

***PALEOMAGNETISME DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTALE
DANS LES ETATS DE DURANGO ET SINALOA (MEXIQUE):
VARIATIONS DU CHAMP OU ROTATIONS DE BLOCS
AU PALEOCENE ET AU NEOGENE?***

C. BOBIER*

C. ROBIN**

RESUMEN

Rocas ígneas de la cordillera andesítica occidental, la cual constituye el elemento principal de la Sierra Madre Occidental, se mostraron para un estudio paleomagnético. Se colectaron 350 muestras de 64 sitios a lo largo de la carretera Durango-Mazatlán y en la parte norte de Mazatlán, en los estados de Durango y Sinaloa (localidad media: 24°N, 106°W). Los resultados permiten distinguir dos unidades principales con direcciones de magnetización y posiciones polares distintas, las cuales corresponden a dos unidades petrológicas mayores en la cordillera. Estas son:

(1) La secuencia más antigua de lavas andesíticas y batolitos granodioríticos, con edades entre ~100 m.a. y 45 m.a. Esta secuencia se caracteriza por una dirección media de magnetización de $I = 34.9^\circ$, $D = 3.3^\circ$, $R = 21.767$ y $\alpha_{95} = 8.8^\circ$, y correspondiente polo geomagnético virtual de 84.3°N , 41.0°E ($\delta p = 5.8$, $\delta m = 10.1$). Dicha posición polar difiere de otras posiciones polares reportadas anteriormente, lo que es explicado en términos de un desplazamiento al norte y una rotación en el sentido de las manecillas del reloj del área estudiada. Este modelo corresponde con la clausura durante el Paleoceno y Eoceno Temprano del arco occidental (de oeste a este: dominio oceánico, continente occidental, cuenca marginal), el cual se desarrolló en el occidente de México desde el Cretácico.

* *Unité de Géologie - Faculté des Sciences de Tunis 1060 Tunis, TUNISIE*

** *Laboratoire de Volcanologie, Université de Clermont-Ferrand, 5, rue Kessler - 63038, Clermont-Ferrand, FRANCE*

(2) La secuencia superior de riolitas ignimbríticas (tobas y flujos piroclásticos) de unos 1000 m de espesor y con edades entre ~ 32 m.a. y 2.2 m.a. (la cual registra al menos unas 7 épocas de polaridad geomagnética). Esta secuencia se caracteriza por una dirección media de magnetización de $I = 33.7^\circ$, $D = 335.8^\circ$, $R = 18.934$ y $\alpha_{95} = 10^\circ$ y correspondiente polo geomagnético virtual de 66.8°N , 154.8°E ($\delta p = 6.5$, $\delta m = 11.4$). Dicha posición polar difiere de la posición polar definida para la secuencia más antigua y de la posición polar media definida para series volcánicas del Oligoceno y Mioceno de Norteamérica. La divergencia angular entre las direcciones de magnetización para el Terciario Medio es de $\sim 20^\circ$, para la localidad media de 24°N , 106°W . La divergencia angular observada para la secuencia superior es de sentido contrario a la observada para la secuencia más antigua. Se presentan y discuten dos hipótesis: (a) variaciones espaciales de baja frecuencia del campo geomagnético durante el Oligoceno y Mioceno Temprano, y (b) rotación en sentido contrario a las manecillas del reloj del área estudiada.

En favor de la segunda hipótesis se tiene: (i) ocurrencia de eventos compresivos en el occidente de México durante el Mioceno; (ii) cambio en la dirección de convergencia de W-E a SW-NE a lo largo de la zona de subducción durante el Mioceno Tardío; y (iii) resultados paleomagnéticos de localidades en el suroeste de México (Estado de Jalisco) que indican movimientos tectónicos similares. Este modelo sugiere que la rotación tectónica que afectó esta área durante el Paleoceno alcanzó valores de $\sim 40^\circ$ y fue mayor que la rotación aparentemente registrada en la secuencia andesítica inferior. Esta rotación (40°) no puede ser aplicada a todo el margen, lo que sugiere una probable fragmentación del "continente occidental" durante la clausura, con arreglo local de bloques en respuesta a movimientos mayores.

ABSTRACT

A paleomagnetic study of 350 samples (64 sites) of the western andesitic cordillera has been made. This cordillera forms the main part of the *Sierra Madre Occidental* in Mexico. Igneous rocks have been sampled in Durango and Sinaloa states (along the Durango-Mazatlán highway) and in the North of Mazatlán (mean point: 24°N ; 106°W).

Two petrological units, showing two distinct directions of magnetization and associated virtual poles, are observed:

1. The older sequence of andesitic lavas and batholithic granodiorites ranges in age from 45 m.y. to at least 100 m.y. This lower system is characterized by a mean direction of magnetization defined by: $I = 34^\circ 9'$; $D = 3^\circ 3'$ E; $R = 21.7672$; $\alpha_{95} = 8^\circ 8'$. A corresponding virtual geomagnetic pole located at $84^\circ 3'$ N; 41° E ($\delta p = 5.8$; $\delta m = 10.1$) differs from previously proposed pole positions. This apparent pole is explained by a slight northward shifting and a clockwise rotation of the area since the andesitic sequence overflow. This model agrees with a closing (during Paleocene and Early Eocene) of the occidental arc system (from W to E: oceanic domain - western continent - marginal basin) which develops in western Mexico since Cretaceous. Then the paleomagnetic results suggest a larger tightening to the North of the cordillera than to the South.

2. The upper sequence, approximately 1000 meters thick, is made of ignimbritic rhyolites (tuffs and ash-flows). These volcanics range in age from 32 to 22 m.y. and cover at least seven field polarity epochs. The magnetization is characterized by a mean direction: $I = 33^\circ 7'$; $D = 335^\circ 8'$; $R = 18.9343$; $\alpha_{95} = 10^\circ$. The corresponding pole is located at $66^\circ 8'$ N; $154^\circ 8'$ E ($\delta p = 6.5$; $\delta m = 11.4$). It is widely different from both the poles deduced from the andesitic system and the mean pole computed from American Oligocene and Miocene volcanic series. The de-

viation between the two directions of magnetization (corresponding to the two middle Tertiary poles) is about 20° W at the point 24° N - 106° W. The apparent pole for the upper sequence shows a migration opposite from the one recognized using paleomagnetic studies of the lower group. Two hypotheses are presented and discussed:

- One implies large spatial variations of very low frequency in the geomagnetic field during Oligocene and Early Miocene.

- The second takes into account an anticlockwise rotation of the area since the ignimbrite deposits. In favour of this hypothesis we note: (i) the occurrence of compressive events during Miocene in western Mexico. (ii) A change in direction of convergence of the oceanic subduction during late Miocene (first W-E directed, then SW-NE). (iii) The results of other paleomagnetic studies in southwestern Mexico (Jalisco State) suggesting similar movements.

This model also suggests that the rotation affecting the area with respect to "stable" North America during Paleocene, has been larger than it appears according to the remanent magnetization of the lower andesitic group, and reached about 40° . Such a value cannot be applied to the entire border. It suggests a probable fragmentation of the "western continent" during the closing with local arrangements of blocks, in response to larger movements.

I - INTRODUCTION

Cet article expose les résultats de l'analyse paléomagnétique de 350 échantillons en provenance de 64 sites répartis le long d'une coupe transversale de la Sierra Madre Occidentale mexicaine. Une présentation préliminaire des données (Bobier et Robin, 1975) soulignait l'existence de larges variations dans la direction rémanente des ignimbrites oligo-miocènes situées au sommet de cette coupe. Simultanément, Nairn *et al.* (1975) et Nairn (communication personnelle) obtenaient sur ces ignimbrites des résultats comparables; leur travail incluait aussi une étude des minéraux magnétiques.

Les variations de directions d'aimantations mesurées sur des roches situées entre 17 et 30 M.a. - en particulier en Sardaigne - ne sont pas pleinement expliquées par une interprétation tectonique (Bobier, 1971, 1973; Coulon *et al.*, 1974). C'est pourquoi nous discutons dans un premier temps les variations observées sur les ignimbrites de la Sierra Madre (32-23 M.A.) dans l'hypothèse d'une dérive du champ géomagnétique de grande amplitude et de longue durée à la jonction Oligocène-Miocène. Cette interprétation est ensuite confrontée à une hypothèse impliquant une mobilité de la zone occidentale du Mexique par rapport au reste du continent américain. Ce dernier modèle se trouve conforté par de récents travaux de reconstructions paléogéographiques (Tardy, 1977, 1980) et d'autres données paléomagnétiques qui vont dans le même sens (Urrutia-Fucugauchi et Pal, 1977; Urrutia-Fucugauchi, 1981).

II - CADRE GEOLOGIQUE - AGE ET NATURE DES FORMATIONS

L'épaisse couverture volcanique de la Sierra Madre Occidentale atteint par endroits 2000 mètres. Elle représente l'une des plus imposantes formations andésito-ignimbritiques du monde. Parallèle à la côte pacifique sur une longueur d'environ 1400 km, sa largeur varie de 200 à 400 km. Les formations rhyolitiques du Sud-Ouest du Nouveau Mexique et de l'Arizona prolongent vers le Nord cette couverture volcanique. Plus au Nord, les rhyolites de l'Utah et du Nevada sont aussi semblables en âge et en aspect (Nairn *et al.*, 1975).

Les principaux types de volcanisme peuvent être abordés avec suffisamment de détails le long de la côte du Golfe de Californie entre Guamuchil et Mazatlán et Durango, la route fédérale n°40 recoupe toutes les formations et culmine à 2600 mètres près de El Salto (Fig. 2). Schématiquement, les complexes volcaniques décrits dans deux articles (McDowell et Keizer, 1977; McDowell et Clabaugh, 1979) se divisent en deux ensembles d'importances sensiblement égales (Fig. 2):

1 - La série andésitique inférieure:

La partie inférieure, reconnue le long de la côte et au Nord-Est de Mazatlán jusqu'à l'altitude 1400 m, correspond à la série andésitique. Près de Culiacán, à 230 km au Nord-Nord-Ouest de Mazatlán, des données paléontologiques indiquent que le début de l'activité remonte au moins au Crétacé terminal (Bonneau, 1971). D'après les résultats géochronologiques de Henry (1975) sur les batholites associés aux laves, on peut penser que la durée approximative de ce magmatisme calco-alcalin s'étend de ± 100 à ± 45 M.a. En effet, des études de terrain ont montré que les intrusions et les andésites appartiennent à un même cycle magmatique, les plus anciens formations se situant le long de la côte et près de Mazatlán (Henry et Fredrikson, 1972; Henry, 1975; Fredrikson, 1974).

