

Variation séculaire de la direction du champ géomagnétique enregistrée par les laves de l'Etna et du Vésuve pendant les deux derniers millénaires

Secular variation of the geomagnetic field direction recorded in lavas from Etna and Vesuvius during the last two millennia

Jean-Claude Tanguy^{a,b,*}, Maxime Le Goff^a, Vito Chillemi^b, Anna Paiotti^c, Claudia Principe^c, Santo La Delfa^b, Giuseppe Patanè^b

^a Université Paris-6 et laboratoire de géomagnétisme, Institut de physique du Globe, 4, av. de Neptune, 94107 Saint-Maur-des-Fossés cedex, France

^b Istituto di Geologia e Geofisica, Università di Catania, 55, Corso Italia, 95129 Catania, Italie

^c Istituto di Geocronologia e Geochimica Isotopica, CNR, 36 via Cardinale-Maffi, 56127 Pisa, Italie

(Reçu le 22 mars 1999, accepté après révision le 30 août 1999)

Abstract — High precision methods of sampling and measurement developed at Saint-Maur laboratory added to a critical examination of written documents pertaining to the history of Etna and Vesuvius enable us to reconstruct the path of the geomagnetic field direction in southern Italy for the past 2 000 years. This curve agrees well with that obtained from archaeomagnetism in France and may confidently be used either for geophysical purposes or for dating high-temperature-emplaced volcanic products and archaeological structures in the time span considered. (© 1999 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.)

Etna / Vesuvius / geomagnetic secular variation / archaeomagnetic dating

Résumé — Les méthodes de haute précision mises au point au laboratoire de Saint-Maur, ainsi que le réexamen critique des documents relatifs à l'histoire de l'Etna et du Vésuve, ont permis de retracer l'orientation du champ géomagnétique en Italie du Sud, pendant les deux derniers millénaires. La courbe ainsi obtenue s'accorde avec celle résultant des nombreux sites archéomagnétiques prospectés en France et peut être utilisée comme courbe de référence, tant pour des usages d'ordre géophysique que pour dater les produits volcaniques et les structures archéologiques mis en place à haute température pendant l'intervalle de temps considéré. (© 1999 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.)

Etna / Vésuve / variation géomagnétique séculaire / datation archéomagnétique

Abridged version

The secular variation of the geomagnetic field direction in southern Italy over the last 2 000 years has been determined by combining three sets of data. Firstly, we reconstructed a coherent history of the eruptions of Mount Etna and Mount

Vesuvius through a critical examination of 'primary sources' of information, i.e. the original texts of the most ancient documents (Tanguy, 1980; Principe et al., 1987; Rosi et al., 1993; Tanguy and Patanè, 1996), rather than interpretations by recent

Note présentée par Jean-Louis Le Mouél.

* Correspondance et tirés à part.
tanguy@ipgp.jussieu.fr

authors. Secondly, we sampled the lavas from these eruptions by using the high precision archaeomagnetic method developed at St. Maur laboratory (Thellier, 1971, 1981), known as 'the big sample plaster method'. Thirdly, the results obtained from the two Italian volcanoes were shown to agree closely with the French archaeomagnetic variation curve (Bucur, 1994; Le Goff, unpublished data) recalculated to the latitude and longitude of Etna and Vesuvius, except for two short periods (A.D. 100–400 and 1100–1300) where we suspect a bias due to imprecise archaeological dating. Conversely, the French curve is used to check the Italian results, especially when imprecise information on the exact location of eruptions could lead to spurious dates of volcanic products.

Classic core-drilling methods used in palaeomagnetism fail to reach a sufficient precision for an accurate determination of the geomagnetic secular variation (e.g. Rolph et al., 1987; Carracedo et al., 1993), with alpha 95 values (Fisher, 1953) often exceeding 3 or 4°. This is probably because of the small size of the samples which makes difficult their orientation both in the field and during measurements in the laboratory, and above all enhances the effects of parasitic magnetizations acquired during the coring process (Lauer, 1978; Audunsson and Levi, 1989). Such magnetizations may indeed be very strong and not entirely removed by alternating field demagnetizations. They have been proven to be common in Etna lavas (Tanguy, 1980).

