20° de sa latitude actuelle.

Les résultats suggèrent donc, en admettant le principe d'un champ dipolaire axial, que Madagascar était restée dans l'hémisphère Sud, tout en étant plus éloignée de l'équateur qu'elle n'est actuellement. Elle aurait dérivé depuis, vers sa position actuelle. Si l'on suppose que la dérive s'est faite avec une vitesse constante, on trouve une vitesse de l'ordre de 3 cm/an, qui est de l'ordre de grandeur du taux d'expansion des fonds océaniques (26, 59).

L'examen détaillé des différents pôles virtuels a mis en évidence un écart systématique entre les formations de la côte Ouest qui sont plus anciennes et les formations plus récentes de la côte Est. Le calcul montre que cet écart est de l'ordre de 12° d'arc.

L'écart ainsi observé, s'il est réel, pourrait signifier que Madagascar a dérivé entre les deux périodes moyennes d'éruptions.

Les anciennes latitudes de Tananarive correspondant à ces deux pôles virtuels moyens sont respectivement 40° Sud et 45° Sud.

La différence est faible, mais on est tenté de la considérer comme significative étant donné le caractère représentatif des formations envisagées. Dans ces conditions, les résultats pourraient être considérés comme l'indication d'une dérive de Madagascar vers le Sud entre 90 et 70 millions d'années. Dans le même intervalle de temps, il y aurait eu également un changement d'orientation de la Grande Ile de l'ordre de 15° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, par rapport au méridien.

En ce qui concerne les périodes plus récentes, le fait que les pôles virtuels correspondants ne présentent pas d'écarts significatifs avec le pôle géographique actuel, permet de supposer l'absence de mouvements importants de Madagascar, depuis les périodes de mise en place des formations étudiées.

Ainsi, les études paléomagnétiques exécutées, suggèrent donc l'existence d'une dérive de Madagascar vers le Nord depuis le Crétacé supérieur. Entre 90 et 70 millions d'années, une légère dérive vers le Sud serait intervenue, ainsi qu'un changement d'orientation de la Grande Ile, par rapport au méridien. Depuis la période quaternaire, aucun mouvement important ne semble avoir affecté Madagascar.

IV. - ESSAI DE COMPARAISON AVEC LES AUTRES PAYS ENCADRANT L'OCEAN INDIEN

Les différents déplacements qu'aurait subis Madagascar ne peuvent être convenablement interprétés qu'en les comparant avec ceux qui auraient affecté les autres pays entourant l'Océan Indien.

Pour cela j'ai relevé un certain nombre de pôles relatifs à l'Afrique, l'Inde, l'Australie et l'Antarctique susceptibles d'être comparés avec les pôles obtenus pour la Grande Ile. Ces pôles sont indiqués sur la figure VI-5 et leurs coordonnées sont données dans le tableau VI-1.

Le tableau VI-1 comporte également l'ancienne latitude de diverses villes références :

Salisbury	pour l'Afrique
Nagpur	pour l'Inde
Canberra	pour l'Australie
Tananarive	pour Madagascar

et l'ancienne orientation ψ (62) par rapport au méridien des différents pays. Les données résumées à l'avant dernière colonne ont été obtenues à partir de la position du pôle moyen relatif à chaque pays.

Connaissant l'ancienne latitude d'une ville référence et l'ancienne orientation par rapport au méridien, on peut déterminer une des positions possibles d'un pays, sa longitude étant indéterminée. Une telle construction sera utilisée dans les diverses comparaisons qui vont suivre.

Tableau VI-1

Liste des pôles virtuels relatifs aux divers pays
entourant l'Océan Indien pour la deuxième moitié du Crétacé

!	Age en MA		Pôle virt.		lat.	ψ	Pôle moy.			lat.	ψ	REFERENCE
AFRIQUE												
Mlanje	116-128	A'	60°S	82°E								(18)
Lupata	106-111	A ₀	60°S	79°E	34°S	-27°	A	61°S	81°E	34°S	-27°	(51)
INDE												
Rajmahal	100	I	7°S	116°E	44°S	-55°						(25, 72)
Tirupati	Crét. sup.	I ₀	28°S	107°E	34°S	-29°	I	19°S	111°E	39°S	-39°	(100)
Dekkan	65	I ₂	33°S	102°E	31°S	-22°						(74, 89, 103)
AUSTRALIE												
Cygnat Compl.	99-109	Au ₀	50°S	158°E	74°S	-21°						(62)
Mt Dromedary	93	Au ₁	56°S	138°E	68°S	17°	Au	53°S	149°E	72°S	1°	(62, 84)
ANTARCTIQUE												
Andean Intr.	96	An	86°S	178°E			An	86°S	178°E			(62)
MADAGASCAR												
Côte W	90	M ₁	68°S	60°E	40°S	-6°						(4, étude actuelle)
Côte E	73	M ₂	63°S	34°E	45°S	9°	M	67°S	46°E	41°	0°	(étude actuelle)
Androy	70		63°S	63°E								(4, étude actuelle)
Laves volc.	Crét. sup.		68°S	12°E								(86)

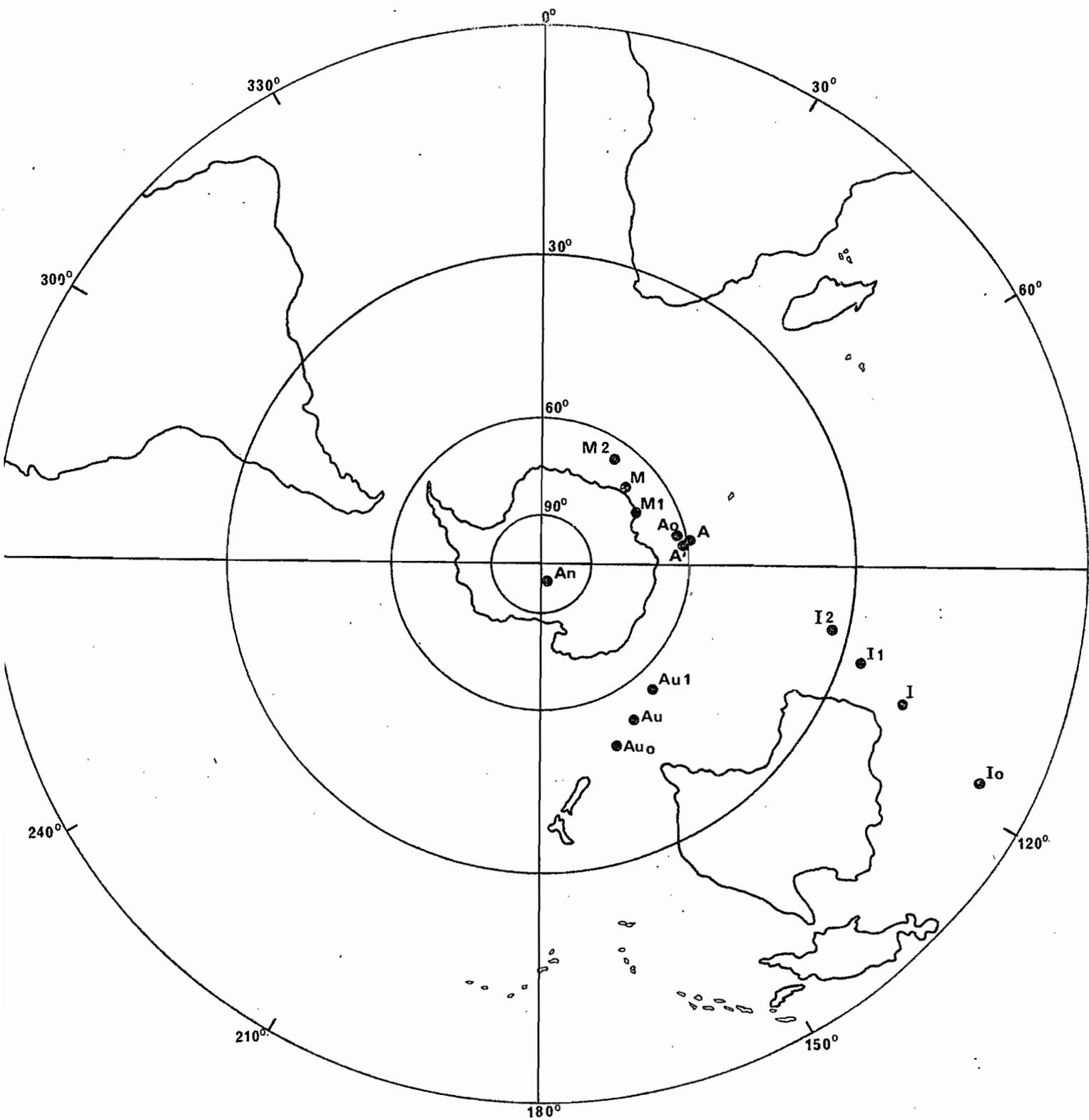


FIG.VI-5 POSITION DES POLES VIRTUELS POUR DIVERS PAYS ENTOURANT L'OCEAN INDIEN.

Afrique	A ₀ : 106, - 111 MA; A': 116 - 128 MA; A: Crétacé
Inde	I ₀ : 100 MA; I ₁ : Crétacé sup.; I ₂ : 65 MA; I: Crétacé sup.
Australie	Au ₀ : 99 - 109 MA; Au ₁ : 93 MA; Au: Crétacé sup.
Antarctique	An: 96 MA
Madagascar	M ₁ : 90 MA; M ₂ : 73 MA; M: Crétacé sup.

1.- Comparaison Madagascar - Afrique

Aucune comparaison directe avec l'Afrique ne paraît possible par suite de l'absence de pôles de même âge, relatifs aux deux pays. Cependant si, comme le suppose R.W. GIRDLER (50), les pôles africains sont restés stables jusqu'à il y a 70 millions d'années, période à laquelle l'Afrique aurait repris sa dérive vers sa position actuelle, une étude comparative de certains pôles africains et de ceux de Madagascar pourrait être instructive. On peut par exemple, comparer le pôle africain relatif au Lupata avec ceux de la Grande Ile.

Une telle comparaison montre que les pôles malgaches sont sensiblement décalés vers l'^{Ouest} par rapport au pôle africain (figure VI-5). Le décalage est important si l'on ne considère que les pôles malgaches relatifs aux formations de la côte Est. Le calcul montre que le pôle moyen malgache du Crétacé supérieur est à 16° d'arc environ de celui du Lupata.

Si l'hypothèse de R.W. GIRDLER était exacte, le décalage observé pourrait signifier une dérive de Madagascar par rapport au continent africain.

La position de l'Afrique vers 110 MA peut être déterminée en calculant l'ancienne latitude d'une ville référence. Il est intéressant de choisir Salisbury qui est pratiquement à la même latitude que Tananarive (18°S pour Salisbury et 19°S pour Tananarive).

L'ancienne latitude de Salisbury correspondant au pôle en question (A_0 sur le tableau VI-1) serait de 34°S . En ce qui concerne Tananarive, les calculs indiquent qu'il y a 90 MA elle aurait été à 40°S . L'Afrique et Madagascar, d'après ces résultats, auraient eu donc une position relative différente de l'actuelle. Il y aurait eu depuis une dérive vers le Nord de la Grande Ile par rapport au continent africain. Dans l'hypothèse d'un continent

africain fixe jusqu'à il y a 70 MA, on peut déterminer une position relative possible (en latitude et en orientation seulement) des deux pays. Cette reconstruction est schématisée sur la figure VI-6a où la longitude est choisie de façon arbitraire, la méthode paléomagnétique ne permettant pas de la préciser.

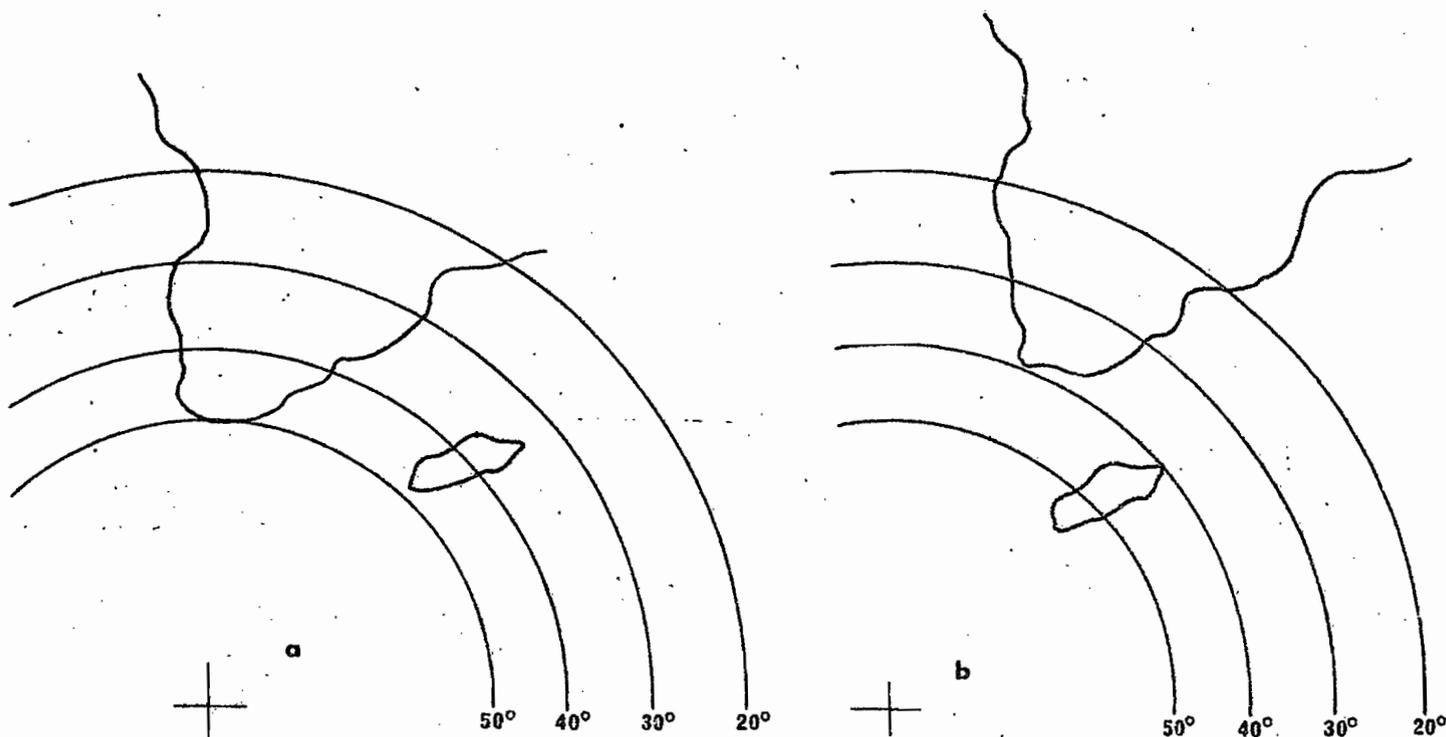


FIG. VI-6.- Position relative possible de l'Afrique et de Madagascar
a : il y a 90-110 MA
b : il y a 70 MA

Selon J.G. BRIDEN (19), il y aurait eu au contraire une dérive sensible des fragments du Gondwana vers le Crétacé supérieur. En ce qui concerne l'Afrique, M.W. McELHINNY et ses collaborateurs (77) suggèrent, d'après l'étude du pôle virtuel (de coordonnées 87°N , 253°E), relatif aux laves éocènes de l'Ethiopie, un déplacement de 20° du pôle africain entre 100 et 70 MA. Il semble cependant que la détermination exacte de cet intervalle de temps nécessite une meilleure connaissance de l'âge des laves en question (20).

Si l'âge attribué par M.W. Mc ELHINNY et ses collaborateurs aux laves considérées était exact et si le déplacement de 20° correspondait à une dérive du continent africain, Salisbury aurait été à 20° de latitude Sud, il y a 69 MA, c'est à dire très voisine de sa position actuelle. Vers la même époque, d'après le pôle moyen d'âge comparable relatif aux formations de la côte Est de Madagascar, Tananarive n'aurait été qu'à 45° de latitude Sud, c'est à dire bien loin de sa position actuelle.

La différence de latitude des deux villes choisies serait donc nettement différente de celle qui existe actuellement entre elles. Une des positions relatives possibles des deux pays vers 70 MA est schématisée sur la figure VI-6b.

Ainsi l'étude comparative des pôles africains et malgaches suggère l'existence d'une dérive de la Grande Ile vers le Nord par rapport au continent africain depuis le Crétacé supérieur. Une meilleure connaissance de leur position relative nécessite cependant l'examen de pôles d'âges équivalents. Cela ne semble pas possible dans l'état actuel des recherches paléomagnétiques dans les deux pays. Il n'y a pas suffisamment de données relatives au Crétacé supérieur en Afrique.

2. - Comparaison Madagascar - Inde

Divers renseignements paléomagnétiques relatifs au Crétacé sont connus pour l'Inde, et les pôles malgaches peuvent être utilement comparés avec certains pôles de ce continent, par exemple avec ceux obtenus pour Rajmahal et pour les trapps du Dekkan.

L'âge de Rajmahal est fixé à 100 MA, celui de Tirupati est moins précis. On sait cependant qu'il est compris entre celui de Rajmahal et celui des trapps du Dekkan qui est de 65 MA (72, 103).

Les coordonnées des pôles virtuels relatifs à ces diverses régions sont indiquées dans le tableau précédent.

Les pôles malgaches et indiens d'âges équivalents sont nettement décalés les uns par rapport aux autres (figure VI-5), indiquant que la position relative de ces deux pays, vers les périodes de mise en place des formations géologiques correspondantes, était différente de celle d'aujourd'hui. L'étude comparative de ces pôles devrait fournir quelques indications à ce sujet.

Par exemple, la comparaison du pôle indien I_0 (100 MA) avec le pôle malgache M_1 (90 MA) fait apparaître entre Nagpur et Tananarive, villes choisies comme référence, une différence de latitude de 4° , soit près de 10 fois moins que l'écart en latitude actuel. Ce premier résultat suggère donc que l'Inde et Madagascar se trouvaient, il y a 90-100 MA, dans une même bande de latitude; mais leur longitude relative reste indéterminée.

Du point de vue orientation, les résultats de la comparaison semblent indiquer un certain parallélisme entre la côte Est de Madagascar et la côte du Malabar. Une des positions relatives possibles des deux pays est schématisée sur la figure VI-7a.

La même comparaison pour la période 65-70 MA (pôles I_2 et M_2) montre un accroissement de la différence de latitude entre les deux villes. Cet écart aurait été de 14° et semble traduire une dérive de l'Inde vers le Nord par rapport à Madagascar. D'autre part, le parallélisme signalé précédemment a cessé d'exister.

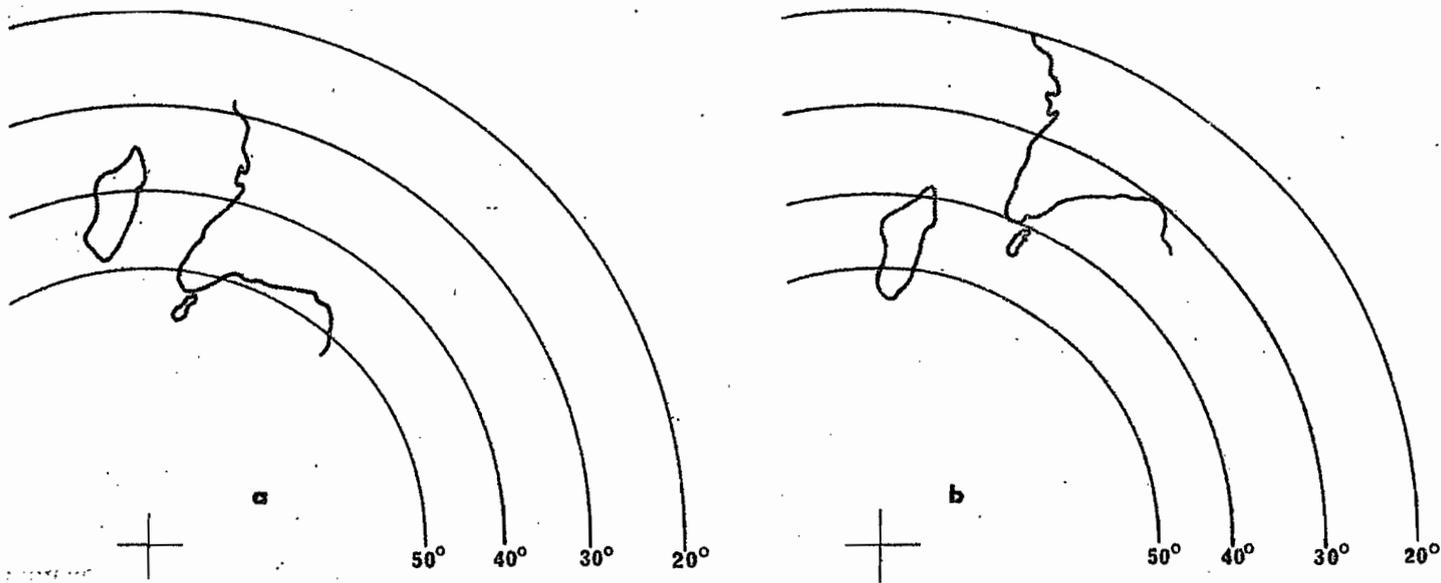


FIG. VI-7.- Position relative possible de l'Inde et de Madagascar
a : il y a 90-100 MA
b : il y a 65-70 MA

Comme dans le cas précédent, on peut déterminer une position relative possible des deux régions considérées (Fig. VI-7b).

