

Paléomagnétisme en zone d'accrétion : le cas de l'Afar

par PIERRE-YVES GALIBERT *, BERTRAND SICHLER **, BRIGITTE SMITH ***
et NORBERT BONHOMMET *

Mots clés. — Aimantation rémanente visqueuse, Basalte, Rift, Accrétion, Pliocène sup., Quaternaire. Éthiopie, Dépression Afar (Asal).

Résumé. — Une étude paléomagnétique a été entreprise sur le rift d'Asal et la zone extérieure s'étendant jusqu'à Yoboki. Dans les deux cas l'échantillonnage a été effectué en surface et suivant des coupes verticales (parois de failles dans le rift et canyon d'Edayle sur la bordure sud du Ghoubbet).

Les résultats concernant le rift indiquent une polarité normale pour tous les sites étudiés. Par ailleurs des corrections de pendage montrent que les basculements tectoniques visibles dans le « petit rift » semblent antérieurs à la mise en place des coulées.

A l'extérieur du rift 18 coulées à polarité normale et inverse appartenant à la série stratoïde (1-4 Ma) donnent une direction de champ moyen $D = 10^\circ E$, $I = +13^\circ$ qui implique pour cette région et cette période soit un champ magnétique non dipolaire, soit un effet important de la tectonique régionale. Des mesures structurales sont nécessaires pour conclure sur l'origine de cette direction.

Paleomagnetism in an accretion zone : the Afar

Abstract. — A paleomagnetic investigation has been undertaken to study the Asal rift zone and the border zone between Asal and Yoboki. In both zones sampling has been carried out along the vertical surfaces of the sections exposed by the rift faults and the Edayle canyon, on the south side of Ghoubbet. The results of the rift zone indicate a magnetization of normal polarity for all the sites. Moreover, the corrections for the tilt of the strata show that in the « small rift » the observable tectonism is older than the emplacement of the lava flows. Outside the rift, 18 flows with normal and reversed polarity belong to the stratoid series (1-4 m.y.). They yield a mean direction of $D = 10^\circ E$ and $I = +13^\circ$, which can be explained either by a non dipolar or non co-axial geomagnetic field for this interval in the Afar region, or by an important regional tectonic displacement. Structural measurements would be necessary to choose between these alternatives to explain the observed directions.

INTRODUCTION.

L'ouverture de la Mer rouge et du golfe d'Aden par écartement relatif de l'Afrique et de l'Arabie a fourni depuis longtemps matière à spéculation en ce qui concerne la dérive des continents, au moins autant que la séparation de l'Amérique du Sud et de l'Afrique [Wegener, 1929 ; Teilhard de Chardin, 1930]. Dans ce schéma trop simple, le Sud de la Mer rouge représentait une pierre d'achoppement. Très vite la dépression Afar fut comparée à une zone de croûte océanique [Laughton, 1966] séparée de celle de la Mer rouge à l'Est par les « Alpes Danakil ». Paradoxalement parmi les études nombreuses menées dans cette région le paléomagnétisme a été quelque peu délaissé. Si en effet des études paléomagnétiques ont été menées sur les plateaux éthiopiens est et sud [Schult, 1974 ; Megrue *et al.*, 1972 ; Brock *et al.*, 1970], en ce qui concerne le « Bloc Danakil » dont la connaissance du mouvement est capitale pour la compréhension de toute la région, il n'existe en dehors du travail de Schult [Schult, 1974] que les seuls résultats de Burek [Burek, 1970]. Quant à la dépression Afar proprement dite la situation n'est pas meilleure : une étude exploratoire, très extensive concernant l'ensemble de la République de Djibouti [Pouchan et Roche, 1971], et un échantillonnage de surface limité au rift de Ghoubbet-Asal [Harrison *et al.*, 1975], représentent seuls la contribution du paléomagnétisme à la connaissance générale de la région. Dès lors une étude paléomagnétique appro-

fondie s'imposait. Dans le rift d'Asal (fig. 2) nous avons voulu étendre cet échantillonnage par des coupes paléomagnétiques profitant des affleurements de coulées superposées qu'offrent les parois de faille et par des coupes horizontales détaillées en tenant compte des éventuels basculements tectoniques. A l'extérieur du Rift (fig. 1) le même souci nous a guidé en ajustant cependant la maille d'échantillonnage à la dimension de la zone tectonique étudiée (Asal, Yoboki) pour permettre une étude comparée ultérieure avec les résultats du levé aéromagnétique de l'INAG effectué sur cette région. Deux coupes l'une à l'intérieur l'autre à l'extérieur du rift ont été réalisées sur des parois de failles d'une centaine de mètres de rejet et comportant chacune plus de vingt coulées. Les objectifs étaient multiples : étude paléomagnétique d'empilements de basaltes comparables à ceux obtenus pour les forages I.P.O.D., étude de l'importance de la variation séculaire afin d'apprécier l'étalement dans le temps des coulées dans le rift, évaluation de paramètres réels pour contribuer à l'élaboration de

* Lab. de géophysique interne et paléogéophysique, Univ. de Rennes, 1, av. du Général Leclerc, 35042 Rennes Cedex.

** C.O.B. B.P. 337, 29273 Brest Cedex.

*** Lab. de géomagnétisme, 4, av. de Neptune, 94100 Saint-Maur-des-Fossés.

Contribution n° 691 du Centre océanologique de Bretagne. Note présentée à la séance des 23-27 février 1980, manuscrit définitif remis le 17 juillet 1980.

modèles rendant compte de la carte aéromagnétique réalisée en 1977 [Courtilot *et al.*, 1980].

ÉCHANTILLONNAGE ET PROCÉDURE.

Les prélèvements d'échantillons orientés ont été effectués au cours de deux missions ; l'une à l'intérieur du rift d'Asal (fig. 2, coupes A, B, D, E, F) concerne des coulées d'âge récent ; l'autre, à l'extérieur, dans une direction sud-ouest perpendiculaire à l'axe du rift (fig. 1, sites 83-100) intéresse les coulées plus

de Rennes (Spinner DSM-1 Schonstedt). La technique de désaimantation progressive par champ alternatif a été appliquée à l'ensemble des échantillons jusqu'à des niveaux de 30 mT à 100 mT conduisant à définir une direction stable caractéristique [Zijderveld, 1967] par échantillon orienté ; la désaimantation thermique progressive en champ nul a été de plus employée dans l'étude de la zone extérieure au rift afin de tester la stabilité des directions caractéristiques des sites 99 et 100.

