

# Hypothèse d'une ample rotation horaire tardi-varisque du bloc Maures-Estérel-Corse-Sardaigne.

Données paléomagnétiques nouvelles sur le bassin du Plan-de-la-Tour (Maures, Provence) et synthèses des données antérieures\*

Jean-Bernard EDEL (1)

*Hypothesis for the Late Variscan clockwise rotation of the Maures-Estérel-Corsica-Sardinia block. New paleomagnetic data from the Plan-de-la-Tour basin (Maures, Provence) and review of the previous data*

Géologie de la France, n° 1, 2000, pp. 3-19, 7 fig., 3 tabl.

Mots-clés : Paléomagnétisme, Rhyolite, Carbonifère supérieur, Permien, Rotations, Orogénie varisque, Var, Massif Maures, Estérel, Corse, Sardaigne, Bassin du Plan-de-la-Tour.

Key-words: Paleomagnetism, Rhyolite, Late Carboniferous, Permian, Rotations, Variscan Orogeny, Var France, Maures Massif, Estérel, Corsica, Sardinia, Plan-de-la-Tour basin.

## Résumé

Les objectifs de cette étude étaient de mettre en évidence les mouvements tardi-varisques du bloc Maures-Estérel-Corse-Sardaigne (MECS) et de comprendre pourquoi, au Permien supérieur, la partie orientale de la zone interne des Variscides se scinde en deux branches, l'une se dirigeant vers le Massif de Bohême et la seconde bifurquant vers le sud à travers les Maures-Estérel, la Corse et la Sardaigne. Des données nouvelles s'avéraient indispensables, en particulier sur le bloc Maures-Estérel pour lequel, seules des données sur le Permien supérieur étaient disponibles. Dans le massif des Maures, le bassin du Plan-de-la-Tour contient une succession de sédiments conglomératiques, des rhyolites puis un nouvel ensemble de conglomérats et grès à passées charbonneuses, ces dernières contenant des fossiles d'âge Westphalien supérieur-Stéphanien inférieur. Une étude préliminaire menée par Zijdeveld (1975) sur des rhyolites de la partie nord-orientale

du bassin a mis en évidence des directions WSW avec des inclinaisons faibles qui divergent fortement par rapport aux directions attendues pour l'Europe stable au Carbonifère supérieur et qu'il convenait d'éclaircir.

Huit sites de rhyolite et un site de conglomérat ont été échantillonnés le long de deux profils qui recoupent le bassin dans sa partie la plus large. Des résultats ont été obtenus sur les deux flancs du bassin, permettant ainsi le test du pli. La désaimantation thermique et la correction tectonique montrent la présence d'aimantations pré/syn-plissement B1 et post-plissement B2 avec des directions respectives 255°/-5° et 254°/-7° quasi identiques (PGV : 14°N/105°E). Ces aimantations présentent les mêmes propriétés caractéristiques de la magnétite, de sorte que les aimantations B1 sont suspectées d'être également des réaimantations. Le phénomène de réaimantation est donc contemporain du plissement qui a eu lieu entre 300 et 280 Ma, probablement aux

alentours de 290 Ma. En plus des aimantations B dominantes, ont été isolées de rares aimantations A1 de direction 217°/3° (PGV : 33°N/139°E) et des aimantations A0 de direction 198°/4° (PGV : 42°/162°), toutes deux interprétées comme étant des réaimantations plus tardives. Le passage des directions B aux directions A1, puis A0 implique une rotation horaire du bassin et probablement de l'ensemble des Maures au cours du Permien inférieur.

Les nouveaux résultats sur les Maures apportent un nouvel éclairage sur la rotation tardi-varisque du bloc corso-sarde mise en évidence antérieurement (Edel et al., 1981). Si les hypothèses suivantes s'avèrent exactes 1) la rotation horaire du bassin du Plan-de-la-Tour est extrapolable à l'ensemble du bloc Maures-Estérel, 2) les zonations métamorphiques, magmatiques et tectoniques du bloc Maures-Estérel et du bloc corso-sarde étaient continues au Carbonifère supérieur, 3) les aimantations dans les volcanites du Carbonifère supérieur -

\* Manuscrit reçu le 1er septembre 1998, accepté le 7 février 2000.

(1) EOSt, UMR 7516 Institut de Physique du Globe, 5 rue Descartes, 67084 Strasbourg, France.

Permien inférieur de Sardaigne méridionale ont été acquises en période de champ normal, alors le bloc MECS dans son ensemble a subi une rotation horaire de près de 125° pendant le Permien inférieur. Avant la rotation, au Carbonifère supérieur, les zonations métamorphique et magmatique du bloc MECS étaient parallèles à la zonation de la branche orientale de la chaîne varisque, de sorte que les faciès amphibolite barrovien du Massif central, du bloc MECS et du Massif de Bohême étaient en continuité. La paléoposition du bloc déduite des directions B des Maures représente un stade intermédiaire, vers 290-280 Ma, de la rotation, qui s'est achevée à la fin du Permien inférieur vers 270-265 Ma. La rotation horaire est à mettre en relation avec les importants décrochements transpressifs dextres qui ont affecté l'ensemble de la chaîne varisque au Dévonien supérieur-Carbonifère inférieur, et plus tard, au Carbonifère supérieur-Permien-inférieur, la partie méridionale essentiellement.

### Abridged English version

The aim of this study was to demonstrate the Late Variscan displacement of the Maures-Estérel-Corsica-Sardinia (MECS) block and to understand why, during the Permian, the eastern part of the internal zone of the western European Variscides was split into two branches, one continuing toward the Bohemian Massif and the other trending southward through the MECS block. New data were thus necessary, particularly for the Maures-Estérel massif for which the only reliable data concerned the Late Permian.

In the Maures massif, the N-S-trending Plan-de-la-Tour basin is filled by a sequence of conglomerate, rhyolite and microgranite, and then a unit of conglomeratic arkose with coal beds containing Late Westphalian-Early Stephanian fossils. Sampling was carried out at eight sites for rhyolite and one site for conglomerate along two profiles crossing the basin at its widest part. Results were obtained for both limbs of the basin, thus allowing a fold test. Thermal demagnetization and tectonic corrections reveal the presence of pre-/syn-folding B1 magnetization and post-folding B2 overprints with almost identical respective mean directions, similar to the preliminary result of Zijdeveld (1975). Both the B1

and the B2 magnetization show the same magnetic characteristics as magnetite, hence the B1 magnetization is also suspected to be an overprint. The magnetization was thus contemporaneous with the folding of the basin and uplift of the eastern Maures that occurred from 300 to 280 Ma, probably around 290 Ma. In addition to the dominant B magnetizations, later overprints interpreted as Early-Middle Permian were also identified, namely the poorly developed A1 direction 217°/3° (VGP: 33°N/139°E) at two sites and the A0 direction 192°/2° (VGP: 44°/170°) at three sites. The deviation from the B direction to the A1 and A0 directions indicates a clockwise rotation of the basin and probably of the whole Maures-Estérel massif during the Early-Middle Permian.

These new results shed new light upon the problem of the Late Variscan rotation of the Corsica-Sardinia block proposed previously (Edel et al., 1981). Assuming that 1) the clockwise rotation of the Plan-de-la-Tour basin concerned the entire Maures-Estérel block, 2) the metamorphic, magmatic and tectonic zonations of the Maures-Estérel block and the Corsica-Sardinia block were continuous during the Late Carboniferous, and 3) the magnetization in the Late Carboniferous-Permian volcanites of southern Sardinia was acquired during a period of normal polarity of the magnetic field, then the entire MECS block underwent a major clockwise rotation of up to 125° during the Early Permian. In the Late Carboniferous, before rotation, the metamorphic and magmatic zonation would have been parallel to the zonation of the eastern branch of the Variscides, and the Barrovian amphibolite facies of the Massif Central, the MECS block and the Bohemian Massif would have been in continuity. Based on the B directions of the Maures, the paleoposition of the block represents an intermediate stage, at about 290-280 Ma, in the rotation that continued until the end of the Early Permian. This rotation occurred in the framework of the large-scale, dextral transpressive wrenching that affected the southern Variscides from Late Carboniferous to Early Permian.

### Introduction

Les interprétations et les modèles de la chaîne varisque d'Europe occidentale qui

prennent en compte les Maures, l'Estérel, la Corse et la Sardaigne dans leur position anté-Miocène font apparaître une zone interne qui se divise au niveau des Alpes occidentales externes, une branche orientale continuant vers le nord-est en direction du massif de Bohême et une deuxième branche bifurquant vers le sud à travers les Maures et l'Estérel, la Corse et la Sardaigne (Matte, 1991). On est amené à se poser la question : cette forme en Y est-elle représentative des phases principales de l'orogénèse varisque ou ne s'agit-il que d'un stade tardif ?

Les études paléomagnétiques menées dans les années 1970 début 1980 sur des formations volcaniques et sédimentaires du Carbonifère supérieur-Permien de l'ensemble Maures-Estérel-Corse-Sardaigne ont mis en évidence des directions présentant des inclinaisons cohérentes entre elles et cohérentes également avec celles attendues pour le sud-est de la France. Par contre, les déclinaisons des différentes provinces volcaniques divergent fortement (Zijdeveld et al., 1970 ; Zijdeveld, 1975 ; Westphal, 1976 ; Westphal et al., 1976 ; Storetvedt et Markhus, 1978 ; Edel, 1980 ; Edel et al., 1981 ; Mérébet et Daly, 1988 ; Vigliotti et al., 1990), impliquant ainsi des rotations importantes au cours de la période tardi-varisque (Edel et al., 1981).

A l'Eocène-Oligocène et jusqu'à la fin de l'Aquitainien, le bloc corso-sarde était tourné de 30° dans le sens horaire et accolé aux Maures et à l'Estérel (de Jong et al., 1973 ; Manzoni, 1975 ; Manzoni et Ferriani, 1976 ; Edel, 1979, 1980 ; Montigny et al., 1981 ; Vigliotti et Kent, 1990). Les directions paléomagnétiques permiennes du nord de la Sardaigne impliquent une rotation de 60° de l'île par rapport à la situation actuelle, alors que celles du nord de la Corse ne font apparaître aucune rotation supplémentaire à la rotation tertiaire de 30° (Westphal et al., 1976). Les directions fortement divergentes obtenues sur les formations volcaniques carbonifère supérieur-permien inférieur du sud-est de la Sardaigne mettent en évidence un important mouvement de rotation de cette partie de l'île (Edel et al., 1981). Deux interprétations qui dépendent de l'âge des formations volcaniques et surtout de l'âge des aimantations ont été proposées : 1) toutes les aimantations mesurées en Corse et en Sardaigne ont le même âge et le bloc

corso-sarde a subi des rotations relatives impliquant une forte déformation du bloc MECS, 2) les aimantations fortement déviées du sud de la Sardaigne sont plus vieilles que les autres, comme le suggèrent les datations K-Ar, et c'est l'ensemble du bloc qui a subi une rotation au Carbonifère supérieur-Permien inférieur. Cette rotation était soit de 55° dans le sens antihoraire, soit de 125° dans le sens horaire.

Les objectifs de cette étude étaient : 1) de voir si de tels mouvements relatifs ou globaux ont affecté les Maures et l'Estérel, 2) de trancher entre les deux hypothèses, rotations relatives ou rotation globale, 3) de préciser le sens de la rotation, 4) de proposer un modèle d'évolution de l'ensemble Maures-Estérel-Corse-Sardaigne (MECS) et plus particulièrement, de voir si la bifurcation de la zone interne des Variscides ne résulte pas de ces mouvements tardi-varisques.

Lors d'une étude préliminaire, Zijdeveld (1975) avait obtenu sur la rhyolite stéphanienne du Plan-de-la-Tour dans les Maures des directions incompatibles avec celles attendues pour l'Europe stable à la même époque et avec celles qu'il avait mesurées dans les rhyolites permienues de l'Estérel. Ce résultat ne repose cependant que sur 16 échantillons provenant de deux sites, sans test de pli. Pour répondre aux questions posées plus haut, il convenait donc de reprendre cette étude afin de vérifier si les directions mises en évidence sont représentatives de la paléogéographie des Maures et par conséquent du bloc MECS, au Carbonifère supérieur-Permien.