3. - Comparaison Madagascar - Australie

La comparaison avec l'Australie ne peut être effectuée que pour la période de 90 millions d'années.

Le pôle moyen malgache de 90 millions d'années est différent de celui obtenu pour le Mont Dromedary, en Australie, d'âge pourtant équivalent (93 millions d'années).

Ce résultat indique l'existence d'un mouvement relatif des deux pays depuis le Crétacé supérieur.

4. - Comparaison Madagascar - Antarctique

Les pôles An et M₂ respectivement de l'Antarctique et de Madagascar peuvent être considérés comme étant d'âges équivalents. Leur comparaison

pourrait donc fournir une indication sur le déplacement relatif de ces deux pays.

Le pôle relatif à l'Antarctique est très voisin du pôle géographique actuel, indiquant que ce pays aurait occupé la même position géographique depuis 96 MA. Tel n'est pas le cas pour Madagascar, dont les pôles sont nettement décalés par rapport au pôle géographique actuel. Dans ces conditions, l'étude comparative des pôles suggère un déplacement de la Grande Ile par rapport à l'Antarctique restée sensiblement fixe.

V. - ESSAI DE CORRELATION GEOGRAPHIQUE ENTRE LES PAYS ENCADRANT L'OCEAN INDIEN

Les différentes comparaisons qui viennent d'être effectuées suggèrent l'existence, au Crétacé supérieur, de mouvements relatifs des différents pays qui entourent l'Océan Indien.

L'absence de données paléomagnétiques valables relatives aux périodes antérieures au Crétacé, ne permet pas de déterminer avec plus de précision la position (en latitude et orientation) à ces époques de Madagascar par rapport aux autres éléments du Gondwana. Il semble cependant que, compte tenu des analogies géologiques entre l'Inde et Madagascar, la reconstitution de la figure VI-4 est peu probable.

Pour le Crétacé, différentes reconstructions géographiques des pays du pourtour de l'Océan Indien ont été proposées. Les plus importantes sont reproduites sur les figures VI-8, VI-9 et VI-10.

Des modifications semblent devoir être apportées notamment en ce qui concerne la position de Madagascar, par rapport à l'Inde et l'Australie.

La position relative de l'Inde et de Madagascar schématisée sur la figure VI-9 me semble plus conforme aux résultats obtenus dans le cadre de ce travail. Cette reconstitution tient compte d'ailleurs, en ce qui

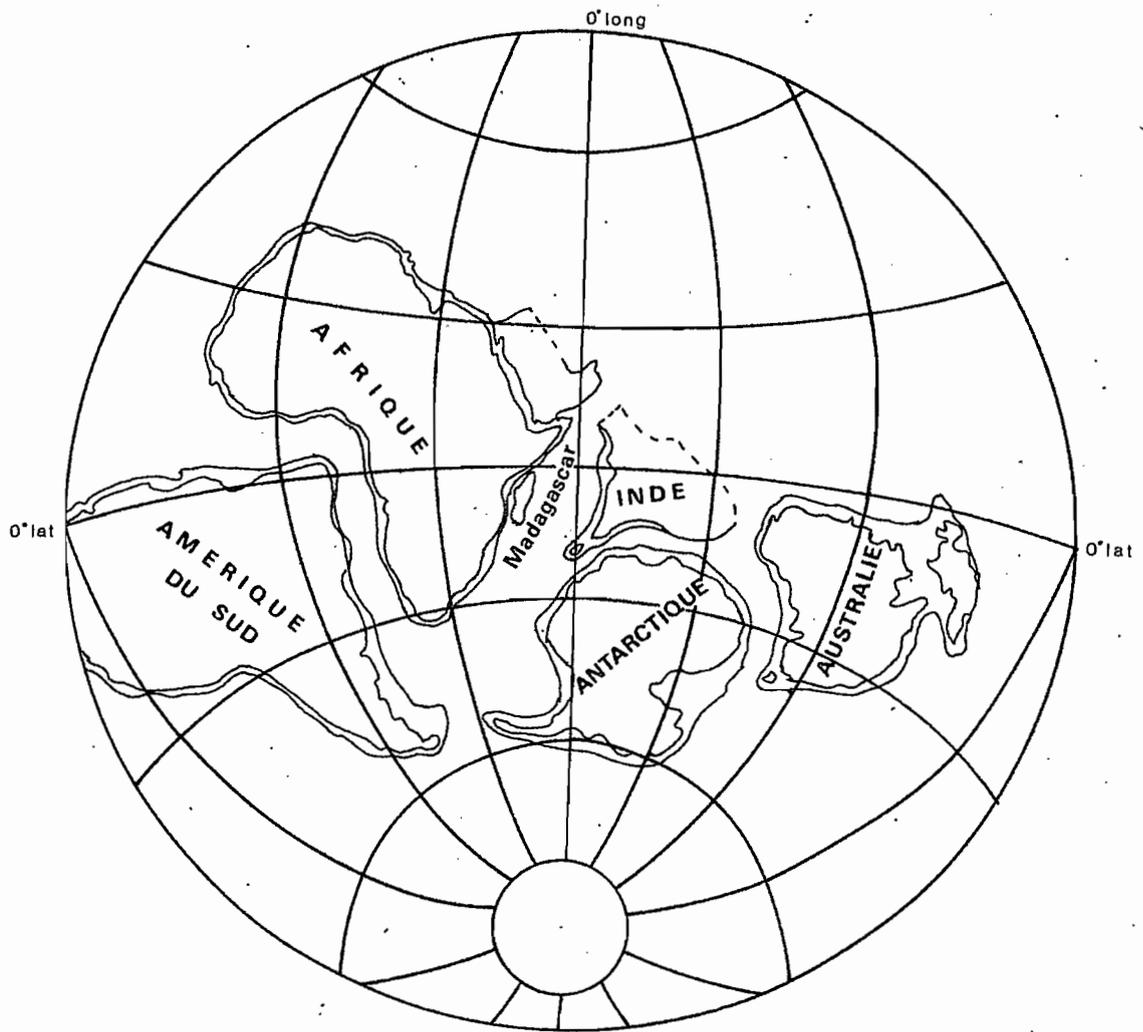


FIG.VI-8 POSITION RELATIVE DES ELEMENTS DU GONDWANA VERS LA FIN DU JURASSIQUE OU LE DEBUT DU CRETACE d'après L.C. KING.

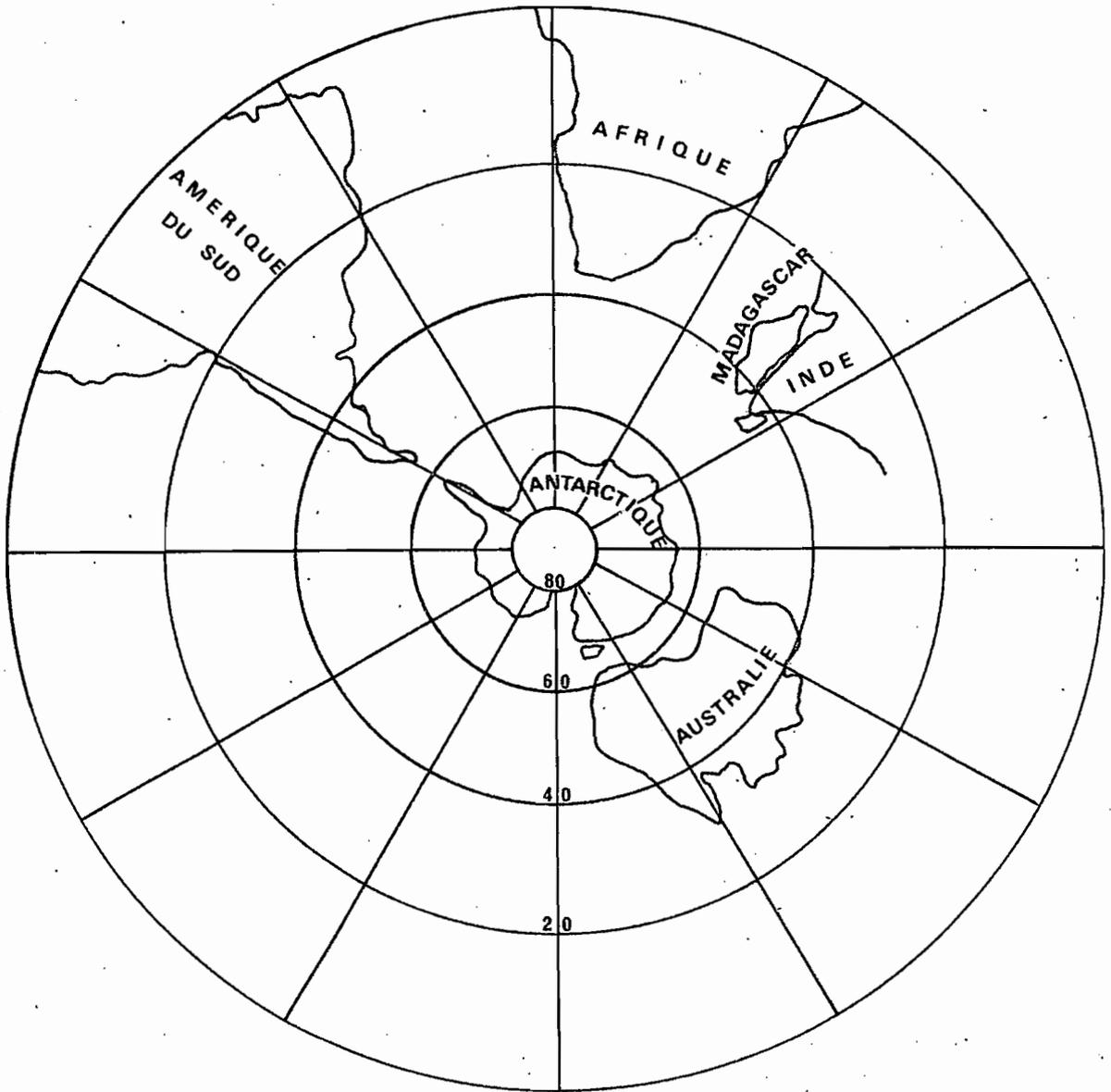


FIG. VI -9 LE GONDWANA AU CRETACE SUPERIEUR d'après M.W. Mc.ELHINNY

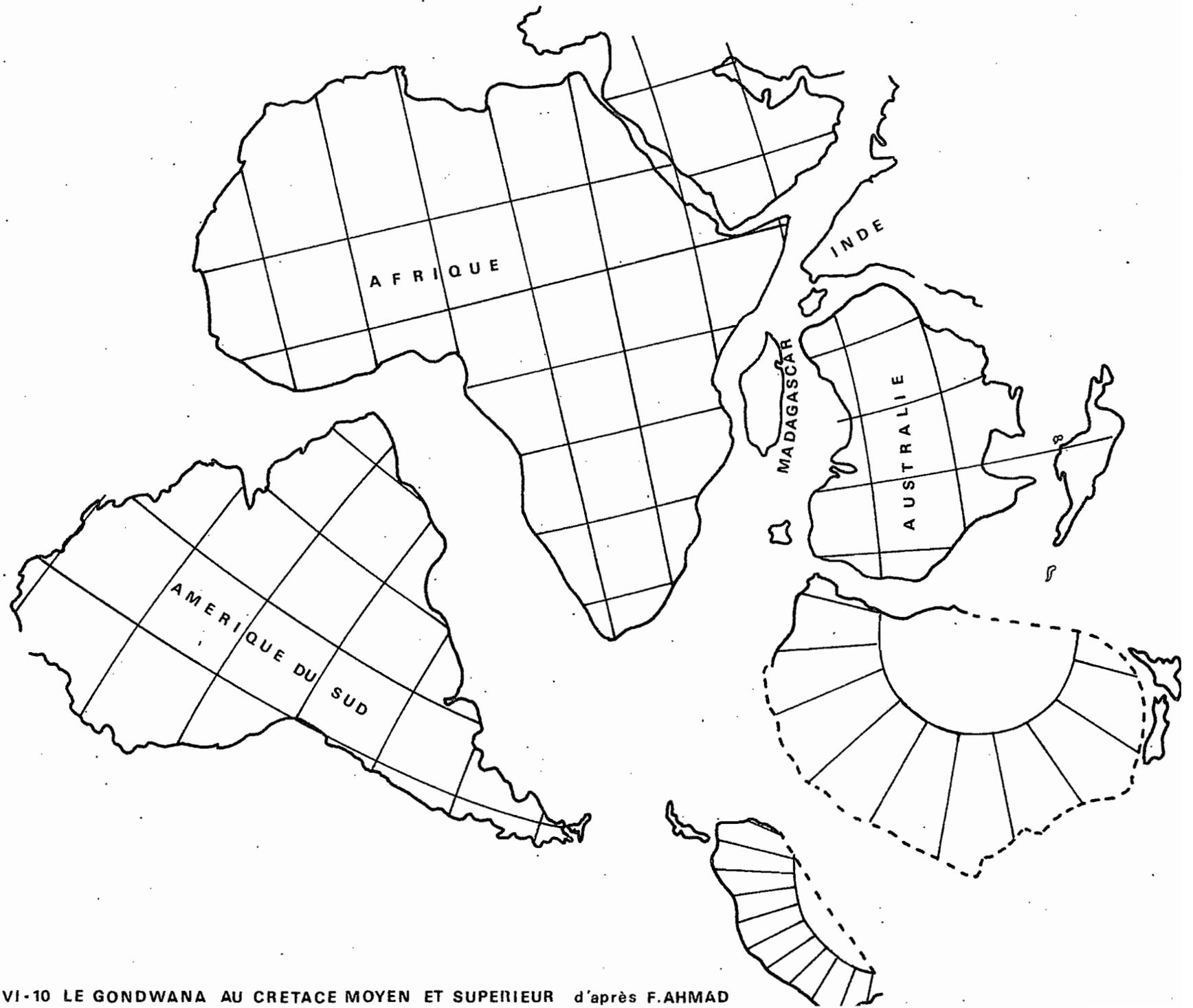


FIG. VI-10 LE GONDWANA AU CRETACE MOYEN ET SUPERIEUR d'après F.AHMAD

concerne la Grande Ile, d'une partie des résultats présentés ici.

A la suite des études nouvelles et plus complètes qui ont été entreprises depuis la publication des premiers résultats (3), ainsi que la connaissance plus précise des âges des diverses formations grâce à de récentes datations radiochronologiques (17), des modifications notamment en ce qui concerne l'ancienne latitude et l'ancienne orientation, par rapport au méridien peuvent être apportées à une telle reconstitution.

A partir des différents pôles exposés dans le tableau VI-1, un pôle moyen peut être défini pour chacun des pays entourant l'Océan Indien. La connaissance de ce pôle permet de déterminer ensuite l'ancienne orientation de chaque pays ainsi que leur paléolatitute.

La reconstruction schématisée sur la figure VI-11, dans laquelle les longitudes sont choisies de façon arbitraire, représente une des positions possibles de ces pays, les uns par rapport aux autres. Cette reconstitution de la partie orientale du Gondwana est marquée d'une part par le fait que l'Inde et Madagascar semblent avoir occupé la même bande de latitude, et d'autre part, par le parallélisme de leurs côtes (celle de l'Ouest pour l'Inde et celle de l'Est pour Madagascar) pendant une partie du Crétacé supérieur.

VI. - CONCLUSION

Les études entreprises fournissent des renseignements supplémentaires sur le champ magnétique ancien dans cette partie du monde. Les résultats apportent de nouveaux arguments en faveur de l'existence au Crétacé de périodes pendant lesquelles le champ magnétique aurait eu un sens analogue à celui qu'il a actuellement.

L'étude des formations récentes montre, une fois de plus, qu'au Tertiaire supérieur et au Quaternaire, la direction moyenne du champ magnétique

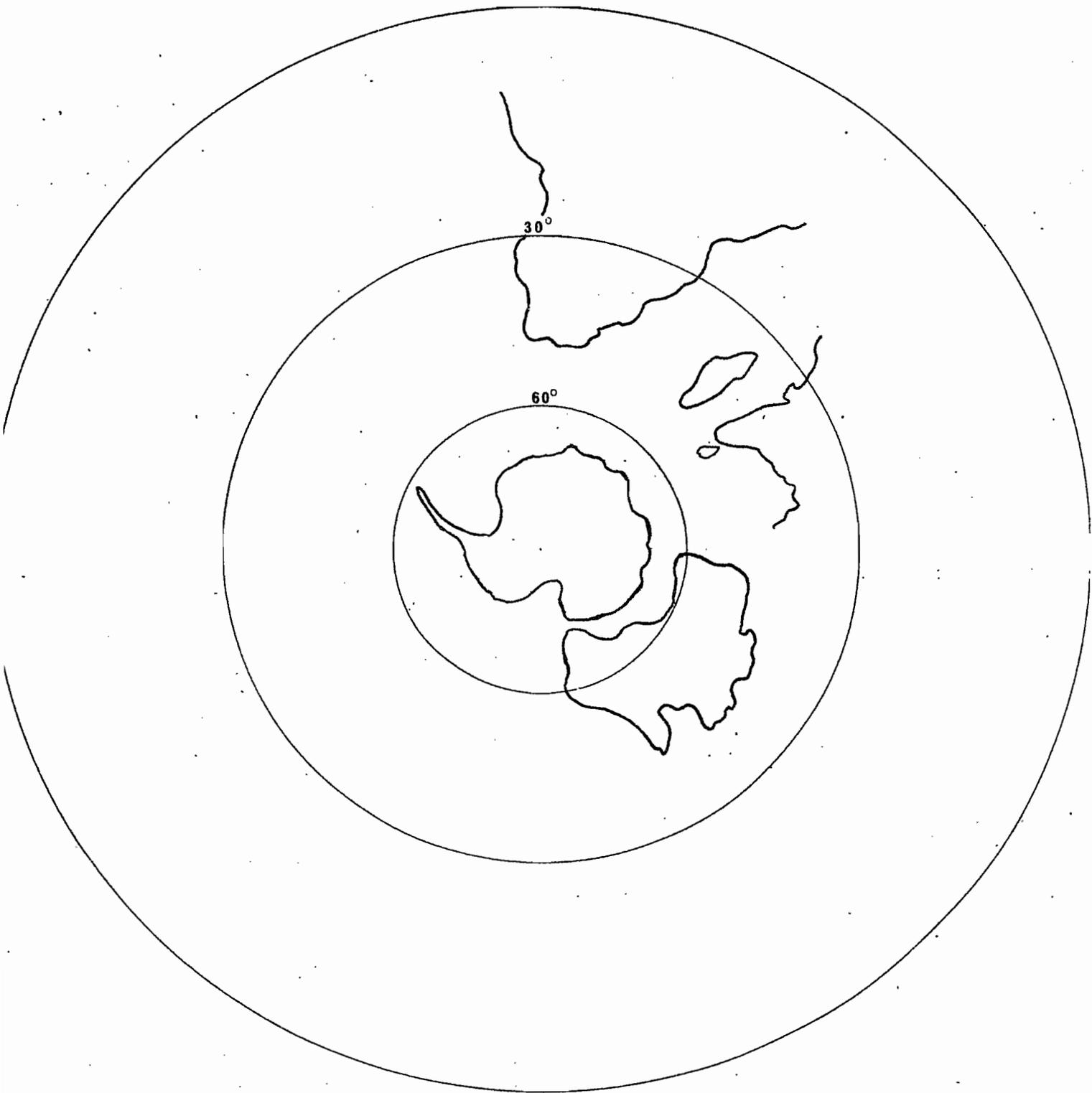


FIG.VI-11 POSITION RELATIVE DES PAYS DE LA PARTIE ORIENTALE DU GONDWANA VERS LA DEUXIEME MOITIE DU CRETACE. (longitude arbitraire)

terrestre se rapproche de celle qu'engendrerait un dipôle géocentrique axial.