Entre Guamuchil et Mazatlán, les prélèvements 1 à 18 correspondent à des coulées dacitiques accompagnées de dômes traversés par des filons d'andésites. La route Mazatlán-Durango recoupe d'abord le complexe granodioritique (Fig. 2) puis la série lavique (coulées de dacites associées à des brèches et des tufs): sites 19 à 36. Dans la région de Durango, un âge de 52 M.a. a été trouvé pour les andésites qui supportent la série ignimbritique (McDowell et Keizer, 1977). McDowell et Keizer (1977) signalent sur le versant Ouest de la Sierra des andésites tectonisées et altérées. Les formations les plus saines (analyses Tab.1) et ne paraissant pas perturbées par des mouvements tectoniques, ont été recherchées pour l'échantillonnage.

ANALYSES CHIMIQUES - SERIE ANDESITIQUE DE BASE										
Ech.	NORD DE MAZATLAN					EST DE MAZATLAN (MAZATLAN - PUERTO BUENOS AIRES)				
	DM 84	DM 89	DM106	DM114	DM147	DM157	DM239	DM247	DM252	DM257
Site	3	4	7	8	15	30	33	34	35	36
Altitude	110	150	80	130	280	680	1190	1250	1315	1370
SiO ₂	64,20	53,20	60,04	58,79	57,08	54,54	64,07	62,49	70,05	71,87
Al ₂ O ₃	16,33	19,28	16,53	15,71	16,81	16,99	17,48	16,73	15,07	13,43
Fe total	4,53	8,03	6,24	6,12	7,84	8,30	3,07	5,82	3,32	3,51
MnO	0,07	0,12	0,08	0,10	0,12	0,12	0,09	0,12	0,03	0,02
MgO	0,99	2,80	2,25	2,57	3,10	4,36	0,95	1,68	0,70	0,77
CaO	2,32	7,89	4,69	4,66	6,25	7,96	3,06	4,36	1,23	1,39
Na ₂ O	4,32	3,97	3,94	3,88	3,44	3,27	4,34	4,75	3,75	3,31
K ₂ O	3,82	1,64	2,84	2,89	1,93	1,74	4,29	1,83	3,77	2,90
TiO ₂	0,66	1,12	1,07	1,12	1,12	1,19	0,15	0,99	0,65	0,68
P.F.	1,83	0,54	2,05	2,83	1,03	1,26	2,04	0,40	0,82	1,22
Total	99,07	98,59	99,73	98,67	98,72	99,73	99,54	99,47	99,39	99,10

Analyses réalisées au C.R.P.G. Nancy (France)
P.F. : perte au feu.

Tableau 1

Analyses chimiques de la série andésitique de base. Les échantillons DM252 et DM257 correspondent à des rhyolites.

2 - La série ignimbritique supérieure:

La partie supérieure est essentiellement ignimbritique. De l'altitude 1400 jusqu'au village Puerto Buenos Aires (2600 m) affleurent différentes unités reconnues par Waitt (1970): série ignimbritique occidentale (sites 37 à 46). Les formations A à F rencontrées successivement d'Ouest en Est et au fur et à mesure que l'on s'élève dans la série, comprennent principalement des ignimbrites vitreuses (ash flow tuffs) de composition rhyolitique. Elles dépassent fréquemment 60 mètres d'épaisseur; la plus importante, l'unité E, caractérisée par le débit prismatique de ses tufs soudés, atteint 150 mètres. Vers la base de la série, l'unité B se compose de coulées basaltiques accompagnées de tufs: l'intervalle C est représenté par des rhyolites. Un âge moyen de $23,3 \pm 0,3$ M.a. a été obtenu par McDowell et Keizer (1977) pour l'ensemble des séquences A à F (6 datations).

Plus à l'Est, entre Puerto Buenos Aires et El Salto (Fig. 1 et 2), d'autres ignimbrites associées à des rhyolites reposent sur des dômes de rhyolites datés de 26,8 à 29,3 M.a. (McDowell et Clabaugh, 1972; McDowell et Keizer, 1977). Les sites 54 à 61, pris dans les ignimbrites de El Salto (plateau units, "Crystal vitric tuffs", "poorly welded lithic tuffs"; Wahl, 1972), sont contemporains du sommet de la série occidentale (unités E et F: 23-24 M.a.).

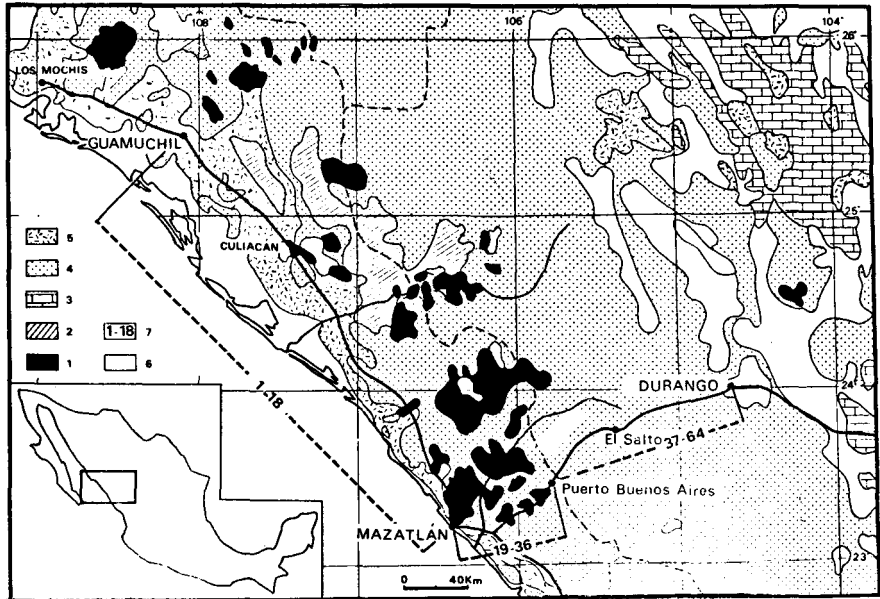


Fig. 1. Carte géologique sommaire de la zone étudiée montrant la répartition spatiale des prélèvements.

- 1: Intrusifs (granodiorites) - 2: Crétacé métamorphique - 3: Crétacé sédimentaire - 4: Terres volcaniques (séries andésitique et ignimbrétique) - 5: Tertiaire supérieur détritique - 6: Quaternaire - 7: Répartition des sites pour étude paléomagnétique.

A l'Est de El Salto (sites 47 à 53; 58-59 et 62-64) entre ≈ 2500 m et ≈ 1900 m, on peut observer une quinzaine d'unités ignimbrites reconnues par Waitt (1970). L'épaisseur totale est de 800 mètres. Swanson *et al.* (1978) et Lyons (1975) ont montré les relations qui existent entre certaines de ces ignimbrites et des calderas. Les âges obtenus (23 datations K-Ar; McDowell et Keizer, 1977) suggèrent que ce volcanisme s'est mis en place de façon continue entre 32 et 28 M.a. Il est recouvert en certains endroits par des basaltes miocènes et quaternaires. Le tableau 2 reproduit quelques analyses caractéristiques des formations ignimbritiques calco-alcalines de la Sierra Madre Occidentale.

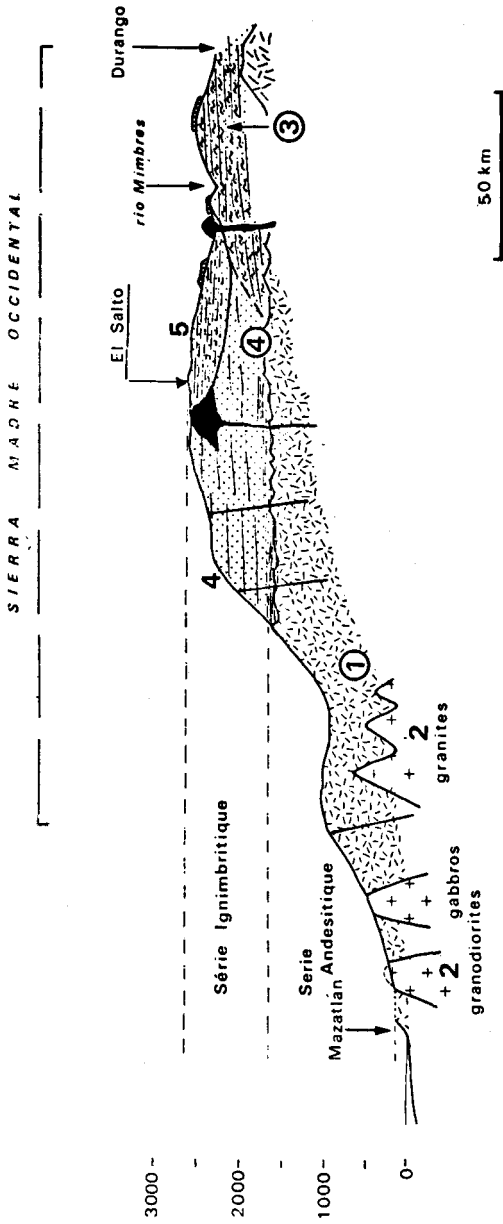


Fig. 2. Coupe schématique de la zone étudiée entre Durango et Mazatlán (voir aussi McDowell et Keizer, 1977). 1: Andésites de base - 2: Complexe batholithique associé aux andésites - 3: Série ignimbritique orientale (Durango-Río Mimbres) - 4: Série ignimbritique occidentale - 5: "plateau units" de El Salto (- 23 M.a.).