### Etude paléomagnétique de la rhyolite du Plan-de-la-Tour

#### Cadre géologique (fig. 1)

Le bassin du Plan-de-la-Tour est un semi-graben de 16 km de long, de largeur maximale 1,5 km, orienté N-S et contrôlé à l'est par la faille décrochante de Grimaud (Begassat, 1985 ; Basso, 1985 ; Bronner et Castanet, 1998 ; Rousset *et al.*, 1998). La série sédimentaire consiste en dépôts continentaux variés allant de silts à des conglomérats, généralement pentés vers le sud-est. Dans les niveaux

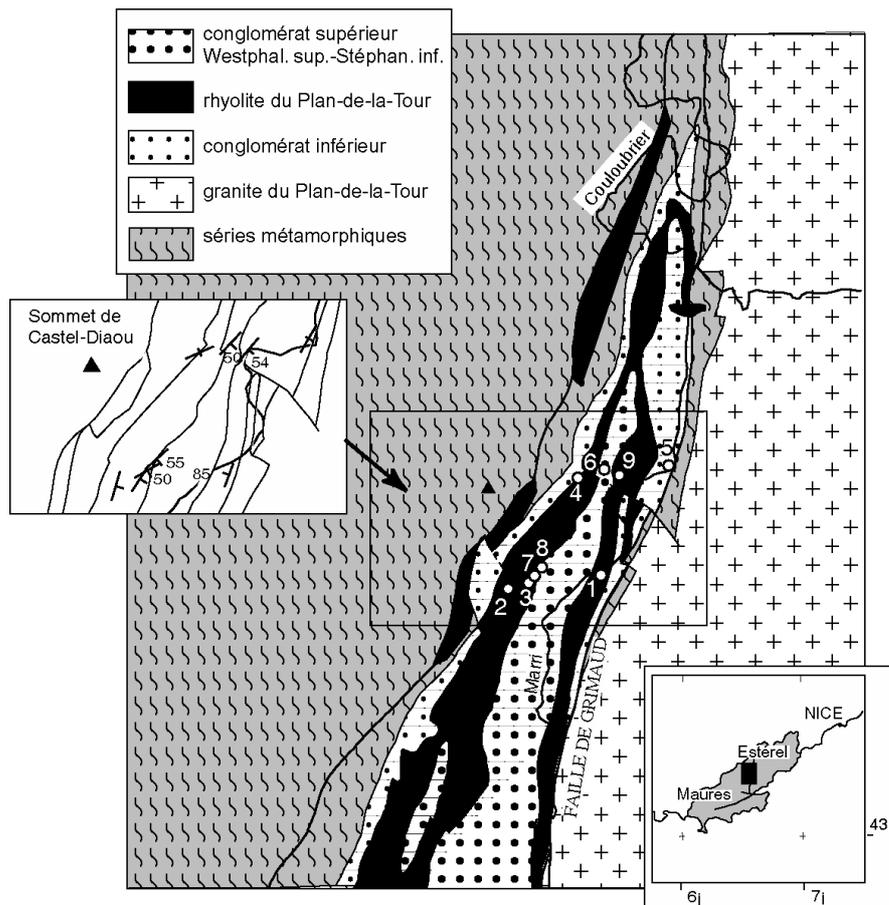


Fig. 1.- Carte géologique simplifiée du bassin du Plan-de-la-Tour (Toutin-Morin *et al.*, 1994), situation des sites de prélèvement et pendage des séries déduit des observations de terrain et de l'anisotropie de susceptibilité magnétique.

Fig. 1.- Simplified geological map of the Plan-de-la-Tour basin (Toutin-Morin *et al.*, 1994) showing the sampling sites and the dip of the rocks deduced from field observations and the magnetic susceptibility anisotropy.

supérieurs ont été trouvés des fossiles du Westphalien supérieur-Stéphanien inférieur qui situent l'âge du bassin vers 305 Ma (Odin, 1994). Des roches intrusives à effusives, interprétées comme rhyolite ou microgranite selon les auteurs, ont été mises en place le long des failles bordières et, parallèlement à la stratification, en sills et coulées. Un âge K-Ar de 290±10 Ma a été obtenu pour la rhyolite il y a près d'une trentaine d'années (Roubault *et al.*, 1970).

Les données tectoniques et thermo-chronologiques montrent qu'entre 315 et 300 Ma le socle à l'est de l'accident de Grimaud a été exhumé en contexte de décrochement sénestre (Morillon, 1997 ; Sosson *et al.*, 1998). Entre 300 et 280 Ma, la déformation varisque tardive est marquée par une inversion des mouvements en décrochement dextre, exhumation complète des Maures orientales et chevauchement du substratum métamor-

phique sur la bordure ouest du bassin du Plan-de-la-Tour. La couverture sédimentaire saxono-thuringienne du bassin d'Argens et de l'Estérel n'étant pas affectée par ces mouvements, on peut considérer qu'au Permien moyen l'orogénèse varisque est terminée.

#### Techniques de prélèvement et de mesures

L'échantillonnage porte sur neuf sites situés dans la partie la plus large du bassin, le long de deux profils transverses. Un site a été carotté dans les conglomérats supérieurs, les huit autres carottés et/ou échantillonnés par blocs dans les sills et coulées de rhyolite. Mis à part le site PT1 qui présente un pendage subvertical vers l'WNW, tous les autres sites montrent le pendage général vers le sud-est, permettant ainsi le test du pli. Le pendage des rhyolites a été mesuré directement au contact avec les

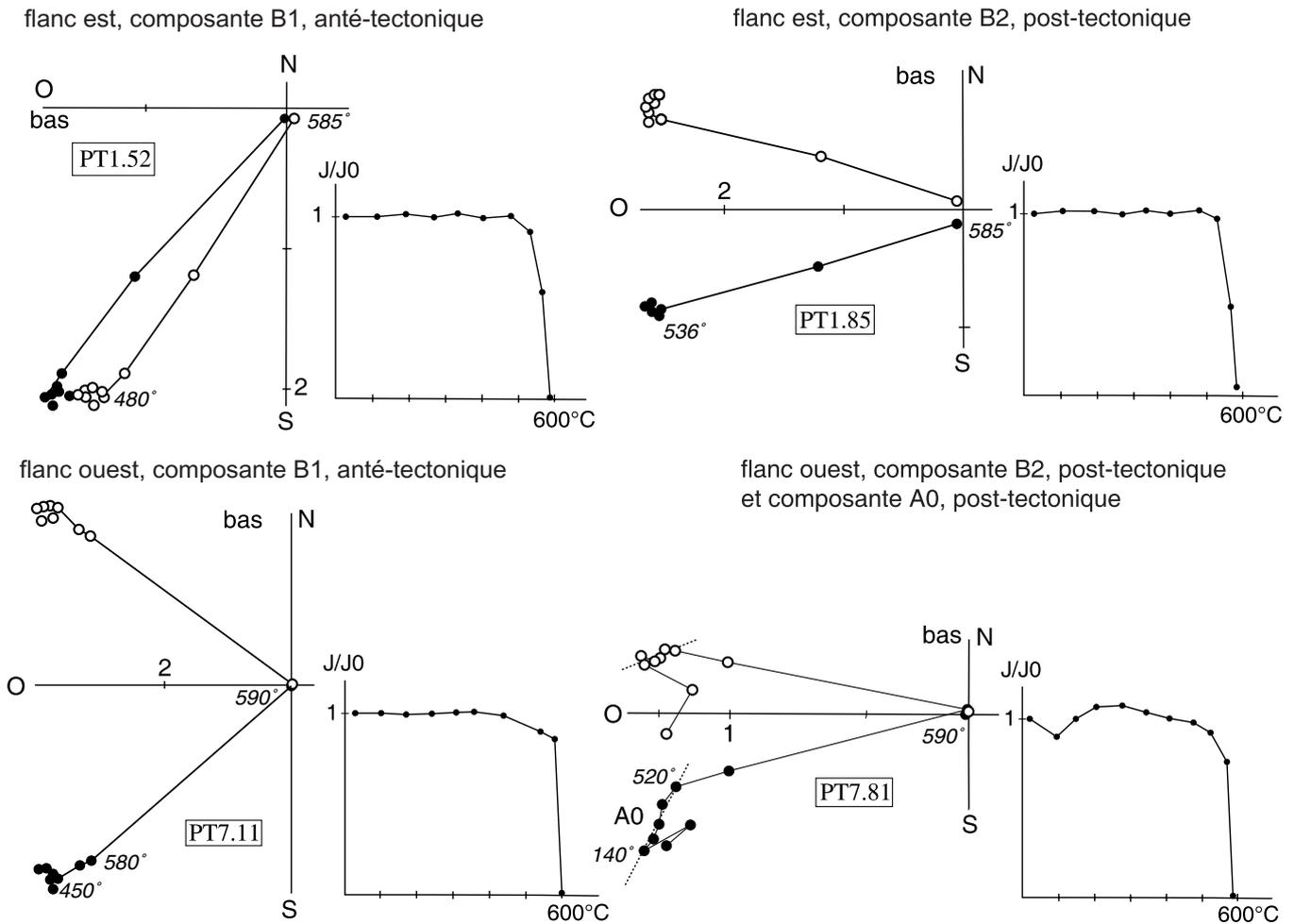


Fig. 2.- Désaimantation thermique par paliers d'échantillons types : projections orthogonales de l'ARN (cercles pleins : dans le plan horizontal ; cercles vides : dans le plan vertical E-W) et diagrammes J/J0. Les intensités d'aimantation sont en mA/m.

Fig. 2.- Thermal demagnetization by type sample plateaux: orthogonal projections of the natural remnant magnetization (filled circles: horizontal plane; empty circles: E-W vertical plane) and J/J0 diagrams. Magnetization intensity is given in mA/m.

Site	N	Kmax D/I	Kmin D/I	Kmax cor. D/I	p'	T
PT4	12	177/55	289/15		1.045	-0.680
PT6	8	65/30	314/32	79/4	1.084	0.847
PT9	12	129/54	308/36	129/0	1.038	-0.098
PT2	8	278/9	9/5	278/34	1.073	0.754
PT3	9	160/61	294/21	140/25	1.026	0.154
PT7	12	107/41	358/21	117/7	1.027	-0.522
PT8	5	108/54	336/26	122/6	1.045	-0.175
PT1	8	203/30	97/25		1.073	-0.143
PT1	3	65/33	305/37		1.093	0.202

Tabl. 1.- Anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM) dans le rhyolite du Plan-de-la-Tour. N: nombre de spécimens; Kmax: déclinaison/inclinaison de l'axe de susceptibilité maximale ou linéation magnétique; Kmin: déclinaison/inclinaison de l'axe de susceptibilité minimale, perpendiculaire au plan de la foliation magnétique; Kmax corr: déclinaison/inclinaison de l'axe de susceptibilité maximum corrigé du pendage; p': taux d'anisotropie (Jelinek, 1981); T: paramètre de forme: planaire >0, linéaire <0, plano-linéaire ~0.

Table 1.- Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) in the Plan-de-la-Tour rhyolite. N: number of specimens; Kmax: declination/inclination of the axis of maximum susceptibility or magnetic lineation; Kmin: declination/inclination of the axis of minimum susceptibility, perpendicular to the magnetic foliation plane; Kmax corr: declination/inclination of the axis of maximum susceptibility corrected for dip; p': degree of anisotropy (Jelinek, 1981); T: shape parameter: planar >0, linear <0, planar-linear ~0.

sédiments (PT1, PT6), soit déduit de l'anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM) (PT3, PT4, PT6, PT7, PT8, PT9) ou de la foliation magmatique (PT4), ou encore à partir de l'orientation des prismes de refroidissement (PT3, PT7, PT8).

Un site représente un affleurement de 3 à 15 m d'extension. En chaque site, l'échantillonnage a fourni 6 à 12 carottes (PT 4, PT5, PT6, PT7, PT8, PT9) ou blocs orientés (PT1, PT2 et PT3) et chaque échantillon a été découpé en deux à trois spécimens cylindriques. L'aimantation rémanente a été mesurée avec un rémanomètre Digico modifié, dont le bruit de fond n'exécède pas 0,03 mA/m. C'est également un appareillage Digico qui a servi aux mesures de la susceptibilité magnétique et de l'anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM). La désaimantation par chauffe progressive a permis de sépa-

rer les composantes de l'aimantation rémanente naturelle (ARN). Les directions de ces composantes ont été calculées par ajustement aux moindres carrés de segments de droites sur les diagrammes de Zijdeveld, avec un minimum de trois points par segment (Kent *et al.*, 1983 ; Kirchwink, 1980).

La susceptibilité magnétique des rhyolites varie entre 100 et  $350 \cdot 10^{-6}$  SI et l'intensité de l'ARN reste assez faible, entre 1 et 14 mA/m. Après élimination de l'aimantation visqueuse, la désaimantation thermique montre généralement la présence d'une seule composante de l'ARN (fig. 2). Les températures de déblocage entre 580° et 600°C ainsi que les courbes d'acquisition d'une aimantation isotherme (ARI) indiquent que le porteur de cette aimantation caractéristique est la magnétite.

### Les mesures d'ASM

L'objectif de ces mesures a été principalement d'apporter un complément d'information sur le pendage des niveaux de rhyolites ou de microgranite. Le taux d'anisotropie  $p'$  reste généralement assez faible (tabl. 1) ce qui signifie que l'anisotropie est plutôt d'origine magmatique et qu'elle devrait surtout nous renseigner sur la mise en place de la rhyolite. Le paramètre de forme T indique que la linéation prédomine en PT4 qui est situé à proximité immédiate de la bordure tectonisée occidentale du bassin ainsi que dans le site PT7. Par contre, la foliation magnétique domine en PT6 et PT2. Dans les autres sites, les valeurs de T proches de 0 montrent à la fois la présence d'une linéation et d'une foliation. En PT6 la foliation magnétique est quasi parallèle au niveau de pélites qui recouvre la coulée, ce qui prouve que lorsque la foliation magnétique est bien contrainte, elle peut être utilisée comme critère de pendage. En PT3 et PT8, les arêtes de prismes nous donnent des surfaces de refroidissement avec un pendage très voisin de celui de la foliation magnétique.