PREMIÈRE PARTIE : LE RIFT. DIRECTIONS DE L'AIMANTATION DES COULÉES RÉCENTES A L'INTÉRIEUR DU RIFT D'ASAL.

La figure 2 indique les coupes où les prélèvements ont été effectués. La coupe A est un profil horizontal en travers du « petit rift » (structure dite « rift in rift ») ; les coupes B, D, E, F correspondent à un échantillonnage de coulées superposées. En D l'importance du rejet de la paroi de faille échantillonnée, et le nombre de coulées accessibles en font un endroit privilégié pour une étude détaillée des variations de direction du Champ Magnétique Terrestre (CMT). Les coupes A' et C comportant un nombre important d'échantillons foudroyés ont été éliminés.

L'aimantation rémanente visqueuse (ARV) a été mesurée sur 244 échantillons des coupes A, B, D, E, F. Le coefficient moyen de viscosité [Thellier et Thellier, 1959] déterminé sur une durée de trainage de 12 jours est de 1,1 % (moyenne géométrique). Il montre que le CMT actuel a un effet négligeable sur l'intensité et la direction de l'aimantation rémanente naturelle des échantillons. L'intensité de l'ARN représentée par l'histogramme de la figure 4_a indique une distribution autour d'une valeur moyenne $J_r = 5,7 \text{ Am}^{-1}$, avec un intervalle de confiance de 5,2 et 6,1 Am^{-1} . Après réduction à une valeur équatoriale, la valeur trouvée 5,4 Am^{-1} se situe entre la valeur moyenne donnée pour les basaltes sous-marins, 9,0 Am^{-1} à l'axe des dorsales, et celle donnée pour les basaltes subaériens, 3,6 Am^{-1} [Prévo et Grommé, 1975].

Le tableau I et la figure 5 indiquent la direction moyenne de l'aimantation avant et après nettoyage par champ alternatif pour chaque site des cinq coupes du rift A, B, D, E, F calculée en utilisant la statistique de Fisher. Si le groupement est amélioré après nettoyage magnétique il est en général déjà élevé au niveau de l'ARN ; dans le cas contraire, par exemple coupe B, site 72, $k = 5$ (ARN) donne un très bon groupement ($k = 303$) après désaimantation. Le tableau II donne la direction moyenne et la statistique correspondante calculée pour chaque coupe A, B, D, E, F.

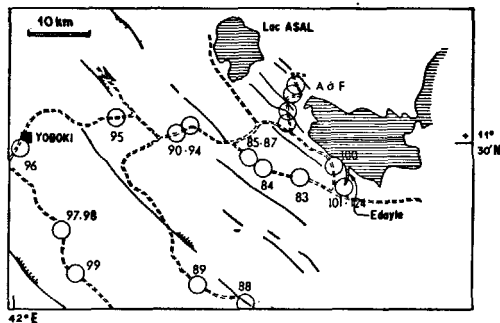


FIG. 1. — Localisation des sites de prélèvement paléomagnétiques dans le rift de Ghoubbet Asal et au Sud-Ouest de celui-ci.

anciennes 4-1 Ma de la série stratoïde [Demange, Stieltjes, 1975 ; Varet, 1978]. Ces prélèvements ont été réalisés avec une foreuse électrique portable excepté ceux des coupes A, D et E situés dans le rift (fig. 1, 2) obtenus par la méthode du « chapeau de plâtre » [Thellier, 1936]. L'orientation des carottes ou des blocs est faite sur le soleil ; un compas magnétique permet de déterminer après calcul la déclinaison du Nord magnétique en chaque point de forage. Outre un contrôle de l'orientation, cette information en liaison avec l'examen de l'intensité d'aimantation, permet de reconnaître par l'incohérence éventuelle de ces déclinaisons les échantillons ayant subi l'effet de la foudre. En général quatre blocs plâtrés ou cinq carottes ont été extraites par site. Nous disposons actuellement d'environ 500 prélèvements orientés, répartis en 91 sites ; il se peut que plusieurs sites aient été implantés dans la même coulée, comme le suggèrent certains résultats mais le site restera dans ce travail l'unité statistique de traitement.

Les mesures de direction de l'aimantation et les désaimantations par champ alternatif ont été effectuées au laboratoire de Saint-Maur [Inductomètre rotatif, Legoff, 1975], du C.O.B. (Spinner Forster)

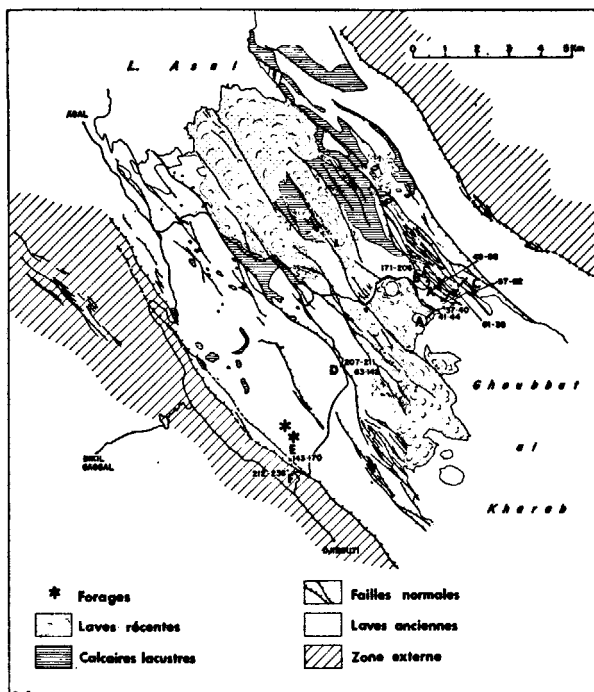


FIG. 2. — Localisation des coupes A à F dans le rift de Ghoubbet Asal. Les étoiles indiquent l'emplacement des forages géothermiques (Figure extraite de Benhommet *et al.*, 1978).