ANALYSES CHIMIQUES - SERIE IGIMBRITIQUE					
	Nord de Mazatlan	Partie Occidentale	Partie orientale		
N° Ech.	DM128	DM313	DM 15	DM 40	DM 50
Site	12	45	48	54	55
Altitude	200	2545	2010	2350	2410
SiO ₂	70,12	70,88	75,10	72,97	73,06
Al ₂ O ₃	14,03	14,15	12,29	14,09	13,33
Fe total	2,30	2,43	1,02	1,92	2,04
MnO	0,05	0,09	0,04	0,07	0,05
MgO	0,38	0,14	0,30	0,40	0,38
CaO	0,75	1,05	0,52	traces	0,85
Na ₂ O	3,56	4,42	3,91	4,24	4,28
K ₂ O	4,94	4,31	5,60	4,08	3,96
TiO ₂	0,40	0,46	0,15	0,37	0,33
P.F.	2,24	1,11	0,25	1,19	0,89
Total	98,77	99,04	99,18	99,33	99,17
Analyses réalisées au C.R.P.G. Nancy (France)					
P.F. : perte au feu					

Tableau 2

Quelques analyses de la série ignimbrétique oligo-miocène.

III - DONNEES PALEOMAGNETIQUES

La nature des aimantations est analysée par la technique de désaimantation par champ alternatif.

1 - Echantillonnage:

Sur chaque formation (nappe d'ignimbrite, coulée ou intrusion) un lot de plusieurs échantillons (généralement 5 à 7) est prélevé. Ces échantillons de gros volume (300 à 400 cm³) sont répartis horizontalement et verticalement, de sorte que leur direction moyenne d'aimantation soit représentative du champ pendant le refroidissement: champ instantané pour les coulées minces, champ moyen pour les nappes épaisses. L'orientation est faite en utilisant la technique dite du "chapeau de plâtre" proposée par Thellier (1967a). Le plan horizontal du lieu est matérialisé sur le plâtre par une surface plane définie à l'aide de niveaux. L'orientation par rapport au méridien est déduite de la direction du soleil (Creer et Sanver, 1969) déterminée à l'aide d'un fil à plomb. La direction du Nord magnétique est elle-même indiquée pour éviter les zones à aimantation rémanente isotherme (ARI) intense. Au laboratoire, les échantillons sont inclus dans des cubes de plâtre de 8 cm d'arête.

SERIE ANDESITIQUE DE BASE - NORD DE MAZATLAN											
NATURE	SITE	ALTITUDE	Nc/Np	Pol.	R	K	I	D	α_{95}		
Intrusif Mazatlan	1	0	0/6								
Intrusif	2	170	6/6	-	5,965	145	24	23,2	4,7		
Intrusif	3	110	6/6	-	5,953	106	45,8	352,5	5,6		
Intrusif	4	150	7/7	-	6,518	13	14,4	0,5	14,9		
Andésite (dyke)	5	180	4/5	+	3,953	64	37,6	7,7	8,8		
Andésite	6	180	5/5	-	4,925	53	36,6	22,1	8,6		
Andésite	7	80	5/5	-	4,920	50	28	318,9	8,8		
Andésite	8	130	6/6	-	5,989	495	49,6	314,2	2,6		
Andésite (dyke)	9	120	0/3	+				W			
Andésite	10	90	3/5	-	2,981	111	30,7	33,8	7,7		
Andésite	11	110	4/4	-	3,990	300	45,3	338,3	4		
Tufs rhyolitiques	12	200	6/6	+	5,956	113	26,4	348,3	5,4		
Intrusif San Ignacio	13		0/7	+				W			
Andésite (dyke)	14	80	3/4	+	2,998	1333	46,8	357,3	2,2		
Intrusif	15	280	6/6	+	5,958	118	31,9	5,1	5,3		
Tufs	16	140	5/5	-	4,840	25	3,2	4	12,5		
Andésite	17	110	4/5	+	2,914	23	15,1	6,6	16,8		
Tufs	18	30	5/5	+	4,990	416	29,9	40,9	3,1		
RESULTANTE*					R = 12,904	K = 53,8	I = + 34,4				
					B = 14	$\beta = 11,8$	D = 6,9	$\alpha_{95} = 11,1$			
* La résultante est calculée sur les sites caractérisés par α_{95} inférieur à 15°.											

Tableau 3

Résultats de l'étude paléomagnétique de la série andésitique au Nord de Mazatlán.

- No Nombre d'échantillons prélevés dans le site.
 Nc Nombre d'échantillons retenus dans le calcul après analyse.
 Pol Polarité du champ.
 R Résultante du site.
 K Paramètre de précision dans le site.
 I Inclinaison de la résultante.
 D Déclinaison de la résultante.
 α_{95} Demi-angle au sommet du cône de confiance.
 B Nombre de sites.
 k paramètre de précision moyen dans les sites.
 β Paramètre de précision entre les sites.

l'intérieur d'un solénoïde à axe horizontal. Pour que toutes les aimantations soient attaquées sous un angle favorable, les échantillons sont placés dans une boîte tournant autour de deux axes orthogonaux, l'un est horizontal, l'autre mobile dans un plan vertical. Le spectre des champs coercitifs de chaque site est déterminé en désaimantant par paliers successifs les échantillons. Dans la pratique, la désaimantation est arrêtée lorsque la direction reste constante, en général avant action d'un champ de 50 à 60 mT (500 à 600 oe). Cependant, au moins un échantillon de chaque site a été traité jusqu'à 80 mT, afin de s'assurer de la stabilité de la direction d'aimantation.

SERIE ANDESITIQUE DE BASE : SECTION MAZATLAN-PUERTO DE BUENOS AIRES										
NATURE	SITE	ALTITUDE	Nc/Np	Pol.	R	K	I	D	$\alpha 95$	
Intrusif	19	120/280	0/6	-						
Intrusif	20	200	0/4	?						
Andésite (dyke)	21	200	0/4	+						
Andésite	22	200	5/5	-	4,957	93	-8,6	4,8	6,5	
Intrusif	23	220	0/4	?						
Intrusif	24	220	0/5	?						
Andésite	25	255	5/5	+	4,874	32	27,3	8,6	11	
Andésite	26	310	3/4	+	2,864	15	41,2	290,6	20,8	
Rhyolite	27	370	6/6	+	5,984	305	17	5,6	3,3	
Intrusif (Copala)	28	500	0/6	?						
Intrusif (Copala)	29	580	6/6	+	5,954	108	42	6,6	5,5	
Intrusif	30	680	3/6	+	2,949	39	42,8	21	12,9	
Tufs andésitiques	31	1170	5/5	+	4,963	109	44,8	1,2	6	
Rhyolite	32	1170	4/6	+	3,834	18	23,5	336	16,5	
Dacites	33	1190	6/6	+	5,981	256	12,6	351	3,6	
Andésites	34	1250	6/6	+	5,966	145	58,7	353,3	4,7	
Rhyolites	35	1315	4/6	+	3,930	43	28,9	305,3	10,7	
Rhyolites	36	1370	5/5	+	4,874	32	71	357,8	11,9	
RESULTANTE*	R = 8,908	k = 72,2	I = 35,4	B = 10	$\beta = 9$	D = 357,9				
	D = 357,9	$\alpha 95 = 14,9$								

* La résultante est calculée pour les sites donnant $\alpha 95$ inférieur à 15° .

Tableau 4

Résultats paléomagnétiques de la série andésitique entre Mazatlán et Puerto Buenos-Aires. Explication des indices dans la légende du tableau 3.

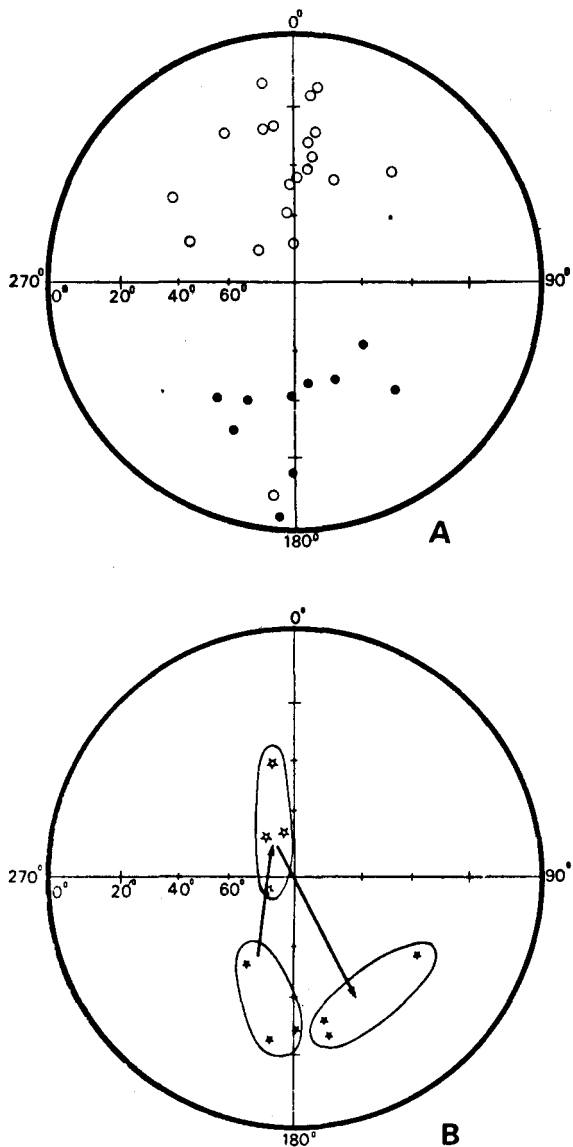


Fig. 4. Directions moyennes d'aimantation obtenues dans les séries andésitiques (a) et ignimbritiques (b) à l'Ouest de Puerto Buenos Aires. Projection stéréographique de l'hémisphère inférieur pour les signes évidés et de l'hémisphère supérieur pour les signes pleins. Les flèches indiquent la succession des niveaux étudiés. Dans la figure 4a on a reporté toutes les directions moyennes calculées y compris celles pour lesquelles $\alpha_{95} > 20^\circ$ à l'exception du site 9.

La recherche des directions d'aimantation caractéristiques des formations est faite en utilisant une méthode adaptée de celle de Zijdeveld (1967) en comparant les courbes normalisées de désaimantation qui traduisent la variation en direction et en intensité des composantes horizontales (Fig. 3a), la covariance des composantes horizontales et verticales (Fig. 3b) et les variations des directions représentées dans une projection stéréographique (Fig. 3c). La nature des aimantations est déduite des courbes donnant la variation de l'intensité d'aimantation normalisée en fonction du champ démagnétisant (Fig. 3d). Lorsqu'une aimantation secondaire (visqueuse ou isotherme) représente plus de 80% de l'aimantation rémanente initiale, l'échantillon n'est pas pris en compte. La direction moyenne dans un site est déterminée par la méthode Fisher (1953). Lorsque α_{95} est supérieur à 20° , seule la polarité est retenue. Les directions résultantes correspondant à plusieurs sites sont déterminées par la méthode développée par Watson et Irving (1957).