Our method involves the sampling of blocks weighing 0.5 to 1 kg each, first detached with a hammer and then replaced in their original position. Plaster of appropriate fluidity is poured in to support a plate carrying a spherical spirit level, thus making a horizontal surface about 7 cm in diameter on which the sun shadow is reported in order to recalculate the geographical north direction. In the laboratory, the samples are replastered in square moulds 12 cm in size for measurements using a big induction magnetometer and an alternating field demagnetization device for big samples (Le Goff, 1975). Even if sawing is necessary to reduce the size of some samples, the parasitic magnetization then acquired is limited in extent to a thickness of a few millimetres around the sawing plane and is negligible because of the large size of the sample. This method also permits sampling, with the same precision, of high-temperature-emplaced volcanic pyroclasts such as nuée

ardente deposits (pyroclastic flows) and welded scoriae from explosive basaltic cones.

The results obtained from 783 "big samples" distributed among 60 sites show that 88 % of the alpha 95 values are smaller than 1.75° (*figure 1, tables I and II*). The mean palaeomagnetic directions are in remarkable agreement either with direct measures of the geomagnetic field of the last four centuries (London and Paris, e.g. Alexandrescu et al., 1996, 1997) and with the geomagnetic direction recorded in baked clays from archaeological sites in France, provided the values are reduced to the latitude and longitude of Etna or Vesuvius through the virtual geomagnetic pole (Irving, 1964). Our two sites showing alpha 95 > 2° are indeed studies still in progress (V46, *table II*) and an unfavourable outcrop, where rocks were emplaced at insufficient temperature (phreatomagmatic tephra from Mt Lepre, indicated "N" in *table I*).

The secular variation curve of Etna (*figure 2*) is reconstructed going further into the past until AD 1329, which corresponds to the most ancient eruption accurately described. However, a number of lavas presumed to have erupted between 1651 and 1284 present palaeomagnetic directions out-with this curve, most of them having a strong eastern declination which agrees with the Middle Ages. This result, already shown in Tanguy et al. (1985), is confirmed in this study by both the French and the Vesuvius curves. Such a bias in geological mapping of Etna eruptions, which are poorly located from historical accounts (e.g. Romano et al., 1982), was the main source of error in the pioneering archaeomagnetic work of Chevallier (1925), where five of the seven lava flows he used were incorrectly dated.

The samples from Vesuvius (*figure 3*), for which there are historical records dating back to the paroxysmal eruption of AD 79 (destruction of Pompei and Herculaneum), allow a good reconstruction of the geomagnetic variation in the period 79–1139. Finally, a precious indication is given for the year 1302 by a trachytic flow from the neighbouring island of Ischia, where no other eruption occurred in historical times and, therefore, where no confusion with products from other activities might have arisen (Tanguy and Pozzi, 1972). These combined results (*figure 4*) provide a powerful archaeomagnetic tool for dating archaeological structures as well as volcanic units (lava flows or high-temperature-emplaced pyroclasts) in the central Mediterranean area.

1. Introduction

La variation séculaire (VS) du champ magnétique terrestre (CMT) est connue par les mesures directes effectuées dans les observatoires depuis environ 150 ans, 3 ou 4 siècles tout au plus, en un très petit nombre de lieux privilégiés, essentiellement Londres et Paris (e.g. Thellier, 1971 ; Alexandrescu et al., 1996, 1997). Si l'on veut reconstituer la VS plus avant dans le passé, il faut recourir à des méthodes indirectes, par exemple la mesure de l'aimantation thermorémanente fossilisée dans les terres cuites de

fours datés par l'archéologie (Thellier, 1971, 1981 ; Bucur, 1994). De la même façon, on peut utiliser les roches volcaniques (coulées de lave ou dépôts pyroclastiques de haute température), qui ont figé l'orientation du CMT au moment de leur refroidissement. C'est ce qu'avait tenté de faire Chevallier (1925), en étudiant quelques-unes des coulées historiques de l'Etna. Ce volcan a été le siège d'une cinquantaine d'éruptions importantes au cours des 4 derniers siècles, et des documents écrits relatant son activité remontent à quelque 2 500 ans. Dans ce cas, toutefois, une difficulté majeure se présente, celle de