Corrections tectoniques et analyse des résultats. Des mesures de l'azimut et du pendage des surfaces structurales ont été, soit obtenues directement sur le terrain (cas de la coupe A où les relevés ont été faits au niveau de chaque coulée) soit fournies sous forme d'une mesure globale pour une coupe donnée [P. Choukroune, 1979]. En terrain volcanique les corrections de pendage à appliquer au vecteur aimantation sont extrêmement délicates pour deux raisons : 1) il n'est pas facile de mesurer ce pendage pour chaque coulée, 2) ce pendage, quand il existe, représente-t-il, en l'absence de couches de référence comme des sédiments, le basculement de la coulée ou la pente préexistante de la surface sur laquelle s'est épanchée la coulée ? On peut s'attendre à ce que les résultats paléomagnétiques eux-mêmes fournissent la réponse comme dans le classique test de « plissement ». Cependant : les prélèvements de part et d'autre de l'axe des basculements n'ont pas été possibles, du fait soit de la dissymétrie effective du « petit rift » soit de la difficulté d'accès aux affleurements. Malgré cela on peut déduire des données magnétiques et structurales (tabl. III) un

certain nombre de résultats moyennant quelques hypothèses vraisemblables.

Les directions d'aimantation de huit coulées de la coupe A sont groupées autour de la direction moyenne $D = 350,3$; $I = 24,2$; $k = 725$ (tabl. II) direction sensiblement différente de celle du champ actuel sur le rift (la déclinaison du champ actuel a pu être appréciée par ailleurs à partir de 20 mesures d'orientation solaire et magnétique faites sur les carottes de la coupe B ; la valeur moyenne ainsi déterminée est $D = 0,6^{\circ}E \pm 2,2^{\circ}$). Si l'on corrige chaque direction du pendage mesuré sur chaque coulée la nouvelle direction moyenne obtenue est peu différente ($D = 349,7$; $I = 26,0$; $k = 367$) mais le paramètre de précision k est divisé par deux. On en déduit : 1) les coulées superficielles de la coupe A se seraient mises en place en un temps très court ($k = 725$) quelques dizaines d'années pour fixer les idées ; 2) les failles actives visibles sur le terrain ne provoqueraient pas de basculement.

La coupe B après désaimantation donne une direction moyenne d'aimantation ($D = 339,5$; $I = 25,5$; $k = 192$) très voisine de celle de A. On

ESE

COUPE DU CANYON DE EDAYLE

Selon un sentier suivant une faille.

WNW

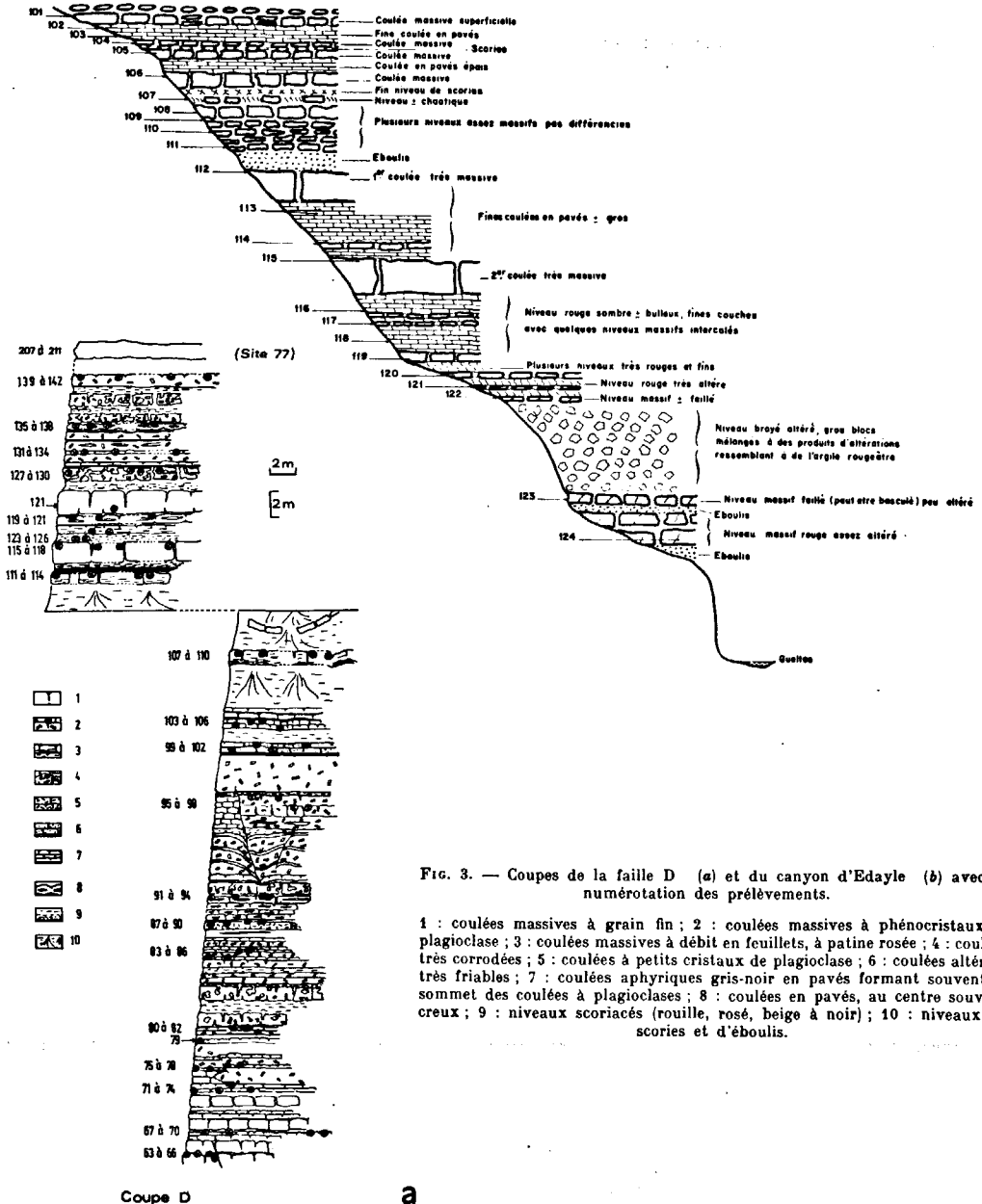


Fig. 3. — Coupes de la faille D (a) et du canyon d'Edayle (b) avec la numérotation des prélèvements.

1 : coulées massives à grain fin ; 2 : coulées massives à phénocristaux de plagioclase ; 3 : coulées massives à débit en feuillets, à patine rosée ; 4 : coulées très corrodées ; 5 : coulées à petits cristaux de plagioclase ; 6 : coulées altérées très friables ; 7 : coulées aphyriques gris-noir en pavés formant souvent le sommet des coulées à plagioclases ; 8 : coulées en pavés, au centre souvent creux ; 9 : niveaux scoriacés (rouille, rosé, beige à noir) ; 10 : niveaux de scories et d'éboules.