Ces résultats confirment la tendance générale déduite des observations géologiques. Les niveaux rhyolitiques sont généralement pentés vers le sud-est. En PT 1 et PT 4 qui sont respectivement situés sur les bordures tectonisées est et ouest du bassin, les linéations magnétiques sont

Site	formation	tb °C	comp.	N	D/I in situ	Dc/lc corr.	k	$\alpha_{95}$	PGV °N°E
PT4	rhyolite	510	A	2	<b>24/26</b>	103/40	155		54/144
	(orange-brun)	580-600	B1	10	267/-34	285/14	56	6	-16/91 -8/98
PT6	rhyolite	550-580	A0	3	<b>188/-5</b>	203/-30	379	6	48/174
	(orange-brun)	590	B1	5	243/-30	<b>258/-5</b>	26	15	12/97
PT9	rhyolite	580-600	B1	7	229/-27	<b>247/-9</b>	66	7	19/110
	(gris-rose)	580-590	B2	5	<b>240/-10</b>	240/10	141	6	25/11
		590	A1	2	<b>220/-3</b>	222/-2	253		35/135
PT2	rhyolite	580-600	B1	5	258/-27	<b>260/1</b>	74	9	7/103
	(gris-bleu)	580	B2	3	<b>260/-1</b>	257/27	65	15	8/103
PT3	rhyolite	600	A1	2	<b>215/9</b>	208/10	176		33/144
	(gris-bleu)	585-605	B1	9	238/-28	<b>249/-5</b>	56	7	17/109
PT7	rhyolite	510	A0	7	<b>199/10</b>	200/-14	60	8	39/162
	(gris-bleu)	590	B1	7	241/-20	<b>256/-12</b>	121	5	14/102
		590	B2	8	<b>257/-11</b>	259/6	191	4	13/101
PT8	rhyolite	580-590	B1	3	257/-30	<b>268/1</b>	139	10	2/99
	(gris-bleu)	580-590	B2	7	<b>259/-13</b>	258/16	93	6	12/99
PT1	rhyolite	580-590	B1	10	217/30.5	237/-8	60	6	26/118
	(gris-bleu)	580-610	B2	8	<b>252/-3</b>	206/-47	60	7	14/108
PT5	conglomérat	350-500	A0	5	<b>189/1</b>	207/-21	33	13	45/174
			B	1	<b>69/-18</b>	11/-38			8/117
Moyenne B1				8	244/-22.5		10	19	
						257/-3	48	8	10/104
Moyenne B1, sans PT4				7	240.5/-20.5				
						<b>255/-5</b>	86	6	<b>13/105</b>
Moyenne B2				5	<b>254/-7</b>		71	9	<b>14/105</b>
						247/3	6	32	
Moyenne A1				2	<b>217/3</b>		78		<b>33/139</b>
						215/4	39		
Moyenne A0				3	<b>192/2</b>		70	15	<b>44/170</b>
						203/-22	87	13	

Tabl. 2.- Directions paléomagnétique moyennes des rhyolites et d'un conglomérat du bassin du Plan-de-la-Tour (43.4°N/6.5°E). tb: température de déblocage maximale; Comp.: composante; N: nombre de specimens; D/I: déclinaison/inclinaison *in situ*; Dc/lc: déclinaison/inclinaison après correction de pendage; k/ $\alpha_{95}$ : paramètres de la statistique de Fisher. Les directions en gras sont prises en compte pour le calcul des PGV.

Table 2.- Average paleomagnetic directions of the rhyolites and a conglomerate of the Plan-de-la-Tour basin (43.4°N/6.5°E). tb: maximum breaking temperature; comp.: component; N: number of specimens; D/I: in situ declination/inclination; Dc/lc: dip-corrected declination/inclination; k/ $\alpha_{95}$ : Fisher statistical parameters. The directions in bold are taken into account for calculating the VPG.

parallèles à ces bordures et pentées vers le sud. Après avoir basculé les rhyolites à l'horizontale (on suppose qu'après la mise en place, le toit des coulées était proche de l'horizontale) on constate que les linéations sont généralement orientées ESE (tabl. 1) ce qui signifie que les rhyolites se sont écoulées perpendiculairement aux failles principales NNE-SSW qui ont servi de couloir d'alimentation.

### Les directions paléomagnétiques

Les directions moyennes par site montrent généralement des déclinaisons sud-ouest et des inclinaisons plutôt faibles, tantôt positives, tantôt négatives

(tabl. 2). La projection stéréographique polaire n'étant pas très adaptée pour la représentation de telles directions, nous avons adopté la projection cylindrique (fig. 3, 4). Dans la majorité des sites, sauf en PT3 et PT4, les directions à température de blocage de magnétite se caractérisent par une distribution non fishérienne, allongée le long d'un petit cercle (fig. 3). L'azimut de l'axe du petit cercle coïncide généralement avec l'azimut des niveaux de rhyolite, ce qui suggère que les aimantations ont été acquises pendant leur basculement. L'axe de pli reste voisin de l'horizontale sauf pour les sites PT1 et PT4, situés sur les bordures du bassin, où il plonge vers le nord.

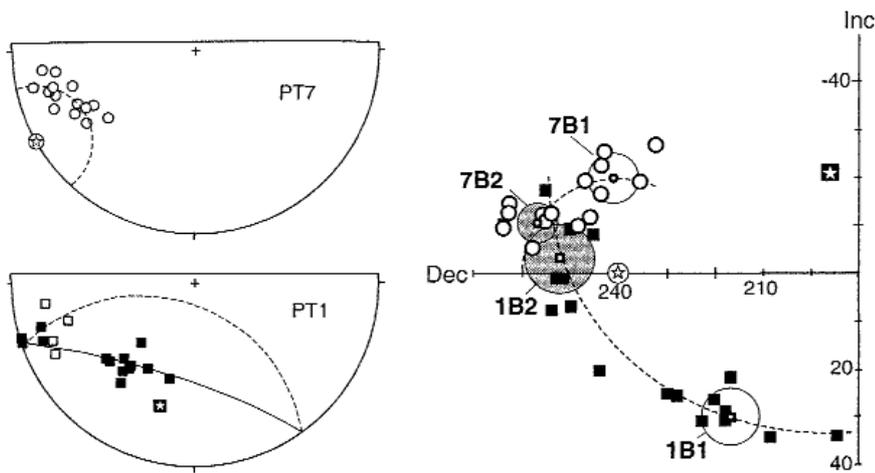


Fig. 3.- Projections stéréographiques et cylindrique des directions des composantes éliminées à 580-600°C des sites PT1 (carrés pleins) et PT7 (cercles) et directions moyennes B1 et B2 des deux pôles de chaque distribution. Les étoiles représentent les axes des petits cercles.

Fig. 3.- Stereographic and cylindrical projections of the directions of the components eliminated at 580-600°C from sites PT1 (filled squares) and PT7 (circles), and average B1 and B2 directions of the two poles of each distribution. The stars represent the axes of the small circles.

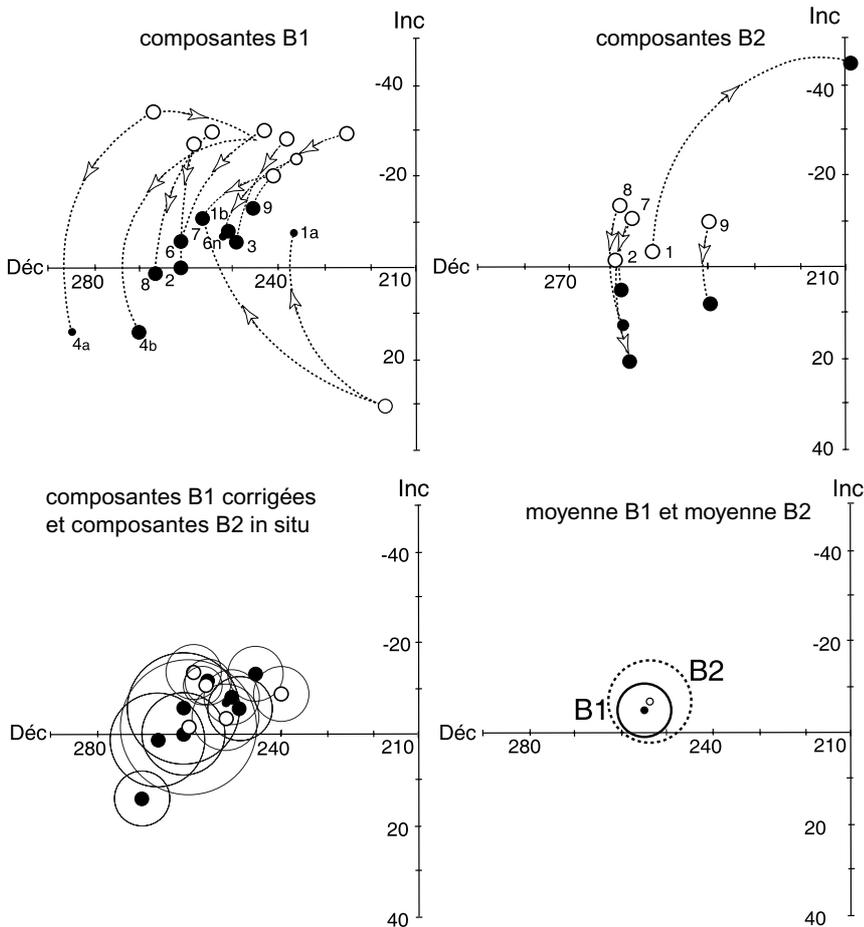


Fig. 4.- Projections cylindriques des directions des huit sites de rhyolite, avant (ronds blancs) et après correction de pendage (ronds noirs). Pour PT1 et PT4 sont données deux directions corrigées: a - en prenant en compte le pendage mesuré, b - en prenant également en compte le pendage de l'axe du pli. Les moyennes de B1 et B2 sont représentées avec leur cercle  $\alpha 95$ .

Fig. 4.- Cylindrical projections of the directions of the eight rhyolite-sampling sites before (empty circles) and after (filled circles) dip correction. For PT1 and PT4, two corrected directions are given: a - taking the measured dip into account, b - also taking the dip of the fold axis into account. The B1 and

Le calcul de la direction moyenne n'ayant pas de signification paléogéographique, nous avons calculé les deux pôles B1 et B2 de la distribution (fig. 3). On remarque d'emblée que les directions B2 des cinq sites sont bien groupées *in situ* (fig. 3 et 4), alors que les directions B1 diffèrent fortement. Après correction de pendage, les directions B1 des huit sites de rhyolite convergent dans la zone occupée jusque là par les directions B2, alors que ces dernières divergent. Cela signifie que les aimantations B1 ont été acquises avant et éventuellement pendant le plissement, alors que les aimantations B2 sont des réaimantations post-plissement. Du point de vue du magnétisme des roches, il n'y a aucune différence entre les deux types d'aimantations qui sont tous deux portés par des magnétites en grains fins. Les composantes B2 étant clairement des réaimantations, on est amené à penser qu'il en est de même pour les aimantations B1, et que ces réaimantations ont été acquises dans le même contexte tectonique et hydrothermal. En fait, il est fortement probable que le processus de réaimantation était plus ou moins continu et qu'il a eu lieu avant, pendant et après le plissement principal contemporain de la phase transpressive dextre du Permien inférieur (300-280 Ma ; Morillon, 1997 ; Sosson *et al.*, 1998). Ce plissement a dû être rapide, sinon les directions intermédiaires à B1 et B2 seraient plus nombreuses. L'âge K-Ar sur roche totale à 290 Ma trouvé pour la rhyolite (Roubault *et al.*, 1970) daterait alors plutôt la phase d'altération hydrothermale responsable des réaimantations B que la mise en place qui, si on s'en tient aux données stratigraphiques, aurait eu lieu vers 305 Ma. Une composante B2 à polarité normale portée par de la magnétite et très bien définie a été trouvée dans un unique échantillon du conglomérat PT5. La direction après correction de pendage étant incompatible avec les directions dans la rhyolite, il s'agit bien d'une réaimantation. Le fait que la polarité soit opposée indiquerait que la réaimantation B2 est plus tardive dans le conglomérat que dans la rhyolite.

Mises à part les directions B, qui sont voisines de celles mises en évidence par Zijdeveld (1975), la désaimantation a montré la présence dans deux sites (PT3, PT9) de rares directions plus méridiennes A1, également portées par la magnétite et aussi bien définies que les directions B.