retrouver, à partir d'indications peu précises et parfois contradictoires, les coulées et systèmes éruptifs qui correspondent réellement à telle ou telle éruption décrite dans les textes. L'histoire de l'Etna n'est bien connue que depuis l'an 1600 de notre ère, et les affleurements de produits volcaniques bien datés antérieurs à cette époque se limitent à 2 ou 3. De nombreuses coulées indiquées sur la carte géologique comme datant de 1284 à 1651 (Romano et al., 1982) sont en fait plus anciennes, les différences se comptant en siècles, voire en millénaires (Tanguy, 1980 ; Tanguy et al., 1985). Ces erreurs proviennent de ce que les « sources primaires » d'information ont été réinterprétées, le plus souvent à tort, par les historiens modernes. C'est pourquoi, aussi extraordinaire que cela puisse paraître, les conclusions de Chevallier étaient erronées, non point tant en raison du caractère rudimentaire de ses instruments de mesure, mais surtout parce qu'il avait fait confiance aveuglément aux cartes existantes, l'âge de 5 des 7 coulées qu'il avait choisies étant faux.

Dans cette note, nous nous proposons d'exposer les résultats d'études effectuées sur l'Etna et le Vésuve à partir de documents historiques primaires, dont la discussion est donnée par ailleurs (Tanguy, 1980 ; Principe et al., 1987 ; Tanguy et Patané, 1996 ; Principe, données non publiées). Ces deux grands volcans, distants d'environ 350 km, se complètent. L'Etna, très actif, a fourni de nombreux courants de lave et cônes éruptifs, permettant de remonter dans le passé jusque vers 1300 de notre ère. Mais, à cause de cette surabondance et de l'enchevêtrement de coulées innombrables, il est illusoire de prétendre identifier les produits antérieurs à cette époque et, d'ailleurs, les témoignages de l'activité volcanique font défaut pour presque tout le Moyen Âge. Le Vésuve a été le siège d'éruptions moins nombreuses, dont les produits sont de ce fait plus faciles à retrouver. En outre, on dispose pour ce volcan de davantage d'informations ; en tout cas le Moyen Âge ne souffre pas de ce vide quasi absolu qui caractérise l'Etna.

2. Méthodes de prélèvement et de mesure

Les méthodes paléomagnétiques classiques par carottage sont d'une précision insuffisante pour la reconstitution de la VS. Les publications existantes en la matière (e.g. Rolph et al., 1987 ; Carracedo et al., 1993) présentent des angles de confiance à 95 % (Fisher, 1953), qui souvent dépassent 3 ou 4°, trop grands pour mettre en évidence un phénomène dont l'ampleur peut n'être que de quelques degrés (*figure 1*). Même lorsque les angles de confiance sont plus resserrés, cela ne signifie pas que les résultats soient fiables, comme on peut le constater pour certaines coulées de lave provenant d'éruptions subactuelles, par exemple celles du Vésuve en 1855, 1906, 1944, dont les orientations paléomagnétiques (*in* Carracedo et al., 1993) sont très éloignées de la direction du CMT aux dates respectives, les écarts atteignant de 5 à 10°. Sans entrer dans la discussion des causes d'erreurs possibles, men-

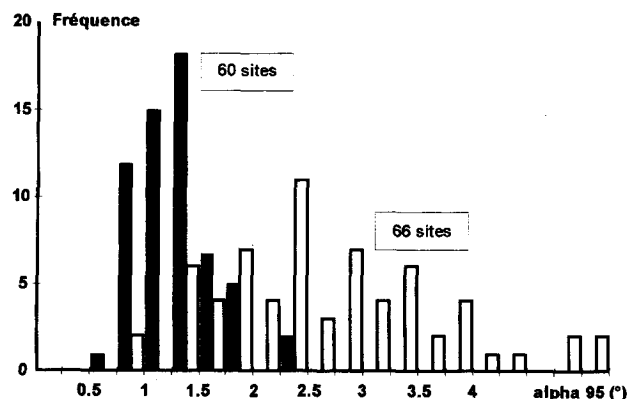


Figure 1. Fréquences comparées des semi-angles de confiance à 95 % de la statistique de Fisher, d'après les méthodes de prélèvement par carottage (en blanc, données de Rolph et al., 1987 ; de Carracedo et al., 1993) et d'après la présente étude (en noir).