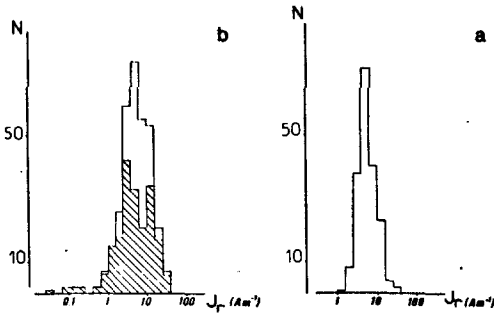


FIG. 4. — Histogrammes des intensités de l'aimantation rémanente naturelle.

a : sites A à F ; b : sites 83 à 124 ; en hachuré sites 83 à 100.

ne peut dans le cas de la coupe B appliquer aux données le test précédent, les coulées ayant apparemment toutes la même pendage. On peut remarquer cependant que la correction utilisant la direction moyenne du pendage (tabl. III) conduit à une inclinaison de champ élevée peu probable. Cette

observation, et le fait que les deux coupes sont situées dans le même contexte tectonique (« petit rift ») nous conduit à étendre à la coupe B les conclusions trouvées pour la coupe A.

L'échantillonnage réalisé sur la coupe D est représenté sur la figure 3 a ; les directions de l'aimantation obtenues par l'étude de 22 sites superposés sur une centaine de mètres d'épaisseur sont donnés dans le tableau I ; les directions après désaimantation sont représentées sur la projection stéréographique de la figure 5 b. La direction moyenne après désaimantation est $D = 357,7$; $I = 14,6$; $k = 37$. L'analyse des données (tabl. I) et l'examen de la figure 5 b indiquent : 1) une dispersion des directions traduisant l'étalement dans le temps des coulées échantillonnées et correspondant à une variation paléoséculaire (fig. 5 b) représentée par la faible valeur de k ; 2) une inclinaison moyenne ($14,6^\circ$) faible incompatible avec l'hypothèse d'un dipôle géocentrique axial pour lequel on devrait avoir $I = 22,2^\circ$ à la latitude d'Asal.

Le haut de la falaise correspond par ailleurs au rebord d'une surface structurale de pendage

S	A. R. N.					Après désaimantation				
	D	I	N	k	α_{95}	D	I	N	k	α_{95}
COUPE A. PETIT RIFT.										
(1- 4)	353.8	22.5	4	141	5.9	347.9	25.2	4	178	5.2
(5-12)	351.7	21.7	8	369	2.6	350.9	22.5	8	365	2.6
(13-16)										
(21-28)	353.9	21.9	12	216	2.8	352.5	22.4	12	382	2.1
(17-20)	350.9	2.9	4	235	4.6	350.8	21.9	4	1459	1.8
(29-32)	353.2	27.7	4	275	4.2	350.4	25.0	4	1132	2.1
(33-36)	343.9	17.4	4	9	23.5	349.8	21.8	4	769	2.5
(37-40)	358.5	29.5	4	178	5.2	352.8	27.9	4	981	2.2
(41-44)	341.4	17.9	4	4	18.9	347.3	27.2	4	441	3.3
COUPE B.										
71 (1-4)	341.4	21.2	4	207	4.9	350.6	22.2	4	91	7.3
72 (1-7)	339.9	15.4	7	5	22.8	336.4	24.9	7	303	3.0
73 (1-6)	334.1	35.7	6	9	19.2	335.8	23.3	6	506	2.5
74 (1-6)	337.0	22.8	6	7	2.2	338.6	25.9	5	327	1.1
75 (1-6)	341.2	24.3	6	200	4.0	339.7	25.7	6	164	4.5
76 (1-5)	337.3	29.2	5	389	3.2	335.9	30.2	5	357	3.3
COUPE E.										
(143-146)	351.6	31.8	4	2701	1.4	351.2	32.0	4	1434	1.9
(147-150)						345.7	28.8	4	37	11.4
(151-154)	350.1	29.0	4	1113	2.1	350.9	28.9	4	2397	1.4
(155-158)	353.1	19.1	4	175	5.3	352.7	19.7	4	163	5.5
(160-162)	359.0	11.7	3	261	5.0	355.8	12.3	3	733	3.0
(163-166)	353.7	18.7	4	1099	2.1	356.1	20.6	4	454	3.3
(168A-168B)	2.9	25.2	2			2.9	25.2	2		
(167-170)	355.5	27.4	3	274	4.9	357.2	27.2	4	234	4.6

a) Directions moyennes par site de l'aimantation avant et après désaimantation : coupe A, B, E du rift.

S	A. R. N.					Après désaimantation				
	D	I	N	k	α_{95}	D	I	N	k	α_{95}
COUPE D.										
(63- 66)	13.7	21.0	4	675	2.7	13.7	21.1	4	643	2.8
(67- 70)	7.6	20.2	4	447	3.3	7.6	20.1	4	864	2.4
(71- 74)	4.2	14.8	4	157	5.6	4.3	15.0	4	165	5.4
(75- 78)	1.2	9.5	5	998	2.0	1.0	9.6	5	1429	1.7
(79- 82)	0.5	13.2	4	931	2.3	0.4	13.2	4	1010	2.2
(83- 86)	0.7	13.5	4	260	4.3	0.9	13.3	4	324	3.9
(87- 90)	356.6	20.3	4	252	4.4	356.5	22.0	4	857	2.4
(91- 94)	359.7	19.6	4	128	6.2	356.6	19.5	3	249	5.1
(95- 98)	359.5	19.9	4	260	4.3	0.6	18.9	4	529	3.0
(99-102)	5.1	19.7	4	117	6.5	2.2	17.1	4	2560	1.4
(103-106)	2.7	17.3	4	219	4.7	3.2	16.8	4	219	4.7
(107-110)	0	7.6	4	229	4.6	357.4	5.2	4	335	3.8
(111-114)	22.7	12.7	4	20	15.3	13.9	9.0	4	245	4.5
(115-118)	355.0	-6.1	4	6	27.0	354.3	-7.7	4	260	4.3
(123-124)	338.6	-7.7	2			344.6	-17.0	2		
(125-126)	333.0	20.2	2			334.2	19.4	2		
(119-122)	339.9	31.4	3	50	11.4	339.1	24.8	3	2180	1.7
(127-130)	339.8	14.2	3	99		354.8	15.3	3	1862	1.9
(131-134)	329.4	-1.1	4	3	40.7	354.1	19.5	4	524	3.1
(135-138)	352.2	19.8	4	19	15.9	356.5	20.0	4	1938	1.6
(139-142)	356.5	31.2	3	13	22.0	355.2	19.1	3	1561	2.0
(207-211)	0.8	24.4	5	44	9.5	357.1	20.7	5	655	2.4
COUPE F.										
78 (1-6)	3.3	33.0	5	41	9.7	11.6	31.5	5	465	2.9
79 (1-6)	12.3	34.1	6	308	3.3	13.4	34.8	6	449	2.7
80 (1-5)	8.4	30.4	5	418	3.1	9.1	30.6	5	538	2.7
81 (1-6)	356.9	27.4	6	534	2.5	357.8	27.4	6	529	2.5
82 (1-4)	2.0	30.4	4	286	4.1	4.6	29.7	4	593	2.9