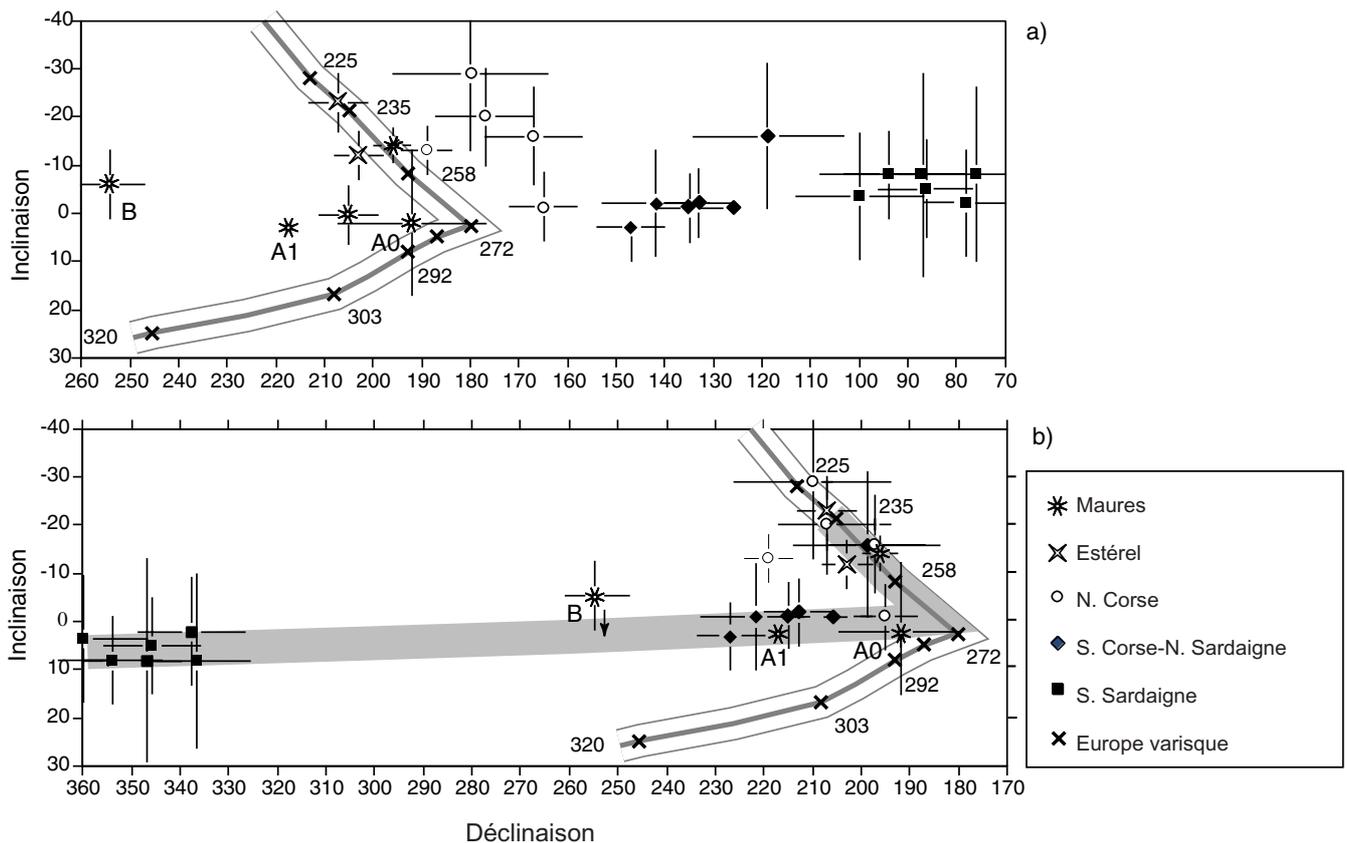


Fig. 5.- Déclinaisons et inclinaisons des directions moyennes des Maures, Estérel, Corse et Sardaigne, citées dans le tableau 3, a - dans la configuration actuelle, b - après restauration de la paléogéographie du Permien supérieur-Trias, c.à d., après rotation de 80° de la Sardaigne et de la Corse méridionales et rotation de 30° seulement de la Corse septentrionale. Les directions de Sardaigne méridionale sont inversées. La courbe des directions de référence a été calculée pour les Maures méridionales à partir des PGV de l'Europe varisque (Edel et Schneider, 1995). Les âges correspondant aux différentes directions sont indiqués.

Fig. 5.- Magnetic declination and inclination of the near directions of the Maures-Estérel-Corsica-Sardinia block, cited in Table 3, a - present configuration, b - after restoration of Late Permian - Triassic paleogeography, i.e. after 80° rotation of southern Corsica and Sardinia and only 30° rotation of northern Corsica. The directions of southern Sardinia are reversed. The curve of the reference directions was calculated for southern Maures from the VPG of the Europe Variscides (Edel and Schneider, 1995). The ages corresponding to the different directions are indicated.

Dans trois autres sites (PT5, PT6, PT7), dont le site de conglomérat (PT5), des aimantations secondaires A0 avec des déclinaisons méridiennes et des températures de déblocage de 350 à 580° se superposent aux aimantations B et sont donc éliminées avant ces dernières. C'est le cas dans le site PT 7 (fig. 2). En PT5 différents petits galets, ainsi que la matrice portent l'aimantation A0. Le test du conglomérat est donc négatif. Il prouve que l'aimantation est postérieure aux aimantations B. Les directions A0 sont proches du résultat trouvé par Zijderveld (1975) pour des arkoses stéphanienues de Bassin de Reyran ainsi que des directions déduites des pôles Permien inférieur à Permien moyen des Variscides (fig. 5). Le test du pli n'est significatif ni pour A1 ni pour A0 et ces aimantations sont interprétées comme étant des réaimantations tardives. La chronologie des réaimanta-

tions serait donc B1- B2- A1- A0. On en déduit une rotation horaire des séries du Plan-de-la-Tour. Les directions A1, bien que très rares pourraient représenter un stade intermédiaire de la rotation.

La connaissance de l'âge des événements tectoniques et des aimantations est primordiale pour l'interprétation des directions B. Des directions avec des déclinaisons voisines de celles des B mais avec des inclinaisons plus élevées ont été acquises dans toute la chaîne varisque au cours du Namurien, témoignant ainsi d'une rotation horaire globale au Namurien terminal-Westphalien (Edel et Wickert, 1991 ; Edel et Lewandowski, 1993). Si les aimantations B du Plan-de-la-Tour étaient plus vieilles que 310 Ma, il n'y aurait donc plus de rotation horaire par rapport au reste de la chaîne mais seule une dérive N-S.

L'inclinaison moyenne de -6 à -7° des directions B n'est pas compatible avec l'inclinaison calculée pour les Maures à partir des pôles moyens Permien inférieur de l'Europe varisque (Edel et Schneider, 1995). Cette inclinaison est de +2 à +5°. Par contre, les inclinaisons des directions A1 et A0 sont cohérentes avec les inclinaisons attendues (fig. 5). Deux interprétations de ces inclinaisons divergentes sont possibles : 1) les Maures étaient situées environ 5° au nord de leur position actuelle par rapport au reste de la chaîne varisque, lors de l'acquisition des directions B ; 2) le basculement vers le sud-est des séries du bassin du Plan-de-la-Tour s'est poursuivi d'une dizaine de degrés après la mise en place des dernières aimantations B2. Cette dernière hypothèse implique que lors de l'acquisition des aimantations B1, les séries volcaniques et sédimentaires du bassin n'étaient pas hori-

zontales mais légèrement basculées vers l'ouest. Une telle configuration serait plus conforme à celle attendue pour un demi-graben avec faille listrique à l'ouest. Dans ce cas, le basculement supplémentaire n'a pas d'incidence significative sur les déclinaisons et l'interprétation en terme de rotation horaire, soit à l'échelle du bassin soit à celle des Maures dans leur globalité, reste valable.

## Les directions Carbonifère supérieur-Permien inférieur des Maures, de l'Estérel, de la Corse et de la Sardaigne

### Maures et Estérel

Les résultats disponibles proviennent des rhyolites de cette étude, des formations volcaniques saxoniennes de l'Estérel (Zijderveld, 1975 ; Vlag *et al.*, 1997) et des sédiments saxoniens et thuringiens bordant l'Estérel et les Maures (Zijderveld, 1975 ; Merabet et Daly, 1986). Seules les directions des formations du Saxonien et du Thuringien et les directions A0 des rhyolites sont en accord avec celles déduites des pôles d'Europe (fig. 5). La proximité des directions des volcanites de l'Estérel avec les directions du Trias inférieur d'Europe suggère une réaimantation. Celle-ci pourrait résulter de la même phase d'altération qui est à l'origine des âges Ar-Ar entre 250 et 220 Ma, trouvés dans les volcanites mises en place il y a 278-264 Ma (Zheng *et al.*, 1992). On a vu que les directions B du bassin du Plan-de-la-Tour, divergent de celles attendues pour le sud-est de la France.

Les inclinaisons des directions A1 et A0 situent la réaimantation à l'époque du virage sénestre de la courbe de dérive des Variscides (fig. 5) qui a lieu à la fin de l'Autunien. Compte tenu de l'âge estimé à 290-280 Ma des aimantations B, l'inclinaison devrait être légèrement positive au lieu de -6-7°. Comme dans la suite on montre que les Maures, l'Estérel, la Corse et la Sardaigne formaient un seul bloc et que nulle part on ne trouve des inclinaisons comparables au Permien inférieur-moyen, l'hypothèse la plus vraisemblable est qu'au début de la réaimantation B, le bassin était déjà légèrement plissé et que le basculement a continué de 5 à 10° vers le sud-est après l'acquisition des dernières réaimantations B2.

La déviation en déclinaison des directions A0, A1, et B, qui augmente avec l'âge des aimantations implique des rotations horaires soit à l'intérieur du bassin, soit de l'ensemble du bassin et par conséquent de l'ensemble des Maures. Dans le contexte de décrochement dextre de la phase transpressive à 300-280 Ma, des rotations horaires sont possibles à l'intérieur du bassin. Cependant, on constate que d'un bord à l'autre du bassin, la variation en déclinaison n'excède pas 20° et ce, quelle que soit la direction du pendage qui varie de N110° à N145°. Ceci implique que les séries n'ont pas subi de rotation relative notable après la réaimantation B2. En conséquence, si des rotations locales restent possibles, elles ne peuvent expliquer la totalité de la déviation de 70° des directions B par rapport à la direction attendue à partir des pôles d'Europe. Le bloc Maures-Estérel a donc vraisemblablement subi une rotation horaire pendant le Permien inférieur et les réaimantations B, A1 et A0 représentent les différentes étapes de cette rotation.

Le bloc Maures-Estérel est représenté sur la figure 6, dans la position qu'il occupait à l'époque de la mise en place des aimantations A0. Les limites nord du bloc correspondent à un axe négatif sur la carte des anomalies magnétiques et à des gradients sur la carte du gradient vertical des anomalies de Bouguer.

### La Corse

Les reconstructions qui replacent le bloc corso-sarde dans sa position antérieure à la rotation antihoraire de 30° de la fin de l'Aquitainien, où le nord-ouest de la Corse fait face à l'Estérel (Edel, 1979 ; 1980 ; Montigny *et al.*, 1981), montrent généralement un bon accord entre les directions paléomagnétiques du second cycle volcanique permien de Corse du nord (Westphal, 1976 ; Westphal *et al.*, 1976) et celles des volcanites du second cycle de l'Estérel et des sédiments saxono-thuringiens des Maures et de l'Estérel (Zijderveld, 1975 ; Merabet et Daly, 1986) (fig. 5 ; 6). De même, les directions du premier cycle volcanique de Corse se corrélaient bien avec celles obtenues dans les sédiments du Bassin de Reyran (Zijderveld, 1975) ainsi qu'avec les réaimantations A0 du Plan-de-la-Tour. En d'autres termes, depuis le Permien inférieur-moyen, la Corse du nord semble

n'avoir subi qu'une rotation par rapport au bloc Maures-Estérel, à savoir la rotation tertiaire.

Ceci n'est plus vrai lorsqu'on considère les résultats obtenus sur des filons acides et basiques du sud de la Corse (Vigliotti *et al.*, 1990). Si les inclinaisons voisines de 0° sont comparables à celles du premier cycle volcanique du nord (tabl. 2), les déclinaisons divergent de 30°, impliquant une rotation antihoraire de 60° depuis le Permien au lieu de 30° pour le nord de l'île. Deux hypothèses se présentent : ou ces aimantations ont été acquises à différents stades d'une rotation de l'ensemble de l'île, ou les deux parties de l'île ont subi une rotation relative.

### La Sardaigne

Les études menées sur les formations rhyolitiques de la Gallura ont abouti à des résultats convergents (Zijderveld *et al.*, 1970 ; Westphal *et al.*, 1976 ; Storetvedt et Markhus, 1978). A 10° près, ils concordent avec ceux obtenus par Vigliotti *et al.* (1990) sur les dykes qui affleurent de part et d'autre du détroit de Bonifacio, en Corse et en Sardaigne (tabl. 3, fig. 5 et 6). La différence devient plus notable (20°) lorsqu'on considère la direction moyenne mesurée dans les ignimbrites de la Nurra, situées au nord-ouest de l'île (Edel *et al.*, 1981).

Les directions paléomagnétiques obtenues dans les volcanites permo-carbonifères de la Barbagia, de l'Ogliastra et du Gerrei, dans le sud-est de l'île, divergent par contre de 55° voire de 125° si on considère le complément, de celles du nord, alors que les inclinaisons sont légèrement supérieures (Edel *et al.*, 1981 ; tabl. 3, fig. 5). Un résultat très voisin, non publié, a été obtenu par Manzoni sur des formations sédimentaires ordoviciennes de l'Iglesiente, dans le sud-ouest de la Sardaigne. Le bon groupement des directions *in situ* de 6 sites (tabl. 3) et les inclinaisons faibles montrent qu'il s'agit plutôt de réaimantations du Carbonifère supérieur-Permien inférieur, peut-être contemporaines de la mise en place des volcanites tardi-hercyniennes du Cap Teulada et/ou des granites. Deux autres sites de la même formation présentent des directions WSW à inclinaisons faibles acquises dans un champ opposé.