L'étude des formations relatives au Crétacé semble indiquer une dérive de Madagascar vers le Nord depuis cette époque. Elle a également permis d'émettre l'hypothèse d'un changement d'orientation de la Grande Ile par rapport à l'Afrique.

Les résultats obtenus suggèrent, en outre, l'existence d'un déplacement relatif de l'Inde et de Madagascar. Compte tenu des paléolatitudes et du parallélisme de leurs côtes en regard, une liaison aurait pu encore exister, entre ces deux pays, dans la première partie du Crétacé supérieur. Toutefois le paléomagnétisme ne saurait prouver l'existence effective d'une telle liaison, mais suggère seulement sa possibilité. Par contre, les résultats semblent bien montrer que cette possibilité avait cessé d'exister dès la seconde partie du Crétacé supérieur, les deux blocs suivant alors des trajectoires indépendantes.

Les recherches paléomagnétiques sur Madagascar contribuent ainsi à préciser le développement de la dislocation du Gondwana pendant la seconde moitié du Crétacé.

B I B L I O G R A P H I E

1. - AHMAD F.
Palaeogeography of the gondwana period in Gondwanaland, with special reference to India and Australia, and its bearing on the theory of continental drift. Mem. Geol. Surv. India, 90, 1961, 142 p.
2. - ANDRIAMIRADO R. et J.P. KARCHE
Sur l'aimantation de quelques laves de la Montagne d'Ambre (Nord de Madagascar). C.R. Somm. Soc. Geol. Fr., fasc. 8, 1970, p. 299.
3. - ANDRIAMIRADO R. et A. ROCHE
Etude paléomagnétique de formations volcaniques crétacées de Madagascar. C.R. Acad. Sc. Paris, 269, 1969, p. 16-19.
4. - AS J.A. et J.D. ZIJDERVELD
Magnetic cleaning of rocks in palaeomagnetic research. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 1, 1958, p. 308-319.
5. - ATHAVALE R.N., C. RADAKRISHNAMURTY et P.W. SAHASRABUDHE
Palaeomagnetism of some indian rocks. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 7, 1963, p. 304-313.
6. - ATHAVALE R.N., R.K. VERMA, M.S. BHALLA et G. FULLAIAH
Drift of the indian sub-continent since Pre-cambrian times. p. 291-305 in Palaeogeophysics, ed. S.K. RUNCORN, Academic Press London, 1970.
7. - BATTISTINI R.
La structure du massif volcanique de l'Androy (Madagascar). Bull. Soc. Geol. Fr., 7ème série, 1, 1959, p. 187-191.
8. - BERTUGAT M. et G. JOURDE
Considération sur la stratigraphie du socle malgache. C.R. Sem. Geol. Madagascar, 1966, p. 107-116.

9. - BESAIRIE H.
Recherches géologiques à Madagascar. Serv. Geol. Madagascar,
vol. 1 et 2, 1948, 303 p.
10. - BESAIRIE H.
Lexique stratigraphique international, Afrique, Fasc. 11,
Madagascar, Vol. 4, Suppl. CNRS, 1960, 159 p.
11. - BESAIRIE H.
La géologie du bassin de Majunga à Madagascar. Doc. Bur. Geol.
Madagascar, 172, 1966, 285 p.
12. - BESAIRIE H.
La géologie du bassin de Morondava à Madagascar, Doc. Bur.
Geol. Madagascar, 175, 1967, deux volumes, 446 p.
13. - BESAIRIE H.
Description géologique du massif ancien de Madagascar. Doc. Bur.
Geol. Madagascar, 177, 1969, trois volumes, 256 p.
14. - BLACKETT P.M.S., J.A. CLEGG et P.N.S. STUBBS
An analysis of rock magnetic data. Proc. Roy. Soc., A, 256,
166, p. 291-322.
15. - BOULANGER J.
Geologie et prospection de la région côtière du Sud-Est de
Madagascar. Doc. Bur. Geol. Madagascar, 87, 1958, 104 p.
16. - BRENON P.
Traits généraux du volcanisme de Madagascar dans le cadre de
l'Océan Indien. C.R. 3ème Congrès PIOSA Tananarive, section c,
1957, p. 91-98.
17. - B.R.G.M. - S.G.N.
Département laboratoire service SGI, Etude M2163, 1971.
18. - BRIDEN J.C.
A new palaeomagnetic result from the lower cretaceous of East-
central Africa. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 12, 1967,
p. 375-380.

19. - BRIDEN J.C.
Recurrent continental drift of Gondwanaland. Nature London, 215, 1967, p. 1334-1339.
20. - BROCK A., I.L. GIBSON et P. GACII.
The palaeomagnetism of the ethiopian flood basalt succession near Addis-Ababa. Geophys. R. Astr. Soc., 19, 1970, p. 485-497.
21. - BULLARD E., J.E. EVERETT et A.G. SMITH
The fit of the continents around the Atlantic, Phil. Trans. Roy. Soc. London A, 258, 1965, p. 41-51.
22. - BUSSIÈRE P.
Notice explicative sur la feuille Seavinandriana (M.47). Serv. Geol. Madagascar, 1961, 9 p.
23. - CHAMALAUN F.H.
Palaeomagnetism of Reunion Island and its bearing on secular variation. J. Geophys. Res. 73, 1968, p. 4647-4659.
24. - CHAMALAUN F.H. et I. McDOUGALL.
Dating geomagnetic polarity epochs in Reunion. Nature, London, 210, 1966, p. 1212-1214.
25. - CLEGG J.A., C. RADAKRISHNAMURTY et P.W. SAHASRABUDHE
Remanent magnetism of the Rajmahal traps of Northeastern India. Nature, London 181, 1958, p. 830-831.
26. - COULOMB J.
L'expansion des fonds océaniques et la dérive des continents. Presses Universitaires de France, 1969, 224 p.
27. - COX A.
Analysis of present geomagnetic field for comparison with palaeo-magnetic results. J. Geomag. Geoelec. 13, 1962, p. 101-112.
28. - COX A. and R.R. DOELL.
Review of palaeomagnetism. Bull. Geol. Soc. Am., 71, 1960, p. 645-768.
29. - COX A., R.R. DOELL and C.B. DALRYMPLE
Reversals of the Earth's magnetic field. Science, 144, 1964, p. 1537-1543.

30. - CURRIE R.G., C.S. GROMME and J. VERHOOGEN
Remanent magnetization of some upper cretaceous granitic plutons in the Sierra Nevada, California. *J. Geophys. Res.*, 68, 1963, 2263-2279.
31. - GREER K.M.
Palaeomagnetic data from the gondwanic continents. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, 258, 1965, p. 27-40.
32. - GREER K.M.
A review of palaeomagnetism. *Earth Sci. Rev.*, 6, 1970, p. 369-466.
33. - GREER K.M.
A reconstruction of the Continents for the upper Palaeozoic from palaeomagnetic data. *Nature* 203, N° 4950, 1964, p. 1115-1120.
34. - GREER K.M.
An analysis of the geomagnetic field using palaeomagnetic methods. *J. Geomag. Geoelec.*, 13, 1962, p. 113-119.
35. - GREER K.M.
The dispersion of the geomagnetic field due to secular variation and its determination for remote times from palaeomagnetic data. *J. Geophys. Res.*, 67, 1962, p. 3461-3476.
36. - GREER K.M.
A synthesis of world palaeomagnetic data. p. 351-382, in S.K. RUNCORN (Editor), *Mantles of the Earth and Terrestrial Planets*, 1967.
37. - GREER K.M.
Palaeomagnetism and DU TOIT's reconstruction of Gondwanaland, *Nature*, London, 204, 1964, p. 369-370.
38. - DALRYMPLE G.B., A. COX, R.R. DOELL and C.S. GROMME
Pliocene geomagnetic polarity epochs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2, 1967, p. 163-173.
39. - DEUTSCH E.R., C. RADAKRISHNAMURTY and P.W. SAHASRABUDHE
Palaeomagnetism of the Deccan Traps. *Ann. Geophys.*, 15, 1959, p. 39-59.

40. - DIETZ R.S.
Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, London, 190, 1961, p. 854-857.
41. - DIXEY F.
The geology and geomorphology of Madagascar and a comparison with Eastern Africa. *Quart. J. Geol. Soc. London*, 116, 1960.
42. - DOELL R.R. and A. COX
Analysis of alternating field demagnetization equipment p. 241-253 in *methods in Palaeomagnetism*, D.W. COLLINSON, K.M. CREER et S.K. RUNCORN (ed.) Elsevier, 1967.
43. - DU TOIT A.
Our wandering continents. Oliver and Boyd, Edinburgh, 1937, 336 p.
44. - DU TOIT A.
The geology of South Africa. - 3rd edition, Oliver and Boyd, London, 1954.
45. - FISHER R.A.
Dispersion on a sphere. *Proc. Roy. Soc. London A.* 217, 1953, p. 295-305.
46. - FLOWER M.F.J. and D.F. STRONG
The significance of sandstone inclusions in lavas of the Comores archipelago. *Earth Planet. Sci. Lett.* 7, 1969, p. 47-50
47. - FURON R.
La paléogéographie. Essai sur l'évolution des continents et des océans. Payot éditeur, Paris. 1960, 400 p.
48. - FURON R.
La géologie de l'Afrique. Payot éditeur Paris, 1958, 484 p.
49. - GEOL. SOC. LONDON.
The phanerozoic Time scale. A. symposium, 1964, 458 p.
50. - GIRDLER R.W.
Drifting and rifting of Africa. *Nature*, London, 217, 1968, p. 1102-1106.

51. - GOUGH D.I. and N.D. OPDYKE
The palaeomagnetism of the Lupata alkaline volcanics. Geophys. J. Roy. Soc. 7, 1963, p. 457-468.
52. - GOUGH D.I., N.D. OPDYKE et M.W. McELHINNY
The significance of palaeomagnetic results from Africa. J. Geophys. Res., 69, 1964, 2509-2519.
53. - GROMME C.S. and R.L. HAY
Magnetization of basalt of bed 1 Olduvai Gorge, Tanganyika. Nature, London, 200, 1963, p. 560-561.
54. - GROMME C.S. and R.L. HAY
Geomagnetic polarity epochs : new data from Olduvai Gorge, Tanganyika. Earth Planet. Sci. Lett., 2, 1967, p. 111-115.
55. - GROMME C.S. and R.T. MERRIL
Palaeomagnetism of late cretaceous granitic plutons in the Sierra Nevada, California. Further results. J. Geophys. Res., 70, 1965, p. 3407-3420.
56. - GROMME C.S., R.T. MERRIL and J. VERHOOGEN
Palaeomagnetism of jurassic and cretaceous plutonic rocks in the Sierra Nevada, California, and its significance for polar wandering and continental drift. J. Geophys. Res., 72, 1967, p. 5661-5684.
57. - GUIGUES J.
Etude géologique des feuilles Antsirabe, Ambatolampy. Doc. Geol. Madagascar, 20, 1952, 123 p.
58. - HANNA W.F.
Palaeomagnetism of upper cretaceous volcanic rocks of southwestern Montana. J. Geophys. Res., 72, 1967, p. 595-610.
59. - HEIRTZLER J.R., G.O. DICKSON, E.M. HERRON, W.C. PITMAN and X. LE PICHON
Marine magnetic anomalies, geomagnetic reversals and motions of the ocean floor. J. Geophys. Res., 73, 1968, p. 2119-2136.

60. - HELSLEY C. and M.B. STEINER
Evidence for long intervals of normal polarity during the cretaceous period. Earth Planet. Sci. Lett., 5, 1969, p. 325-332.
61. - HOTTIN G.
Etude géologique et prospection des feuilles au 1/100.000. Vohimenakely T. 43, Vavatenina U. 43 et Fénériver V. 43, Doc. Bur. Geol. Madagascar, 126, 1967, 45 p.
62. - IRVING E.
Palaeomagnetism and its application to geological and geophysical problems, J. Wiley & Sons, New York 1964, 399 p.
63. - IRVING E., P.J. STEPHENSON and A. MAJOR
Magnetism in Heard Island rocks. J. Geophys. Res., 70, 1965, p. 3421-3427.
64. - IRVING E., P.M. STOTT and M.A. WARD
Demagnetization of igneous rocks by alternating magnetic fields. Phil. Mag. 6, 1961, p. 225-241.
65. - I.U.G.S.
Reviews prepared for the first Symposium on Gondwana stratigraphy. Mar del Plata, Argentine 1967, 304 p.
66. - JAEGER J.C. and E. IRVING
Palaeomagnetism and reconstruction of Gondwanaland. C.R. 3ème Congrès PIOSEA, Tananarive, C, 1957, p. 233-242.
67. - KING L.C.
The morphology of the earth. Hafner, New-York, 1962, p. 577.
68. - KING L.C.
Basic palaeogeography of Gondwanaland during the late palaeozoic and mesozoic eras. Quater. J. Geol. Soc. London, 114, 1958, p. 47-78.
69. - LENOBLE A.
Notice explicative sur la feuille Antsirabe. Tananarive Imp. Off., 1938, 16 p.

70. - LENOBLE A.
Le massif volcanique de l'ltasy. p. 43-80 in Etudes sur la géologie de Madagascar. Mem. Acad. Malg. fasc. 32, 1940.
71. - McDOUGALL I. and F.H. CHAMALAUN
Isotopic dating and geomagnetic polarity studies on volcanic rocks from Mauritius, Indian ocean. Geol. Soc. Am. Bull., 80, 1969, p. 1419-1442.
72. - McDOUGALL I. et M.W. McELHINNY
The Rajmahal traps of India K-Ar ages and Palaeomagnetism. Earth Planet. Sci. Lett., 9, 1970, p. 371-378.
73. - McELHINNY M.W.
The palaeomagnetism of the southern continents. A survey and Analysis. I.U.G.S. Symposium on continental Drift Montevideo. Oct. 1967.
74. - McELHINNY M.W.
The northward drift of India. Examination of recent palaeomagnetic results. Nature, London, 217, 1968, p. 342-344.
75. - McELHINNY M.W.
Notes on progress in geophysics. Palaeomagnetic directions and pole positions. VIII, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 15, 1968, p. 409-430.
76. - McELHINNY M.W.
Formation of the indian ocean. Nature, London, 228, 1970, p. 977-979.
77. - McELHINNY M.W., J.C. BRIDEN, D.L. JONES and A. BROCK
Geological and geophysical implications of palaeomagnetic results from Africa. Rev. Geophys., 6, 1968, p. 201-238.
78. - McELHINNY M.W. and G.R. LUCK
Palaeomagnetism and Gondwanaland. Science, 168, 1970, p. 830-832.
79. - NAGATA T.
Rock magnetism. Maruzen Tokyo, 1961, 350 p.

80. - NAIRN A.E.M.
Palaeomagnetic measurements on Karroo and post-Karroo rocks.
A second progress report. Overseas Geol. Min. Resources
(Gr. Britain), 9, 1964, p. 302-320.
81. - LE PICHON X.
Sea-Floor spreading and continental drift. J. Geophys. Res. 71,
1968, p. 3661-3697.
82. - LE PICHON X., J.R. HEIRTZLER
Magnetic anomalies in the indian ocean and sea-floor spreading.
J. Geophys. Res., 73, 1968, p. 2101-2117.
83. - RIMBERT F.
Contribution à l'étude de l'action de champs alternatifs sur les
aimantations rémanentes des roches. Applications géophysiques.
Rev. Inst. Fr. Petr. XIV-I et XIV-2, 1959 p. 17-54 et 123-155.
84. - ROBERTSON W.A.
Palaeomagnetism of some mesozoic intrusives and tuffs from
eastern Australia. J. Geophys. Res., 68, 1963, p. 2299-2312.
85. - ROCHE A.
Etudes paléomagnétiques à Madagascar. Proc. pan-Ind. Ocean Sci.
Congr. 4, 1960, p. 129-137.
86. - ROCHE A. et L. CATTALA
Remanent magnetism of the cretaceous basalts of Madagascar.
Nature, London, 183, 1959, p. 1049-1050.
87. - ROCHE A., L. CATTALA et J. BOULANGER
Sur l'aimantation des basaltes de Madagascar. C.R. Acad. Sci.
Paris, 246, 1958, p. 2922-2924.
88. - RUNCORN S.K.
Palaeomagnetic evidence for continental drift and its geophysical
cause. p. 1-39, in Continental Drift, International Geophysics
series, vol. 3, Academic Press London, 1962.

89. - SAHASRABUDHE P.W.
Palaeomagnetism and the geology of the Daccan traps. Seminar on Geophysical investigations in the peninsular shield, Osmania Univ. Hyderabad, 1963, p. 226-243.
90. - SERV. GEOL. MADAGASCAR
Le volcanisme à Madagascar. Doc. Bur. Geol., 83, 1957, 237 p.
91. - SMITH A.G. and A. HALLAM
The fit of the southern continents. Nature, London, 225, 1970, p. 139-144.
92. - TARLING D.E.
Gondwanaland. Palaeomagnetism and continental drift. Nature, London, 229, 1971, p. 17-21.
93. - THELLIER E.
Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. Ann. I.P.G. Paris, 16, 1938, p. 157-302.
94. - THELLIER E.
Propriétés magnétiques des terres cuites et des roches. J. Phys. Rad., 12, 1951, p. 205-218.
95. - THELLIER E.
Methods of sample collection and orientation for archaeomagnetism, p. 16-20, in Methods in palaeomagnetism, D.W. COLLINSON, K.M. CREER et S.K. RUNCORN (editeurs), Elsevier, 1967.
96. - THELLIER E.
A "big sample" spinner magnetometer, p. 149-154, in Methods in palaeomagnetism, D.W. COLLINSON, K.M. CREER et S.K. RUNCORN (editeurs), Elsevier, 1967.
97. - THELLIER E. et F. RIMBERT
Sur l'analyse d'aimantations fossiles par action de champs magnétiques alternatifs. C.R. Acad. Sci. Paris, 239, 1954, p. 1399 - 1401.

98. - THELLIER E. et O. THELLIER
Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé
historique et géologique. Ann. Géophys., 15, 1959, p. 285-376.
99. - VERMA R.K. and H. ~~RAMANATHAN~~ NARAIN
Palaeomagnetic studies of indian rocks and continental drift.
Geophys. Monogr. U.S.A., 12, 1968, p. 189-197.
100. - VERMA R.K. et G. PULLAIAH
Palaeomagnetism of the Tirupati sandstones from Godavary valley,
India. Earth Planet. Sci. Lett., 2, 1967, p. 310-316.
101. - WATSON G.S. and E. IRVING
Statistical methods in rock magnetism. Month. Notices, Roy.
Astr. Soc. Geophys. Sup., 7, 1957, p. 289-300.
102. - WEGENER A.
Le genèse des continents et des océans. Théorie des translations
continentales. Nouvelle traduction française d'après la dernière
édition allemande, par A. LERNER, 1937.
103. - WELLMANN P. and M.W. McELMINNY
K. Ar. age of the Deccan Trap. India Nature. London, 277, 1970.
104. - WILSON R.L.
Remanent magnetism of late secondary and early tertiary british
rocks. Phil. Mag., 4, 1959, p. 750-755.
105. - WILSON R.L.
Palaeomagnetism and rock magnetism. Earth Sci. Rev., 1, 1966,
p. 175-212.

ANNEXES

Cette série d'annexes comprend les valeurs obtenues au cours des différents étalonnages effectués (annexe I) et les résultats concernant diverses études en laboratoire des échantillons (annexes II à XI) :

- détermination des caractéristiques des aimantations rémanentes naturelles et des aimantations stables, caractéristiques des échantillons,
- détermination de la direction de l'aimantation caractéristique de chaque site de prélèvement.