REFERENCE	DIRECTION DU CHAMP AU POINT 24 N 106 W	
	I	D
Série de base		
Nord de Mazatlan	+ 34,4	6,9
Est de Mazatlan	+ 35,4	357,9
Résultante	+ 34,9	3,3
Dipôle axial	+ 41,7	0
Pôles moyens d'après Mc ELHINNY		
Crétacé	50,8	331,8
Tertiaire inférieur	45,1	355,3
Tertiaire supérieur	40	357
Pôles moyens d'après VAN DER VOO et FRENCH		
Crétacé inférieur	+ 48	340,9
Crétacé supérieur	+ 46,1	339,2
Eocène Paléocène	+ 47	344,7

Tableau 5

Directions du champ calculées aux points 24°N , 106°W pour divers pôles, comparées à la direction du champ d'après l'étude de la série andésitique.

3 - Mesure et analyse de l'anisotropie de susceptibilité magnétique:

Enfin, la détermination des directions d'aimantations dans les roches intrusives et dans les dépôts ignimbricitiques doit être accompagnée par l'appréciation du rôle de l'anisotropie. C'est pourquoi cette étude est complétée par des mesures systématiques de l'anisotropie de susceptibilité sur chaque site. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux en annexe. La mesure est faite à l'aide d'une ba-

lance de torsion construite par l'Institut de Physique du Globe de Paris. Elle tient compte des aménagements proposés par Sylvain (1976) pour étudier l'anisotropie dans les massifs intrusifs et juger de l'influence possible des phénomènes d'hystérésis rotationnelle.

IV - DISCUSSION DES RESULTATS

1 - *La série andésitique de base: validité des résultats*

Au Nord de Mazatlán, les coulées d'andésites et de dacites présentent généralement une aimantation inverse alors que celle des granites ou des intrusions basiques (dykes) est normale. Entre Durango et Mazatlán, les massifs intrusifs de basse altitude sont souvent porteurs d'ARV. Cela est à mettre en rapport avec l'influence des eaux de circulation agissant en climat tropical, qui entraîne l'altération des minéraux magnétiques. Entre 250 et 1370 m, les matériaux échantillonnés sont caractérisés par une aimantation normale.

La dispersion angulaire obtenue sur l'ensemble de la série de base (Tab. 9) est plus grande que celle due à la variation séculaire telle qu'elle a été observée dans les formations tertiaires et quaternaires par Creer et Sanver (1979), mais du même ordre de celle de formations de la fin du Secondaire et du début du Tertiaire (Wilson, 1959). L'importance de cette dispersion pourrait avoir plusieurs causes:

- *Erreurs de mesure et d'orientation:* dans la méthode employée, les erreurs de mesure et d'échantillonnage, compte tenu de la répartition des prélèvements, ont statistiquement une influence faible, la seule difficulté réside dans l'estimation des actions tectoniques locales.

- *Influence de l'anisotropie de susceptibilité magnétique:* Le pourcentage d'anisotropie est généralement très faible (<1%), tout comme les paramètres de linéation et de foliation (cf. annexe). En outre, l'écart entre la direction des aimantations et celle de la susceptibilité maximale ou minimale est aléatoire. La direction moyenne d'aimantation n'est donc pas influencée par l'anisotropie de susceptibilité magnétique.

2 - *Interprétation de la migration apparente du pôle*

Les produits étudiés sont étagés du Crétacé à l'Eocène moyen. Pour certains auteurs (Urrutia-Fucugauchi et Pal, 1977; Urrutia-Fucugauchi, 1981), la zone occidentale mexicaine a subi ultérieurement un déplacement par rapport au reste de l'Amérique du Nord.

Les directions mesurées sur la série andésitique sont comparées à la direction du champ dû à un dipôle géocentrique axial, et aux directions du champ terrestre au point 24°N, 106°W correspondant à divers pôles moyens calculés pour le Crétacé, le Tertiaire inférieur et le Tertiaire supérieur d'Amérique du Nord par McElhinny (1973) et Van der Voo et French (1974) (Tab. 5 et Fig. 8). La direction moyenne mesurée sur les andésites inférieures est plus proche de celle du champ correspondant au pôle du Tertiaire supérieur que de celles déduites des pôles crétacé ou éocène. On pourrait penser que la majeure partie des formations étudiées date du Tertiaire moyen et supérieur, mais le critère est faible et ne s'accorde pas avec les données radiochronologiques de Henry (1975), d'autant plus qu'un hiatus dans l'activité de la Sierra Madre est probable entre 45 et 32 M.a. (McDowell et Keizer, 1977). En outre, l'inclinaison de la résultante est significativement plus faible que celle attendue pour des formations étagées du Crétacé à l'Eocène. Ces écarts peuvent résulter d'une dérive vers le Nord, avec rotation dextre, de la zone côtière par rapport au reste de la plaque nordaméricaine. Un tel modèle conduit à imaginer l'existence d'accidents actuellement masqués par la couverture ignimbritique, ce qui s'accorde avec l'évolution paléogéographique et structurale proposée par Tardy (1977): jusqu'au Paléocène, la partie occidentale du Mexique était occupée par un système zone en subduction - "continent occidental" - mer marginale (Fig. 7a). Le bassin marginal s'est fermé au Paléocène par serrage et chevauchement de la zone occidentale vers l'Est (Fig. 7b). Outre un léger déplacement vers le Nord, les données paléomagnétiques suggèrent un serrage plus fort au Nord du chevauchement qu'au Sud, entraînant la rotation du continent occidental et de la couverture andésitique.

Par ailleurs, des translations sud-nord de grande ampleur, connues dans le centre du Pacifique (Hammond *et al.*, 1974) ont été postulées par Alvarez (1979) en Californie sur la base de mesures paléomagnétiques, ce qui accrédite l'hypothèse de la dérive d'une partie de la bordure pacifique.

3 - Paléomagnétisme de la série ignimbritique (32-23 M.a.) (Tab. 6)

- Sur le versant oriental dans l'Etat de Durango, entre El Salto et Durango, les formations ont un âge compris entre 32 et 28 M.a. Les aimantations inverses prédominent, seule l'unité 4 et une partie de l'unité 6 présentent une aimantation normale. Les résultats s'accordent ainsi avec ceux de Nairn *et al.* (1975) en les précisant: le passage entre les aimantations inverses de la base (unités 8-10-12) et les niveaux à aimantation normale (unités 4 et 6) se situe à l'intérieur de l'unité 6. Cette série ignimbritique s'est mise en place sur une période couvrant au moins 3 zones de polarité (une zone normale séparant 2 horizons à aimantation inverse). Le site 64, de direction d'aimantation très normale n'a pas été pris en compte dans la moyenne. On observe une variation systématique et ordonnée de la déclinaison quand on s'élève dans la série.

NATURE	SITE	UNITE	ALT.	Nc/Np	Pol.	R	K	I	D	$\alpha 95$
PARTIE OCCIDENTALE ET UNITES DES PLATEAUX (EL SALTO) - AGE MOYEN : 23 M.a.										
Ignimbrite	37		1590	5/5	-	4,975	159	28,7	35,9	5,6
Ignimbrite	38	A*	1940	5/5	-	4,966	119	48,6	28,6	5,7
Ignimbrite	39	A*	1950	5/6	-	5,928	69	24,1	8,5	6,9
Ignimbrite	40	B*	1950	8/8	+	7,009	7	66,8	327,8	18,6
Ignimbrite	41	C*	2030	6/7	+	5,805	26	74,6	245,9	11,3
Ignimbrite	42	D* km 168	2355	6/6	+	5,894	47	40,1	348,7	8,3
Ignimbrite	43	C* km 166,5	2400	5/5	+	4,926	54	68,2	349,8	8,5
Ignimbrite	44	E* km 166	2440	7/7	-	6,821	33	31,1	348	9,1
Ignimbrite	45	F	2545	4/5	-	3,927	41	30,2	302,4	10,9
Ignimbrite	46	F* km 158	2630	0/5	-					
Ignimbrite	54	km 89	2350	6/6	-	4,719	16	26	355	15,7
Ignimbrite	55	km 100	2410	5/5	-	4,977	171	30,5	347,7	4,8
Ignimbrite	56	El Salto km 99	2445	0/5	-					
Ignimbrite	57	El Salto km 99	2440	5/5	-	4,682	12	19,2	322	17,7
Ignimbrite	60	El Salto	2450	4/4	-	3,978	138	22,5	261,2	6
Ignimbrite	61	El Salto	2455	4/4	-	3,962	80	21,5	298,4	7,8
PARTIE ORIENTALE : IGNIMBRITES D'AGE 28-32 M.a. ET AUTRES FORMATIONS										
Ignimbrite	47	- km 25	2035	0/6	-					
Rhyolite	48	ρ intru. km 30	2010	5/6	-	4,921	51	18,6	355,6	8,8
Ignimbrite	49	km 34	2170	6/6	-	5,961	127	10,3	337,8	5
Rhyolite	50	ρ intru. km 39	2260	4/5	-	3,965	86	38,8	332	7,5
Ignimbrite	51	Rio mimbres unité 8	2240	6/6	-	5,944	90	6,6	328,4	6
Ignimbrite	52	Rio mimbres unité 8*	2300	6/6	-	5,982	278	23,2	319,6	3,4
Ignimbrite	53	Rio mimbres unité 3	2395	5/6	-	4,994	718	6	328,8	2,3
Ignimbrite	58	Unité 4* Novios	2440	6/6	+	5,951	102	45,2	342,6	5,6
Ignimbrite	59	Unité 6*	2455	4/5	+	3,959	74	55,4	19,7	8,2
Ignimbrite	62	Vitreux 109,5	2540	4/4	-	4,967	120	34,2	307,6	5,7
Ignimbrite	63	Unité 6 km 54	2520	6/6	-	5,725	18	12,5	329,5	13,4
Rhyolite	64	km 21	2600	6/6	-	5,868	38	-38,6	287,1	9,3

Tableau 6

Résultats globaux de l'étude paléomagnétique.