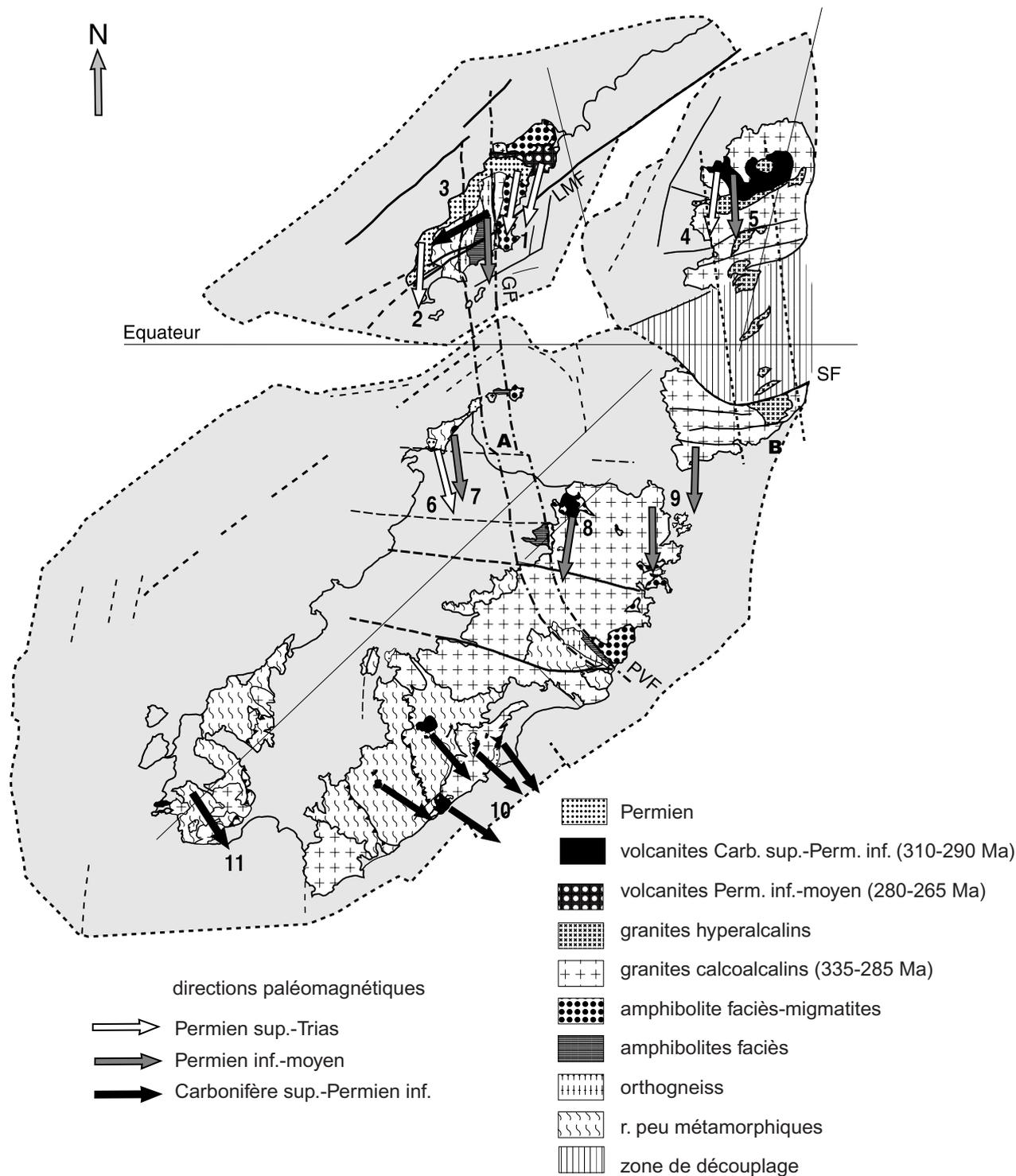


Fig. 6.- Paléogéographie du bloc MECS à la fin de l'Autunien, d'après les directions paléomagnétiques indiquées en gris. Directions paléomagnétiques obtenues pour l'Estérel (1 - Zijdeveld, 1975), les Maures (2 - Merabet et Daly, 1985 ; 3 - cette étude), le N. Corse (4 - Westphal, 1976 ; 5 - Westphal *et al.*, 1976), la Nurra (6 - Edel, 1980 ; 7 - Edel *et al.*, 1981), la Gallura (8 - Zijdeveld *et al.*, 1970 et Westphal *et al.*, 1976), le S. Corse et le N. Sardaigne (9 - Vigliotti *et al.*, 1990), la Barbagia, l'Ogliastra et le Gerrei (10 (Edel, 1980 et Edel *et al.*, 1981), l'Iglesiente (11 - Manzoni, non publié). A : zone de métamorphisme intermédiaire (Westphal *et al.*, 1976 ; Elter *et al.*, 1990) ; B : zone des granites hyperalcalins (Orsini, 1976, 1979). LMF : faille de La Môle ; GF : faille de Grimaud ; SF : faille de Solenzara ; PVF : faille de la vallée de Posada.

Fig. 6.- Paleogeography of the MECS block at the end of the Autunian, according to the paleomagnetic directions indicated in grey. Paleomagnetic directions obtained for Estérel (1 - Zijdeveld, 1975), Maures (2 - Merabet and Daly, 1985 ; 3 - present study), northern Corsica (4 - Westphal, 1976 ; 5 - Westphal *et al.*, 1976), Nurra (6 - Edel, 1980 ; 7 - Edel *et al.*, 1981), Gallura (8 - Zijdeveld *et al.*, 1970 ; Westphal *et al.*, 1976), southern Corsica and northern Sardinia (9 - Vigliotti *et al.*, 1990), Barbagia, Ogliastra and Gerrei (10 Edel, 1980 ; Edel *et al.*, 1981), Iglesiasiente (11 - Manzoni, unpublished). A : intermediate metamorphic zone (Westphal *et al.*, 1976 ; Elter *et al.*, 1990) ; B : peralkaline granite (Orsini, 1976, 1979). LMF: La Môle Fault; GF: Grimaud Fault; SF: Solenzara Fault; PVF: Posada Valley Fault.

Régions	Formations	Age (Ma)	Référence	N	D/I	Dc/lc	kc/k0	α95	âge Mag.	PGV °N°E	Références
<b>Maures</b>											
bassins permien	pélites	255±5	Merabet et Daly, 1986	10	206/-31	<b>196/-14</b>	161/17	4	255	51/161	Merabet et Daly, 1986
b. Plan-de-la-Tour	rhyolites	305±5	Begassat, 1985	2	241/4	239/-16	13/15				Zijderveld, 1975
	rhyolites	*****	*****	7	240/-20	<b>255/-5</b>	86/10	6	290-280	14/105	cette étude
		*****	*****	5	<b>254/-7</b>	247/3	6/71	9	290-280	14/105	cette étude
b. Plan-de-la-Tour	rhyol. + conglom.	305±5	*****	3	<b>192/2</b>	203/-22	70/87	15	280-260	44/170	cette étude
bassin du Reyran	arkoses	300	Zijderveld, 1975	1	198/-18	<b>205/0</b>	58/41		280-260	41/153	Zijderveld, 1975
<b>Estérel</b>											
	basaltes +rhyolites	278-264	Zheng et al., 1991	12	207/-9	<b>207/-23</b>	52/34	6	250-220	51/142	Zijderveld, 1975
	sédiments			3	204/3	<b>203/-12</b>	543/190	5	250	47/150	Zijderveld, 1975
<b>N. Corse</b>											
Scandola-Cinto	ignimbrites 1er cycle			5		<b>165/4</b>		7	280-260	44/209	Westphal et al., 1976
*****	ignimbrites 2e cycle			5		<b>180/-29</b>		16	250-220	64/189	Westphal, 1976
*****	dykes			16	<b>177/-20</b>			10	250-220	58/194	*****
Tuara	dolérites				<b>167/-16</b>			10	250-220	54/211	*****
Ota	gabbro	290±10	Edel et al., 1981		<b>189/-13</b>			5	250-220	54/174	*****
<b>S. Corse-N. Sardaigne</b>											
S. Corse	dykes			11	<b>135/-1</b>			7	280-260	36/250	Vigliotti et al., 1990
N. Sardaigne	dykes			11	<b>133/-2</b>			7	280-260	31/249	Vigliotti et al., 1990
Gallura	ignimbrites	288±11	Del Moro et al. 1996	6	142/3	<b>142/-2</b>	34/32	11	280-260	38/239	Zijderveld et al., 1970
	ignimbrites	*****	*****	4	<b>147/3</b>			7	280-260	37/238	Westphal et al., 1976
<b>NO. Sardaigne</b>											
Nurra	ignimbrites	303±9	Edel et al., 1981	2	124/24	<b>126/-1</b>			280-260	27/253	Edel et al., 1981
Nurra	grès	Permo-Trias	*****	5	128/-7	<b>120/-12</b>	34/14	13	250-240	26/262	Edel, 1980 + Zijderveld
<b>SE. Sardaigne</b>											
Seui-Seulo	andésites, ignimbrites			4	94/9	<b>94/-8</b>	112/9	9	307-287	-5/100	Edel, 1980; Edel et al.,
Baunei	ignimbrites	297±10	Edel et al., 1981	3	104/3	<b>97/-8</b>	32/21	21	307-287	-8/98	1981
Talana-Villagrande	porphy., ignimbrites			4	89/-24	<b>86/-5</b>	92/27	10	307-287	1/104	*****
Mte Ferru-Tertenia	andésites, ignimbrites	311±10	*****	4	81/-7	<b>78/-2</b>	65/10	11	307-287	8/108	*****
Escalaplano	tufs, ignimbrites	301±8	*****	3	77/-13	<b>76/-8</b>	44/24	18	307-287	8/111	*****
<b>SO. Sardaigne</b>											
Iglesiente	sédiments	Ordovicien		6	100/-3			13	307-297	-9/94	Manzoni, non publié.
	*****	*****		2	243/15				307-287		*****

Tabl. 3.- Résultats paléomagnétiques des formations Carbonifère supérieur-Permien des Maures-Estérel-Corse-Sardaigne. Age: âge de la formation, suivi de la référence correspondante; N: nombre de sites; D/I: déclinaison/inclinaison in situ; Dc/lc: déclinaison/inclinaison après correction de pendage; kc/k0: paramètre de la statistique de Fisher après / avant correction de pendage; Age mag.: âge supposé de l'aimantation; Référence: référence de l'étude paléomagnétique. Les directions en gras sont prises en compte pour le calcul des PGV.

Table 3.- Paleomagnetic results for the Late Carboniferous-Permian formations of the Maures-Estérel-Corsica-Sardinia block. Age: age of the formation, followed by the corresponding reference; N: number of sites; D/I: in situ declination/inclination; Dc/lc: dip-corrected declination/inclination; kc/k0: Fisher statistical parameter after/before dip correction; Age mag.: assumed magnetization age; Référence: reference of the paleomagnetic study. The directions in bold are taken into account for calculating the VGP.

## Discussion

### Les relations Maures-Estérel-Corse-Sardaigne

Les résultats paléomagnétiques sur les volcanites de l'Estérel (Zijderveld, 1975) et sur les volcanites de la Gallura, dans le nord de la Sardaigne, ainsi que les corrélations géologiques entre les Maures et la Sardaigne ont amené Westphal *et al.* (1976) à proposer une reconstruction pour le Permien, où la Sardaigne est tournée de

60° dans le sens horaire et où le nord-ouest de l'île (la presqu'île de l'Asinara) est accolé aux îles de Hyères, dans le sud des Maures. Depuis, plusieurs autres études géologiques ont confirmé la continuité des zonations métamorphique, magmatique et tectonique du bloc Maures-Estérel au bloc corso-sarde (Arthaud et Matte, 1977a ; Orsini, 1976, 1979 ; Ricci et Sabatini, 1978 ; Elter *et al.*, 1990) (fig. 6). Ainsi, pour ce dernier l'accident décrochant de la vallée de Posada (PVF, fig. 6), dans l'est de la Sardaigne, serait l'équivalent et la continuité de l'accident de Grimaud. Nous

respecterons donc cette continuité dans les reconstructions du Paléozoïque terminal.

### Le découplage Corse du nord - Corse du sud

La différence notable de 30° en déclinaison entre le nord de la Corse et le nord de la Sardaigne a amené Westphal *et al.* (1976) à découpler les deux îles et à proposer une rotation relative de 30° de la Sardaigne par rapport à la Corse au Tertiaire. Cette interprétation a été contestée, d'abord sur la base d'argu-

ments géologiques qui montrent que, dans le nord de la Sardaigne et le sud de la Corse, les filons tardi-hercyniens sont strictement parallèles (Arthaud et Matte, 1977a), puis d'arguments paléomagnétiques, les directions d'aimantation dans ces filons étant quasi identiques (Vigliotti *et al.*, 1990 ; tabl. 3). Une première solution consisterait à envisager que les aimantations dans les formations du premier cycle volcanique de Corse du nord et celles des dykes du sud ne sont pas contemporaines. Dans ce cas, les directions pourraient représenter deux stades d'une rotation antihoraire contemporaine de l'acquisition des aimantations. La direction dans le sud serait alors la plus ancienne. Si au contraire, les aimantations sont de même âge, alors un découplage entre le nord et le sud de la Corse s'impose. Or il existe en Corse centrale une série d'accidents courbes à concavité vers le nord, parmi lesquels l'accident de Solenzara, qui pourraient avoir fonctionné en décrochement et constitué un couloir de déformation relativement large, d'abord au Permien moyen comme on le verra plus loin et surtout pendant la rotation de la Sardaigne et du sud de la Corse par rapport à la Corse du nord, à l'Estérel et aux Maures, au Crétacé-Tertiaire inférieur. L'âge des aimantations n'étant connu dans aucun des cas, nous privilégions provisoirement la seconde hypothèse (fig. 6).

### Le découplage apparent Sardaigne du nord-Sardaigne du sud

La différence importante entre les directions du nord et du sud de la Sardaigne a été interprétée de deux façons dépendant de l'âge des aimantations (Edel *et al.*, 1981). Si les aimantations ont le même âge dans toute l'île, alors il faut envisager un découplage et une rotation relative entre les deux parties de l'île. Si, au contraire, ces âges sont différents, les directions déviées peuvent représenter différents stades d'une rotation globale de l'île. Un mouvement relatif n'est pas exclu, et l'île est traversée par des accidents tardifs NE-SW qui ont joué en décrochement. La zonation métamorphique s'incurve d'ailleurs à l'approche de l'accident de Centre-Sardaigne (fig. 6). Cependant, au nord comme au sud, les directions des zonations métamorphiques et magmatiques ainsi que des principaux accidents

tectoniques restent orientés NW-SE à WNW-ESE, ce qui rend une rotation relative de 55° improbable. L'interprétation dépendant fortement de la chronologie des événements, il importe de discuter l'âge des aimantations dans les deux parties de l'île avant de proposer une solution.