b) Directions moyennes par site de l'aimantation avant et après désaimantation : coupes D et F du rift.

TABLEAU I

A. B. C.		APRES DESAIMANTATION											
COURSE	N	avant correction de pendage				après correction de pendage				D	I	k	
		D	I	k	α_{95}	D	I	k	α_{95}				
A	8	350.8	20.3	70	6.7	350.3	24.2	725	1.8	349.7	26.0	367	
B	6	336.6	24.8	119	6.2	339.5	23.5	190	4.8	339.5	40.4	192	
D	22	356.4	15.7	25	6.3	357.7	14.4	37	5.2	359.7	24.9	37	
E	8	355.9	20.5	51	7.8	354.1	24.4	104	5.4	356.1	20.4	104	
F	5	4.5	31.2	200	5.4	7.2	30.9	180	5.7	7.2	30.9	180	
Tous les sites, N = 69 :		354.5				20.9				37			
		356.8				24.9				45			

TABLE II. — Directions moyennes par coupe, avant et après désaimantation des coupes A, B, D, E, F.

Site	Pendage	Direction pendage
Coupe A		
(1-4)	0°	-
(5-8)	4°	N 22°
(9-12)	0°	-
(13-16)	0°	-
(17-20)	4°	N 202°
(21-24)	4°	N 202°
(25-28)	4°	N 202°
(29-32)	4°	N 202°
(33-36)	0°	-
(37-40)	4°	N 202°
(41-44)	4°	N 202°
Coupe B		
	15°	N 160°
Coupe D		
	12°	N 151°
Coupe E		
	10°	N 35°
COUPE F		
	0°	-

TABLE III. — Pendages et directions du pendage relevés sur les coupes A, B, D, E, F.

connu [Choukroune, 1979] mesuré lors de l'exécution de profils structuraux réalisés en travers du rift d'Asal. Si l'on applique la correction de pendage correspondante, la direction moyenne (D = 359,7 ; I = 25,0) devient peu différente de celle donnée par un dipôle géocentrique et l'inclinaison voisine de celles obtenues sur les coupes A et B. On peut en tirer les conclusions suivantes quant à la tectonique liée au rift [Bonhommet, Smith et Sichler, 1978] :

— dans la région du « petit rift » (plancher interne, coupes A et B), considérée comme actuellement active, les coulées se seraient mises en place sur un bombement central déjà existant, et les failles fonctionneraient sans basculement ;

— plus loin de l'axe du rift, en dehors du « plancher interne » (coupe D) mais toujours dans la zone centrale [Needham *et al.*, 1976], les basculements

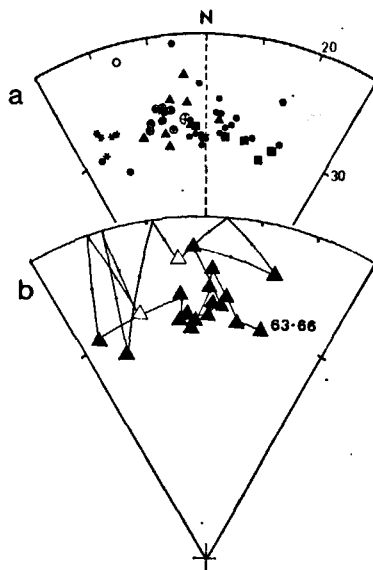


FIG. 5. — Projections stéréographiques des directions après désaimantation dans le rift d'Asal.

Symboles pleins : polarité normale ; symboles creux : polarité inverse.

a) Cercles pointés : coupe A ; étoiles : coupe B ; cercles : coupe D ; triangles : coupe E ; carrés : coupe F ; croix : direction moyenne des 49 coulées.

b) Enregistrement de la variation séculaire de la coupe D. 63-66 indique la coulée inférieure.

seraient postérieurs à la mise en place des coulées. Les conclusions tirées des profils géodésiques réalisés avant et après la crise sismovolcanique de novembre 1978 vont dans le même sens [Ruegg *et al.*, 1979].

Pour un nombre de sites équivalent le résultat obtenu par Harrison (D = 358,9 ; I = 19,2 ; k = 41 ; N = 24) sur des prélèvements superficiels le long d'un profil de plusieurs kilomètres en travers du rift correspond à celui obtenu sur la paroi de faille verticale de la coupe D (tabl. II). Dans les deux cas les populations des directions de champ sont caractérisées par une direction moyenne et une dispersion peu différentes.

Dans tout le rift nos prélèvements et des mesures de polarité magnétique faites *in situ* au « fluxgate » sur des coulées non échantillonnées n'ont pas permis de mettre en évidence de directions correspondant à des aimantations inverses, confirmant l'âge récent (inférieur à 0,7 Ma) de ces formations. C'est cependant l'étude paléomagnétique de carottes non orientées remontées lors de deux forages géothermiques

d'Asal (fig. 2) qui nous a fourni les premières directions d'aimantation inverse. Ces forages ont rencontré des formations anciennes (B.R.G.M., 1975) reconnues par ailleurs à l'extérieur du rift. Une carotte attribuée à la série du Dahla nous a fourni par une méthode d'orientation indirecte [Galibert, Bonhomme et Sichler, 1979] une direction d'aimantation $D = 179,1$; $I = -37,7$ sur cinq échantillons. Ce résultat ne concernant qu'une seule coulée doit être utilisé avec prudence; cependant la présence à cette profondeur (1 282 m) d'une série ancienne à aimantation inverse indique que l'ouverture globale du rift reste inférieure aux 10 km de largeur de la zone centrale comme le laissent supposer Neeham *et al.* [1976].