Compared frequencies of the Fisher's 95 % confidence limits (degrees) for classic core-drilling methods (in white, data from Rolph et al., 1987 ; Carracedo et al., 1993) and for results from the present study (in black).

tionnons seulement la petite taille des échantillons, dont le repérage précis pose des problèmes, tant sur le terrain que lors de leur mise en place dans l'appareil de mesure, leur trop petit nombre — parfois 5 carottes de 25 mm de diamètre, prélevées à quelques centimètres de distance dans un même bloc, dont l'ensemble peut avoir basculé ou être soumis à une forte perturbation magnétique locale —, et surtout l'action du carottier, qui produit des aimantations parasites difficiles à éliminer (Lauer, 1978 ; Audunsson et Levi, 1989).

La procédure mise en œuvre au laboratoire de Saint-Maur comporte le prélèvement, au marteau et au burin, d'une moyenne de 10 à 20 « gros » échantillons (0,5 à 1 kg) par site, répartis sur toute la largeur de l'affleurement, en général plusieurs dizaines de mètres. L'orientation sur le terrain est assurée par la confection (à l'aide de plâtre, d'une plaquette et d'un petit niveau circulaire) d'un plan horizontal de 5 à 7 cm de diamètre, sur lequel on trace la direction de l'ombre du soleil à une heure déterminée. Ce procédé présente l'avantage d'être à la fois précis et exempt des erreurs de reports d'angles, la seule aberration possible étant la lecture de l'heure. En comparant les résultats fournis par plusieurs ombres tracées à des moments différents sur un même échantillon, on obtient des écarts toujours inférieurs au demi-degré.

Au laboratoire, les échantillons sont replâtrés dans des moules carrés de 12 cm de côté, de façon à obtenir trois axes de référence. S'il est nécessaire de scier une partie du bloc prélevé, la perturbation, étant limitée à moins d'un centimètre de part et d'autre du trait de scie (Lauer, 1978), se trouve pratiquement sans influence sur la direction d'aimantation globale, en raison de la taille importante de l'échantillon. Les mesures magnétiques sont effectuées sur l'inductomètre à rotation continue et sur l'appareil à désaimanter par champs alternatifs spécialement conçus pour gros échantillons (Le Goff, 1975). Là encore, les

erreurs sur la mise en place et la mesure sont considérablement réduites, du fait de la grande taille du matériel.

Les résultats obtenus à partir de 783 échantillons répartis sur les produits de 60 éruptions montrent que 88 % des alpha 95 de Fisher sont inférieurs à $1,75^\circ$ (figure 1, tableaux I et II). La précision est encore meilleure si plusieurs sites d'une même éruption ont été prospectés, par exemple $0,7^\circ$ pour celle de 1669 de l'Etna. Seuls font exception quelques cas défavorables : petits nombres d'échantillons dus à la faible surface de l'affleurement ou produits de projections mis en place à une température insuffisante. Il faut en effet souligner cet avantage supplémentaire de notre méthode, qui peut s'appliquer sans difficulté majeure aux cônes de scories ou aux dépôts de nuées ardentes (coulées pyroclastiques), pourvu que ceux-ci soient mis en place à une température supérieure au point de Curie. On remarquera les excellents résultats des scories soudées du Monte Rosso, du Monte Sona, du Monte Pizzillo et du Monte Pizzuta Calvarina de l'Etna (tableau I, 1329, H, J, X), ou des coulées pyroclastiques de 79 et 472 du Vésuve (tableau II). En revanche, le Monte Lepre, situé sur le flanc ouest de l'Etna (tableau I, N), présente un alpha 95 $> 2^\circ$, car une bonne part de ses projections résultent d'explosions phréatiques qui ont projeté du vieux sol, insuffisamment réchauffé. Remarquons que c'est là une démonstration par voie magnétique du type de dynamisme éruptif du volcan.