Les datations K-Ar sur feldspaths des échantillons de la Gallura étudiés par Westphal *et al.* (1976) montrent un groupement entre 247 et 267 Ma (Edel *et al.*, 1981). Excepté un âge à 268 Ma comparable à ces derniers, les âges obtenus par la méthode Rb-Sr sur roche totale et sur minéraux sont généralement plus vieux et se regroupent entre 286 et 291 Ma (Del Moro *et al.*, 1996 ; Vaccaro *et al.*, 1991). Les ignimbrites rhyolitiques de la Nurra se caractérisent par des âges K-Ar sensiblement plus anciens, à 302-303 Ma pour la biotite et dans la même gamme que précédemment pour les feldspaths, soit 248 Ma. Dans le sud-est (Barbagia, Ogliastra, Gerrei), les datations K-Ar de sites étudiées en paléomagnétisme font apparaître essentiellement deux groupes d'âges (Edel *et al.*, 1981). Les feldspaths ont fourni des dates entre 270 et 245 Ma, avec un maximum autour de 265 Ma, comparables à ceux obtenus par la même méthode sur roche totale (Cozzupoli *et al.*, 1971). Par contre, les biotites et, dans un cas les plagioclases, présentent des âges plus élevés de 287 à 315 Ma. En résumé, au nord comme dans le sud-est de la Sardaigne, les datations sur roche totale et sur feldspaths montrent une fourchette d'âges commune entre 245 et 270 Ma avec un pic autour de 265 Ma qui marque vraisemblablement un événement hydrothermal. On notera que ces âges coïncident avec celui du volcanisme et de l'hydrothermalisme dans l'Estérel (Zheng *et al.*, 1992). Les âges sur biotite et une partie des âges sur plagioclases se regroupent entre 287 et 315 Ma. La fourchette plus serrée pour les biotites, soit 301 à 307 Ma correspond vraisemblablement à la mise en place des volcanites de la Nurra, de la Barbagia, de l'Ogliastra et du Gerrei. Quant aux volcanites de la Gallura, le bon groupement des âges Rb-Sr sur minéraux et sur roche totale à 286-289 Ma suggère une mise en place plus tardive.

Dans les roches du socle, les aimantations sont rarement contemporaines de la mise en place des formations. Les aimantations de la Gallura, de la Nurra, et de part et d'autre du détroit de Bonifacio, qui pré-

sentent des directions relativement homogènes (fig. 6), doivent être plus jeunes que 286-289 Ma, car à cette époque la paléolatitute autour de 0° (fig. 6) situerait le bloc MECS à la hauteur du Massif du Bohème (fig. 7). Par contre, si on attribue aux aimantations les âges autour de 265 Ma des feldspaths, roches totales et d'une partie des plagioclases, interprétés comme résultant d'une phase hydrothermale liée au volcanisme du 2<sup>ème</sup> cycle de l'Estérel, alors les paléolatitudes concordent (fig. 7c). Les aimantations en question seraient donc des réaimantations contemporaines de cet événement hydrothermal. On verra plus loin que le bloc MECS subit une première dislocation au Permien moyen-supérieur. Or cette zone de dislocation passe entre les Maures et la Sardaigne, puis traverse la Corse centrale. Les formations concernées par cette réaimantation à 265 Ma sont toutes situées à proximité de cette zone tectonique, ce qui suggère que phase hydrothermale, phase tectonique et réaimantations sont liées. Au vu des datations radiométriques, le sud de la Sardaigne semble avoir subi également cette altération d'origine hydrothermale. Cependant, les sites paléomagnétiques sont loin de la zone de dislocation tardive et des accidents décrochants E-W du nord et du centre de la Sardaigne. Les déclinaisons diffèrent de celles du nord de près de 55° et les paléolatitudes de 2 à 3°, voire 4 à 5° si la polarité des aimantations du sud de l'île est normale. Si au Permien, des décrochements ont vraisemblablement affecté l'île, il paraît exclu que celle-ci ait subi une rotation relative entre le nord et le sud de 55° voire 125°. Dans un des sites de la série de Seulo (site 89, Edel *et al.*, 1981) a été mise en évidence une aimantation secondaire avec une direction voisine de celles de la Gallura qui indique que les deux types de directions ne sont pas contemporains. D'autre part, comme en témoigne le test du pli, les aimantations sont antérieures aux événements tectoniques qui ont basculé les séries volcaniques. Les aimantations peuvent donc être contemporaines de la fermeture des biotites (301 à 307±8 Ma) ou, si on excepte l'âge à 315±11 Ma qui reste cohérent avec les précédents, de celle des plagioclases (287 à 297±10 Ma). L'hypothèse d'une rotation globale de la Sardaigne au cours du Stéphan-Autunien est donc la plus probable. Il reste à connaître le sens de cette ample rotation.

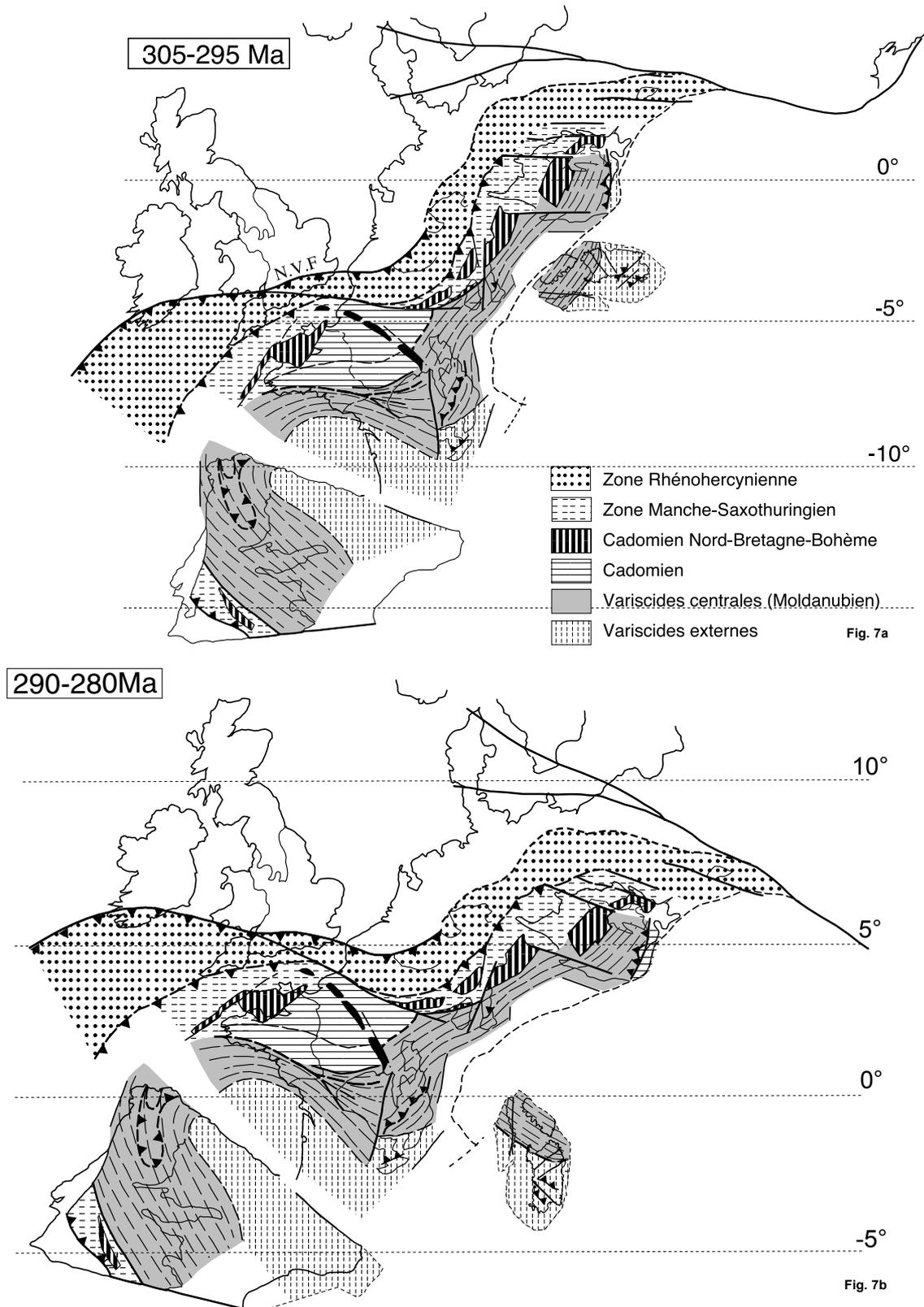


Fig. 7a

Fig. 7b

Fig. 7.- Paleogéographie de l'Europe varisque a) au Stéphanien, b) à l'Autunien, c) au Saxonien et d) au Jurassique moyen, d'après la carte du socle (Edel et Weber, 1995), les PGV moyens du Carbonifère supérieur-Permien (Edel et Schneider, 1995), et les résultats paléomagnétiques sur le bloc MECS (tabl. 2 et 3, fig. 6). Les mouvements tardi-varisques de l'Ibérie et les chevauchement et raccourcissement de la zone rhéno-hercynienne ne sont pas pris en compte dans les reconstructions. Les erreurs sur les positions relatives peuvent atteindre 500 km.

Fig. 7.- Paleogeography of the European Variscides during the a) Stephanian, b) Autunian, c) Saxonian and d) Middle Jurassic, according to the basement map (Edel and Weber, 1995), the average VPG for the Late Carboniferous to Permian (Edel and Schneider, 1995) and the paleomagnetic results of the MECS block (Tables 2 and 3, Fig. 6). The late Variscan movements of Iberia and the thrusting and shortening of the Rhine-Hercynian zone are not taken into account in the reconstructions. Errors related to the relative positions can be as much as 500 km.

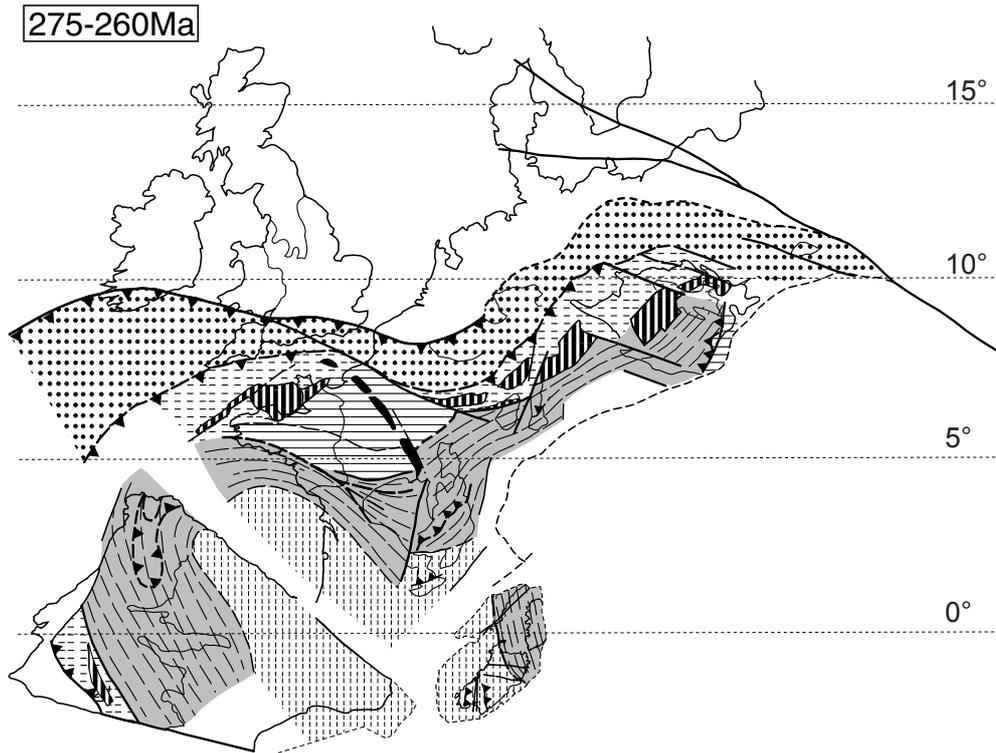


Fig. 7c

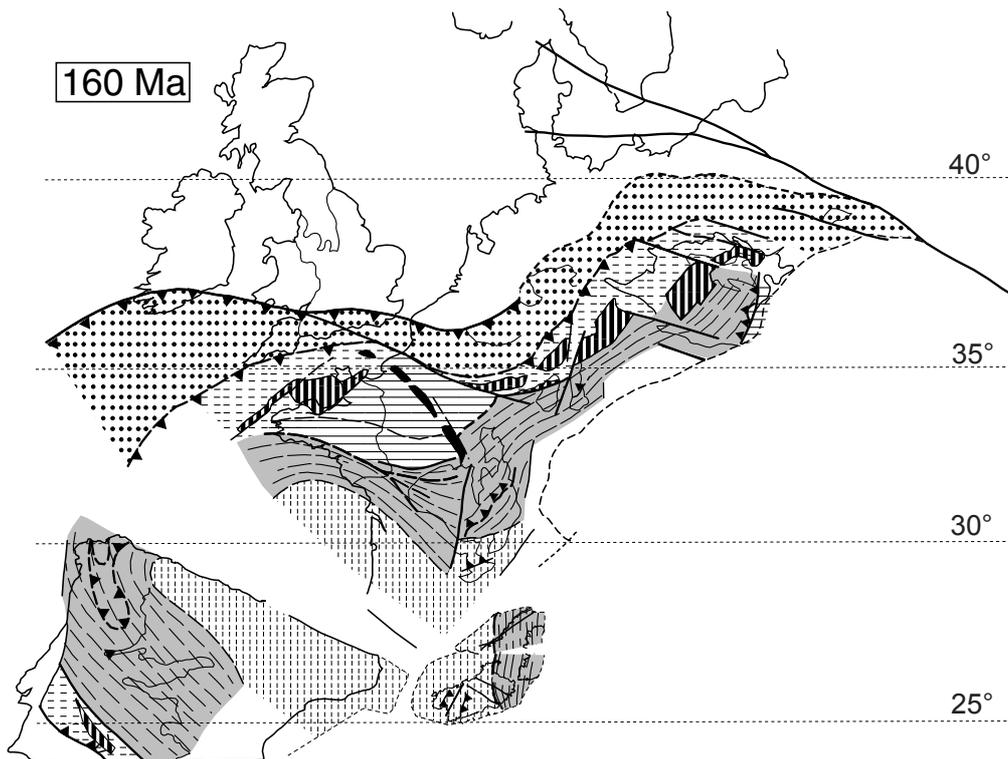


Fig. 7d

Le sens de la rotation dépend de la polarité du champ magnétique qui régnait lors de l'acquisition des aimantations du sud de l'île. Au vu des âges possibles, les aimantations ont été acquises pendant la très longue période de champ inverse du

Kiaman, qui a duré de 310 Ma à 265 Ma. Cependant, plusieurs périodes à champ normal ont été reconnues à l'intérieur du Kiaman. Menning (1995) en dénombre au moins cinq, dont deux vers 296 Ma et deux autres vers 291 Ma, donc à des

périodes comparables à celles de la mise en place de nos aimantations. Dans un des sites du massif de Seui-Seulo (site 165), deux échantillons montrent une direction ouest, opposée à celle des autres échantillons et des autres sites. Parmi les huit

sites ordoviciens de l'Iglesiente caractérisés par des directions voisines de celles de la Barbagia et de l'Ogliastra, deux montrent une direction opposée aux six autres (tabl. 3 ; Manzoni, non publié). La logique voudrait que les rares directions opposées correspondent à des réaimantations acquises pendant une de ces périodes à champ normal et que les autres datent de la période inverse de Kiaman. Cependant l'inverse est non seulement possible, mais probable si l'on prend en compte d'autres paramètres.