Toutefois, aucun résultat relatif à la désaimantation progressive des échantillons par champs alternatifs croissants, n'est présenté, afin de ne pas rendre trop fastidieuse la lecture des annexes. Tous les résultats concernant cette série d'expériences ont été exposés au fur et à mesure dans des rapports préliminaires déposés aux laboratoires de l'ORSTOM (Paris et Tananarive), ainsi qu'à ceux des Professeurs E. THELLIER et A. ROCHE.

I. - CARACTERISTIQUES DES AIMANTATIONS

Les résultats présentés concernent :

- n : nombre de cubes provenant de l'échantillon orienté
- D et I : direction d'aimantation déterminée avant et après la désaimantation de l'échantillon
- σ_0 : valeur de l'intensité de l'aimantation spécifique exprimée en 10^{-3} uém cgs/g
- H_{α} : valeur du champ alternatif ayant détruit les composantes secondaires d'aimantation. Dans le cas d'un échantillon orienté comportant plusieurs cubes, H représente l'intensité du champ alternatif utilisé pour la désaimantation partielle des différents cubes.

Pour certains échantillons de Betafo-Antsirabe et de l'Itasy, les caractéristiques des aimantations naturelles (D, I et σ_0) ne sont pas données. Cela provient du fait qu'après l'analyse des aimantations naturelles des échantillons-pilotes, les autres échantillons du site ont été soumis directement à la désaimantation partielle.

Si l'aimantation naturelle est considérée comme stable, aucune indication n'est portée sous la colonne H.

II. - DIRECTION MOYENNE D'AIMANTATION D'UN SITE

Les résultats exposés comprennent :

- D_m et I_m : direction moyenne d'aimantation du site
- N : nombre d'échantillons orientés retenus pour le calcul de la direction moyenne
- k : paramètre de précision de R.A. FISHER
- α : rayon du "cercle d'erreur" à 95 %

Ces diverses données seront complétées, pour chaque site de prélèvement, par une description sommaire de chaque lieu de prélèvement, par les "coordonnées Laborde" de ce dernier, et par les résultats des études pétrographiques par examen en lame mince de certains échantillons.

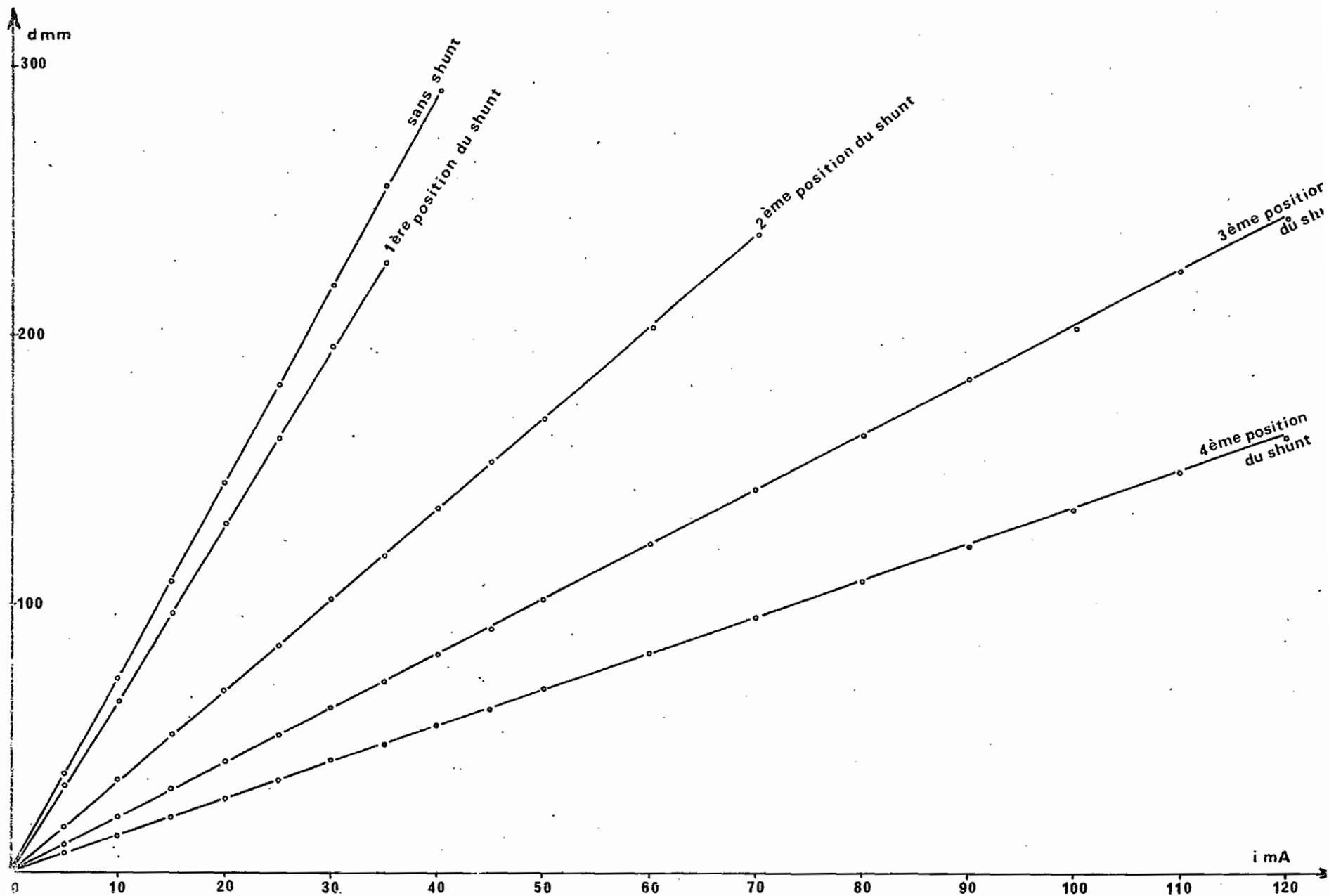
RESULTATS DES DIFFERENTS ETALONNAGES

Différents étalonnages ont été effectués depuis 1965. D'abord moins fréquents, ils sont devenus pratiquement mensuels depuis la deuxième moitié de 1968.

Les valeurs trouvées au cours des années sont sensiblement constantes montrant ainsi la bonne fidélité de l'inductomètre (Fig. 1).

La proportionnalité des déviations aux moments magnétiques est également bonne et cela pour différentes positions du shunt électrique (Fig. 2).

FIG. 2 PROPORTIONALITE DES DEVIATIONS AUX MOMENTS MAGNETIQUES (Si) POUR DIFFERENTES POSITIONS DU SHUNT ELECTRIQUE.



LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DE LA MONTAGNE D'AMBRE

I. Les échantillons du Miocène supérieur

1. Lieu de prélèvement : presqu'île de l'Anorontany

- échantillon N° 44 : d'une coulée de basalte à l'Est de Bobakilandy
 échantillon N° 215 : andésite d'Anoronibe X = 1510,1 Y = 653,0
 échantillon N° 216 : basalte de Rompandolo X = 1511,4 Y = 654,5
 échantillon N° 217 : basalte de Bobatsirotra X = 1510,5 Y = 654,6

2. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
44	1	344°	-11°	8,6		aimantation instable	
215	1	7°	-39°	1,7	40	357°	-43°
216	1	49°	-76°	4,7	80	4°	-59°
217	1	187°	-6°	1,8	100	342°	-29°

3. Direction moyenne d'aimantation du groupe

$$D_m = 354^\circ \quad I_m = -45^\circ \quad N = 3 \quad k = 28,98 \quad \alpha = 23^\circ$$

II. Les échantillons du Plio-Pléistocène

1. Lieu de prélèvement : ouest de la Montagne d'Ambre

- échantillon N° 10 : un neck de basalte à Ambohitsangia
 X = 1504,4 Y = 665,0
 échantillon N° 33 : un filon de basalte au Nord d'Irohona
 X = 1520,6 Y = 674,2
 échantillons N° 80 à 83 : rivière Antsandrantoana
 X = 1492,0 Y = 674,0
 échantillon N° 185 : basalte d'Ampanangana X = 1497,5 Y = 679,0
 échantillons N° 815-1 et 815-4 : basaltes de la rivière Ambararata
 X = 1521,5 Y = 692,5

2. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
10	1	169°	14°	0,6	120	185°	35°
33	1	213°	5°	1,1	120	190°	15°
80	1	155°	45°	3,8	120	167°	32°
81	1	318°	-12°	0,6		aimantation instable	
82	1	212°	-7°	4,0	150	203°	12°
83	1	194°	25°	0,4	100	188°	30°
185	1	185°	29°	4,0	20	186°	30°
815-1	1	142°	69°	15,2		aimantation instable	
815-4	1	15°	10°	1,5	150	189°	33°

3. Direction moyenne d'aimantation du groupe

$$D_m = 187^\circ \quad I_m = 25^\circ \quad N = 5 \quad k = 88,89 \quad \alpha = 8^\circ$$

Pour le calcul de la direction moyenne, les valeurs relatives aux échantillons 80-82-83 provenant d'un même point de prélèvement ont été d'abord groupées ensemble.

III. Les échantillons du Quaternaire récent

1. Lieu de prélèvement : diverses vallées rayonnant à partir de l'axe principal de la Montagne d'Ambre

échantillons N° 68 et 69 : basaltes de Bobakilandy

$$X = 1492,0 \quad Y = 683,8$$

échantillons N° 143 et 145 : basaltes de la rivière Andrafia (coulée de vallée) X = 1513,0 Y = 680,0

échantillon N° 163 : basalte d'Ambarijeby (coulée de vallée)

$$X = 1507,8 \quad Y = 682,1$$

échantillons N° 825-1, 825-2 et 825-3 : basaltes de la rivière Beamalona X = 1509,5 Y = 720,5

échantillons N° 826, 827-1, 827-2, 827-3, 827-4 : basaltes de la rivière Sakaramy X = 1510,5 Y = 720,0

2. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
68	1	8°	-32°	2,6	60	9°	-33°
69	1	348°	-30°	3,6	100	347°	-35°
108	1	359°	-29°	2,9	40	359°	-33°
143	1	11°	-32°	11,1	100	16°	-27°
145	1	8°	-40°	5,8		8°	-40°
163	1	1°	-34°	2,7	40	2°	-34°
825-1	1	4°	-29°	0,7	100	360°	-32°
825-2	1	4°	-31°	1,4	80	5°	-33°
825-3	1	4°	-32°	0,9	80	3°	-33°
826	1	3°	-34°	0,6	100	3°	-34°
827-1	1	2°	-37°	0,6	40	2°	-39°
827-2	1	360°	-38°	0,6	40	2°	-39°
827-3	1	6°	-41°	0,9	100	5°	-35°
827-4	1	360°	-31°	0,5	80	4°	-33°

En ce qui concerne l'échantillon 145, son aimantation rémanente naturelle a été considérée comme stable, la désaimantation progressive n'ayant montré aucun changement significatif de la direction.

3. Direction moyenne d'aimantation du groupe

$$D_m = 4^\circ \quad I_m = -34^\circ \quad N = 7 \quad k = 157,89 \quad \alpha = 5^\circ$$

Pour le calcul de la moyenne, les valeurs relatives aux échantillons 68-69, 825 et 826-827, ont été groupés ensemble, chaque groupe ayant été prélevé dans un même site.

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DE LA REGION DE BETAFO-ANTSIRABE

Nombre de sites de prélèvement étudiés : 10

Site N° 1 : ATSIMONIFASINA

1. Lieu de prélèvement : roche mise à nu au bas du Fasina, près du village d'Atsimonifasina X = 703,0 Y = 452,8
2. Nombre d'échantillons prélevés : 5
3. Nature des échantillons : basanite
4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation

Ech.	n	D	I
B 66	1	314°	32°
B 67	2	310°	-22°
B 68	1	324°	-60°
B 69	2	318°	-26°
B 70	1	296°	-

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les valeurs obtenues sont trop dispersées et non significatives

Site N° 2 : MIANTSOARIVO

1. Lieu de prélèvement : rivière Lohalambo, près du village de Miantsoarivo X = 700,0 Y = 447,6
2. Nombre d'échantillons prélevés : 8
3. Nature des échantillons : basanite
4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation dans un champ alternatif de 500 Oe

Ech.	n	D	I
B 80	5	342°	-42°
B 81	2	348°	-53°
B 82	3	342°	-37°
B 83	1	16°	-44°

Ech.	n	D	I
B 84	3	14°	-40°
B 85	1	345°	-6°
B 86	2	313°	30°
B 87	4	285°	26°

5. Direction moyenne d'aimantation du site :

$$D_m = 344^\circ \quad I_m = -44^\circ \quad N = 3 \quad k = 92,23 \quad \alpha = 13^\circ$$

Seuls les trois premiers échantillons ont été retenus.

Site N° 3 : RANOMAFANA

1. Lieu de prélèvement : rivière Iandratsay, route de Betafo-Mandoto

$$X = 697,3 \quad Y = 440,9$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basanite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
B 88	4	329°	-29°	4,5	500	335°	-28°
B 89	7	330°	-31°	2,6	500	343°	-34°
B 90	5	317°	-12°	1,1	500	331°	-22°
B 91	2	322°	-8°	8,2	500	333°	-10°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 336^\circ \quad I_m = -28^\circ \quad N = 3 \quad k = 104,45 \quad \alpha = 12^\circ$$

La valeur relative à l'échantillon B 91 a été exclue du calcul de la moyenne.

Site N° 4 : TSIAFAHY

1. Lieu de prélèvement : rivière Andranokely à l'Est du village de

$$\text{Tsiafahy} \quad X = 697,0 \quad Y = 460,8$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basanite

Lame mince B 123 : basanite altérée renfermant de nombreux minéraux opaques

Lame mince B 126 : basanite non altérée, de composition identique à B 123

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
B 122	2	349°	-51°	2,5	200	1°	-50°
B 123	7	325°	1°	57,8	200	327°	2°
B 124	3	339°	-35°	3,5	200	346°	-41°
B 125	1	20°	-56°	2,2	200	2°	-54°
B 126	3	329°	-45°	3,5	200	333°	-47°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 350^\circ \quad I_m = -48^\circ \quad N = 4 \quad k = 58,37 \quad \alpha = 12^\circ$$

La valeur relative à l'échantillon B 123 a été exclue du calcul de la moyenne.

Site N° 5 : SOAVIMALAZA

1. Lieu de prélèvement : paroi de roche verticale à l'Ouest du village de Soavimalaza X = 693,3 Y = 448,4

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : basanite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
B 97	2	15°	-43°	4,8	70	5°	-49°
B 98	5	344°	-45°	5,5	70	354°	-51°
B 99	2	14°	-30°	3,0	70	15°	-43°
B 100	6	33°	-39°	4,7	70	13°	-50°
B 101	4	277°	-13°	9,8	70	1°	-52°
B 102	3	33°	-36°	5,1	70	16°	-45°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 8^\circ \quad I_m = -49^\circ \quad N = 6 \quad k = 140,01 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 6 : MANDRAY

1. Lieu de prélèvement : carrière près du village de Ranofotsy

$$X = 691,1 \quad Y = 468,4$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces B 144 et B 147 : basaltes frais, renfermant de nombreux minéraux opaques

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
B 142	1	323°	-27°	0,4	200	342°	-32°
B 143	1	248°	-13°	0,5	200	336°	-36°
B 144	1	175°	-6°	4,2	200	274°	-73°
B 145	1	308°	-17°	2,4	200	333°	-18°
B 146	6	261°	-15°	2,2	200	330°	-19°
B 147	6	196°	-19°	2,9	200	330°	-33°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 334^\circ \quad I_m = -28^\circ \quad N = 5 \quad k = 73,68 \quad \alpha = 9^\circ$$

La valeur relative à l'échantillon B 144 a été éliminée.

Site N° 7 : IVOHITRA

1. Lieu de prélèvement : carrière sur la route d'Antsirabe - Belazao

$$X = 691,5 \quad Y = 460,2$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basanite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_o		D	I
B 137	2	268°	-11°	2,8	350	299°	-42°
B 138	2	269°	-31°	1,2	350	317°	-53°
B 139	3	54°	-65°	1,7	350	341°	-59°
B 140	2	293°	-15°	5,1	350	324°	-17°
B 141	1	214°	-49°	2,7	350	108°	-45°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 319^\circ \quad I_m = -43^\circ \quad N = 4 \quad k = 13,71 \quad \alpha = 26^\circ$$

La valeur relative à l'échantillon B 141 a été exclue du calcul de la moyenne.

Site N° 8 : ANTSONGO

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Sohalambo, près du village d'Antsongo X = 690,8 Y = 457,9

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons :

Lame mince B 127 basanite assez altérée

Lame mince B 129 basanite, identique à B 127, mais moins altérée

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_o		D	I
B 127	1	140°	-42°	18,0	350	135°	-39°
B 128	1	113°	5°	16,3	350	117°	3°
B 129	1	78°	72°	3,2	350	89°	54°
B 130	1	324°	41°	2,3	350	11°	-27°
B 131	1	333°	11°	0,8	350	1°	-47°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les valeurs obtenues sont trop dispersées et non significatives

Site N° 9 : VINANINKARENA

1. Lieu de prélèvement : au Nord du village de Vinaninkarena, paroi de la route d'Antsirabe - Vinaninkarena

$$X = 683,8 \quad Y = 463,0$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basanite

Les quatre échantillons examinés en lame mince, B 118, B 119, B 120 et B 121, semblent altérés

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0
B 118	4	310°	-13°	23,9
B 119	1	53°	17°	19,1
B 120	6	37°	-28°	14,5
B 121	6	58°	23°	14,3

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Etant donné le caractère instable des aimantations analysées et l'altération présentée par les échantillons prélevés, l'étude du site a été abandonnée.

Site N° 10 : AMBODIRIHANA

1. Lieu de prélèvement : rivière Ambodirihana, près du pont de la route Vinaninkarena - Mangarano

$$X = 683,0 \quad Y = 455,4$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basanite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
B 154	2	252°	-17°	0,7	350	177°	25°
B 155	3	116°	77°	7,3	350	141°	54°

Ech.	n	D	I	σ_0	H	D	I
B 156	1	213°	72°	30,4	350	204°	67°
B 157	4	84°	80°	12,4	350	137°	59°
B 158	1	272°	84°	32,4	350	227°	66°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les valeurs trouvées sont trop dispersées.

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DE L'ITASY

Nombre de sites de prélèvement étudiés : 13

Site N° 1 : AMPARAKY

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Mazy, au Nord-Ouest du village d'Amparaky X = 795,9 Y = 422,5
2. Nombre d'échantillons prélevés : 5
3. Nature des échantillons : basanitoïde
Lame mince B 196 : structure non porphyroïde, trame large microlitique d'augite et de plagioclases en abondance identique; présence d'apatite fréquente. Présence de titanomagnétite.
4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation par un champ alternatif de 110 Oe

Ech.	n	D	I
B 192	5	5°	-45°
B 193	5	355°	-40°
B 194	6	357°	-39°
B 195	3	334°	-42°
B 196	6	349°	-41°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 352^\circ \quad I_m = -42^\circ \quad N = 5 \quad k = 83,89 \quad \alpha = 8^\circ$$

Site N° 2 : INGILOFOTSY

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Mazy, route d'Analavory - Tsiroanomandidy X = 793,6 Y = 427,6
2. Nombre d'échantillons prélevés : 4
3. Nature des échantillons : basanitoïde
Lame mince B 204 : fond assez opaque avec trame fine de microlites de plagioclase dominant et d'augite. Olivine rare.

4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation par un champ alternatif de 200 Oe

Ech.	n	D	I
B 204	7	13°	-38°
B 205	5	355°	-49°
B 206	5	11°	-48°
B 207	3	3°	-51°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 6^\circ \quad I_m = -47^\circ \quad N = 4 \quad k = 97,95 \quad \alpha = 9^\circ$$

Site N° 3 : RIVIERE LILY

1. Lieu de prélèvement : en amont et en aval de la chute d'Antafofo

$$X = 785,8 \quad Y = 426,0$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 8

3. Nature des échantillons : basanitoïde

Lame mince B 184 : fond à zones vitreuses et plages de plagioclase dominantes, présence d'analcine ou peut-être de néphéline, trame irrégulière de microlites d'augite. Olivine rare, minéraux opaques abondants.