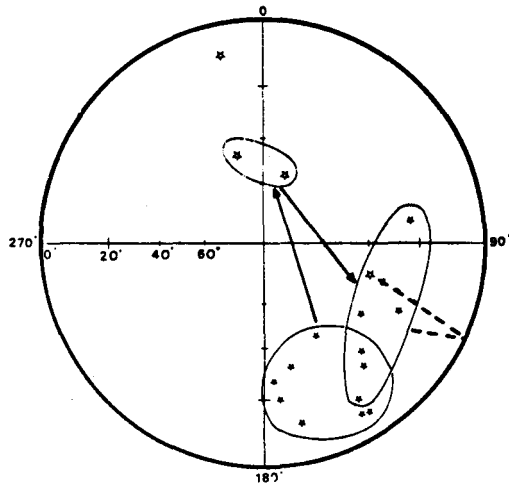


Fig. 5. Directions moyennes d'aimantation obtenues sur les ignimbrites entre El Salto et Durango, même légende que dans la figure 4.

- Sur le versant occidental de la Sierra, les formations ignimbritiques A à F datées de 22-23 M.a. s'étagent sur 3 périodes: une période de champ normal encadrée par deux périodes inverses. En fait, la série doit recouvrir au moins cinq périodes de polarité puisque Nairn *et al.* (1975) ont mis en évidence des coulées inverses dans la formation C médiane. En combinant nos résultats et ceux de ces auteurs on a donc successivement:

- Unité A, aimantation inverse
- Unité B, aimantation normale
- Unité C, aimantation inverse et normale
- Unité D, aimantation normale
- Unité E, aimantation inverse
- El Salto ("plateau units"), aimantation inverse
- Unité F, aimantation inverse

Selon McDowell et Keizer (1977) le cycle ignimbritique est probablement continu entre les deux événements principaux 32-28 M.a. (Durango) et 23-21 M.a. (zone occidentale et région de El Salto). Des rhyolites intrusives ont un âge intermédiaire (≈ 27 M.a.). Il est probable que les échantillons analysés ne se raccordant pas à ces deux événements sont inclus dans la période 32-21 M.a.; ils présentent des déclinaisons nord-occidentales tout comme la moyenne calculée sur l'ensemble des ignimbrites (Tab. 7). Ce résultat rejoint ceux de Nairn *et al.* (1975), de Guerrero (1973) et de Urrutia-Fucugauchi et Pal (1977).

La résultante des sites à aimantation normale n'est pas à l'opposé de celle des niveaux à aimantation inverse. Cette divergence est largement atténuée si l'on englobe l'ensemble des résultats disponibles. Ceci montre que l'effet de la variation séculaire est sans doute marqué dans les niveaux de polarité positive, où l'échantillonnage est limité. Par contre, quand celui-ci est plus abondant, comme dans les niveaux à aimantation inverse, cet effet demeure réduit. La moyenne ($33,7^{\circ}$; $335,6^{\circ}$) recouvrant plusieurs millions d'années, peut être considérée comme débarrassée des variations séculaires. Urrutia-Fucugauchi et Pal (1977) trouvent pour des niveaux semblables de l'Etat de Jalisco une direction moyenne $I = 36,2$ et $D = 335,6$.

Les ignimbrites sont donc porteuses d'une aimantation rémanente stable caractérisée par:

- Une dispersion des directions plus importante que celle observée sur les laves du Tertiaire supérieur (Creer et Sanver, 1969). Cette dispersion tient au fait que

Tableau 7

Série de base	I	D	B	R	K	β	δ	δ_0	α_{95}	σ_p	λ_p	δ_p	δ_m
Nord de Mazatlan	(1) + 34,4	6,9	14	12,9039	53,8	11,8	22,8	27,9	11,1	---	---	---	---
Est de Mazatlan	(1) + 35,4	357,9	10	8,9082	72,2	9	27	33	14,9	---	---	---	---
Résultante	(1) + 34,9	3,3	24	21,7672	60,1	11	24,9	30,5	8,8	84,3	41	5,8	10,1
Ignimbrites	(2) + 33,7	335,8	21	18,9343	186,7	9,4	25,6	31,3	10	66,8	154,8	6,5	11,4

(1) Résultante des sites tels que α_{95} inférieur à 15°

(2) Résultante des sites tels que α_{95} inférieur à 15° et sans le site 64

Résultats globaux de l'étude paléomagnétique.

certaines parties des émissions ignimbritiques acquièrent une aimantation qui s'écarte assez fortement de celle du champ géocentrique (Nairn *et al.*, 1976). En aucun cas elle est due à l'anisotropie de susceptibilité qui demeure négligeable, comme dans la série andésitique.

- Une inclinaison plus faible que celle correspondant à un dipôle du Tertiaire supérieur (Tab. 5).

- Une déclinaison qui s'écarte largement de celle du méridien et de celle mesurée sur la série andésitique.

Ces variations ne s'expliquant pas par l'anisotropie de susceptibilité, elles ne peuvent s'interpréter que de deux manières, soit en admettant l'existence de variations amples et de longue durée de la direction du champ géomagnétique à l'Oligocène supérieur et au Miocène inférieur, soit en postulant une rotation sénestre de la zone prélevée après la mise en place des ignimbrites, au Miocène.

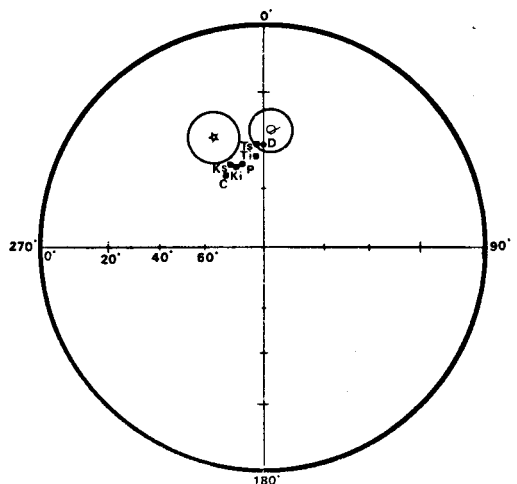


Fig. 6. Comparaison de la direction moyenne de l'aimantation de la série de base (cercle évidé) et de la série ignimbritique (étoile évidée) avec les directions du champ local correspondant à divers pôles. Les cercles pleins correspondent aux pôles calculés par Van der Voo et French pour le Crétacé inférieur (Ki) le Crétacé supérieur (Ks) et l'Eocène (P). Les carrés pleins correspondent aux pôles calculés par McElhinny (1973) pour le Crétacé (C) le Tertiaire inférieur (Ti) et le Tertiaire supérieur (Ts). Le cercle plein (D) correspond à la direction du champ créé par un dipôle axial. Projection stéréographique de l'hémisphère inférieur.

4 - *Interprétation géophysique des directions d'aimantation des ignimbrites: variations de grandes amplitudes et de longues durées du champ:*

Cette hypothèse suppose que la symétrie du champ peut être modifiée par une migration du dipôle géocentrique ou par le développement de la composante non dipolaire, Opdyke et Henry (1969) ont montré que l'analyse de l'inclinaison de l'aimantation des carottes marines constitue un test du caractère dipolaire du champ. Si le passage du pôle caractéristique de la série de base au pôle correspondant aux ignimbrites est lié à une migration du dipôle, cette migration doit se traduire sur le grand cercle passant par les deux paléo-pôles par une variation de l'inclinaison moyenne. Hammond *et al.* (1974) ont étudié l'inclinaison de carottes prélevées dans le Pacifique dans des zones proches de ce grand cercle. L'une d'entre elles (M 70-16), recouvre l'ensemble de la période qui nous préoccupe. Les résultats montrent que la distance du pôle au lieu de prélèvement diminue plusieurs fois entre 17,5 et 27,5 M.a.. La vitesse de sédimentation est cependant trop faible pour juger si ces variations sont caractéristiques. Par contre, dans une seconde carotte (M 70-39), un décalage systématique apparaissant vers 19,5 M.a., dure près de 1 M.a. et peut traduire une migration du pôle. Les travaux de Goldreich et Toomre (1969) complétés par ceux de Fisher (1974) montrent en effet que des mécanismes sont susceptibles d'entraîner des migrations du pôle d'une durée de 1 à 10 M.a.. Selon Irving et Robertson (1969) ces migrations pourraient être corrélées avec des changements d'équilibre de l'écorce accompagnant les orogénèses.

Si de telles migrations du pôle existent, on doit en retrouver des témoins dans d'autres régions de la Plaque Nord-Américaine. Des variations comparables à l'écart de la direction d'aimantation des ignimbrites avec celle du pôle moyen pour le Tertiaire supérieur, ont été mises en évidence sur des formations oligo-miocènes, non seulement dans d'autres Etats du Mexique (Bobier, 1971; Mooser *et al.*, 1974) mais aussi dans l'Ouest des Etats-Unis au Nevada (Diehl *et al.*, 1974), dans l'Utah (Nairn *et al.*, 1976) ou dans l'Oregon (Clark, 1969). Il est difficile d'admettre que, dans tous les cas, les directions correspondent à des époques de transition. Ces variations semblent caractéristiques de périodes assez longues. Selon Clark (1969) les changements de direction seraient dus soit à l'existence d'une composante non dipolaire relativement importante, soit à une excursion particulière du dipôle géocentrique entre 30 et 20 M.a..

Nous confrontons cette hypothèse d'ordre purement géophysique à une interprétation impliquant des mouvements tectoniques:

5 - Interprétation tectonique alternative des directions d'aimantation de la série ignimbritique

Les paléo-pôles obtenus sur diverses formations volcaniques datant du Tertiaire moyen (22-37 M.a.) de l'Ouest des Etats-Unis (Utah, Nevada, Californie, Orégon; Gromme *et al.*, 1971) ne sont pas éloignés de ceux obtenus par Gose (1970) sur des ignimbrites miocènes du Nevada, ou du pôle moyen calculé par McElhinny (1973) pour le Tertiaire supérieur. La position moyenne de ces pôles est caractéristique de l'Amérique du Nord pour l'Oligocène supérieur et le Miocène.