DEUXIÈME PARTIE : PROFILS TRANSVERSES À L'AXE DU RIFT. DIRECTION DE L'AIMANTATION DES COULÉES ANCIENNES À L'EXTÉRIEUR DU RIFT.

La figure 1 indique les sites où des prélèvements de surface ont été effectués à l'extérieur du rift dans la série stratoïde. Chaque affleurement échantillonné correspond à une, parfois deux à trois coulées superposées. Les sites 83 à 100 représentent l'échantillonnage en surface de la série stratoïde dans la direction sud-ouest d'Asal. Comme dans le cas des coulées récentes nous avons choisi d'effectuer également des prélèvements sur une paroi verticale.

S	A. R. N.					Après désaimantation				
	D	I	N	k	α_{95}	D	I	N	k	α_{95}
83	345.9	46.6	4	19	16.0	357.9	9.7	3	66	10.0
84	173.4	-20.0	8	3	30.2	181.8	-21.1	7	29	15.0
85	19.5	-26.2	7	1	48.3	7.1	4.2	6	344	3.1
86	4.3	8.6	5	608	2.5	1.3	5.9	4	720	2.6
87	185.5	-7.0	7	363	2.8	184.3	-7.2	6	257	3.6
88	200.5	-16.6	5	44	9.5	197.9	-23.2	5	120	5.7
89	208.2	-23.3	4	34	12.0	200.3	-21.6	2		
90	13.1	11.0	4	165	5.5	0.7	10.1	2		
91	348.0	23.7	4	14	18.8	0.8	15.8	3	38	15.0
92	359.5	15.7	3	132	7.0	359.4	19.8	3	96	8.3
93	357.4	26.3	2			6.9	18.8	2		
94	13.1	11.8	2			20.8	8.3	2		
95	14.4	9.6	6	34	9.8	16.1	7.8	6	30	10.3
96	26.4	3.0	5	820	2.2	26.6	3.2	5	383	3.2
97	27.9	15.1	6	717	2.1	28.0	15.7	6	730	2.1
98	30.5	33.4	5	2	41.6	26.7	18.8	4	136	6.0
99	229.8	-19.0	6	2	44.3	196.8	-28.5	6	355	3.0
100	268.1	13.3	7	2	45.0	174.2	0.7	7	212	3.6
Sites 83 à 100						10.3	13.5	18	36	5.5

a) Directions moyennes avant et après désaimantation des sites 83 à 100.

En bordure sud du Ghoubbet le canyon d'Edayle a permis un échantillonnage de 24 coulées (sites 101 à 124) superposées sur une épaisseur de l'ordre de 100 m. L'analyse du tableau IV b, donnant les directions d'aimantation de chaque site après désaimantation, fait apparaître les points suivants : 1) un fort groupement ($k = 164$) des directions, 2) une inclinaison de la direction moyenne supérieure à celle donnée par le dipôle géocentrique, 3) la présence d'une inversion du C.M.T. à la base de l'empilement.

On peut penser que la mise en place des coulées d'Edayle a été très rapide ou que durant un temps assez long et à l'époque du refroidissement le C.M.T. était anormalement stable et incliné (« point de rebroussement » de la variation séculaire par exemple).

La figure 4 b représente l'histogramme du logarithme de l'intensité d'aimantation de l'ensemble des coulées anciennes. La valeur moyenne, $J = 5,9 \text{ Am}^{-1}$ et les limites pour un écart type $3,3 \text{ Am}^{-1}$ et $10,6 \text{ Am}^{-1}$ indiquent des intensités très compa-

S	A. R. N.					Après désaimantation				
	D	I	N	k	α_{95}	D	I	N	k	α_{95}
101	196.1	-26.9	4	3	44.2	184.8	-27.4	4	53	9.6
102	203.1	-43.8	4	3	43.1	192.8	-30.9	4	1543	1.8
103	188.8	-28.9	5	141	5.3	182.9	-29.8	4	142	5.9
104	188.8	-31.6	5	202	4.4	184.2	-33.7	4	201	4.9
105	187.4	-36.9	6	3	34.6	196.5	-30.1	4	19	16.2
106	187.9	-29.5	5	198	4.5	186.4	-30.8	4	317	3.9
107	186.1	-24.7	6	46	8.4	186.6	-32.1	4	194	5.0
108	180.4	-26.8	6	423	2.8	181.4	-27.7	4	494	3.1
109	187.7	-23.8	6	78	6.5	187.2	-29.4	4	1591	1.8
110	184.9	-31.1	6	371	3.0	184.0	-32.2	4	378	3.6
111	183.5	-29.2	4	335	3.8	184.3	-30.7	3	220	5.4
112	192.4	-22.9	5	131	5.5	190.6	-24.8	4	487	3.2
113	188.6	-22.3	6	179	4.3	185.8	-30.0	4	1178	2.0
114	189.5	-29.9	5	135	5.4	199.1	-30.5	4	109	6.7
115	188.0	-28.5	6	531	2.5	187.6	-29.7	5	1451	1.6
116	186.5	-24.0	5	373	3.2	184.5	-22.3	3	355	4.3
117	187.6	-34.2	6	502	2.6	184.5	-34.1	4	733	2.6
118	186.3	-32.4	5	122	5.7	188.3	-35.9	3	222	5.4
119	187.3	-24.4	5	227	4.2	183.5	-27.8	4	183	5.2
120	195.6	-38.3	5	178	4.7	195.2	-43.2	4	265	4.3
121	182.8	-14.6	3	21	17.6	181.6	-22.9	3	308	4.6
122	179.3	-22.9	5	87	6.7	178.7	-25.9	4	158	5.6
123	203.7	15.2	5	66	7.7	201.7	11.7	4	83	7.7
124	13.9	22.9	6	4	28.9	24.3	18.4	4	231	4.6
Sites 101 à 122						186.8	-30.2	22	164	2.3

b) Directions moyennes avant et après désaimantation des sites 101 à 124 du canyon d'Edayle.