4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation par un champ alternatif de 270 Oe

Ech.	n	D	I
B 181	4	340°	-67°
B 182	1	234°	43°
B 183	1	26°	83°
B 184	4	345°	-66°
B 185	4	346°	-63°
B 189	3	31°	-62°
B 190	4	44°	-67°
B 191	3	39°	-59°

5. Direction moyenne d'aimantation

$$D_m = 12^\circ \quad I_m = -66^\circ \quad N = 6 \quad k = 38,7 \quad \alpha = 11^\circ$$

Les valeurs relatives aux échantillons B 182 et B 183 ont été exclues.

Site N° 4 : AMPEFY

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Lily près du village d'Ampefy X = 784,9 Y = 430,8
2. Nombre d'échantillons prélevés : 3
3. Nature des échantillons : basanite
4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation par un champ alternatif de 200 Oe

Ech.	n	D	I
B 186	4	345°	-48°
B 187	2	346°	-46°
B 188	4	344°	-49°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 345^\circ \quad I_m = -48^\circ \quad N = 3 \quad k = 2532,79 \quad \alpha = 2^\circ$$

Site N° 5 : MAROVATO

1. Lieu de prélèvement : près du village de Marovato
X = 786,1 Y = 420,6
2. Nombre d'échantillons prélevés : 3
3. Nature des échantillons : labradorite - andésite

Lame mince B 260 : roche fraîche

structure microlitique porphyroïde bulbeuse
plagioclases labrador-andésine dominant
phénocristaux d'augite
pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0	
B 259	1	161°	-29°	5,6	Aimantation instable
B 260	1	170°	-18°	16,2	Aimantation instable
B 261	1	131°	-55°	2,5	Aimantation instable

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les trois aimantations naturelles se sont montrées instables, de sorte qu'aucune aimantation caractéristique n'a pu être définie.

Site N° 6 : MANDANISAKAFO

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Antafofo, à l'Ouest du village de Mandanisakafo X = 780,1 Y = 420,5

2. Nombre d'échantillons prélevés : 10

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces B 220 - B 229 : verre présentant des microlites de plagioclases
présence de nombreux minéraux opaques
olivine altérée

4. Caractéristiques des aimantations après la désaimantation

Ech.	n	H	D	I	
B 220	3	200	5°	-67°	
B 221	3	200	360°	-59°	
B 222	1	200	360°	-59°	
B 223	1				aimantation instable
B 224	3	200	353°	-45°	
B 225	2	200	15°	-56°	
B 226	3	200	356°	-68°	
B 227	3	140	2°	-61°	
B 228	3	140	4°	-51°	
B 229	3	200	347°	-77°	

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 1^\circ \quad I_m = -61^\circ \quad N = 9 \quad k = 66,04 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 7 : ANDRANOMALAIMIZAKA

1. Lieu de prélèvement : lit d'un ruisseau, près du village d'Andranomalaimizaka X = 781,2 Y = 420,8
Le prélèvement a été fait en 3 points différents à 100 mètres environ les uns des autres
2. Nombre d'échantillons prélevés : 27
3. Nature des échantillons :
 - Lame mince B 56 : Limburgite - basanitoïde
structure microlitique très porphyroïde
fond assez opaque à zones vitreuses
minéral abondant, présence de cristaux
entièrement transformés (oxydes, serpentine)
 - Lame mince B 212 : Basalte vacuolaire
présence de microlites de plagioclase et de
petits cristaux d'augite
début d'altération
 - Lame mince B 214 : identique à B 212, mais moins altéré
 - Lame mince B 237 : Basalte assez frais
structure microlitique porphyroïde
quelques phénocristaux d'augite
pas d'olivine
 - Lames minces B 239, B 242 - B 244 : Basaltes assez frais
structure microlitique porphyroïde
présence de phénocristaux d'augite
présence d'andésine
 - Lames minces B 250 - B 253 - B 254 - B 257 : identiques aux
précédentes
4. Caractéristiques des aimantations après la désaimantation

Ech.	n	H	D	I
B 52	1	350	141°	-58°
B 53	1	350	165°	-79°
B 54	1	350	128°	80°
B 55	1	350	135°	35°
B 56	1	350	195°	71°

Ech.	n	H	D	I
B 57	1	350	172°	69°
B 58	1	350	110°	80°
B 59	1	350	176°	58°
B 60	1	350	28°	-78°
B 212	1	140	307°	-33°
B 213	1	140	319°	-40°
B 214	1	aimantation instable		
B 215	1	"	"	"
B 216	1	"	"	"
B 217	1	"	"	"
B 218	1	"	"	"
B 219	1	"	"	"
B 237	1	"	"	"
B 239	1	"	"	"
B 240	1	"	"	"
B 244	1	"	"	"
B 246	1	"	"	"
B 249	1	"	"	"
B 252	1	"	"	"
B 253	1	"	"	"
B 256	1	"	"	"
B 257	1	"	"	"

5. Direction moyenne d'aimantation du site

L'aimantation caractéristique du site n'a pas pu être définie.

Site N° 8 : AMBODIFARIHY

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Zanakolo, près du village
d'Ambodifarihy X = 781,3 Y = 425,0

2. Nombre d'échantillons prélevés : 7

3. Nature des échantillons : basalte

Lame mince B 230 : basalte vacuolaire

verre avec microlites de plagioclases

présence de minéraux opaques

olivine transformée en partie en iddingsite

Lame mince B 235 : basalte vacuolaire
composition identique à celle de B 230
roche non altérée

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	D	I	σ_0	
B 230	1	207°	-6°	44,9	aimantation instable
B 231	1	206°	21°	41,9	" "
B 232	1	243°	-21°	24,6	" "
B 233	1	225°	10°	51,0	" "
B 234	1	225°	21°	18,2	" "
B 235	1	234°	-9°	19,4	" "
B 236	1	227°	-15°	38,1	" "

5. Direction moyenne d'aimantation du site

L'aimantation caractéristique du site n'a pas pu être définie.

Site N° 9 : AMPARIHILAVA

1. Lieu de prélèvement : lit de ruisseau sur la route de Mananasy -
Saromoka X = 776,6 Y = 452,1

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : limburgite basanitoïde

Lame mince B 202 : fond opaque à zones vitreuses
trames microlitiques à augite dominant
nombreux cristaux d'olivine peu altérés
phénocristaux d'augite

4. Caractéristiques des aimantations après d'aimantation dans un
champ alternatif de 450 Oe

Ech.	n	D	I
B 201	4	355°	6°
B 202	4	3°	-13°
B 203	4	64°	-17°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les valeurs obtenues sont trop dispersées et non significatives

Site N° 10 : ANDRANOMAITSO

1. Lieu de prélèvement : paroi de roche verticale tout autour du lac
Andranomaitso X = 774,6 Y = 421,6
2. Nombre d'échantillons prélevés : 14
3. Nature des échantillons : basanitoïde
Lame mince B 165 : fond à zones vitreuses et plages de
plagioclase incluant des microlites
d'augite
phénocristaux d'augite et d'olivine
abondants
minéral opaque fréquent
4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation dans un
champ alternatif de 110 Oe

Ech.	n	D	I
B 160	6	358°	-26°
B 161	2	6°	-28°
B 162	5	5°	-25°
B 163	4	3°	-33°
B 164	3	55°	-42°
B 165	3	15°	-30°
B 166	5	359°	-36°
B 167	5	360°	-35°
B 168	4	139°	-1°
B 169	3	345°	-33°
B 170	4	346°	-33°
B 171	5	359°	-40°
B 172	5	356°	-38°
B 173	5	350°	-47°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 359^\circ \quad I_m = -34^\circ \quad N = 12 \quad k = 72,41 \quad \alpha = 5^\circ$$

Les valeurs relatives à B 164 et B 168 ont été exclues du calcul de la moyenne.

Site N° 11 : MAHATSINJO

1. Lieu de prélèvement : Paroi de piste près de la localité de Mahatsinjo X = 771,3 Y = 426,9
2. Nombre d'échantillons prélevés : 4
3. Nature des échantillons : limburgite basanitoïde
Lame mince B 198 : structure très porphyroïde
trame fine microlitique avec prédominance d'augite
nombreux minéraux opaques
présence de quelques cristaux d'olivine
altération assez forte
4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation dans un champ alternatif de 450 Oe

Ech.	n	D	I
B 197	1	357°	-50°
B 198	1	242°	-
B 199	1	31°	-65°
B 200	1	61°	-30°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les valeurs trouvées ne sont pas significatives.

Site N° 12 : AMBATOLAKA

1. Lieu de prélèvement : lit de ruisseau au Nord de Sovinandrina,
X = 773,8 Y = 430,7
2. Nombre d'échantillons prélevés : 4
3. Nature des échantillons : basanitoïde
Lame mince B 174 : fond opaque avec trame fine de microlites de plagioclase dominant et d'augite
olivine rare
petits phénocristaux d'augite abondants

4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation dans un champ alternatif de 450 Oe

Ech.	n	D	I
B 174	5	356°	-41°
B 175	4	339°	-39°
B 176	6	341°	-44°
B 177	6	360°	-44°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 344^\circ \quad I_m = -43^\circ \quad N = 4 \quad k = 97,06 \quad \alpha = 9^\circ$$

Site N° 13 : SAHAPETRAKA

1. Lieu de prélèvement : paroi de route, à l'Est du village de
Sahapetraka X = 769,9 Y = 429,4

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : basanitoïde - limburgite

Lame mince B 180 : trames fines microlitiques de plagioclase
et d'augite
quelques phénocristaux d'augite
présence de minéraux opaques

4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation dans un champ alternatif de 200 Oe

Ech.	n	D	I
B 178	5	321°	-24°
B 179	5	321°	-24°
B 180	5	336°	-37°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 326^\circ \quad I_m = -28^\circ \quad N = 3 \quad k = 58,68 \quad \alpha = 16^\circ$$

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE D'ANDREFOREFO ET DE BEVOAY

Site N° 1 : ANDREFOREFO

1. Lieu de prélèvement : flanc du pointement volcanique d'Andreforefo

$$X = 378,2 \quad Y = 110,0$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 10

3. Nature des échantillons : Tous les échantillons ont été examinés en lame mince. Ils correspondent tous à des basaltes à olivine et augite, souvent riches en zéolites, présentant généralement une structure microlitique.

On peut distinguer une phase bulleuse (Ech. D 89, D 90, D 93, D 95, D 98) et une phase massive (D 91, D 92, D 94, D 96 et D 97). La première phase est caractérisée par des grains plus fins.

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation			
		D	I	σ_0	H	D	I	
D 89	1	320°	36°	4,4	350	191°	69°	
D 90	1	35°	23°	1,7	350	172°	63°	
D 91	2	344°	28°	1,0	200	176°	63°	
D 92	4	166°	80°	0,9	350	184°	55°	
D 93	1	358°	30°	8,2				aimantation instable
D 94	1	336°	-11°	6,6				" "
D 95	1	187°	-88°	2,7				" "
D 96	1	25°	-17°	7,7				" "
D 97	2	198°	18°	0,2	200	199°	38°	
D 98	1	220°	17°	1,4	200	200°	36°	

Les aimantations relatives à D 93, D 94, D 95 et D 96 n'ont comporté aucune fraction stable.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 190^\circ \quad I_m = 55^\circ \quad N = 6 \quad k = 26,56 \quad \alpha = 13^\circ$$

Site N° 2 : BEVOAY

1. Lieu de prélèvement : carrière sur la rive droite du Mangoky, à
l'Est du village d'Ampanongana

X = 470,3 Y = 135,6

2. Nombre d'échantillons prélevés : 33

3. Nature des échantillons : la détermination exacte demande une
analyse chimique

Lames minces D 300, D 312, D 330 : roches peu altérées

structure microlitique porphyroïde

fond brun isotrope fait d'oxydes et de
verre

microlites d'augite et granules d'olivine

absence de feldspaths exprimés

phénocristaux d'olivine fraîche ou
serpentinisée

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0
D 300	1	176°	55°	0,4
D 301	1	178°	55°	0,5
D 302	1	161°	53°	0,7
D 303	2	169°	58°	0,9
D 304	1	171°	57°	0,6
D 305	1	174°	60°	0,5
D 306	2	174°	57°	0,4
D 307	2	177°	57°	0,5
D 308	2	169°	57°	1,2
D 309	2	175°	60°	0,7
D 310	2	173°	60°	0,6
D 311	2	170°	57°	0,8
D 312	4	169°	57°	1,3
D 313	3	170°	58°	0,6
D 314	4	173°	58°	0,5
D 315	1	171°	51°	0,5
D 316	1	172°	58°	0,6

Ech.	n	D	I	σ_0
D 137	2	165°	60°	0,8
D 318	3	170°	57°	1,7
D 319	2	176°	57°	0,7
D 320	4	168°	55°	0,6
D 321	4	166°	59°	1,1
D 322	1	167°	58°	1,1
D 323	7	174°	57°	1,2
D 324	4	180°	57°	1,9
D 325	3	175°	53°	1,1
D 326	3	166°	59°	2,1
D 327	4	167°	55°	0,9
D 328	3	174°	56°	0,7
D 329	1	181°	54°	0,5
D 330	3	171°	56°	0,9
D 331	2	176°	54°	0,6
D 332	4	178°	57°	0,7

La désaimantation progressive de tous les échantillons n'ayant montré aucun changement significatif des directions, les aimantations naturelles ont été considérées comme étant stables.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 172^\circ \quad I_m = 57^\circ \quad N = 33 \quad k = 562,39 \quad \alpha = 1^\circ$$

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DE LA COTE CENTRE NORD-EST

Nombre de sites de prélèvement : 11

Site N° 1 : FENERIVE-PLAGE

1. Lieu de prélèvement : plage de Fénériver au point X = 966,7 Y = 716,1
Z = 5 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 9

3. Nature des échantillons : dolérite ou basalte

Lames minces A 36, A 38, A 39 : dolérites

structure doléritique ophitique typique

composition : labrador , augite, oxydes
de Fe-Ti abondants

pas d'olivine

Lames minces A 40 et A 44 : basaltes à olivine

structure microlitique à doléritique

composition : labrador et augite

la roche A 44 est très altérée (saussurisation du plagioclase et ouralitisaiton du pyroxène)

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle			H	Aimantation stable		
		D	I	σ_0		D	I	
A 36	3	11°	-66°	5,5		11°	-66°	
A 37	2	28°	-67°	2,0	50	24°	-72°	
A 38	1	211°	-59°	4,6				aucune fraction stable
A 39	1	54°	-41°	1,3				aucune fraction stable
A 40	2	28°	-71°	9,4		28°	-71°	
A 41	1	220°	-73°	8,0	100	207°	-69°	
A 42								} chapeau de plâtre détaché
A 43								
A 44	2	207°	-64°	5,5		207°	-64°	

Les aimantations naturelles correspondant aux échantillons A 38 et A 39 se sont montrées entièrement instables. Les échantillons A 42 et A 43 n'ont pas été étudiés par suite de la perte du "chapeau de plâtre".

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 20^\circ \quad I_m = -70^\circ \quad N = 3 \quad k = 369,54 \quad \alpha = 6^\circ$$

Les valeurs relatives aux échantillons A 41 et A 44 ont été exclues du calcul de la moyenne. En ce qui concerne l'échantillon A 44, compte tenu de sa forte altération, l'aimantation pourrait être du type ARC.

Site N° 2 : FENERIVE-CARRIERE

1. Lieu de prélèvement : carrière de Fénériver

$$X = 964,5 \quad Y = 718,0 \quad Z = 15 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 12

3. Nature des échantillons : dolérite

Lames minces A 25, A 27, A 33 : roches fraîches ou peu altérées
 structure doléritique ophitique
 composition : labrador, augite
 oxydes de Fe-Ti abondants
 pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle			H	Aimantation stable	
		D	I	σ_0		D	I
A 24	4	13°	-46°	3,8		13°	-46°
A 25	1	353°	-59°	2,4		353°	-59°
A 26	3	16°	-69°	2,6		16°	-69°
A 27	1	29°	-69°	2,1	50	24°	-68°
A 28	3	38°	-71°	3,4		38°	-71°
A 29	2	7°	-67°	1,7	50	9°	-63°
A 30	1	10°	-72°	1,4	50	5°	-65°
A 31	4	359°	-63°	1,9		359°	-63°

Ech.	n	D	I	σ_0	H	D	I
A 32	1	356°	-66°	3,0		356°	-66°
A 33	1	359°	-76°	2,9	50	3°	-77°
A 34	1	16°	-60°	2,6	25	11°	-60°
A 35	2	9°	-63°	1,4		9°	-63°

Aucun changement significatif des directions n'a été observé pour la plupart des aimantations naturelles. Celles-ci ont été, de ce fait, considérées comme étant stables.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 9^\circ \quad I_m = -65^\circ \quad N = 12 \quad k = 79,56 \quad \alpha = 5^\circ$$

Site N° 3 : MORAFENO

1. Lieu de prélèvement : rivière Iazafo X = 958,6 Y = 704,9 Z = 100 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons :

Lame mince A 8 : andésite
présence d'andésine, d'augite
structure trachytique

Lame mince A 11 : dolérite
labrador et augite
structure doléritique ophitique

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
A 8	5	145°	-80°	5,3	100	359°	-81°
A 9	2	347°	-56°	4,8	50	354°	-61°
A 10	1	227°	-83°	14,7			aimantation instable
A 11	6	13°	-59°	4,3	100	3°	-67°

L'aimantation relative à A 10 s'est montrée entièrement instable.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 358^\circ \quad I_m = -70^\circ \quad N = 3 \quad k = 65,59 \quad \alpha = 15^\circ$$

Site N° 4 : AMBATOBE

1. Lieu de prélèvement : rivière Iazafo, au Sud-Est du village

$$\text{d'Ambatobe } X = 957,1 \quad Y = 712,4 \quad Z = 50 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 7

3. Nature des échantillons :

Lame mince A 13 : andésite
andésine - augite
minéral subautomorphe interstitiel
abondant

Lames minces A 16 - A 18 : dolérites
structure doléritique ophitique
labrador et augite
minéral interstitiel abondant

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable		
		D	I	σ_0	H	D	I	
A 12	5	28°	-67°	19,1	50	7°	-62°	
A 13	2	125°	-73°	0,8	100	12°	-57°	
A 14								{chapeau de plâtre {détaché (non étudié)
A 15	1	326°	-45°	1,0				aucune fraction stable
A 16	1	237°	-11°	0,8				aucune fraction stable
A 17	3	5°	-67°	2,5	25	6°	-67°	
A 18	3	4°	-73°	1,4		4°	-73°	

L'aimantation naturelle relative à A 18 s'est montrée stable au cours des phases successives de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 8^\circ \quad I_m = -65^\circ \quad N = 4 \quad k = 131,86 \quad \alpha = 8^\circ$$

Site N° 5 : MAHAMBO

1. Lieu de prélèvement : carrière près de Mahambo

X = 955,1 Y = 720,9 Z = 5 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons :

Lame mince A 1 : dolérite
labrador et augite
minéral interstitiel

Lame mince A 4 : trachyte
quelques phénocristaux d'augite
minéral interstitiel

Lame mince A 5 : andésite
andésine et augite
minéral interstitiel

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0	
A 1	1	334°	-42°	3,1	aimantation instable
A 2	1	252°	-13°	1,6	" "
A 3	1				{chapeau de plâtre détérioré (non étudié)
A 4	1	355°	-73°	2,6	aimantation instable
A 5	1	28°	-12°	0,6	" "

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Toutes les aimantations naturelles se sont montrées instables au cours des phases successives de la désaimantation, de sorte que l'aimantation caractéristique originelle du site n'a pas pu être définie.