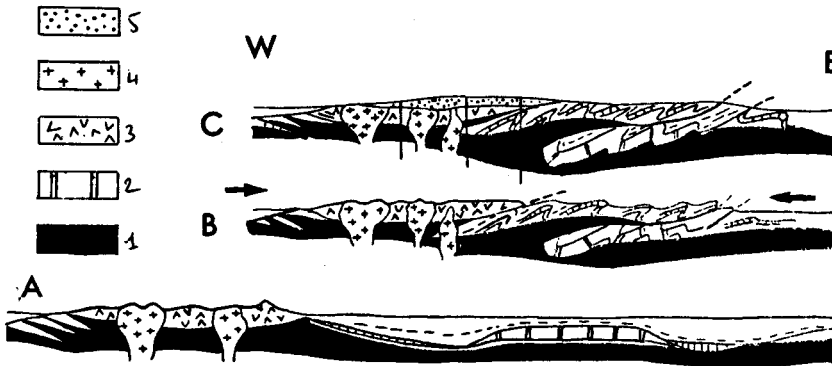


Fig. 7. Coupes schématiques situant l'évolution géologique et paléogéographique du Mexique au Cénomanien supérieur (A), au Paléocène (B) et au Miocène inférieur (C). 1: Socle - 2: Terrains sédimentaires (calcaires) - 3: Série andésitique: volcanisme d'arc paléocène et andésites du Tertiaire inférieur - 4: Complexe batholitique - 5: Série ignimbritique. Coupes d'après Tardy (1977) très simplifié.

La résultante des directions d'aimantation des ignimbrites de la Sierra Madre Occidentale marque une migration apparente du pôle par rapport à cette position moyenne, qui s'effectue en sens inverse de celle reconnue pour la série andésitique. Dans l'hypothèse impliquant des mouvements tectoniques, une rotation senestre de la zone côtière doit être envisagée, depuis le dépôt des ignimbrites. Si l'on se réfère au modèle de Tardy (1977), les ignimbrites se sont mises en place lors d'une période de relaxation des contraintes tectoniques sur l'ensemble du territoire mexicain (Voir coupe W-E; Fig. 7c). A la latitude de Durango, ceci est confirmé pour le secteur oriental, par la mise en place à l'Oligocène terminal et au Miocène inférieur d'un magmatisme alcalin (Cantagrel et Robin, 1979) caractéristique de la progression vers le Sud d'un *rifting* prolongeant le rift du Rio Grande (Robin 1976, 1981). Un volcanisme de distension caractérise le secteur oriental entre 20 et 28 M.a. (période d'épanchement des ignimbrites), puis au Miocène terminal. Les basaltes de la région de Durango, datés de 11-12 M.a. (Mc Dowell et Keizer, 1977) caractérisent aussi une tectonique distensive dans la zone centrale.

FORMATIONS ETUDIEES	AGE en M.A.	POSITION DU POLE		δp	δm	$\alpha 95$	DIRECTION D'AIMANTATION AU POINT 24° N, 106° W	
		Lat. N	Long. E				I	D
Spanish Peaks, Colorado (LARSON et STRANGWAY, 1969)	Oligo-Miocene	81	211	16	20	---	49,5	352,9
Mary's Peak sill, Oregon (CLARK, 1969)	29,7±1,2	63,0	196,0	6	10	---	55,0	331,7
Formations volcaniques Ouest U.S.A. (Utah, Nevada, Californie, Oregon)	22-37	78,0	146,0	--	--	5,8	35,8	347,9
Ignimbrites du Nevada (GOSE, 1970)	17,8-29,7	80,6	109,4	--	--	12,7	30,2	354,3
		32,9	163,6	--	--	---	23,8	300,7
		48,5	173,0	--	--	---	41,0	314,5
San Juan Colorado (DIEHL et al., 1974)	25-35	85,6	298	8	11	---	45,7	3,4
Ignimbrites, Etat de Jalisco (URRUTIA et PAL, 1977)	Oligocène supérieur et Miocène	68	181	6,95	11,90	---	36,2	335,6
Résultante série andésitique Sierra Madre Occidentale	45 M.A.	84,3	41	5,8	10,1	---	34,9	3,3
Résultante série ignimbritique, d'après nos résultats d'après GUERRERO (1973)	32-23	66,8	154,8	6,5	11,4	---	33,7	335,8
		66,6	155,6	---	---	---	---	---

Tableau 8

Comparaison des positions de divers pôles oligo-miocènes obtenus dans la littérature avec nos résultats paléomagnétiques.

Selon Tardy (1977), une dernière phase compressive, génératrice d'importants plis de fond d'orientation NNW-SSE a eu lieu au Miocène. Les mouvements déportant les directions d'aimantation vers le Nord-Ouest peuvent être envisagés pendant cette phase; leur existence impliquerait que la rotation dextre subie par la série andésitique de base a été plus ample qu'elle n'apparaît actuellement (Fig. 8). Le tableau 9 permet d'estimer ces déplacements par rapport au Nord géographique: la zone a subi depuis le Miocène inférieur, une migration de 5,6° vers le Nord et une rotation sénestre de 24,2°. Depuis le Crétacé, la migration suivant le méridien est de 5° vers le Nord et la rotation de 3,3° dans le sens horaire. On peut donc considérer qu'il n'y a pas eu de déplacement vers le Nord entre le Crétacé et l'Oligocène supérieur. D'autre part, on est conduit à admettre qu'une rotation dextre de 27,5° est intervenue au Paléogène inférieur. La rotation paléocène peut aussi être estimée par rapport au continent "stable" américain. Au point 24° N - 106° W, elle est égale à la déviation entre la déclinaison d'aimantation des ignimbrites et celle cor-

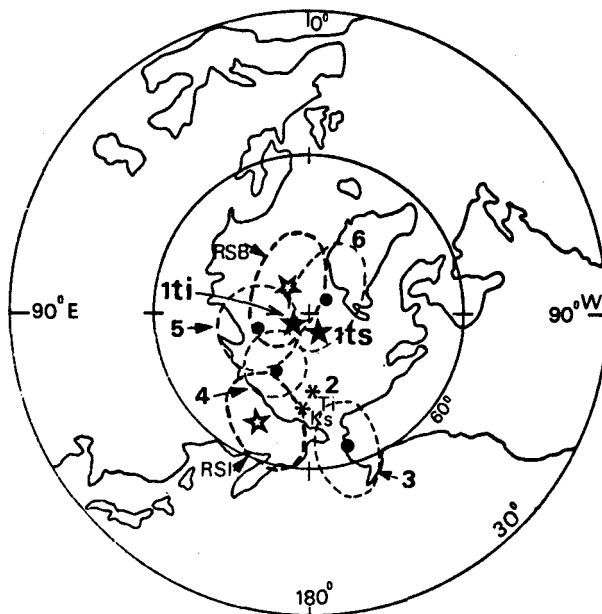


Fig. 8. Positions géographiques des pôles géomagnétiques virtuels calculés pour diverses formations oligocènes et miocènes d'Amérique du Nord et des pôles moyens RSB: Pôle correspondant à la résultante des ignimbrites. Projection stéréographique à surface conservée de la partie de l'hémisphère septentrional comprise entre 30° N et 90° N. Les pôles calculés par McElhinny (1973) pour le Tertiaire inférieur (1, Ti) et le Tertiaire supérieur (1, Ts) sont représentés par des étoiles pleines. Les pôles calculés par Van der Voo et French (1974), pour le Crétacé supérieur (2, Ks) et l'Eocène (2, Ti) sont représentés par des astérisques. 3: Clark, 1969 (Oligocène supérieur) - 4: Gromme et McKee, 1971 (Tertiaire moyen) - 5: Gose, 1970 (Ignimbrites miocènes du Nevada) - 6: Diehl *et al.*, 1974 (Oligocène, San Juan Mountains, Colorado).

respondant à un pôle moyen pour le Tertiaire supérieur en Amérique du Nord (d'après McElhinny, 1973), plus la déviation entre la déclinaison du groupe andésitique et celle de l'aimantation correspondant à un pôle paléocène (pôle moyen entre les résultats de McElhinny, 1973 et Van der Voo et French, 1974). La somme de ces déviations suppose une rotation dextre de plus de 40° (-41°). Un angle aussi grand ne peut s'appliquer à l'ensemble de la côte nord-ouest du Mexique; il suggère une fragmentation du "continent-occidental" pendant la fermeture et des réajustements de blocs, à petite ou moyenne échelle, en réponse à une tectonique de plus grande ampleur (décrochements vers le Nord de la bordure pacifique signalés plus haut ?).

	Direction d'aimantation au point 24°N 106°W		Paléolatitude correspondante	Mouvements relatifs apparents de la zone étudiée	
	I	D		Migrations N-S	Rotations
Dipôle Axial	41,7	0	24	Depuis l'Oligocène:	
Aimantation mesurée (Oligocène sup. Miocène inf.)	33,7	335,8	18,4	5°6 vers le Nord	24°2 Senestre
Aimantation crétacée-paléocène mesurée	34,9	3,3	19	Depuis le Crétacé supérieur:	
				5°0 vers le Nord	3°3 dextre

Tableau 9

Estimation des mouvements par rapport au pôle actuel géographique.