TABLEAU IV

rables à celles obtenues sur le rift pour les coulées récentes. Le tableau IV a donne la direction moyenne des coulées 83 à 100 de l'ARN et après désaimantation par champ alternatif ; la figure 6 a montre en projection stéréographique la direction moyenne de chaque site et le cercle de confiance associé. L'ensemble se répartit en 12 coulées à polarité normale et 6 coulées à polarité inverse. Au cours de la désaimantation le comportement des échantillons appartenant aux sites 83 à 100 est caractérisé par :

1) des sites avec un très bon groupement des directions de l'ARN. L'aimantation est stable et caractérisée par un champ moyen détruisant (CMD) 50 % de l'aimantation de l'ordre de 25 mT ; ils représentent la majorité des sites ;

2) des sites à valeur de k faible sur l'ARN correspondent à des CMD de l'ordre de 5-15 mT. Au cours de la désaimantation le vecteur évolue vers une direction normale ou inverse bien définie et avec une augmentation de k, comme le montre le tableau IV ;

3) deux sites (99 et 100) à direction anormale. Le comportement au cours de la désaimantation thermique et par champ alternatif suivi sur deux spécimens d'un même échantillon est caractérisé par un parcours identique conduisant à la même direction après désaimantation. Les courbes de désaimantation indiquent des champs de blocage faibles (CMD = 5 mT) et des températures de blocage élevées (500°C). Après nettoyage magnétique la direction finale des deux sites correspond à un champ inverse et est déterminée avec précision (tabl. IV).

Après désaimantation la direction caractéristique de chaque site est donnée dans le tabl. IV a et la

figure 6 b. La direction moyenne de chaque groupe mis en évidence est donnée par :

$$N = 12 \quad D = 11,2 \quad I = 11,8$$

$$k = 38 \text{ coulées à polarité normale}$$

$$N = 6 \quad D = 189,0 \quad I = -15,8$$

$$k = 30 \text{ coulées à polarité inverse}$$

Si nous corrigeons de 180° la direction moyenne des coulées inverses on peut montrer que la direction obtenue n'est pas différente de la direction moyenne des coulées à polarité normale. On peut alors considérer que l'on est en présence d'une seule population statistique et traiter l'ensemble des directions. On obtient pour les 18 sites (coulées) la direction moyenne suivante :

$$N = 18 \quad D = 10,3 \quad I = 13,5 \quad k = 36 \quad \alpha_{95} = 5,5.$$

Le nombre de coulées échantillonnées et leur répartition dans l'espace et le temps nous autorise à considérer cette direction comme celle du champ moyen en ce lieu pour la période 4-1 Ma. Il reste alors à expliquer au vu de cette direction : a) l'écart systématique de 10° Est de la direction moyenne par rapport au Nord géographique, incompatible avec un champ dipôle axial ; b) l'écart extrêmement fort de l'inclinaison moyenne (13,2) avec celle d'un dipôle axial (22,1) centré correspondant à la latitude d'Asal. Les hypothèses suivantes sont envisagées :

1) l'écart en déclinaison provient d'une variation d'attitude du bloc à l'Ouest d'Asal par rapport à l'axe polaire et postérieure à la mise en place des coulées ;

2) un biais systématique du vecteur aimantation est introduit par un basculement tectonique équivalent sur l'ensemble des sites échantillonnés ;

3) le champ moyen pour cette partie de l'Afrique et la période 1-4 Ma n'est pas celui d'un dipôle centré axial.

La première hypothèse suppose un changement d'attitude du bloc étudié (rotation autour d'un axe vertical) depuis la mise en place des coulées par rapport à l'axe polaire. Des gradients de déplacement au Sud de Ghoubbet ont été observés lors des récentes mesures géodésiques [Tarantola *et al.*, 1979] faites dans la région. S'il existe des mouvements de rotation relatifs ceux-ci devraient pouvoir être testés par des études paléomagnétiques dans la zone au Nord d'Asal et la région d'Ali Sabiè. Cette hypothèse n'explique pas cependant la différence d'inclinaison observée avec celle du dipôle géocentrique ; celle-ci devrait, si nous cherchons une origine tectonique, être interprétée par un basculement structural sur l'ensemble de la région étudiée, c'est la seconde hypothèse.

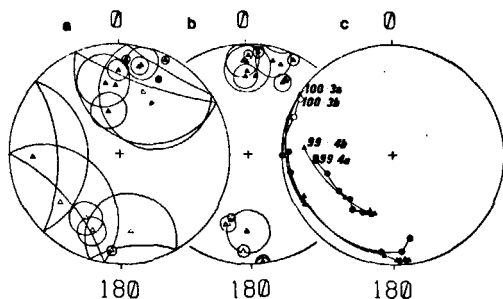


FIG. 6. — Projection stéréographique des directions moyennes de l'ARN (a) et après désaimantation (b) pour les sites 83 à 100 avec leurs cercles de confiance (c) parcours suivi par le vecteur aimantation au cours de la désaimantation thermique (cercles) et par champs alternatifs (triangles) pour quatre échantillons des sites 99 et 100.

La troisième hypothèse nécessite de regarder les données paléomagnétiques obtenues par ailleurs dans l'Est de l'Afrique; or des directions comparables (déclinaison est et inclinaison faible) ont été signalées depuis plusieurs années soit en Afar [Pouchan et Roche, 1971], soit en Éthiopie [Schult, 1974; Brock *et al.*, 1970] pour des roches plus anciennes (oligocène, éocènes-oligocènes respectivement) soit encore dans le rift Est Africain [Reilly *et al.*, 1976] (basaltes miocènes et pliocènes). Plus récemment une étude de magnétostratigraphie fine a été réalisée dans le Sud-Ouest de l'Éthiopie [Brown *et al.*, 1978] sur deux séquences sédimentaires âgées de 3,5 à 0,8 Ma et 3,7 à 2,8 Ma. Une déclinaison de 49° E et une inclinaison de 5° ont été dégagées. En Égypte des basaltes tertiaires probablement éocènes, conduisent aussi à des déclinaisons est (7 à 11°) et des inclinaisons trop faibles pour la latitude actuelle [Hussain *et al.*, 1979]. Tous ces résultats ainsi que la direction que nous trouvons sont compatibles avec le modèle de dipôle excentré caractérisé par une inclinaison faible et la remarque de Wilson constatant une déviation systématique du champ magnétique terrestre vers l'Est depuis le tertiaire supérieur [Wilson, 1970].

CONCLUSIONS.

Dans le rift où les coulées étudiées ont moins de 700 000 ans nos conclusions seraient essentiellement d'ordre tectonique : sur le « plancher interne » les coulées se seraient mises en place sur un bombement central déjà existant et les failles fonctionneraient sans basculement. En dehors du « plancher interne » les basculements seraient postérieurs à la mise en place des coulées.