Site N° 6 : BEMENAKA

1. Lieu de prélèvement : carrière près du village de Bememaka

X = 892,9 Y = 709,0 Z = 30 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : dolérite

Lames minces A 53 - A 55 - A 57 : structure doléritique ophitique
 composition : labrador et augite avec
 des oxydes de Fe-Ti
 pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable	
		D	I	σ_o	H	D	I
A 53	1	8°	-64°	1,9		8°	-64°
A 54	2	2°	-57°	1,8		2°	-57°
A 55	1	21°	-70°	2,3	50	14°	-67°
A 56	1	359°	-62°	1,7			aucune fraction stable
A 57	1	15°	-59°	2,1	75	6°	-60°

L'échantillon A 56 ne comporte aucune fraction d'aimantation stable, tandis que les aimantations naturelles correspondant aux échantillons A 53 et A 54 se sont révélées stables au cours des phases successives de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 7^\circ \quad I_m = -62^\circ \quad N = 4 \quad k = 285,59 \quad \alpha = 5^\circ$$

Site N° 7 : AMBODIVATO - SUD

1. Lieu de prélèvement : carrière près du village d'Ambodivato

$$X = 892,7 \quad Y = 712,7 \quad Z = 10 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : dolérite

Lames minces A 46 - A 47 : structure doléritique ophitique
 composition : labrador et augite
 présence d'oxydes de Fe-Ti
 pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0	
A 45	2	4°	-61°	1,2	
A 46	1	9°	-58°	1,0	
A 47	1	7°	-62°	1,1	
A 48	1	340°	-57°	1,1	aimantation instable

Toutes les aimantations naturelles, sauf une, celle relative à A 48, se sont montrées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 8^\circ \quad I_m = -60^\circ \quad N = 3 \quad k = 967,77 \quad \alpha = 4^\circ$$

Site N° 8 : AMBINANINDRANO

1. Lieu de prélèvement : carrière près d'Ambinanindrano

$$X = 889,6 \quad Y = 710,6 \quad Z = 25 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons :

Lame mince A 49 : dolérite

composition : labrador - augite
minéral interstitiel abondant

Lame mince A 51 : structure microlitique

composition : andésine - labrador - augite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle			H	Aimantation stable		
		D	I	σ_0		D	I	
A 49	1	309°	-70°	2,9				aucune fraction stable
A 50	2	357°	-60°	1,4		357°	-60°	
A 51	1	347°	-57°	2,5	50	355°	-58°	
A 52	1	35°	-59°	2,5	50	26°	-60°	

L'échantillon A 49 n'a comporté aucune fraction d'aimantation stable, tandis que l'aimantation naturelle relative à A 50 s'est montrée stable d'un bout à l'autre de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 6^\circ \quad I_m = -60^\circ \quad N = 3 \quad k = 85,91 \quad \alpha = 13^\circ$$

Site N° 9 : FANANDRANA

1. Lieu de prélèvement : carrière au Nord de Fanandrana

$$X = 869,6 \quad Y = 699,6 \quad Z = 20 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons :

Lame mince A 60 : basalte

composition : labrador et augite

pas d'olivine

nombreux oxydes de Fe-Ti

structure microlitique interstiale

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
A 59	2	12°	-71°	8,0		12°	-71°
A 60	3	16°	-63°	7,6		16°	-63°
A 61	1	13°	-63°	5,8	50	17°	-68°

Les aimantations naturelles relatives aux échantillons A 59 et A 60 se sont révélés stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 15^\circ \quad I_m = -67^\circ \quad N = 3 \quad k = 356,66 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 10 : AMBARIMILAMBANA

1. Lieu de prélèvement : près de la localité d'Ambarimilambana

$$X = 850,0 \quad Y = 687,4 \quad Z = 30 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces A 62 - A 65 : structure ophitique

minéraux opaques intersticiels

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0	
A 62	1	55°	-64°	1,6	aimantation instable
A 63	3	21°	-64°	1,6	
A 64	2	25°	-65°	1,2	
A 65	1	214°	-65°	2,7	

Toutes les aimantations naturelles, sauf celle relative à A 62, se sont montrées stables au cours de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 23^\circ \quad I_m = -64^\circ \quad N = 2 \quad k = 2490,68 \quad \alpha = 5$$

La valeur relative à l'échantillon A 65 a été exclue du calcul de la moyenne.

Site N° 11 : BRICKAVILLE

1. Lieu de prélèvement : carrière d'Ambodiara, près de Brickaville

$$X = 806,2 \quad Y = 678,0 \quad Z = 35 \text{ m.}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 11

3. Nature des échantillons

Lames minces A 67 - A 75 : basaltes

structure microlitique

composition : plagioclase en microlites
et pyroxènes

présence d'oxydes - pas d'olivine

Lames minces A 68, A 70, A 74 : dolérites

structure doléritique ophitique

composition : labrador en bâtonnets
de gros prismes d'augite

présence d'oxydes - pas d'olivine

Lame mince A 72

: andésite

composition : andésine - augite - minéral
en inclusion

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle			H,	Aimantation stable	
		D	I	σ_0		D	I
A 66	1	2°	-55°	1,8			aucune fraction stable
A 67	3	4°	-62°	0,6	50	11°	-58°
A 68	2	20°	-61°	3,0		20°	-61°
A 69	3	3°	-62°	1,0		3°	-62°
A 70	1	12°	-56°	2,3		12°	-56°
A 72	1	20°	-57°	1,7		20°	-57°
A 73	4	3°	-56°	1,4	25	4°	-55°
A 74	1	25°	-65°	1,1		25°	-65°
A 75	1	7°	-67°	0,7	25	15°	-66°
A 76	1	15°	-70°	1,2		15°	-70°

L'échantillon A 71 n'a pas été étudié par suite de la détérioration de son "chapeau de plâtre".

La plupart des aimantations naturelles se sont révélées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 13^\circ \quad I_m = -61^\circ \quad N = 9 \quad k = 167,44 \quad \alpha = 4^\circ$$

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DE LA COTE SUD-EST

Nombre de sites de prélèvement : 16

Site N° 1 : ANDRANOMANITSY

1. Lieu de prélèvement : carrière près du village d'Andranomanitsy,
sur la route de Nosy-varika - Mananjary
X = 607,9 Y = 607,9

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces C 115 - C 119 : basaltes riches en augite
composition : microlites de labrador
augite - grains de magnétite
structure microlitique porphyrique

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable		
		D	I	σ_o	H	D	I	
C 115	4	334°	-66°	1,1	50	344°	-61°	
C 116	2	353°	-58°	1,6		353°	-58°	
C 117	2	346°	-59°	1,2	50	358°	-62°	
C 118	1	355°	-61°	2,3	50	357°	-60°	
C 119	1	348°	-59°	1,2	50	354°	-63°	

L'aimantation naturelle relative à C 116 s'est montrée stable tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 353^\circ \quad I_m = -61^\circ \quad N = 5 \quad k = 613,29 \quad \alpha = 3^\circ$$

Site N° 2 : ANOSIMPARIHY

1. Lieu de prélèvement : carrière d'Anosimparihy
X = 550,6 Y = 586,8

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : dolérite ou basalte doléritique à augite
structure doléritique
composition : labrador - augite titanifère
magnétite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
C 120	2	350°	-62°	2,0	75	351°	-65°
C 121	2	355°	-62°	1,6	75	355°	-64°
C 122	2	337°	-63°	1,6	75	334°	-66°
C 123	4	350°	-59°	1,8	75	349°	-63°
C 124	2	353°	-55°	1,5	75	350°	-57°
C 125	2	342°	-61°	2,2	75	344°	-63°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 350^\circ \quad I_m = -62^\circ \quad N = 5 \quad k = 546,42 \quad \alpha = 3^\circ$$

Il n'a pas été tenu compte de la valeur relative à C 122 dans le calcul de la moyenne.

Site N° 3 P.K. 14 : MANANJARY

- Lieu de prélèvement : carrière à 14 km de Mananjary, sur la route nationale N° 25
X = 588,1 Y = 543,1 Z = 55 m
- Nombre d'échantillons prélevés : 5
- Nature des échantillons : basalte
Lames minces C 126, C 128, C 130 : basaltes fines
structure microlitique à grain très fin
composition : microlites de plagioclase associés à de nombreux petits granules d'augite.
granule de magnétite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
C 126	2	28°	-68°	0,5	75	41°	-65°
C 127	2	16°	-73°	0,3		16°	-73°
C 128	1	47°	-70°	0,6	25	52°	-67°
C 129	2	31°	-48°	0,9	75	39°	-66°
C 130	1	341°	-70°	0,5			aucune fraction stable

L'aimantation relative à C 130 ne comporte aucune fraction stable tandis que l'aimantation naturelle correspondant à C 127 s'est révélée stable dans sa totalité.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 38^\circ \quad I_m = -68^\circ \quad N = 4 \quad k = 157,90 \quad \alpha = 7^\circ$$

Site N° 4 : MAHATSINJO

- Lieu de prélèvement : carrière au Sud-Ouest du village de Mahatsinjo près de Mananjary

$$X = 538,0 \quad Y = 594,7 \quad Z = 30 \text{ m}$$

- Nombre d'échantillons prélevés : 4
- Nature des échantillons : basalte

Lames minces C 131, C 133, C 134 : basalte porphyrique mélanocrate
structure microlitique porphyrique
composition : labrador - augite - gros
grains de magnétite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
C 131	3	359°	-57°	1,6	75	357°	-61°
C 132	4	338°	-60°	0,4	25	342°	-60°
C 133	2	358°	-59°	1,4		358°	-59°
C 134	1	3°	-56°	1,2	50	10°	-59°

L'aimantation naturelle relative à C 133 s'est révélée stable au cours des phases successives de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 357^\circ \quad I_m = -60^\circ \quad N = 4 \quad k = 179,44 \quad \alpha = 7^\circ$$

Site N° 5 : ANTSENAVOLO

1. Lieu de prélèvement : carrière près d'Antsenavolo

$$X = 523,4 \quad Y = 568,0 \quad Z = 150 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : dacite

Lames minces C 136, C 137, C 139 : dacites

structure microlitique porphyrique

composition : phénocristaux de plagioclases

quelques granules de pyroxène

quartz interstitiel

grains de minerai

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
C 135	2	103°	-8°	0,2	75	41°	-62°
C 136	1	329°	-74°	0,2	75	344°	-73°
C 137	2	360°	-69°	0,3	75	6°	-68°
C 138	2	360°	-62°	0,3	100	342°	-64°
C 139	1	16°	-23°	0,6			aimantation instable

L'aimantation correspondant à l'échantillon C 139 ne comporte aucune fraction stable.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 5^\circ \quad I_m = -69^\circ \quad N = 4 \quad k = 46,84 \quad \alpha = 13^\circ$$

Site N° 6 : ANKAZOHARAKA

1. Lieu de prélèvement : carrière près d'Ankazoharaka, sur la route de Manokara - Irondro

$$X = 449,6 \quad Y = 559,7 \quad Z = 5 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 12

3. Nature des échantillons :

Lames minces C8, C 13 : basalte microlitique

Lame mince C 15 : dolérite à structure doléritique ophitique

Lame mince C 16 : labradorite à structure microlitique

fluidale, prédominance de labrador

absence d'olivine dans les quatre lames

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				H	Aimantation stable		
		D	I	σ_0	D		I		
C 7	3	358°	-73°	0,7		358°	-73°		
C 8	1	350°	-59°	0,4				aucune fraction stable	
C 9	3	18°	-58°	5,8		18°	-58°		
C 10	1	10°	-73°	1,1	20	21°	-71°		
C 11	1	24°	-62°	1,3		24°	-62°		
C 12	1	16°	-65°	0,8	70	6°	-68°		
C 13	1	30°	-59°	0,5	20	24°	-56°		
C 14	1	348°	-62°	0,7				aucune fraction stable	
C 15	1	350°	-86°	1,1		350°	-86°		
C 16	1	23°	-77°	0,3	35	21°	-69°		
C 17	1	22°	-57°	0,5	35	15°	-63°		
C 18	1	6°	-71°	0,4				aucune fraction stable	

La désaimantation n'ayant montré aucun changement significatif des directions, les aimantations naturelles relatives à C 7, C 9, C 11 et C 15 ont été considérées comme étant stables.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 17 \quad I_m = -68^\circ \quad N = 9 \quad k = 69,10 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 7 P.K. 3,5 : MANAKARA-IRONDRO

1. Lieu de prélèvement : carrière située à 3,5 km de Manakara

X = 445,6 Y = 560,8 Z = 50 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons :

Lames minces C 1, C 3, C 4 : dolérites

structure doléritique ophitique

composition : labrador - augite

oxydes de Fe-Ti abondants

pas d'olivine

Lame mince C 6

: basalte

structure microlitique

composition: microlites de plagioclase et

de pyroxène

oxyde de Fe-Ti

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation		
		D	I	σ_o		D	I	
C 1	2	323°	-50°	2,2	55	21°	-55°	
C 2	2	246°	-34°	2,9				aimantation instable
C 3	1	20°	-64°	1,2				aimantation instable
C 4	1	19°	-44°	2,0	55	17°	-49°	
C 5	2	36°	-51°	0,4	55	19°	-52°	
C 6	1	360°	-56°	1,6	35	9°	-63°	

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 17^\circ \quad I_m = -55^\circ \quad N = 4 \quad k = 145,97 \quad \alpha = 8^\circ$$

Site N° 8 : P.K. 8,5 : MANAKARA-VOHIPENO

1. Lieu de prélèvement : au bord de la route de Manakara - Vohipeno

X = 436,8 Y = 557,2 Z = 25 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 8

3. Nature des échantillons :

Lames minces C 20, C 26 : basaltes doléritiques

composition : microlites de plagioclase et d'augite

nombreux minéraux opaques

Lames minces C 21, C 23 : dolérites

structure doléritique ophitique

composition : labrador - augite

oxydes de Fe-Ti

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle			Aimantation stable		
		D	I	σ_0	H	D	I
C 19	1	112°	-82°	2,0	135	32°	-71°
C 20	2	151°	-77°	2,8			aucune fraction stable
C 21	4	162°	24°	7,6			aucune fraction stable
C 22	1	80°	-69°	4,5	35	73°	-68°
C 23	1	125°	2°	8,6			aucune fraction stable
C 24	1	36°	-70°	3,8		36°	-70°
C 25	1	24°	-71°	2,7		24°	-71°
C 26	1	68°	-76°	1,6	55	23°	-71°

Les aimantations naturelles relatives à C 24 et C 25 se sont révélées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 29^\circ \quad I_m = -71^\circ \quad N = 4 \quad k = 1485,9 \quad \alpha = 2$$

La valeur relative à C 22 a été exclue du calcul de la moyenne.

Site N° 9 P.K. 7,5 : MANAKARA-VOHIPENO

1. Lieu de prélèvement : carrière sur la route de Manakara-Vohipeno

$$X = 436,1 \quad Y = 558,1 \quad Z = 20 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 7

3. Nature des échantillons : dolérite

Lames minces C 40, C 42, C 45 : dolérites

structure doléritique ophitique
composition : labrador + augite
oxydes de Fe-Ti
pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0	
C 39	1	30°	-77°	0,9	instable
C 40	1	350°	-73°	1,1	"
C 41	1	253°	-75°	0,8	"
C 42	1	74°	-68°	0,5	"
C 43	1	198°	-81°	1,2	"
C 44	1	335°	-65°	1,1	"
C 45	3	13°	-73°	1,0	"

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Toutes les aimantations naturelles se sont montrées instables tout au long de la désaimantation, de sorte qu'il n'a pas été possible de définir la direction d'aimantation caractéristique du site.

Site N° 10 P.K. 24 : MANAKARA-VOHIPENO

1. Lieu de prélèvement : carrière sur la route de Manakara - Vohipeno

X = 429,2 Y = 548,9 Z = 15 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 12

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces C 33, C 35, C 37, C 38 : basaltes

structure microcristalline

composition : labrador, agrégats de pyroxènes et d'oxydes

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle			H	Aimantation stable	
		D	I	σ_0		D	I
C 27	2	16°	-60°	3,7	70	13°	-57°

Ech.	n	D	I	σ_0	H	D	I
C 28	2	24°	-54°	4,3		24°	-54°
C 29	1	16°	-50°	1,9		16°	-50°
C 30	1	23°	-57°	5,1		23°	-57°
C 31	2	17°	-48°	4,7		17°	-48°
C 32	1	32°	-54°	3,6		32°	-54°
C 33	1	19°	-50°	3,4		19°	-50°
C 34							plâtre détérioré
C 35	1	15°	-52°	1,3		15°	-52°
C 36	1	27°	-57°	1,1		27°	-57°
C 37	3	48°	-60°	4,3		48°	-60°
C 38	2	16°	-60°	4,3	100	13°	-58°

Toutes les aimantations naturelles, sauf celles correspondant à C 27 et C 38, se sont montrées stables tout au long de la désaimantation.

Pour C 27 et C 38, les aimantations stables sont apparues après application d'un champ alternatif de 70 et de 100 Oe.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 22^\circ \quad I_m = -55^\circ \quad N = 11 \quad k = 135,64 \quad \alpha = 4^\circ$$

Site N° 11 : VOHIPENO

1. Lieu de prélèvement : carrière près de Vohipeno

$$X = 419,0 \quad Y = 545,4 \quad Z = 30 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces C 141, C 143, C 144 : basaltes

structure microlitique

composition : microlites de labrador -

granules d'augite - grains de magnétite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle				Aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
C 140	2	2°	-66°	2,4		2°	-66°
C 141	1	351°	-71°	0,9	100	11°	-74°
C 142	2	36°	-42°	0,6	75	25°	-65°
C 143	1	14°	17°	7,5			aimantation instable
C 144	4	9°	-56°	1,2	50	13°	-69°

L'aimantation naturelle relative à C 140 s'est révélée entièrement stable pendant la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 13^\circ \quad I_m = -69^\circ \quad N = 4 \quad k = 217,89 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 12 P.K. 19 : VOHIPENO-FARAFANGANA

1. Lieu de prélèvement : carrière sur la route de Vohipeno - Farafangana

$$X = 381,5 \quad Y = 540,6 \quad Z = 45 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : dacite

Lames minces C 145, C 147 : dacites

structure microlitique porphyrique

phénocristaux d'andésine

phénocristaux de pyroxène

biotite

nombreux grains d'épidote

granules de magnétite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
C 145	1	12°	-53°	1,2	50	15°	-52°
C 146	1	8°	-56°	1,0	25	10°	-55°
C 147	1	25°	-54°	1,0	50	13°	-55°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 13^\circ \quad I_m = -54^\circ \quad N = 3 \quad k = 1318,96 \quad \alpha = 3^\circ$$

Site N° 13 : FARAFANGANA

1. Lieu de prélèvement : carrière près de Farafangana

$$X = 371,4 \quad Y = 538,7 \quad Z = 30 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 38

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces C 61, C 65, C 70, C 75, C 95 : basaltes

structure microlitique interstale ou à
tendance fluidalecomposition : microlites de plagioclase
granules de pyroxène

oxydes de Fe-Ti

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	Aimantation naturelle			H	Aimantation stable	
		D	I	σ_0		D	I
C 61	2	8°	-60°	1,3		8°	-60°
C 62	2	359°	-64°	1,2		359°	-64°
C 63	3	270°	-65°	1,0	70	346°	-67°
C 64	5	5°	-62°	2,4		5°	-62°
C 65	3	348°	-54°	1,1		348°	-54°
C 66	2	19°	-52°	1,2		19°	-52°
C 67	1	11°	-72°	0,7	55	19°	-69°
C 68	2	348°	-65°	1,5		348°	-65°
C 69	2	344°	-67°	1,9	105	350°	-63°
C 70	1	351°	-71°	2,0		351°	-71°
C 71	3	3°	-64°	2,2		3°	-64°
C 72	2	352°	-57°	2,5		352°	-57°
C 73	2	59°	-66°	2,0			aimantation instable
C 74	3	337°	-65°	1,7	55	354°	-64°

Ech.	n	D	I	σ_0	H	D	I
C 75	1	160°	-66°	1,5	70	179°	-65°
C 76	2	182°	-65°	2,0	55	185°	-64°
C 77	2	358°	-67°	2,0		358°	-67°
C 78	1	1°	-63°	4,5		1°	-63°
C 79	1	33°	-23°	1,0			aimantation instable
C 80	1	357°	-64°	1,8		357°	-64°
C 81	3	5°	-64°	2,5		5°	-64°
C 82	1	344°	-66°	1,4	55	343°	-66°
C 83	3	43°	-66°	3,2	105	11°	-59°
C 84	1	25°	-70°	1,7		25°	-70°
C 85	2	160°	-57°	7,8			aimantation instable
C 86	2	359°	-63°	4,5		359°	-63°
C 87	1	321°	-72°	3,5	55	322°	-69°
C 88	2	2°	-57°	4,2		2°	-57°
C 89	1	350°	-54°	1,1	55	360°	-56°
C 90	3	346°	-59°	1,2		346°	-59°
C 91	1	165°	-75°	0,7	70	334°	-68°
C 92	2	52°	-72°	0,7			aimantation instable
C 93							{ plâtre détérioré (non étudié)
C 94	1	336°	-55°	1,5		336°	-55°
C 95	3	10°	-58°	1,0		10°	-58°
C 96	1	326°	-62°	1,0			aimantation instable
C 97	1	348°	-59°	2,0	20	349°	-58°
C 98	2	340°	-41°	0,9	55	337°	-47°

Plusieurs aimantations naturelles se sont montrées stables au cours des phases successives de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 356^\circ \quad I_m = -62^\circ \quad N = 30 \quad k = 86,91 \quad \alpha = 3^\circ$$

Les valeurs relatives à C 75 et C 76 ont été exclues du calcul de la moyenne.