Bien que les résultats concernant le Vésuve et l'Etna se recoupent de façon parfaite et confirment pour l'essentiel la courbe archéomagnétique de la France, chacun des deux volcans sera considéré séparément, pour plus de clarté.

3. Courbe de variation séculaire de l'Etna

La courbe de l'Etna (figure 2) retrace la VS depuis l'époque actuelle jusque vers l'an 1300 de notre ère, en parfait accord avec les mesures directes et la courbe archéomagnétique de la France, recalculée ici aux coordonnées de la Sicile (latitude et longitude), après passage par le pôle géomagnétique virtuel (Irving, 1964). La plus ancienne éruption relatée de façon détaillée, en 1329, a construit, sur le bas versant sud-est, le cône de scories soudées du Monte Rosso, près de l'actuel village de Fleri. La direction paléomagnétique fournie par les scories du Monte Rosso s'accorde, en outre, avec celle de la coulée de 1302 dans l'île d'Ischia, près de Naples, dont l'identification ne pose pas de problème, car c'est la seule éruption historique de ce volcan (Tanguy et Pozzi, 1972). Plus avant dans le passé, les documents concernant l'Etna sont insuffisants pour localiser les produits volcaniques, la plupart des éruptions n'ayant pas été enregistrées par des témoignages humains. Même pour la période comprise entre 1284 et

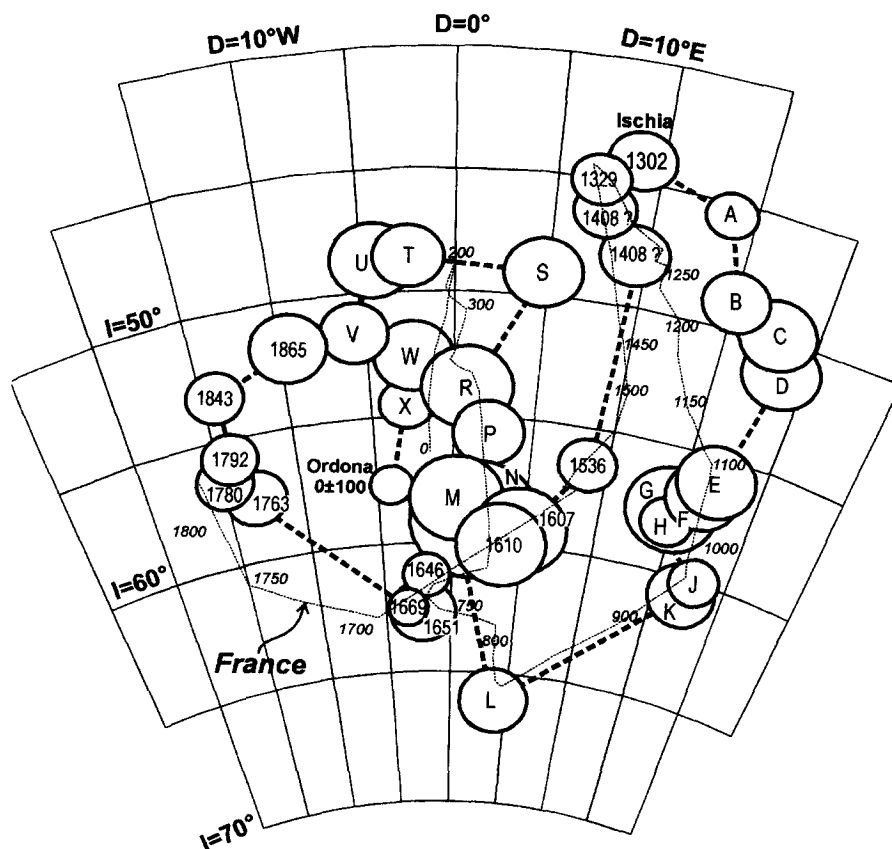


Figure 2. Variation de la direction géomagnétique d'après les laves de l'Etna (voir légende détaillée du tableau I). Les cercles sont proportionnels aux angles de confiance de Fisher à 95 %. La courbe archéomagnétique française (en tireté fin) est réduite aux latitude et longitude de l'Etna.