Une polarité inverse de type Kiaman implique une paléolatititude de 1 à 4°N lors de la mise en place des aimantations de la Sardaigne méridionale et une rotation antihoraire de l'île ; au contraire, une polarité normale signifie que la rotation était horaire et la paléolatititude avant rotation de 1 à 4°S. Dans le premier cas, les reconstructions obtenues à partir des PGV de l'Europe varisque entre 285 et 310 Ma (Edel et Schneider, 1995) situent la Sardaigne 500 à 1000 km au nord de sa position du Permien moyen. Si on prend les PGV de Baltica (Torsvik *et al.*, 1996), la Sardaigne est encore plus au nord, au niveau de la plate-forme russe pendant toute la période considérée. L'hypothèse d'une polarité inverse implique donc une dérive nord-sud de 500 à 1200 km associée à la rotation antihoraire, entre 305-290 Ma et 265 Ma. Si, au contraire, on considère que la polarité des aimantations est normale, la dérive pendant la rotation horaire n'est que de 0 à 700 km (fig. 7a).

Dans les Maures, la coexistence et la séquence des directions B-A1-A0 ne peut être expliquée que par une rotation horaire de 50-60° au Permien inférieur. Compte-tenu de la continuité des marqueurs géologiques des Maures à la Sardaigne, c'est donc l'ensemble du bloc MECS qui a subi une rotation horaire.

### Les mouvements tardifs du Permien moyen et du Tertiaire inférieur

Les résultats paléomagnétiques obtenus pour le Trias et le Jurassique de Sardaigne (Hörner, 1979 ; Edel, 1980) montrent que depuis le Jurassique, l'île a subi une rotation anti-horaire de 80° par rapport à l'Europe. C'est pourquoi, sur la figure 5 les directions permo-carbonifères de Sardaigne ont été corrigées de

80° afin d'illustrer les seuls mouvements anté-triasiques. On constate que les directions des sédiments permo-triasiques de la Nurra, dans le nord-ouest de l'île, se corrélaient très bien avec celles des sédiments thuringiens des Maures (Merabet et Daly, 1986). Si on prend en compte les directions plus anciennes à inclinaison subhorizontale du Permien inférieur - moyen de la Gallura (Zijderveld *et al.*, 1970 ; Westphal *et al.*, 1976), du nord de la Sardaigne et du sud de la Corse (Vigliotti *et al.*, 1990), alors les zonations métamorphiques et magmatiques sont continues et parallèles sur tout le bloc MECS (fig. 6). Cette reconstruction ne nécessite cependant qu'une rotation de 60° de la Sardaigne et non de 80° par rapport au reste des Variscides. Ceci implique une rotation horaire supplémentaire de la Sardaigne par rapport aux Maures et à l'Estérel de près de 20° après l'Autunien et avant le Thuringien. La différence de déclinaison entre les directions des volcanites de la Nurra et celles de la Gallura et du complexe filonien pourrait aussi résulter de cette rotation, auquel cas le mouvement serait contemporain des réaimantations autour de 265 Ma. La grande rotation horaire qui a affecté l'ensemble du bloc MECS se termine donc par une fracturation et un premier démembrement du même bloc, associée à une phase hydrothermale responsable à la fois de la rejuvénation autour de 265 Ma des âges radiométriques, et des réaimantations A0 des Maures, de Corse et de la Sardaigne septentrionale.

On a vu plus haut que du Trias au Jurassique moyen, la Sardaigne et la Corse méridionale étaient tournés de 80° dans le sens horaire par rapport à l'Europe stable (fig. 7 : 160 Ma ; Hörner, 1979 ; Edel, 1980). A l'Eocène-Oligocène, cet angle n'était plus que de 30° pour l'ensemble du bloc corso-sarde (Montigny *et al.*, 1981 ; Vigliotti et Kent, 1990). La rotation entre le sud et le nord de la Corse a donc eu lieu au Crétacé et/ou au début du Tertiaire. D'après Edel (1980) ce mouvement devait être contemporain des rotations antihoraires de l'Ibérie, des Alpes du Sud et des nappes appennines (Van den Berg, 1979) tous entraînés par l'Afrique lors de sa rotation antihoraire du Crétacé. Au vu de sa position par rapport à l'Ibérie pendant le Mésozoïque (fig. 7), le bloc MECS a subi les mouvements de la péninsule. La dislocation de la moyenne Corse et

la rotation antihoraire de l'ensemble Sardaigne-Corse méridionale par rapport au bloc Maures-Estérel-Corse septentrionale est donc liée à la rotation de l'Ibérie et à la convergence pyrénéenne. Le décrochement sénestre des Maures méridionales le long de la faille de la Môle (LMF, fig. 6) qui, dans son prolongement sud-ouest coïncide avec la marge ouest de la Sardaigne (fig. 6) serait un mouvement initiateur de l'ouverture et de la rotation comme le suggèrent les âges par trace de fission de 94,8±2,9 à 62,5±3,9 Ma obtenus récemment dans la région de Saint-Tropez, à proximité immédiate de la faille (Jakni *et al.*, 1998). Il faudrait vérifier si en Corse, et plus particulièrement dans la zone de décrochement supposée, de tels âges existent également.

### Conclusion: la rotation horaire du bloc Maures- Estérel-Corse-Sardaigne

Les rhyolites du bassin du Plan-de-la-Tour se sont probablement mises en place à la même époque que celles de la Nurra, vers 303±9 Ma. A l'époque les deux régions se faisaient face (fig. 6). Dans le bassin, les aimantations les plus vieilles sont les réaimantations B1 et B2 acquises pendant la phase de transpression qui, entre 300 et 280 Ma, a fait fonctionner la faille de Grimaud en décrochement dextre et basculé les séries rhyolitiques et sédimentaires vers le sud-est (Sosson *et al.*, 1998). Comme le suggèrent les inclinaisons des directions *in situ* B2 et des directions corrigées B, ce basculement n'était pas complètement terminé après la réaimantation B2. Les aimantations A0 sont des réaimantations post-tectoniques, donc postérieures à l'Autunien (Toutin-Morin et Bonijoly, 1992), qui présentent des inclinaisons voisines de celles du premier cycle volcanique de Corse, des filons du sud de la Corse et du nord de la Sardaigne, des rhyolites de la Gallura et de la Nurra.

Si les hypothèses suivantes sont vérifiées : - 1) la rotation horaire du Plan-de-la-Tour est extrapolable à l'ensemble du bloc Maures-Estérel, 2) au Westphalo-Stéphanien, les zonations géologiques et tectoniques sont continues du bloc Maures-Estérel au bloc Corse-Sardaigne, 3) la polarité des aimantations du sud de la Sardaigne est normale, - alors le bloc MECS a tourné de près de 125° dans le sens horaire entre 300 et 265 Ma.

Une reconstruction basée sur les directions de Sardaigne méridionale pour le bloc MECS et sur la courbe de dérive des pôles d'Europe Varisque pour les Variscides (Edel et Schneider, 1995) est proposée pour la fin du Carbonifère, vers 300-295 Ma (fig. 7). Compte tenu des erreurs sur les inclinaisons et surtout sur les âges des aimantations et des PGV, l'erreur sur la position en latitude du bloc MECS par rapport au reste de la chaîne est de  $\pm 2,5^\circ$ . Dans cette configuration, le bloc MECS vient se placer entre le Massif central et le Massif de Bohême, la Sardaigne et le sud de la Corse étant tournés de  $90^\circ$  par rapport à leur position actuelle. Les zonations métamorphiques et magmatiques du bloc MECS sont alors parallèles à celles de la branche orientale des Variscides. L'accident de Grimaud est dans le prolongement de l'accident qui borde les Cévennes peu métamorphiques au nord. L'énigme de la forme en Y de la zone interne des Variscides au Permien moyen-supérieur (Matte, 1991) semble donc résolue puisque les branches orientale et méridionale n'en forment plus qu'une. Le Y redevient le classique V varisque.

La rotation horaire du bloc MECS a commencé au Stéphanien et s'est poursuivie jusqu'à la fin de l'Autunien. C'est pendant la rotation que le bassin du Plan-de-la-Tour est soumis à un régime de transpression dextre et à une phase de réaimantation donnant lieu aux directions B1 et B2. Le bloc MECS est alors orienté N-S (fig. 7 : 290-285 Ma). La fin de la rotation coïncide avec la fin de la rotation horaire des Variscides centrales et septentrionales (Moldanubien et Saxothuringien), initiée vers 330-328 Ma, juste après la phase compressive du Viséen supérieur (phase sudète) (Edel et Wickert, 1991 ; Edel et Lewandowski, 1993, in press). Ces mouvements ont eu lieu dans un contexte de transpression dextre qui, au Dévonien-Carbonifère inférieur a affecté l'ensemble des Variscides (Saxothuringien et Moldanubien) (Matte *et al.*, 1990 ; Edel et Weber, 1995), et qui au Carbonifère supérieur, a essentiellement déformé la partie méridionale de la chaîne (Arthaud et Matte, 1977b ; Bard, 1997). La dernière

phase de ce régime de transpression qui se termine vers 270-265 Ma, se traduit à l'extrémité occidentale de la chaîne par la dernière phase alléghanienne (Prost et Becq-Girodon, 1989). En Europe méridionale, le bloc MECS subit une première dislocation. La zone tectonisée est grossièrement orientée E-W, parallèlement au bassin permien du Bas-Argens qui sépare les Maures et l'Estérel. L'hydrothermalisme à l'origine des veines minéralisées datées à  $264 \pm 2$  Ma de l'Estérel (Zheng *et al.*, 1992) et des âges K-Ar entre 247 et 268 Ma obtenus en Sardaigne sur feldspaths et sur roche totale, est vraisemblablement lié à cette tectonique. Il est également responsable des réaimantations de la Corse méridionale et de la Sardaigne septentrionale. L'ensemble Sardaigne - Corse méridionale subit une rotation supplémentaire d'une vingtaine de degrés qui semble ne pas affecter le bloc Maures-Estérel-Corse septentrionale.

Après cet événement tectonique qui marque un changement radical dans le mouvement de la Laurussie, celle-ci amorce un mouvement de dérive très régulier vers le nord, couplé à une légère rotation antihoraire, qui dure près de 70 Ma. Il est brutalement stoppé à la fin du Trias pour cause de collision en Asie orientale (Edel et Düringer, 1997). L'arrêt de la dérive et le couple exercé sur la Pangée se traduit par une fracturation, une rotation de l'Eurasie, le début du rifting atlantique et, dans la zone qui nous intéresse, l'ouverture des bassins du sud-est et piémontais. L'Ibérie et le bloc MECS ont globalement suivi ce mouvement vers le nord mais, sous l'effet de la distension, en se désolidarisant de l'Europe, provoquant ainsi une première ouverture du Golfe de Gascogne. Il est probable qu'au cours de cette dérive de la Laurussie, le bloc MECS arrive au voisinage de la Catalogne, position qu'il va garder jusqu'au Tertiaire (voir la reconstruction au Jurassique, fig. 7). Le modèle proposé soulève cependant une question qui reste pour le moment sans réponse : qu'y avait-il entre le bloc MECS et le bloc de l'Ebre au Carbonifère supérieur - Permien inférieur ?

Au Crétacé et au Tertiaire inférieur, le bloc MECS subit les effets de la rotation antihoraire de l'Afrique et de l'Ibérie par rapport à l'Europe, puis de la convergence des deux grandes plaques. Cela se traduit par une importante dislocation du bloc MECS, une rotation antihoraire de  $50^\circ$  de la Sardaigne et de la Corse méridionale par rapport à l'ensemble Maures-Estérel-Corse septentrionale, autour d'un pôle situé dans le nord-ouest de la Corse, et des décrochements sénestres d'orientation NE-SW (failles de Nîme, de la Durance, de la Môle) en Provence (Westphal *et al.*, 1978 ; Edel, 1980).