On peut aussi imaginer une relation avec l'évolution géodynamique de la région depuis le Miocène: la subduction de la plaque de Cocos s'effectue actuellement avec un mouvement de rotation vers le Nord-Est (Truchan et Larson, 1973; Menard, 1978). Or, on sait que la situation du pôle de rotation (pivot) entre la plaque océanique et le continent américain a varié lors d'un nouvel agencement des plaques intervenu au Miocène terminal et au Pliocène inférieur (Lynn et Lewis, 1976). Le

ANISOTROPIE DES ECHANTILLONS DE LA SERIE ANDESITIQUE DE BASE AU NORD-DE MAZATLAN

RE		RS		KM		KI		Km		K 10 ⁻⁴		L		F					
1	2	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D				
2 DN076	-21,5	+205,5	-24	203,2	4,7	0,083	-38,9	102,2	6	0,083	+49,6	87,2	0,083	0,18	0,0010	0,0016	1,68		
3 DN082	-48	+172,5	-45	172,5	5,6	0,910	-24,8	23,6	6	0,909	+63,7	43,7	0,909	0,20	0,0013	0,0015	1,16		
4 DN088	-9	+158	-14,4	180,5	14,9	0,021	+61,8	223,7	7	0,021	+18	351	0,021	0,100	0,0008	0,0004	0,54		
5 DN098	+37	+13	+37,6	7,7	8,8	17,2	+76,9	359,2	17,1	-6,5	+59,8	17,1	+11,3	148,5	17,1	0,21	0,0016	0,0010	0,64
6 DN103	-27	+198	-36,6	202,1	8,6	3,30	+81,3	331,8	3,30	+4,8	94,6	3,29	-7,3	5,2	3,30	0,20	0,0014	0,0012	0,91
7 DN104	-30,5	+139,5	-28	138,5	8,8	2,52	-1	26	2,52	+36,7	115,3	2,51	53,3	297,3	2,52	0,22	0,0016	0,0014	0,87
8 DN110	-51	+132,5	-49,6	134,2	2,6	1,34	+45,9	33,8	1,34	+15,8	140,8	1,34	-39,8	64,5	1,34	0,21	0,0012	0,0017	1,41
10 DN119	-34	+217,5	-30,7	213,8	7,7	1,19	+15,6	350,5	1,18	+70,5	208,3	1,18	11,3	83,7	1,18	0,86	0,0076	0,0019	0,25
11 DN124	-40,5	+159,5	-45,3	158,3	4	0,638	+33	8,6	0,637	+3,3	276,5	0,637	+56,8	181,5	0,637	0,0003	0,0002	0,87	
12 DN128	+27	+335	+26,4	348,3	5,4	0,376	-2,4	341,4	0,375	-3,5	251,3	0,370	+85,7	286	0,374	1,56	0,0144	0,0025	0,17
13 DN139	+16,5	? 7,5	ARK(?)	? 7,5	5,31	+45,3	48,1	5,29	-24,4	110,8	5,25	-34,7	+2,5	5,28	0,99	0,0080	0,0038	0,47	
14 DN141	+48	359,5	+46,8	357,3	2,2	0,680	-35,9	154,8	0,679	+49,5	122,4	0,677	-16,4	52,5	0,678	0,44	0,0034	0,0019	0,56
15 DN150	+38	+4,5	+31,9	+5,1	5,3	12,2	+21,7	46	12,1	+37,6	153,8	12,1	+44,6	293	12,1	0,56	0,0033	0,0047	1,41
16 DN151	+5	203,5	-3,2	18,4	12,5	0,641	+47,7	207,9	0,640	-4,3	122,6	0,639	+42	36,5	0,640	0,40	0,0029	0,0023	0,78
18 DN161	+34	+41	+29,9	+40,9	3,1	0,230	-43,5	103,5	0,230	+46,5	99	0,230	-2,3	371,3	0,230	0,15	0,0010	0,0011	1,11

ANISOTROPIE DES ECHANTILLONS DE LA SERIE ANDESITIQUE DE BASE ENTRE MAZATLAN ET PUERTO BUENOS AIRES																			
19 DN172	-34	169	-41,9	180,8	8,6	0,505	+80,3	359,1	0,501	-9,3	341,9	0,498	-2,8	72,3	0,501	1,32	0,0094	0,0077	0,82
21 DN180	+14	119,5	+56,7	311,3	21,5	20,8	-19,1	174,4	20,8	+63,4	220,8	20,8	-17,9	270,8	20,8	0,42	0,0034	0,0016	0,46
22 DN181	+10,5	177	+8,6	184,8	6,5	0,099	+6,3	113,9	0,098	-7,6	24,7	0,098	+80,1	344,8	0,098	0,71	0,0062	0,0018	0,29
26 DN200	+45	298,5	+41,2	290,5	20,8	0,155	+67,1	111,7	0,155	-21,6	131,9	0,155	-7,2	39	0,155	0,099	0,0008	0,0003	0,38
27 DN204	+17	+2,5	+17	5,6	3,3	0,088	-32,3	11,2	0,088	-14,5	110,6	0,088	+53,8	41,3	0,088	0,19	0,0012	0,0015	1,20
29 DN220	+49,5	+4	+42	6,6	5,5	3,23	+23,2	71,8	3,20	+2,7	340,6	3,19	+66,7	244,3	3,21	1,27	0,0083	0,0088	1,06
30 DN227	+45	+4	+42,8	21	12,9	1,20	-4,1	340,2	1,19	-8,2	70,8	1,19	+80,8	43,6	1,19	0,34	0,0023	0,0021	0,93
31 DN228	+47	349	+44,8	1,2	6	2,14	-11,1	293,3	2,14	+4,3	22,5	2,13	+78,1	271,7	2,13	0,52	0,0048	0,0009	0,19
33 DN241	+10	351,5	+12,6	351	3,6	0,087	-20,9	18,7	0,087	+48	313,8	0,087	+34,5	93,5	0,087	0,16	0,0013	0,0006	0,48
34 DN246	+64,5	2,5	+58,7	353,3	4,7	0,134	-25,1	144,9	0,133	-6,9	51,6	0,133	+63,9	127,4	0,133	0,47	0,0039	0,0014	0,36
36 DN258	+65	+13	+71	357,8	11,1	0,981	-2,8	100,5	0,980	+16,1	11,3	0,978	+73,6	181,1	0,980	0,31	0,0027	0,0007	0,25

Tableaux 10 et 11 de l'annexe : Mesures de l'anisotropie de susceptibilité magnétique.
 1 : Numéro de site - 2 : Numéro échantillon - RE : Direction de l'ATR de l'échantillon (I inclinaison, D déclinaison) - RS : Direction de la direction des ATR du site (I inclinaison, D déclinaison) - KM, KI, Km : paramètres de la susceptibilité maximale (KM), intermédiaire (KI) et minimale (Km) de l'échantillon - K : Intensité exprimée en 10⁻⁴ uemcgs (I inclinaison, D déclinaison) - |K| : Susceptibilité moyenne (10⁻⁴ uemcgs) - % : Pourcentage d'anisotropie de susceptibilité - L : Linéation - F : Foliation - $\frac{F}{L}$: Facteur de qualité.

pivot s'est déporté vers le Sud pour se situer vers 40° N, 110° W, se rapprochant ainsi de la zone de convergence entre les deux plaques. La subduction, d'abord dirigée de l'Ouest vers l'Est, est devenue SW-NE (Minster et Jordan, 1978; Menard, 1978). Cette déviation de la convergence de la plaque océanique vers le Nord-Est a pu contribuer dans des temps récents au léger déplacement sénestre de la zone côtière du Sud-Ouest mexicain, ce qui rejoindrait les données de Urrutia-Fucugauchi et Pal (1977) sur des roches du Miocène et du Pliocène inférieur de l'Etat de Jalisco. Dans cette hypothèse, la connaissance des directions d'aimantation des formations du Nord de la Sierra (Etats de Chihuahua et de Sonora) sera d'une grande utilité pour définir si le mouvement sénestre implique toute la zone côtière pacifique ou seulement la moitié sud de celle-ci (au Sud de Culiacán). Les résultats paléomagnétiques de Urrutia-Fucugauchi (1981) sur des formations de l'Etat de Chihuahua apportent un premier élément de réponse à cette question et suggèrent que des rotations de blocs se sont produits sur toute l'étendue de la Sierra.

V - CONCLUSIONS

Les résultats paléomagnétiques obtenus sur l'ensemble des formations de la Sierra Madre Occidentale dans les Etats de Sinaloa et de Durango font apparaître deux pôles moyens, nettement différents.

1) Aux formations andésitiques de base (± 100 à ± 45 M.a.) dont la direction moyenne d'aimantation est $I = 34,9$, $D = 3,3$, correspond un pôle situé au point $84,3$ N, 41 E. L'intégration des données sur un temps très long rend cette position caractéristique, ce qui permet d'expliquer le pôle apparent par un léger déplacement vers le Nord et une rotation dextre de la zone côtière depuis la mise en place de la série andésitique. Ces mouvements s'accordent avec la fermeture du Paléocène-Eocène inférieur du système d'arc (domaine océanique-continent occidental bassin marginal) existant dans l'Ouest mexicain au Crétacé. Les données paléomagnétiques suggèrent un serrage plus important au Nord du Mexique qu'au Sud.

2) La couverture rhyolitique (ignimbrites; 32-21 M.a.), qui s'étend sur au moins sept périodes de polarité, est caractérisée par une direction moyenne d'aimantation $I = 33,7$, $D = 335,8$ et d'un pôle situé au point $66,8$ N; $154,8$ E. Cette position, nettement divergente des pôles moyens du Tertiaire supérieur obtenus pour le continent américain, montre une migration apparente à l'opposé de celle reconnue par l'étude de la série andésitique. Deux hypothèses peuvent être envisagées: - a) L'apparition de variations de la direction du champ géomagnétique, de grandes amplitudes et de longues durées, entre 32 et 21 M.a., et - b) des mouvements tectoniques produisant une rotation sénestre (anti-horaire) de la zone étudiée depuis la mise en place des ignimbrites. Une phase tectonique compressive miocène, le nouvel agence-

ment dans la disposition et les mouvements relatifs des plaques intervenu depuis le Miocène supérieur dans le Sud-Ouest mexicain, ainsi que d'autres résultats paléomagnétiques obtenus dans les Etats de Jalisco et de Chihuahua plaident plutôt en faveur de la seconde hypothèse.