Geomagnetic secular variation curve from the Etna lavas (detailed caption in table I). Circles indicate the 95 % confidence limits. The light dashed line is the French curve reduced to the latitude and longitude of Etna.

Tableau I. Résultats relatifs à l'Etna (37,75° Nord ; 15,00° Est). N = nombre d'échantillons par formation éruptive (voir carte in Romano et al., 1982) ; α_{95} et k sont respectivement les angles de confiance à 95 % et le paramètre de précision de Fisher ; I = inclinaison moyenne ; D = déclinaison moyenne. Les noms d'unités volcaniques commençant par un Mont (Mt) indiquent des prélèvements sur produits de projections, les autres sites correspondent à des coulées de lave. Les affleurements sont de date sûre (1910), probable (1408 ?) ou fausse (« 1566 ») ; une date entre parenthèses après une date fausse signifie une correction après réexamen des documents historiques : « 1689 » (1651). A, B, C, etc., désignent les formations dont les dates présumées sont très incertaines. Les coulées sans lettres, en bas du tableau, sont en fait préhistoriques (âge > 3 000 ans). Le point « Ordonà » provient d'un site archéologique daté au ^{14}C entre 120 avant et 80 après J.-C. (Bucur, 1997).

Results from Mt. Etna. N is the number of samples for each volcanic formation (map in Romano et al., 1982), α_{95} and k are the semi-angle confidence limit and precision parameter from Fisher's statistics, respectively. I = mean inclination or dip. D = mean declination. Among the various volcanic units, "Mt" (scoria cone) indicates a sampling of pyroclasts, other sites are samplings on lava flows. The volcanic units may be of known age (1910), probable age (1408?) or wrong age (« 1566 »). Indication « 1689 » (1651), for example, refers to a unit whose age is revised after examination of original accounts. Letters indicate units of doubtful or unknown age, and the six sites without a letter at the bottom of the Table are indeed prehistoric (3 000 ka). "Ordonà" is the result from an archaeological site dated by the ^{14}C method at between 120 BC and AD 80 (Bucur, 1997).