Site N° 14 : LOHANGISA

1. Lieu de prélèvement : paroi de route, au Nord de Lohangisa

$$X = 332,2 \quad Y = 530,2 \quad Z = 50 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons

Lame mince C 60 : basalte

structure microlitique

microlites de plagioclase

phénocristaux de pyroxène

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation		
		D	I	σ_0		D	I	
C 58	2	13°	-61°	1,8	55	340°	-67°	
C 59	1	29°	-59°	1,3				aimantation instable
C 60	1	316°	-64°	1,8	55	351°	-65°	

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 346^\circ \quad I_m = -66^\circ \quad N = 2 \quad k = 562,84 \quad \alpha = 10^\circ$$

Site N° 15 P.K. 44 : FARAFANGANA-VANGAINDRANO

1. Lieu de prélèvement : paroi de route, au point

$$X = 329,9 \quad Y = 529,7 \quad Z = 25 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 8

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces C 50, C 53, C 57 : basaltes

structure microlitique

composition : plagioclase dominant

augite et oxydes de Fe-Ti

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0	
C 50	1	220°	8°	25,9	aimantation instable
C 51	1	327°	-36°	1,2	" "
C 52	1	83°	-25°	1,9	" "
C 53	1	177°	-5°	6,7	" "
C 54	1	300°	-7°	30,3	" "
C 55	2	89°	-19°	4,0	" "
C 56	2	194°	-69°	3,8	" "
C 57	1	354°	-12°	14,2	" "

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Toutes les aimantations ayant été instables, il n'a pas été possible de définir la direction d'aimantation caractéristique du site.

Site N° 16 : LOPARY

1. Lieu de prélèvement : ancienne carrière, au Nord de Lopary

$$X = 324,4 \quad Y = 526,9 \quad Z = 10 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : dolérite

Lames minces C 46, C 49 : dolérites

structure doléritique

composition : augite, petits prismes de labrador

oxydes abondants

olivine transformée

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
C 46	3	323°	-46°	1,2	55	348°	-62°
C 47	2	185°	-13°	4,1			aimantation instable
C 48	1	2°	-33°	1,2	55	356°	-56°
C 49	4	358°	-48°	1,1	55	354°	-62°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 353^\circ \quad I_m = -60^\circ \quad N = 3 \quad k = 381,44 \quad \alpha = 6^\circ$$

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DE L'ANDROY

Nombre de sites de prélèvement : 8

Site N° 1 : TSILANJA

1. Lieu de prélèvement : roche mise à nu au Nord de la localité de
Tsilanja X = 229,1 Y = 368,8

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons :

Lame mince E 1 : labradorite
structure microlitique
composition : de gros bâtonnets de plagioclases
rars cristaux d'augite

Lame mince E 3 : basalte labradoritique
structure microlitique très fine
composition : microlites de plagioclases
rars cristaux de pyroxène

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I	
E 1	3	222°	-36°	1,6	400	299°	-66°	
E 2	2	54°	-75°	3,0	200	55°	-75°	
E 3	2	92°	7°	5,0			Aimantation instable	
E 4	2	287°	31°	4,2	400	275°	70°	
E 5	3	313°	-45°	3,5	100	320°	-45°	

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les valeurs obtenues sont dispersées et non significatives.

Site N° 2 : AMPIHA

1. Lieu de prélèvement : rivière Ranomainty, près du village d'Ampiha
X = 227,7 Y = 360,3

2. Nombre d'échantillons prélevés : 10
3. Nature des échantillons : basalte labradoritique
Lames minces E 9, E 11, E 12, E 14, E 15 : basaltes labradoritiques
structure microlitique
labrador - augite
minerai abondant
4. Caractéristiques des échantillons :

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation			
		D	I	σ_0	H	D	I	
E 6	2	228°	7°	9,7				aimantation instable
E 7	2	274°	-45°	4,7	400	286°	-66°	
E 8	2	80°	-51°	0,5	400	19°	-85°	
E 9	3	335°	-74°	1,9	200	329°	-78°	
E 10	1	337°	13°	1,9	200	335°	-4°	
E 11	3	323°	-61°	2,1	400	326°	-71°	
E 12	2	327°	-60°	31,1	300	325°	-74°	
E 13	3	106°	-83°	3,7	200	37°	-83°	
E 14	3	333°	-68°	0,3	300	316°	-68°	
E 15	2	293	-6°	12,3				aimantation instable

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 321^\circ \quad I_m = -77^\circ \quad N = 7 \quad k = 60,19 \quad \alpha = 8^\circ$$

La valeur relative à E 10 a été exclue du calcul de la moyenne.

Site N° 3 : ANDRANTINA a

1. Lieu de prélèvement : rive gauche de la rivière Andrantina, à l'Ouest du village d'Antsarika
X = 214,6 Y = 353,1
2. Nombre d'échantillons prélevés : 5
3. Nature des échantillons : basalte
Lame mince E 16 : basalte à structure microlitique
riche en oxydes - phénocristaux d'augite
pas d'olivine

Lame mince E 20 : basalte ou roche plus acide (?)
 structure fine : plagioclase, pyroxène,
 oxydes de fer
 néoformation de calcite et de calcédoine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_o	H	D	I
E 16	3	355°	-64°	1,1	75	347°	-68°
E 17	3	355°	-69°	1,4	200	350°	-70°
E 18	1	334°	-68°	1,1	200	324°	-69°
E 19	2	13°	-43°	2,8	100	14°	-43°
E 20	2	354°	-56°	1,0	100	354°	-58°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 345^\circ \quad I_m = -67^\circ \quad N = 4 \quad k = 108,36 \quad \alpha = 9^\circ$$

La valeur relative à E 19 a été exclue du calcul de la moyenne.

Site N° 4 : ANDRANTINA b

- Lieu de prélèvement : rive gauche de la rivière Andrantina
 $X = 213,9 \quad Y = 353,2$
- Nombre d'échantillons prélevés : 5, mais deux seulement ont pu être étudiés, les autres ayant perdu leur "chapeau de plâtre" pendant le transport.
- Nature des échantillons :

Lame mince E 22 : roche assez basique, vraisemblablement du basalte
 fond de dévitrification très hétérogène sans minéraux francs
 zones riches en oxydes et ophérolites de calcite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
E 22	2	360°	-59°	0,2	400	2°	-65°
E 25	3	41°	-45°	0,1	400	46°	-50°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Les valeurs obtenues sont dispersées et non significatives.

Site N° 5 : ANDRANTINA c

1. Lieu de prélèvement : rive droite de la rivière Andrantina

$$X = 214,6 \quad Y = 352,9$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte - labradorite

Lames minces E 28, E 29 : labradorite et basalte

structure microlitique porphyroïde

fond riche en oxydes

agrégats de chlorite et de calcite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
E 26	1	21°	-54°	1,8	100	20°	-55°
E 27	1	360°	-61°	9,0	300	3°	-62°
E 28	3	301°	-60°	0,6	200	322°	-61°
E 29	1	352°	-71°	12,5	300	351°	-72°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 356^\circ \quad I_m = -64^\circ \quad N = 4 \quad k = 35,38 \quad \alpha = 16^\circ$$

Site N° 6 : ANDRANTINA d

1. Lieu de prélèvement : rive droite de la rivière Andrantina

$$X = 213,8 \quad Y = 353,1$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces E 34, E 35, E 38, E 39 : basaltes

structure microlitique porphyroïde

phénocristaux d'augite

oxydes de fer abondants

olivine transformée

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation			
		D	I	σ_0	H	D	I	
E 34	1	187°	37°	3,3				aimantation instable
E 35	1	57°	-39°	1,4	200	23°	-65°	
E 36	3	17°	-33°	1,9	300	11°	-61°	
E 37	2	331°	-61°	0,6	300	337°	-68°	
E 38	1	249°	-76°	0,7	200	274°	-79°	
E 39	1	355°	-68°	1,0	100	353°	-72°	

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 355^\circ \quad I_m = -72^\circ \quad N = 5 \quad k = 35,97 \quad \alpha = 13^\circ$$

Site N° 7 : ANDRANTINA e

1. Lieu de prélèvement : rive gauche de la rivière Andrantina

$$X = 213,1 \quad Y = 353,9$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : vraisemblablement basalte labradoritique,
une analyse chimique serait nécessaire
pour déterminer la nature exacte

Lames minces E 41, E 42 : structure vitreuse

phénocristaux de plagioclase (labrador) et
de pyroxène (augite)

olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
E 40	1	332°	-51°	5,6	300	335°	-51°
E 41	2	8°	-57°	4,9	200	3°	-61°
E 42	3	320°	-33°	1,3	300	335°	-61°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 343^\circ \quad I_m = 458^\circ \quad N = 3 \quad k = 65,52 \quad \alpha = 15^\circ$$

Site N° 8 : ANARAMALINIKA

1. Lieu de prélèvement : ruisseau Anaramalinika, au Nord du village d'Ebelo X = 186,6 Y = 359,2

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces E 43, E 44, E 45, E 46 : basaltes vacuolaire à grain fin - structure microlitique fine
composition : labrador dominant, granules de pyroxène, nombreux grains de magnétite nombreuses vacuoles avec sphérolites de calcédoine
présence de calcite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
E 43	3	347°	-59°	0,9	300	355°	-64°
E 44	2	2°	-51°	0,6	75	2°	-54°
E 45	1	1°	-49°	1,0	300	354°	-51°
E 46	1	5°	-57°	1,3	200	4°	-59°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 359^\circ \quad I_m = -57^\circ \quad N = 4 \quad k = 160,39 \quad \alpha = 7^\circ$$

**LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DE LA
REGION DU MANGOKY-ONILAHY**

Nombre de site étudiés : 12

Site N° 1 : TSIARIMPIOKY

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Mangerimbomino au Sud
de Tsiarimpioky X = 459,7 Y = 151,6

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 296 - D 297 - D 299 : basaltes

structure microlitique

composition : microlites de
plagioclase, pyroxène,
oxydes, pas d'olivine.

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	D	I	σ .
D 295	3	340°	-60°	3,8
D 296	1	337°	-57°	5,4
D 297	2	339°	-62°	1,0
D 298	1	339°	-59°	0,7
D 299	1	344°	-62°	0,8

La désaimantation n'ayant montré aucun changement significatif des directions, les aimantations naturelles ont été considérées comme étant stables.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 340^\circ \quad I_m = 61^\circ \quad N = 5 \quad k = 1500 \quad \alpha = 2^\circ$$

Site N° 2 : MANAMANA

1. Lieu de prélèvement : Crête de Manamana à la source
d'Antsavoabe X = 406,1 Y = 203,0

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 45 - D 47 - D 48 : basaltes à structure microlitique
 composition : plagioclase basique - pyroxène
 oxydes de Fe-Ti
 présence d'olivine probable

4. Caractéristiques des aimantations après la désaimantation dans un champ de 400 Oe

Ech.	n	D	I
D 45	2	348°	-22°
D 46	1	349°	-27°
D 47	5	347°	-28°
D 48	6	2°	-31°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 351^\circ \quad I_m = -27^\circ \quad N = 4 \quad k = 122,77 \quad \alpha = 8^\circ$$

Site N° 3 : MIARY-SUD

1. Lieu de prélèvement : parcelle de roche dite Andasy près de Miary-Sud X = 405,3 Y = 194,8

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 351 - D 353 : basaltes à labrador, augite et olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			aimantation stable		
		D	I	σ_0	H	D	I
D 350	2	335°	-54°	7,4	100	337°	-60°
D 351	2	317°	-53°	9,6		317°	-53°
D 352	2	330°	-52°	9,3	75	328°	-54°
D 353	2	336°	-53°	7,2	100	335°	-58°
D 354	1	330°	-47°	9,2	100	335°	-53°

L'aimantation naturelle relative à D 351 s'est montrée stable d'un bout à l'autre de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 350^\circ \quad I_m = -56^\circ \quad N = 5 \quad k = 181,07 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 4 : MAMAHAPAHA

1. Lieu de prélèvement : paroi de roche sur le flanc Est de Mamahapaha à l'Ouest du village d'Antabika $X = 400,6$ $Y = 202,7$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 345 - D 348 : basaltes à labrador, augite et olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			H	aimantation stable	
		D	I	σ_0		D	I
D 345	1	317°	-69°	4,8	25	317°	-70°
D 346	2	291°	-79°	3,4	50	305°	-82°
D 347	1	299°	-74°	2,3	100	297°	-76°
D 348	3	301°	-72°	1,7		301°	-72°
D 349	2	303°	-68°	3,5	75	296°	-73°

L'aimantation naturelle correspondant à D 348 s'est révélée stable au cours des phases successives de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 304^\circ \quad I_m = -75^\circ \quad N = 5 \quad k = 216,29 \quad \alpha = 5^\circ$$

Site N° 5 : AMBINDA

1. Lieu de prélèvement : paroi de roche près du point géodésique d'Ambinda $X = 395,0$ $Y = 195,3$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons

Lame mince D 340 : Sakalavite à labrador, augite et olivine avec loupes de quartz

Lame mince D 344 : basalte à labrador, augite et olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
D 340	1	115°	-28°	2,0	aimantation instable		
D 341	1	111°	-27°	1,9	"	"	"
D 342	1	119°	-24°	2,2	"	"	"
D 343	1	114°	-18°	2,0	100	359°	-62°
D 344	1	93°	-37°	2,1	aimantation instable		

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Un seul échantillon est porteur d'aimantation stable.
La valeur trouvée n'est pas représentative.

Site N° 6 : ANDOLOFOTSY

1. Lieu de prélèvement : flanc Ouest de l'Andolofotsy, branche la plus orientale de l'Analavelona
X = 370,8 Y = 182,2

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 253 - D 255 - D 257 : basaltes à structure microlitique
composition : microlites de labrador, prismes d'augite, oxydes de Fe-Ti. Pas d'olivine.

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
D 252	2	216°	-71°	3,7	125	330°	-58°
D 253	1	220°	-22°	10,5	aimantation instable		
D 254	4	343°	-29°	10,6	150	332°	-55°
D 255	3	50°	-43°	4,5	150	326°	-63°
D 256	3	131°	-80°	3,1	150	306°	-60°
D 257	3	275°	-71°	1,9	125	309°	-59°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 321^\circ \quad I_m = -59^\circ \quad N = 5 \quad k = 138,11 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 7 : ANAPALY

1. Lieu de prélèvement : lit de la rivière Ankopy au Nord-Ouest d'Anapaly X = 358,9 Y = 169,9

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 256 - D 260 - D 262 - D 263 : basaltes à structure microlitique phénocristaux de plagioclase - pyroxène - oxydes. Pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			H	aimantation stable	
		D	I	σ_0		D	I
D 258	3	358°	-49°	3,9		358°	-49°
D 259	2	360°	-49°	3,4	25	3°	-49°
D 260	3	5°	-50°	4,4		5°	-50°
D 261	2	3°	-52°	4,8		3°	-52°
D 262	3	6°	-53°	4,7	25	2°	-53°
D 263	3	6°	-47°	3,6	125	5°	-48°

Les aimantations naturelles relatives à D 258 - D 260 et D 261 se sont montrées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 2^\circ \quad I_m = -50^\circ \quad N = 6 \quad k = 937,40 \quad \alpha = 2^\circ$$

Site N° 8 : MANETY

1. Lieu de prélèvement : rivière Manety au Nord du Fiherenana

$$X = 346,1 \quad Y = 166,7$$

2. Nombre d'échantillons : 6

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 264 - D 265 - D 266 - D 268 - D 269 :

basaltes à structure micro-
litique. plagioclase -
pyroxène et oxydes pas
d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle				aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
D 264	2	356°	-52°	5,3	50	358°	-52°
D 265	3	6°	-51°	2,9	75	6°	-53°
D 266	3	7°	-48°	3,9		7°	-48°
D 267	3	5°	-52°	4,9		5°	-52°
D 268	3	11°	-50°	5,7	125	8°	-50°
D 269	3	7°	-54°	6,6	125	7°	-50°

Les aimantations naturelles relatives à D 266 et D 267 se sont révélées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 7^\circ \quad I_m = 51^\circ \quad N = 5 \quad k = 1333,33 \quad \alpha = 2^\circ$$

La valeur relative D 264 a été exclue.

Site N° 9 : VINETA

1. Lieu de prélèvement : rivière Vineta et petite carrière au
Sud du pont de Vineta X = 338,7
Y = 177,3

2. Nombre d'échantillons prélevés : 12

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 110 - D 112 - D 114 : basaltes

structure microlitique

Composition : labrador-

augite-oxydes de Fe-Ti

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_c	H	D	I
D 110	8				280	349°	19°
D 111	1	341°	-35°	2,8	280	5°	-58°
D 112	3				280	7°	-62°
D 113	1				280	20°	-69°
D 114	4				280	23°	-54°
D 365	1	4°	-56°	2,7	75	4°	-62°
D 366	1	355°	-47°	2,0	50	356°	-50°
D 367	3	77°	-21°	7,1	125	23°	-58°
D 368	2	16°	-56°	2,9	75	20°	-65°
D 369	2	9°	-49°	2,4	75	10°	-60°
D 370	2	23°	-58°	4,0	75	22°	-60°
D 371	2	2°	-58°	3,2	50	1°	-61°

Les échantillons D 110 - D 112 - D 113 et D 114 ont été soumis directement à l'action d'un champ alternatif de 280 Oe de sorte que les caractéristiques de leur aimantation naturelle n'ont pas été déterminées.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 11^\circ \quad I_m = -60^\circ \quad N = 11 \quad k = 125,47 \quad \alpha = 4^\circ$$

La valeur relative à D 110 a été exclue.

Site N° 10 : ANKETA

1. Lieu de prélèvement : rivière Anketa

X = 331,2 Y = 178,9

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 271 - D 273 - D 275 : basaltes à
 structure microlitique
 Microlites de plagioclase.
 Grains de pyroxène. Pas
 d'olivine.

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0
D 270	3	353°	-44°	4,4
D 271	3	355°	-49°	4,4
D 272	3	356°	-49°	3,5
D 273	3	356°	-47°	4,1
D 274	3	353°	-53°	4,4
D 275	3	355°	-47°	3,6

La désaimantation de tous les échantillons n'ayant montré aucun changement significatif des directions, les aimantations naturelles ont été considérées comme stables.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 355^\circ \quad I_m = 48^\circ \quad N = 6 \quad k = 1000 \quad \alpha = 2^\circ$$

Site N° 11 : VATOLATSAKA

1. Lieu de prélèvement : paroi de route près du village de
 Vatolatsaka, sur la route d'Andranovory-
 Tongobory X = 310,5 Y = 179,2

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 135 - D 136 - D 137 : basalte à structure microlitique plagioclase - pyroxène, oxydes de Fe-Ti

4. Caractéristiques des aimantations après désaimantation dans un champ alternatif de 300 Oe.

Ech.	n	D	I
D 135	2	350°	-60°
D 136	2	351°	-56°
D 137	3	353°	-58°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 351^\circ \quad I_m = -58^\circ \quad N = 3 \quad k = 1000 \quad \alpha = 4^\circ$$

Site N° 12 : ANARALAVA

1. Lieu de prélèvement : sur la rive Nord de l'Onilahy, à l'Ouest du village d'Anaralava
X = 282,0 Y = 175,4

2. Nombre d'échantillons : 10

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 276 - D 279 - D 281 : basaltes structure microlitique microlites de plagioclase - pyroxène. Oxydes. Pas d'olivine.