À l'extérieur du rift la direction moyenne du champ magnétique trouvée sur les coulées de la série stratoïde (4-1 Ma) peut être considérée comme une direction de référence pour la région étudiée; mais l'absence de contrôle tectonique ne permet pas de choisir entre les différentes hypothèses envisagées.

Remerciements. Nous remercions J. Varet d'avoir suscité ce travail dans le cadre de la R.C.P. 341 du C.N.R.S., L. Stieltjes d'avoir suggéré l'étude d'Edayle, J. L. Cheminée et C. Laj pour leur aide sur le terrain ainsi que M. Clin pour son accueil et l'appui logistique fourni à Djibouti.

Références

- BONHOMMET N., SMITH B. et SICHLER B. (1978). — L'apport du paléomagnétisme à la tectonique récente du rift d'Asal, 6^e Réunion. Ann. Sc. Terre, Orlans, p. 47. Livre en dépôt à la S.G.F.
- BUREK P. J. (1980). — Paleomagnetic evidence for an anti-clockwise rotation of the Danakil Alps, Ethiopia, EOS, 51, p. 271.
- BROCK A., GIBSON I. L. et GACII P. (1970). — The paleomagnetism of the Ethiopian flood basalt succession near Addis-Ababa. Geophys. J. R. Astr. Soc., 19, p. 485-497.
- BROWN F. H., SHUEY R. T. et GROES M. K. (1978). — Magnétostratigraphie of the Shungura and Unso formations south western Ethiopia : new data and comprehensive reanalysis. Geophys. J. R. Astr. Soc., 54, p. 519-538.
- CHOUKROUNE P. (1979). — Comm. pers.
- COURTILLOT V., GALDEANO A. et LE MOUËL J. L. (1980). — Propagation of an accreting plate boundary : a discussion of new aeromagnetic data in the gulf of Tadjoura and southern Afar. Earth. Planet. Sc. Lett., 47, p. 144-170.
- DALY L. (1979). — Les lois de Thellier-Neel : Distinction entre les aimantations juxtaposées et superposées. C. R. Ac. Sc., Paris, t. 288, p. 317-320.
- DEMANGE J. et STIELTJES L. (1975). — Géologie de la région Sud-Ouest du T.F.A.I. Bull. B.R.G.M., IV, 2.
- GALIBERT P. Y., BONHOMMET N. et SICHLER B. (1979). — Étude magnétique des forages profonds réalisés dans la zone d'accrétion récente de Ghoubbet-Asal. 7^e Réunion. Ann. Sc. Terre, Lyon, p. 201. Livre en dépôt à la S.G.F.
- HARRISON C. G. A., STIELTJES L. et TARACIEWICZ E. (1977). — Paleomagnetism of samples from the axial zone of the Afar depression. Earth. Planet. Sc. Lett., 34, p. 273-283.
- HUSSAIN A. G., SCHULT A. et SOFFEL H. (1979). — Paleomagnetism of the basalts of Wadi Abu Tereifiya, Mandisha and dioritic dykes of Wadi Shihat, Egypt. Geophys. J. R. Astr. Soc., 56, p. 55-61.
- LAUGHTON A. S. (1966). — The Gulf of Aden. Phil. Trans. R. Soc. London, A, 259, p. 150-171.
- LE GOF M. (1975). — Inductomètre à rotation continue pour la mesure des faibles aimantations rémanentes et induites en magnétisme des roches. Dipl. Ing. C.N.A.M., Paris.
- MÉGRUE G. H., NORTON et STRANGWAY D. W. (1972). — Tectonic history of the Ethiopian Rift as deduced by K/Ar ages and paleomagnetism measurements of basaltic dikes, J. Geophys. Res., 77, p. 29.
- NEEDHAM H. D., CHOUKROUNE P., CHEMINÉE J. L., LE PICHON X., FRANCHETEAU J. et TAPPONNIER P. (1976). — The accreting plate boundary Ardoukoba Rift (North East Africa) and the Oceanic rift Valley. Earth. Planet. Sc. Lett., 28, p. 439-453.
- POUCHAN P. et ROCHE A. (1971). — Étude paléomagnétique de formations volcaniques du T.F.A.I. C. R. Ac. Sc., Paris, t. 272, p. 531-534.
- PREVOT M. et GROMME S. (1975). — Intensity of magnetization of subaerial and submarine basalts and its possible change with time. Geoph. J. R. Soc., 40, p. 207-224.

- REILLY T. A., RAJA P. K. S., MUSSETT A. E. et BROCK A. (1976). — The paleomagnetism of late Cenozoic volcanic rocks from Kenya and Tanzania, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 45, p. 483-494.
- RUEGG J. C., LÉPINE J. C., TARANTOLA A. et KASSER M. (1979). — Geodetic measurements of rifting associated with seismo-volcanic crisis in Afar. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 6, 11, p. 817-820.
- SCHULT A. (1974). — Paleomagnetism of tertiary volcanic rocks from the Ethiopian southern plateau and the Danakil block. *J. Geophys.*, 40, p. 203-212.
- TARANTOLA A., RUEGG J. C. et LÉPINE J. C. (1979). — Brittle elastic behaviour of accreting plate boundaries revealed by geodetic measurements in Afar. *Earth. Planet. Sc. Lett.*, 45, p. 435-444.
- TEILHARD DE CHARDIN P. et al. (1930). — Études géologiques en Éthiopie, Somalie et Arabie méridionale. *Mém. Soc. géol. Fr.*, nouv. sér., t. VI, n° 14.
- THELLIER E. (1936). — Détermination de la direction de l'aimantation permanente des roches. *C. R. Ac. Sc.*, Paris, t. 203, p. 743-745.
- THELLIER E. et THELLIER O. (1959). — Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Géophys.*, vol. 15, p. 285-376.
- VARET J. (1978). — Carte géologique de l'Afar central et méridional C.N.R.S., CNR.
- WEGENER A. (1929). — Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Braunschweig, Friedr. Vieweg.
- WILSON R. L. (1970). — Permanent aspect of the earth's non dipole magnetic field over upper tertiary times. *Geophys. J. R. Soc.*, 19, p. 417-437.
- ZIJDERVELD J. D. A. (1967). — Demagnetization of rocks : analysis of results. In : « Methods in Paleomagnetism ». Edited by D. Q. Collinson, K. M. Creer and S. K. Runcorn N.-York, Elsevier, p. 254-286.