Nom de l'unité volcanique	N	α_{95} (°)	k	I (°)	D (°)
1910, Cantoniera	11	1,5	760	50,7	- 6,9
1865, route de Citelli	18	1,4	583	51,9	- 9,5
1843, Bronte sud-ouest	12	1	1 552	53,2	- 14,2
1792, route de Cassone (3 sites)	23	1	837	55,8	- 14,2
1780, flanc sud (4 sites)	32	1	582	56,7	- 14,9
1763, Sapienza	9	1,1	1 861	57,7	- 13,1
1669, bas versant sud (4 sites)	30	0,7	1 310	62,5	- 3,3
« 1689 » (1651 ?), Fornazzo	16	1,2	891	63,3	- 2,2
1646, bas versant nord (2 sites)	15	0,8	1 855	61,5	- 1,9
1610, flanc sud-ouest	10	1,6	750	60	3,5
« 1536 a » (1607), Pomiciaro supérieur nord-ouest	6	1,7	1 172	59,4	4,8
1536, Piano San Leo (2 sites)	21	1	855	56,5	8,7
1408 ?, Pedara nord	15	1,2	863	48,5	9,3
1408 ?, Ràgala-Nicolosi (3 sites)	26	1,1	621	46,4	7,5
1329, Mt Rosso, Fleri	10	1	1 824	45,1	7,1
1302, Ischia (Naples) (3 sites)	24	1,2	566	47,7	9
A, Serra La Nave sud-ouest Vetore « 1536b »	11	0,9	2 129	45,4	13,7
B, Gallo Bianco supérieur « 1595a »	10	1,2	1 351	48,9	15,1
C, Linguaglossa « 1566 » (2 sites)	19	1,4	525	49,7	17,7
D, Gravina di Catania « 1381 »	12	1,4	815	51,1	18,6
E, Gallo Bianco inférieur « 1595b »	16	1,4	591	56	17
F, coulée du Mt Illice + Linera « 1329 »	15	1,3	731	56,7	16,4
F', Stazzo « 1329 »	14	1,6	553	57,1	16,1
G, Sciarà di Scordia Vacca « 1651 »	12	1,7	581	57,5	14,7
H, Mt Sona + coulée « 812 » (3 sites)	25	0,9	883	58,1	14,6
J, Mt Pizzillo, flanc nord	6	0,9	3 897	60,2	17,7
K, Pomiciaro inférieur nord-ouest « 1536c »	16	1,2	809	60,6	17
L, Trecastagni nord « 1408 »	11	1,2	1 176	66,6	3,8
M, Mt Solfizio + coulée, flanc sud-est	10	1,7	700	56,7	0,2
N, Mt Lepre, flanc ouest, « XVII ^e s. »	9	2,3	406	59	1,5
P, Ciacca, flanc sud « XII ^e s. »	9	1,3	1 358	55,7	2,2
R, Bronte, cimetière sud « XVII ^e s. »	11	1,6	668	53,9	0,8
S, coulée du Mompeloso « 252 »	13	1,3	833	49,2	4,7
T, route Funivia-Silvestri « 1537 »	6	1,3	2 080	48,6	- 2,5
U, Cibali, Catania « 252 »	11	1,5	780	48,8	- 4,4
V, Carvana, Catania « 122 BC »	7	1,2	1 952	51,7	- 5,7
W, Verzella, bas versant nord	8	1,4	1 263	51,9	- 2,4
X, Mt Pizzuta Calvarina, flanc sud-est	10	1	2 130	55,1	- 2,9
S. Giov. La Punta « 1408 » (2 sites)	16	1,5	521	51,1	1,4
Monacella-Dàgala « 1284 » (2 sites)	21	1,4	500	50,7	9,7
La Nave, bas versant nord-ouest « XII ^e s. »	12	1,8	481	41	- 16,6
Aci Castello « 1169 »	11	1,2	1 165	57,3	8,2
Lava dell'Arso, flanc sud-ouest « 425 BC »	11	1,9	488	59,9	6,9
Misterbianco « 693 BC »	8	1,7	842	48,4	11,9

Tableau II. Résultats relatifs au Vésuve (40,80°N ; 14,42°E) [même légende que le tableau I]. Les sites dont les numéros vont jusqu'à 32 correspondent à ceux de Carracedo et al., 1993 (tableau I ; p. 206) ; 41, mince coulée du versant ESE au-dessus de la carrière des Pozzelle (post 472-pré 1631) ; 42, cône de scories de Fossa Monaca, flanc sud (éruption de 1037 ?) ; 43, petite coulée du versant sud à 170 m d'altitude (éruption de 1139 ?) ; 44, coulée de l'autoroute, sortie Ercolano ; 45, coulée du Centre-Ouest de Torre Annunziata ; 46, front de coulée à Passanti (base sud-est du massif) ; 79, ponces de la coulée pyroclastique de 79, fouilles d'Herculanum ; 472, coulée pyroclastique de 472 à Pollena, versant nord-ouest.

Results from Mt. Vesuvius (see *table I* for columns 2–6). Site numbers up to 32 are those of Carracedo et al. (1993) [table 1, p. 206]. Sites 9 and 42 correspond to lava flows and vents whose location is consistent with descriptions of the AD 1037 eruption. Sites 10 and 11 indicate flows possibly erupted in AD 968 or 1037. Site 41 is comprised between the AD 472 and 1631 pyroclastic flows. Site 43 indicates a small flow possibly corresponding to the 1139 (summit?) eruption. Sites 79 and 472 are pyroclastic flows from the AD 79 and 472 eruptions, respectively.