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
D 276	2	356°	-55°	6,1	50	355°	-54°
D 277	2	360°	-54°	8,1	50	357°	-55°
D 278	2	357°	-55°	6,8	100	1°	-57°
D 279	3	1°	-56°	7,5	125	357°	-55°

Ech.	n	D	I	σ_0	H	D	I
D 280	3	2°	-54°	7,3	125	357°	-55°
D 281	2	4°	-57°	9,1	250	355°	-56°
D 361	2	12°	-53°	3,2	75	15°	-61°
D 362	2	14°	-56°	2,3	75	17°	-64°
D 363	1	13°	-55°	5,3	75	18°	-62°
D 364	1	44°	-49°	3,7	50	50°	-51°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 8^\circ \quad I_m = -58^\circ \quad N = 10 \quad k = 59,73 \quad \alpha = 6^\circ$$

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE DU MAILAKA

Nombre de sites étudiés : 12

Site N° 1 : AMPANANGANA

1. Lieu de prélèvement : rivière Ranobe au Sud d'Ampanangana

X = 986,2 Y = 175,1 Z = 15 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : labradorite

Lames minces D 247 - D 251 : labradorites

structure microlitique

fluidale

composition : microlites de

plagioclase et d'augite

quelques oxydes

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle				aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
D 247	2	21°	-54°	0,4	50	6°	-47°
D 248	1	16°	-52°	1,6		16°	-52°
D 249	1	355°	-50°	0,6		355°	-50°
D 250	3	180°	-57°	0,6			aucune fraction stable
D 251	2	3°	-62°	0,7	100	359°	-61°

Les aimantations naturelles relatives aux échantillons D 248 et D 249 se sont révélées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$D_m = 4^\circ$ $I_m = -53^\circ$ $N = 4$ $k = 96,71$ $\alpha = 9^\circ$

Site N° 2 : TSILOMANO

1. Lieu de prélèvement : rivière Tsilomano X = 946,5

Y = 175,7 Z = 50 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 242 - D 246 : basaltes

structure microlitique

composition : labrador

dominant - augite

quelques oxydes

la lame D 242 présente en

outre de l'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
D 242	5	360°	-45°	1,4	150	20°	-50°
D 243	1	45°	-41°	1,3	75	28°	-54°
D 244	2	301°	-48°	1,3		aimantation instable	
D 245	1	281°	-41°	3,6		"	"
D 246	2	294°	-41°	1,2		"	"

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 24^\circ \quad I_m = -52^\circ \quad N = 2 \quad k = 266,41 \quad \alpha = 15^\circ$$

Site N° 3 : MARIFILALY

1. Lieu de prélèvement : rivière Marifilaly au Sud-Est de la

piste Beteno-Morahazo $X = 927,6$

$Y = 176,9$ $Z = 50$ m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 237 - D 241 : basaltes

composition : agrégats de

plagioclase et de pyroxène

oxydes

pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			H	aimantation stable		aimantation instable
		D	I	σ_0		D	I	
D 237	2	321°	-48°	1,1				
D 238	3	349°	-57°	3,6	100	351°	-57°	
D 239	2	359°	-55°	3,7		359°	-55°	
D 240	3	347°	-63°	6,2		347°	-63°	
D 241	2	1°	-56°	5,5		1°	-56°	

Les aimantations naturelles relatives à D 239 - D 240 et D 241 se sont montrées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 355^\circ \quad I_m = -58^\circ \quad N = 4 \quad k = 235,49 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 4 : MANGILY

1. Lieu de prélèvement : confluent du Mangily et Tsiandrorana

$$X = 904,6 \quad Y = 186,7 \quad Z = 130 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 288 - D 231 : basaltes

structure microlitique

Composition : microlite plagioclasiqne dans agrégats de pyroxènes et d'oxydes

olivine transformée en iddingsite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
D 228	1	4°	-35°	1,4	25	2°	-34°
D 229	1	347°	-48°	1,5	200	356°	-45°
D 230	3	360°	-55°	2,3	25	3°	-54°
D 231	2	360°	-57°	2,7	150	2°	-51°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 1^\circ \quad I_m = -46^\circ \quad N = 4 \quad k = 79,19 \quad \alpha = 10^\circ$$

Site N° 5 : BELITSAKA

1. Lieu de prélèvement : paroi de la route Belitsaka-Maintirano

$$X = 901,1 \quad Y = 186,4 \quad Z = 200 \text{ m}$$

2. Nombre de blocs prélevés : 3

3. Nature des échantillons

Lame mince D 227 : basalte

structure microlitique

Composition : plagioclase-pyroxène-oxydes. Pas d'olivine.

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation			
		D	I	σ_0	H	D	I	
D 225	2	309°	-51°	1,7	200	322°	-56°	
D 226	1	313°	-55°	1,6	200	326°	-62°	
D 227	3	292°	-24°	5,5				aimantation instable

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 324^\circ \quad I_m = -59^\circ \quad N = 2 \quad k = 288,23 \quad \alpha = 15^\circ$$

Site N° 6 : AMBIZY

1. Lieu de prélèvement : Ouest du village d'Ambizy sur la route

de Morafenobe-Maintirano X = 899,5

$$Y = 161,6 \quad Z = 50 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 232 - D 236 : basaltes frais

structure microgrenne à

tendance microlitique

Composition : pyroxène-oxydes-plagioclase. Pas d'olivine.

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ_0	
D 232	1	275°	-31°	5,1	instable
D 233	2	271°	-15°	0,6	"
D 234	1	232°	-59°	0,4	"
D 235	3	303°	-19°	1,2	"
D 236	1	317°	-14°	1,0	"

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Toutes les aimantations naturelles se sont montrées instables au cours des phases successives de la désaimantation, aucune aimantation caractéristique n'a pu être définie.

Site N° 7 : VOHIDROA

1. Lieu de prélèvement : rivière Namela sur la piste de Belitsaka-Belita X = 891,8
Y = 190,5 Z = 150 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons

Lame mince D 221 : basalte
structure microlitique
composition : labrador-augite-olivine
oxydes de Fe-Ti

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			H	aimantation stable	
		D	I	σ_0		D	I
D 221	3	333°	-66°	0,6		333°	-66°
D 222	1	328°	-64°	0,9		328°	-64°
D 223	1	333°	-65°	7,6	50	337°	-66°
D 224	1	316°	-67°	4,3	25	320°	-67°

Les aimantations naturelles relatives à D 221 et D 222 se sont montrées stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 330^\circ \quad I_m = -66^\circ \quad N = 4 \quad k = 667,88 \quad \alpha = 3^\circ$$

Site N° 8 : ANDRIAMBATO

1. Lieu de prélèvement : rivière Ampopo près d'Andriambato

$$X = 833,8 \quad Y = 162,5 \quad Z = 25 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons

Lame mince D 219 : basalte

structure microlitique

présence d'abondants oxydes de Fe-Ti

Olivine transformée en partie en iddingsite

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
D 218	2	335°	-29°	2,2	75	330°	-47°
D 219	1	358°	-16°	2,8	aimantation instable		
D 220	3	11°	-28°	2,3	"	"	"

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Un seul des trois échantillons prélevés est porteur d'aimantation stable de sorte que la valeur trouvée n'est pas représentative du site.

Site N° 9 : TSARATSIMENA

1. Lieu de prélèvement : lit d'un ruisseau au Sud-Ouest de

$$\text{Tsaratsimena} \quad X = 881,7 \quad Y = 160,8$$

$$Z = 25 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons

Lames minces D 214 - D 216 : labradorite

structure microlitique à
tendance doléritique
composition : labrador do-
minant
augite et oxydes de Fe-Ti
olivine abondante

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			H	aimantation stable		I
		D	I	σ_0		D	I	
D 213	1	78°	-50°	1,6				aucune fraction stable
D 214	1	24°	-44°	1,5	150	3°	-60°	
D 215	1	17°	-50°	1,3	50	5°	-53°	
D 216	2	343°	-61°	2,9		343°	-61°	
D 217	3	18°	-44°	1,5				aucune fraction stable

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 358^\circ \quad I_m = -58^\circ \quad N = 3 \quad k = 119,63 \quad \alpha = 11^\circ$$

Site N° 10 : ANKABOKA

1. Lieu de prélèvement : rivière Ankaboka sur la piste

Belengo-Berenty X = 844,1

Y = 196,3 Z = 160 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 208 - D 212 : basaltes

structure microlitique
composition : microlites
de plagioclase et granules
de pyroxène
oxydes de Fe-Ti
olivine probable

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
D 208	4	341°	-29°	9,7	100	351°	-31°
D 209	3	328°	-51°	3,8	100	354°	-49°
D 210	2	42°	-31°	15,7	aimantation instable		
D 211	3	333°	-24°	8,0	75	340°	-46°
D 212	3	336°	-43°	5,9	75	342°	-58°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 347^\circ \quad I_m = -46^\circ \quad N = 4 \quad k = 44,64 \quad \alpha = 14^\circ$$

Site N° 11 : BEREVO

1. Lieu de prélèvement : Rivière Berenty au Sud de Berevo

$$X = 830,6 \quad Y = 193,1 \quad Z = 50 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces D 204 - D 207 : basaltes

structure microlitique
composition : microlites
de plagioclase et augite,
oxydes de Fe-Ti
pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
D 203	3	364°	-29°	2,0	aimantation instable		
D 204	4	141°	-76°	0,7	50	349°	-66°
D 205	2	331°	-32°	1,2	75	334°	-52°
D 206	2	57°	-26°	1,0	aimantation instable		
D 207	3	87°	-21°	1,5	" "		

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 340^\circ \quad I_m = -59^\circ \quad N = 2 \quad k = 51,99 \quad \alpha = 35^\circ$$

Site N° 12 : MAHITIAMBOAY

1. Lieu de prélèvement : radier Antsahihy-Mahitiamboay
X = 816,3 Y = 201,9 Z = 70 m
2. Nombre d'échantillons prélevés : 4
3. Nature des échantillons : basalte
Lames minces D 200 - D 202 : basaltes
structure microlitique
composition : microlites
plagioclasiques, oxydes
abondants
pas d'olivine
4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
D 199	2	354°	-43°	0,9	75	353°	-53°
D 200	2	335°	-42°	0,8	75	349°	-45°
D 201	2	256°	-50°	0,4	100	339°	-56°
D 202	2	296°	-57°	1,2		aimantation instable	

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 347^\circ \quad I_m = -51^\circ \quad N = 3 \quad k = 124,66 \quad \alpha = 11^\circ$$

LES ECHANTILLONS EN PROVENANCE D'ANTANIMENA

Nombre de sites étudiés : 13

Site N° 1 : AMBATONAINTY

1. Lieu de prélèvement : rivière Ambatomainty sur la piste de
Maroala-Marovoay X = 1096,9
Y = 420,0 Z = 25 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 6

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 187 - 189 - 191 : basaltes à grain fin avec
minerai et pyroxène

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
187	2	8°	-31°	11,1	75	5°	-43°
188	1	9°	-50°	3,2	50	10°	-53°
189	2	8°	-44°	7,0	125	12°	-54°
190	1	3°	-48°	4,2	100	5°	-59°
191	3	24°	-58°	6,0	75	5°	-56°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 8^\circ \quad I_m = -53^\circ \quad N = 5 \quad k = 167,12 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 2 : AMPIJOROA

1. Lieu de prélèvement : radier au Sud-Est d'Ampijoroa sur la
piste de Maroala-Bekipay
X = 1094,8 Y = 405,8 Z = 5m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 182 - 184 - 185 : basaltes à grain fin
plages de dévitrification
pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
182	2	56°	-53°	2,1	50	7°	-53°
183	2	70°	-32°	5,2	125	7°	-54°
184	3	80°	-73°	1,9	50	9°	-54°
185	1	82°	-66°	13,4	aimantation instable		
186	3	319°	-27°	2,1	100	1°	-54°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 6^\circ \quad I_m = -54^\circ \quad N = 4 \quad k = 1435,75 \quad \alpha = 2^\circ$$

Site N° 3 : AMPONDRABE

1. Lieu de prélèvement : rivière Ampondrabe

$$X = 1090,7 \quad Y = 376,1 \quad Z = 45 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 178 - 180 - 181 : basaltes à structure fluidale et à grain fin pas d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
178	1	354°	-47°	0,7	aimantation instable		
179	3	3°	-49°	0,8	50	360°	-54°
180	1	1°	-54°	0,6	aimantation instable		
181	2	328°	-54°	0,6	75	356°	-54°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 358^\circ \quad I_m = -54^\circ \quad N = 2 \quad k = 1916,96 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 4 : ANTANIMAVO

1. Lieu de prélèvement : rivière Marokotso au Nord-Ouest du village d'Antanimavo

X = 1085,9 Y = 313,2 Z = 100 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 169 - 171 - 173 : basaltes à pyroxène
peu d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations naturelles

Ech.	n	D	I	σ .
169	3	353°	-48°	0,7
170	2	346°	-51°	0,8
171	2	342°	-45°	0,8
172	3	346°	-53°	0,8
173	3	343°	-54°	0,8

La désaimantation de tous les échantillons n'ayant montré aucun changement significatif des directions, toutes les aimantations naturelles ont été considérées comme étant stables.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$D_m = 346^\circ$ $I_m = -50^\circ$ $N = 5$ $k = 334,42$ $\alpha = 4^\circ$

Site N° 5 : ANDRAFINAHOANY

1. Lieu de prélèvement : rivière Andrafinahoany

X = 1084,1 Y = 338,8 Z = 100 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 174 - 176 : basaltes à structure fluidale
et à grain fin

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
174	2	284°	-41°	0,8	100	353°	-62°
175	2	276°	-83°	0,6	aimantation instable		
176	2	81°	-40°	0,9	75	6°	-63°
177	2	6°	-70°	0,7	75	2°	-62°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 360^\circ \quad I_m = -62^\circ \quad N = 3 \quad k = 711,38 \quad \alpha = 5^\circ$$

Site N° 6 : MAROVITSIKA

1. Lieu de prélèvement : rivière Marovitsika à l'Ouest du village de Marorata X = 1081,3 Y = 355,2 Z = 75 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 5

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 192 - 193 - 196 : basaltes à olivine en gros cristaux

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			H	aimantation stable		
		D	I	σ_0		D	I	
192	1	2°	-39°	0,8				aucune fraction stable
193	2	353°	-40°	0,4	75	2°	-57°	
194	1	40°	-41°	0,7				aucune fraction stable
195	2	360°	-53°	1,7		360°	-53°	
196	1	7°	-50°	0,8		7°	-50°	

Les aimantations naturelles relatives aux échantillons 195 et 196 sont stables tout au long de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 3^\circ \quad I_m = -54^\circ \quad N = 3 \quad k = 385,72 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 7 : IHOPY - NORD

1. Lieu de prélèvement : rive droite de la rivière Ihopy X = 1070,5 Y = 335,0 Z = 90 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 158 - 161 : basaltes à Labrador et augite
quelques cristaux d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle				aimantation stable	
		D	I	σ_0	H	D	I
158	1	1°	-67°	0,2	75	354°	-69°
159	1	350°	-63°	0,1			
160	1	359°	-65°	0,4		359°	-65°
161	1	24°	-68°	0,3	75	12°	-69°

L'aimantation naturelle relative à 160 s'est révélée stable au cours des phases successives de la désaimantation.

La désaimantation de 159 a été abandonnée, l'intensité de son aimantation naturelle étant trop faible.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 2^\circ \quad I_m = -68^\circ \quad N = 3 \quad k = 364,91 \quad \alpha = 6^\circ$$

Site N° 8 : MAHAVAVY

1. Lieu de prélèvement : rive droite de la rivière Mahavavy

$$X = 1064,4 \quad Y = 359,9 \quad Z = 70 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 166 - 167 : basaltes à olivine, labrador et augite
olivine et labrador en phénocristaux

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
165	1	2°	-51°	2,8	100	3°	-58°
166	1	7°	-52°	3,7	50	5°	-55°
167	1	360°	-52°	2,9	50	360°	-55°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 3^\circ \quad I_m = -56^\circ \quad N = 3 \quad k = 113,90 \quad \alpha = 4^\circ$$

Site N° 9 : ANDRAFIAMBONY

1. Lieu de prélèvement : sur la piste Befamoty-Soromaray près du village d'Andrafiambony

$$X = 1061,6 \quad Y = 341,0 \quad Z = 165 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 162 - 163 : basaltes à labrador, augite et olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
162	1	9°	-68°	2,2	75	5°	-74°
163	1	5°	-71°	1,9	125	8°	-75°
164	1	357°	-70°	1,8	50	360°	-73°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 4^\circ \quad I_m = -74^\circ \quad N = 3 \quad k = 2385,84 \quad \alpha = 2^\circ$$

Site N° 10 : BEHENA

1. Lieu de prélèvement : sur la piste d'Ambovononby

$$X = 1062,5 \quad Y = 323,4 \quad Z = 170 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 3

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 155 - 157 : basaltes à labrador, augite et olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation				après la désaimantation	
		D	I	σ_0	H	D	I
155	1	189°	-49°	1,7		aimantation instable	
156	1	188°	-44°	0,8		"	"
157	1	335°	-69°	0,8	75	345°	-60°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

Un seul échantillon est porteur d'aimantation stable de sorte que la valeur trouvée n'est pas représentative.

Site N° 11 : BESIEKY

1. Lieu de prélèvement : lit du ruisseau Mariarano

X = 1054,4 Y = 336,0 Z = 180 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 8

3. Nature des échantillons : basalte

Lames minces 140 - 145 - 146 : basaltes à labrador, augite avec des phénocristaux d'olivine

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			H	après la désaimantation	
		D	I	σ_0		D	I
139	1	308°	-66°	0,6	50	315°	-56°
140	1	337°	-74°	0,4	50	336°	-65°
141	1	330°	-73°	0,4	50	353°	-63°
142	1	9°	-36°	0,6		aimantation instable	
143	1	339°	-40°	0,4		"	"
144	1	14°	-75°	2,0	50	333°	-70°
145	1	114°	-79°	1,5	75	321°	-72°
146	1	133°	-88°	1,6	50	315°	-66°

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$D_m = 329^\circ$ $I_m = 66^\circ$ N = 6 k = 90,80 $\alpha = 7^\circ$

Site N° 12 : IHOPY - SUD

1. Lieu de prélèvement : rivière Ihopy près du sentier de

Bealalana-Ankoba X = 1051,0

Y = 326,5 Z = 140 m

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : basalte

Lames 148 - 150 : basaltes à labrador, augite et olivine présence de nombreux minéraux opaques

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	avant la désaimantation			après la désaimantation		
		D	I	σ_0	H	D	I
147	1	12°	-15°	1,0	150	360°	-59°
148	1	360°	-48°	1,8	100	7°	-62°
149	1	321°	-51°	3,2	75	13°	-59°
150	1	283°	-57°	2,8	aimantation instable		

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 7^\circ \quad I_m = -60^\circ \quad N = 3 \quad k = 516,54 \quad \alpha = 5^\circ$$

Site N° 13 : AMBOHITRAMBOALAMBO

1. Lieu de prélèvement : près de la localité d'Ambohitramboalambo

$$X = 1043,6 \quad Y = 337,5 \quad Z = 220 \text{ m}$$

2. Nombre d'échantillons prélevés : 4

3. Nature des échantillons : Sakalavite

Lames minces 152 - 154 : Sakalavites à labrador, augite et olivine avec loupes de quartz

4. Caractéristiques des aimantations

Ech.	n	aimantation naturelle			aimantation stable		
		D	I	σ_0	H	D	I
151	1	352°	-55°	0,4		352°	-55°
152	1	332°	-53°	0,2		aucune fraction stable	
153	1	338°	-59°	0,2	75	344°	-60°
154	1	334°	-60°	0,3	75	344°	-57°

L'aimantation naturelle relative à 151 s'est révélée stable au cours des phases successives de la désaimantation.

5. Direction moyenne d'aimantation du site

$$D_m = 347^\circ \quad I_m = -57^\circ \quad N = 3 \quad k = 597,82 \quad \alpha = 5^\circ$$

Propositions données par la Faculté
ou, éventuellement, seconde Thèse :

Strasbourg, le 15 JUIN 1971

Le Président du Jury,
A. ROCHE

VU et Permis d'imprimer

Strasbourg, le 21 JUIN 1971

LE DOYEN,

G. OURISSON