A l'Oligocène, le démembrement du bloc MECS et le rifting déjà amorcé au Crétacé se poursuivent, comme en témoignent les âges K-Ar de 35-32 Ma des Estérelites de l'Estérel (Baubron *et al.*, 1974) et de Sardaigne (Montigny *et al.*, 1981) ainsi que ceux entre 35 et 21 Ma du volcanisme andésitique de Sardaigne (Montigny *et al.*, 1981). Les âges de 27-22 Ma obtenus par traces de fission sur des apatites des Maures pourraient marquer la rupture entre Maures-Estérel et Corse du nord (Morillon, 1997 ; Jakni *et al.*, 1998). Enfin, à la fin de l'Aquitainien, vers 21 Ma, l'ensemble du bloc corso-sarde amorce la dernière rotation antihoraire de  $30^\circ$  qui l'a amené en quelques millions d'années dans sa position actuelle (Montigny *et al.*, 1981).

## Remerciements

Je tiens à remercier R. Montigny et M. Westphal pour leurs critiques constructives du manuscrit. Je remercie également les organisateurs, P. Rossi et C. Delor, et les participants de la réunion spécialisée BRGM-SGF sur la Géologie du Massif des Maures (Mai, 1998), en particulier G. Bronner et M. Elter, pour les discussions fructueuses que nous avons eues sur la géologie des Maures et les raccords géologiques avec le bloc corso-sarde. J'ai particulièrement apprécié les commentaires constructifs des reviewers. Ce travail est une contribution de l'UMR 7516 Institut de Physique du Globe, CNRS-Université Louis Pasteur de Strasbourg.

## Références

Arthaud F., Matte P. (1977a) - Détermination de la position de la Corse et de la Sardaigne à la fin de l'orogénèse hercynienne grâce aux marques géologiques anté-mésozoïques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), 19/4, 833-840.

- Arthaud F., Matte P. (1977b) - Late Paleozoic strike-slip faulting in southern Europe and northern Africa: result of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **88**, 1305-1320.
- Bard J.P. (1997) - Démembrement anté-mésozoïque de la chaîne varisque d'Europe occidentale et d'Afrique du Nord : rôle essentiel des grands décrochements transpressifs dextres accompagnant la rotation-translation horaire de l'Afrique durant le Stéphanien. *C.R. Acad. Sci., Fr.*, Paris, **324**, (2a), 693-704.
- Begassat P. (1985) - Les bassins stéphanien des Maures et de Tanneron ; pétrologie, géochimie du volcanisme, métallogénie. Thèse, Paris VI, 163 p.
- Basso A.M. (1985) - Le Carbonifère de Basse Provence (sud-est de la France). Thèse, Aix-Marseille I, 319 p.
- Baubron J.C. (1974) - Etude de l'évolution magmatique des formations calco-alcalines de Provence et de Haute-Provence par la géochimie rubidium strontium. BRGM rapport 74, SGN 003 LAB.
- Cozzupoli D., Discendenti A., Lombardi G., Niciletti M. (1971) - Geocronologia K-Ar delle manifestazioni eruttive del settore di Seui-Seulo (Barbagia, Sardenia). *Period. Mineral.*, **40**, 113-114.
- Bronner G., Castanet E. (1998) - Le bassin stéphanien du Plan-de-la-Tour (Massif des Maures, Var) n'est pas un synclinal. *In: Réunion spécialisée BRGM-Société géologique de France, Géologie du Massif des Maures*, abstr.
- De Jong K.A., Manzoni M., Stavenga T., Van Dijk F., Van Der Voo R., Zijdeveld J.D.A. (1973) - Paleomagnetic evidence for the rotation of Sardinia during the early Miocene. *Nature*, **243**, 281-283.
- Del Moro A., Di Simplicio P., Ghezzi C., Guasparri G., Rita F., Sabatini G. (1975) - Radiometric data and intrusive sequence in the Sardinia batholith. *Neues Jahrbuch Mineral.*, **126**, 28-44.
- Edel J.B. (1979) - Paleomagnetic study of the Tertiary volcanics of Sardinia. *J. Geophys.*, **45**, 259-280.
- Edel J.B. (1980) - Etude paléomagnétique en Sardaigne. Conséquences pour la géodynamique de la Méditerranée occidentale. Thèse doct., Strasbourg I, 310 p.
- Edel J.B. (2000) - The rotations of the Variscides during the carboniferous collision: paleomagnetic constraints from the Vosges and the Massif Central (France). *Tectonophysics*, (in press).
- Edel J.B., Wickert F. (1991) - Paleoposition of the Saxothuringian (Northern Vosges, Pfalz, Odenwald, Spessart) in Variscan times: paleomagnetic investigation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **103**, 10-26.
- Edel J.B., Lewandowski M. (1993) - Polyphased palaeomagnetic overprinting in the central part of the Variscan belt, with emphasis on the southern Vosges Devonian-Dinantian basin. Geotectonic interpretation. *In: New Trends in Geomagnetism, IIIrd biennial Meeting, Smolenice, Slovakia, June 1992, Geol. Carpathica*, **44/6**, 381-398.
- Edel J.B., Schneider J.L. (1995) - The Late Carboniferous to Early Triassic evolution of Variscan Europe in the light of magnetic overprints in Early Permian rhyolites from northern Vosges (France) and central Black Forest, (Germany). *Geophys. J. Int.*, **122**, 858-876.
- Edel J.B., Weber K. (1995) - The Cadomian terranes, wrench-faulting and thrusting in the Central Europe Variscides - geophysical and geological evidence. *Geol. Rundsch.*, **84**, 412-432.
- Edel J.B., Düringer P. (1997) - Paleomagnetic constrains on the Apparent Polar Wander Path of the European Plate in Late Triassic-Early Jurassic times - new data from NE France and SW Germany. *Geophys. J. Int.*, **128**, 331-344.
- Edel J.B., Montigny R., Thuizat R. (1981) - Late Paleozoic rotations of Corsica and Sardinia: new evidence from paleomagnetic and K-Ar studies. *Tectonophysics*, **79**, 201-223.
- Elter F.M., Musumeci G., Pertusati P.C. (1990) - Late Hercynian shear zones in Sardinia. *Tectonophysics*, **176**, 387-404.
- Jakni B., Poupeau G., Sosson M., Morillon A.C., Rossi P. (1998) - Thermochronologie par traces de fission du massif des Maures-Tanneron. *In: Réunion spécialisée BRGM-Société géologique de France, Géologie du Massif des Maures*, abstr., 19-21.
- Jelinek V. (1981) - Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, **79**, 63-72.
- Hörner F. (1979) - Paläomagnetismus und gesteinsmagnetische Untersuchungen an mesozoischen Karbonatgesteinen Sardiniens. Dipl. ETH, Zürich, AGT.X.
- Kent J.T., Briden J.C., Mardia K.W. (1983) - Linear and planar structure in ordered multivariate data as applied to progressive demagnetization of palaeomagnetic remanence. *Geophys. J. Roy. astron. Soc.*, **75**, 593-621.
- Kirschvink J.L. (1980) - The least square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. Roy. astron. Soc.*, **62**, 699-718.
- Manzoni M. (1975) - Paleomagnetic data from Tertiary volcanics of the Campidano grabens, Sardinia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **27**, 275-282.
- Manzoni M., Ferriani A. (1976) - Trattamento statistico e validità dei dati paleomagnetici delle vulcaniti terziarie della Sardegna. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, **95**, 1263-1281.
- Matte P.P. (1991) - Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in Western Europe. *Tectonophysics*, **196**, 309-337.
- Matte P., Maluski H., Rajlich P., Franke W. (1990) - Terrane boundaries in the Bohemian Massif Result of large-scale Variscan shearing. *Tectonophysics*, **177**, 151-170.
- Menning M. (1995) - A numerical time scale for the Permian and Triassic periods: an integrated time analysis. *In: Scholle P.A., Peryt T.M. et Ulmer-Scholle D.S. (eds), The Permian of Northern pangea, vol. 1, Springer verlag*, 77-97.
- Merabet N., Daly L. (1986) - Détermination d'un pôle paléomagnétique et mise en évidence d'aimantations à polarité normale sur les formations du Permien supérieur du Massif des Maures (France). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **80**, 156-166.
- Montigny R., Edel J.B., Thuizat R. (1981) - The rotation of Sardinia in the Tertiary: K-Ar dating and paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **54**, 261-271.
- Morillon A.C. (1997) - Etude thermo-chronologique appliquée aux exhumations en contexte orogénique : le Massif des Maures (France) et les cordillères bétiques (Espagne). Thèse doct., Nice.

- Odin G.S. (1994) - Geological Time scale. *C.R. Acad. Sci., Fr.*, Paris, **318**, (2), 59-71.
- Orsini J.B. (1976) - Les granitoïdes hercyniens corso-sardes: mise en évidence de deux associations magmatiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), **18/5**, 1203-1206.
- Orsini J.B. (1979) - Existence d'une zonation spatiale de la chaîne varisque aux temps carbonifères à l'aide de marques plutoniques. Implications géodynamiques. *C.R. Acad. Sci., Fr.*, Paris, **289**, (D), 1109-1112.
- Prost A.E., Becq-Giraudon J.F. (1989) - Evidence for mid-Permian compressive tectonics in western Europe supported by a comparison with the Alleghanian geodynamic evolution, *Tectonophysics*, **169**, 333-340.
- Ricci C.A., Sabatini G. (1978) - Petrologic affinity and geodynamic significance of metabasic rocks from Sardinia, Corsica and Provence. *Neues Jb. Mineral Monatsh.*, **1**, 23-38.
- Roubault M., Bordet P.P., Leutwein F., Sonet J., Zimmermann J.L. (1970) - Ages absolus des formations volcaniques du Tanneron-Estérel (Var). *C.R. Acad. Sci., Fr.*, Paris, **271**, (D), 14, 1157-1160.
- Roussel C., Crevola G., Lerouge G., Morillon A.C., Pupin J.P., Sosson M. (1998) - Structure et evolution du bassin houiller de Plan-de-la-Tour et de ses bordures (Maures, Var, France). In: Réunion spécialisée BRGM - Société géologique de France, Géologie du Massif des Maures, abstr., 34-36.
- Sosson M., Morillon A.C., Feraud G., Ruffet G., Crevola G., Lerouge G. (1998) - L'exhumation hercynienne du massif des Maures : contraintes tectoniques et thermochronologique. In: Réunion spécialisée BRGM - Société géologique de France, Géologie du Massif des Maures, abstr., 40-41.
- Storetvedt K.M., Markhus L.A. (1978) - Multivectorial magnetization in Late Paleozoic volcanics from North Sardinia; partial remagnetization and rotation. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, **53**, 245-257.
- Torsvik T.H., Smethurst M.A., Meert J.G., Van Der Voo R., Mckerrow W.S., Brasier M.D., Sturt B.A., Walderhaug H.J. (1996) - Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Paleozoic - A tale of Baltica and Laurentia. *Earth Science Rev.*, **40**, 229-258.
- Toutin-Morin N., Bonijoly D. (1992) - Structuration des bassins de Provence orientale à la fin de l'ère primaire. *Cuadernos de Geologica Iberica*, **16**, 59-74.
- Toutin-Morin N., Crevola G., Giraud J.D., Dubar M., Brocard C., Dardeau G., Bulard P.F., Meinesz A., Bonijoly D. (1994) - Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille 1024 Fréjus-Cannes, BRGM.
- Vaccaro C., Atzori P., Del Moro A., Oddone M., Traversa G., Villa I.G. (1991) - Geochronology and Sr isotope geochemistry of late-hercynian dykes from Sardinia. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **71**, 221-230.
- Van den Berg J. (1979) - Paleomagnetism and the changing configuration of the Western Mediterranean area in the Mesozoic and Early Cenozoic eras. *Geologica Ultraiectina*, **20**, 178 p.
- Vigliotti L., Kent D.V. (1990) - Paleomagnetic results of Tertiary sediments from Corsica: evidence of post-Eocene rotation. *Phys. Earth Planet. Int.*, **62**, 97-108.
- Vigliotti L., Alvarez W., McWilliams M. (1990) - No relative rotation detected between Corsica and Sardinia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **98**, 313-318.
- Vlag P., Vandamme D., Rochette P., Spinelli (1997) - Paleomagnetism of the Esterel rocks: a revisit after the thesis of Hans Zijdeveld. *Geologie en Mijnbouw*, **76**, 21-33.
- Westphal M. (1976) - Paléomagnétisme des formations permienes de Corse. Comparaison avec la Sardaigne et l'Estérel. *Bull. Soc. géol. Fr.*, **18/5**, 1209-1215.
- Westphal M., Orsini J., Vellutini P. (1976) - Le micro-continent corso-sarde, sa position initiale : données paleomagnétiques et raccords géologiques. *Tectonophysics*, **30**, 141-157.
- Westphal M., Edel J.B., Schott J.J. (1978) - Essai de synthèse des données paléomagnétiques et de la tectonique des plaques en Méditerranée occidentale. *C.R. somm. Soc. Géol. Fr.*, **20**, 12-15.
- Zheng J.S., Mermet J.F., Toutin-Morin N., Hanes J., Gondolo A., Morin R., Feraud G. (1991-1992) - <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating of Permian magmatism and fluorite-baryte veins of eastern Provence (France). *Geodinamica Acta* (Paris), **5**, 203-215.
- Zijdeveld J.D.A. (1975) - Paleomagnetism of the Estérel rocks. Thèse, Utrecht, 199 p.
- Zijdeveld J.D.A., De Jong K.A., Van Der Voo R. (1970) - Datation of Sardinia: paleomagnetic evidence from Permian rocks. *Nature*, **226/5249**, 933-934.