REMERCIEMENTS

Les prélèvements ont eu lieu en 1972 et 1973, dans le cadre d'un programme de coopération avec l'Institut de Géologie de l'Université Nationale Autonome de Mexico. Nous tenons à remercier Monsieur L'Ingénieur D. A. Córdoba, alors Directeur de cet Institut, pour l'aide matérielle apportée dans la réalisation des campagnes, partiellement financées par le C. N. R. S. Les analyses chimiques et les mesures de l'anisotropie ont été financées sur des crédits de l'A. T. P. Géodynamique. Nous remercions R. Van der Voo et A. E. M. Nairns d'avoir relu et critiqué un premier manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ, W., 1979. in Livret guide excursion, Société Géologique de France en Californie. Septembre 1979.
- BOBIER, C., 1971. Contribution du paléomagnétisme à l'étude géodynamique des volcans du Massif Central français, d'Algérie Nord-Orientale et du Mexique. *Thèse Doct. d'Etat*, Université Paris VI, Paris, 659 p.
- BOBIER, C., 1973-1974. La signification de l'aimantation rémanente des laves de la "série des ignimbrites inférieures". Conséquences pour l'étude de la rotation du bloc Corso-Sarde durant le Tertiaire. Cagliari, Juillet 1973. *Paleogeografia del Terziario Sardo nell'ambito del Mediterraneo Occidentale*. Suppl. ai "Rendiconti del seminario della Facolta di Science dell'Universita di Cagliari." A. Pemesano Cherchi Editeur, 1974, 35-56.
- BOBIER, C. et C. ROBIN, 1975. Paléomagnétisme de la cordillère andésitique de Durango à Mazatlán (Mexique). *3ème Réunion annuelle des Sciences de la Terre*, Montpellier, Avril 1975, p. 401.
- BONNEAU, M., 1971. Una nueva area Cretácica fosilífera en el Estado de Sinaloa, *Soc. Geol. Mex. Bol.*, 32, 159-167.
- CLARK, H. C., 1969. Remanent magnetization, cooling history, and paleomagnetic record of the Marys Peak sill, Oregon, *J. Geophys. Res.*, 74, 3143-3160.
- CANTAGREL, J. M. et C. ROBIN, 1979. K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks. Relations between the andesitic and the alkaline provinces. *J. Volc. Geother. Res.*, 5, 99-114.

- COULON, C., A. DEMANT et C. BOBIER, 1974. Contribution du paléomagnétisme à l'étude des séries volcaniques cénozoïques et quaternaires de Sardaigne Nord Occidentale. Le problème de la dérive de la Sardaigne. *Tectonophysics*, 22, 59-82.
- CREER, K. M. et M. SANVER, 1969. Secular variations of the geomagnetic field in Quaternary and late Tertiary. *Palaeogeophysics*, 91-100.
- DIEHL, J. F., M. E. BECK et P. W. LIPMAN, 1974. Paleomagnetism and magnetic polarity zonation in some Oligocene volcanic rocks of the San Juan Mountains, South Western Colorado. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 37, 323-332.
- FISHER, D., 1974. Some more remarks on polar wandering. *J. Geophys. Res.*, 79, 26, 4041-4045.
- FISHER, R. A., 1953. Dispersion on a sphere. Proc. Roy. Soc. London, sér. A, 217, 295-305.
- FREDRIKSON, G., 1974. Geology of the Mazatlán area, Sinaloa, Western Mexico. Ph D-Dissert. Austin, Univ. of Texas at Austin, 90 p.
- GOLDREICH, P. et A. TOOMRE, 1969. Some remarks on polar wandering. *J. Geophys. Res.*, 74, 2555-2579.
- GOSE, W. A., 1970. Palaeomagnetic studies of Miocene ignimbrites from Nevada. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 20, 241-252.
- GROMME, C. S. et E. H. MCKEE, 1971. Mid-Tertiary paleomagnetic pole from volcanic rocks in the Western United States (abstract). *Trans. Am. Geophys. Un.*, 52, p. 187.
- GUERRERO, J., 1973. Paleomagnetismo y relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en ignimbritas del área Tepalcates-Navíos, Durango. *Reunión Anual Unión Geofís. Mexicana Progr.* 1973, 33-34.
- HAMMOND, S. R., F. THEYER et G. H. SUTTON, 1974. Paleomagnetic evidence of northward movement of the Pacific plate in deep sea cores from the central Pacific Basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 22, 1, 22-28.
- HENRY, C. D., 1975. Geology and geochronology of the granitic batholithic complex-Sinaloa Mexico Ph. D-Dissert Austin, Univ. of Texas at Austin, 158 p.
- HENRY, C. D. et G. FREDRIKSON, 1972. Edades de intrusiones en Sinaloa, Mexico. IIa Convención Nac. Soc. Geol. Mex. Resúmenes, 155-157.
- IRVING, E. et W. A. ROBERTSON, 1969. Test for polar wandering and some possible implications. *J. Geophys. Res.*, 74-4, 1026-1036.
- LARSON, E. E. et STRANGWAY, D. W., 1969. Magnetization of the Spanish Peaks dike swarm, Colorado and Shiprock dike New Mexico. *J. Geophys. Res.*, 74, 1505-1514.
- LYNN, W. S. et B. I. R. LEWIS, 1976. Tectonic evolution of the northern Cocos plate. *Geology*, 4, 718-722.
- LYONS, J. L., 1975. Volcanogenic iron ore of Cerro del Mercado and its setting within the Chapuderos Caldera. Durango, Mexico. M. A. Thesis Austin, Univ. of Texas at Austin, 119 p.

- McDOWELL, F. W. et S. E. CLABAUGH, 1972. Edades potasio-argón de rocas volcánicas en la Sierra Madre Occidental, al noreste de Mazatlán. Mem. Soc. Geol. Mex. IIa Convención, Mazatlán, 1972, 182-184.
- McDOWELL, F. W. et S. E. CLABAUGH, 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of Western Mexico. *Geol. Soc. Am. Sp. paper* 180, 113-123.
- McDOWELL, F. W. et R. P. KEIZER, 1977. Timing of Mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, 1479-1487.
- McELHINNY, M. W., 1973. Palaeomagnetism and plate tectonics. 358 p. Cambridge University Press.
- MENARD, H. W., 1978. Fragmentation of the Farallon plate by pivoting subduction. *J. of Geol.*, 86, 1, 99-110.
- MINSTER, J. B. et T. H. JORDAN, 1978. Present day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 83, 11, 5331-5354.
- MOOSER, F., A. E. M. NAIRN et J. F. W. NEGENDANK, 1974. Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VIII - A Palaeomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico. *Geol. Rundschau*, 63-2, 451-483.
- NAIRN, A. E. M., J. F. W. NEGENDANK, H. C. NOLTIMIER et J. J. SCHMITT, 1975. Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks. X: The ignimbrites and lava units West of Durango (Mexico). *Neues Jb. Geol. Palaeont. Mh*, 11, 664-678.
- NAIRN, A. E. M., P. D. ROWLEY et J. J. ANDERSON, 1976. Paleomagnetism of certain tertiary volcanic units in southwestern Utah. *Geol. Soc. Am. Sp. paper*, 160.
- OPDYKE, N. D. et K. W. HENRY, 1969. A test of the dipole hypothesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 6, 139-151.
- ROBIN, C., 1976. Présence simultanée de magmatismes de significations tectoniques opposées dans l'Est du Mexique. *Bull. Soc. Geol. France*, (7) t.XVIII, 6, 1617-1625.
- ROBIN, C., 1981. Relations volcanologie-magmatologie-géodynamique: application au passage entre volcanismes alcalin et andésitique dans le Sud Mexicain. *Thèse Doct. d'Etat*, Univ. de Clermont-Ferrand, publ. Annales Sc. Univ. Clermont 1982, 70, fasc.31, 503 p.
- SWANSON, E. R., R. P. KEIZER, J. I. LYONS et S. E. CLABAUGH, 1978. Tertiary volcanism and caldera development near Durango City, Sierra Madre Occidental, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, p. 1000-1012.
- SYLVAIN, J. D., 1976. Déterminations expérimentales et traitements mathématiques de quelques propriétés magnétiques des roches. Applications au Massif Intrusif de Herbillion-Chetaïbi (Algérie du Nord). *Thèse de 3ème Cycle*, Université de Nice.

- TARDY, M., 1977. Essai sur la reconstitution de l'évolution paléogéographique et structurale de la partie septentrionale du Mexique au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque. *Bull. Soc. Géol. France*, (7), t. XIX, n° 6, 1297-1308.
- TARDY, M., 1980. Contribution à l'étude géologique de la Sierra Madre Occidentale du Mexique. *Thèse Doct. d'Etat*, Univ. P. et M. Curie, Paris, 459 p.
- THELLIER, E., 1967a. Methods of sample collection and orientation for archaeomagnetism. p. 16-20. in *Methods in Palaeomagnetism*. Edited by D. W. Collinson, K. M. Creer et S. K. Runcorn, 609 p., Elsevier Publ. Co., Amsterdam-London-New York.
- THELLIER, E., 1967b. A "big sample" spinner magnetometer. p. 149-154, in *Methods in Palaeomagnetism*. Edited by D. W. Collinson, K. M. Creer et S. K. Runcorn, 609 p., Elsevier Publ. Co., Amsterdam-London-New York.
- TRUCHAN, M. et R. L. LARSON, 1973. Tectonic lineaments on the Cocos plate. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 17, 426-432.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. et S. PAL, 1977. Paleomagnetic data from Tertiary igneous rocks, northeast Jalisco, Mexico. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 36, 202-206.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., 1981. Paleomagnetic evidence for tectonic rotation of northern Mexico and the continuity of the Cordilleran orogenic belt between Nevada and Chihuahua. *Geology*, 9, 178-183.
- VAN DER VOO, R. et R. B. FRENCH, 1974. Apparent polar wandering for the Atlantic bordering continents: late Carboniferous to Eocene. *Earth Sci. Rev.*, 10, 99-109.
- WAHL, D. E., 1972. Geologic map of the El Salto area, Durango-Mazatlán Highway, Mexico. in *Geologic road log Durango Mazatlán* by S. E. Claubaugh. II Conv. Nac. Soc. Geol. Mex. Mem., 80-96.
- WAITT, R. B., 1970. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental between Durango and Mazatlán, Mexico. M. A. Thesis Austin, Univ. of Texas at Austin, 133 p.
- WATSON, G. S. et E. IRVING, 1957. Statistical methods in rock magnetism *Mon. Not. Roy. Astr. Soc. Geophys. Supp.* 7, 289-300.
- WILSON, R. L., 1959. Remanent magnetism of late secondary and early tertiary British rocks. *Phil. Mag.*, 4, 750-755.
- ZIJDERVELD, J. D. A., 1967. A. C. Demagnetization of rocks. p. 254-286 in *Methods in Paleomagnetism*, 609 p., Edited by D. W. Collinson, K. M. Creer et S. K. Runcorn, Elsevier Publ. Co., Amsterdam-London-New York.

(Reçu: 6 Janvier, 1982)

(Accepté: 19 Sept., 1983)