Nom du site	N	α_{95} (°)	K	I (°)	D (°)
V08, S. Vincenzo Postiglione	10	1,2	1 454	66,9	12
V09, S.M. la Bruna, coulée supérieure	15	1,2	943	59,4	20,1
V10, S.M. la Bruna, coulée inférieure	9	1,4	1 040	60,4	16,8
V11, Torre Scassata	14	1,1	1 198	60,7	15,9
V12, Scogli di Prota (villa Balke)	10	1,8	634	60,4	19
V15, Fort de Calastro	17	1,4	623	62,6	13,7
V1754 ? Coulée récente, flanc sud	8	1,3	1 412	59,8	– 16,7
V22, Torre Bassano	14	1	1 385	63,2	17
V41, Cava Terrioni (NW Pozzelle)	5	1,5	1 764	66,6	7,9
V42, cratère de Fossa Monaca	7	1,3	1 650	60,2	18,8
V43, coulée flanc S, 170 m	8	1,9	656	56,9	17,1
V44, autoroute, casello Ercolano	9	1,8	654	58,6	16,9
V45, Torre Annunziata, campo sportivo	8	1,2	1 784	63,5	12,4
V46, Passanti	7	2,4	472	56,7	21,3
V472, Pollena, 472 ap. J.C.	13	0,8	2 596	56,7	4,8
V79, Herculanum, 79 ap. J.C.	11	1,1	1 573	58,7	– 4,8

1651, un certain nombre de coulées et de cônes de scories présentent des paléodirections incompatibles avec les dates qui leur ont été assignées (points représentés par des lettres sur la *figure 2*). La plupart de ces produits remontent en fait au Moyen Âge, à une époque d'invasions et de troubles politiques qui ne laissaient guère le loisir aux contemporains de décrire les manifestations volcaniques. La réalité de ces éruptions se trouve néanmoins confirmée, tant par les points du Vésuve que par la courbe archéomagnétique française (Bucur, 1994 ; Le Goff, données non publiées).

Pour ce qui concerne la comparaison avec la France, on note un léger décalage entre 1100 et 1300 environ, et le même phénomène se reproduit entre 100 et 400 après J.C. Dans les deux cas, la VS présente une variation faible de la déclinaison et relativement forte de l'inclinaison, ce qui fait décrire à la courbe une branche ascendante et une branche descendante très voisines sur le graphique. Le resserrement de ces deux branches pour la courbe française provient, à notre avis, d'une précision insuffisante sur les datations archéologiques, de sorte que des points appartenant à la période 100–250, par exemple, ont pu être attribués à 250–400, et réciproquement, conduisant à un resserrement de la courbe.

Du point de vue volcanologique, les résultats archéomagnétiques mettent en évidence le grand nombre de coulées et cônes de scories qui ont fait éruption pendant la fin de l'empire romain et tout le Moyen Âge, éruptions qui n'ont pas été enregistrées par l'histoire, du fait de l'ab-

sence à peu près complète de documents entre 100 après J.-C. et 1100 environ. Pendant cette période, la seule éruption de date sûre est celle de 252, considérée comme miraculeuse, parce qu'elle se produisit un an exactement après le martyre de sainte Agathe. La coulée de lave aurait été arrêtée aux portes de Catane par le voile de la sainte, et c'est pour cette raison que la tradition nous en a conservé l'emplacement dans la partie nord de la ville actuelle.

4. Courbe de variation séculaire du Vésuve

Le cas du Vésuve (*figure 3*) est plus simple. Ses éruptions antérieures à 1631 ont été peu fréquentes et souvent d'une grande puissance, de sorte qu'elles ont eu d'avantage d'impact sur une région très peuplée depuis l'Antiquité. En conséquence, la localisation de leurs produits est moins difficile. Celles de 79, qui ensevelit Herculanum et Pompéi, et de 472, décrite par Cassiodore, ont laissé d'épais dépôts de nuées ardentes, qui ne peuvent pas être confondus avec les produits des autres phases d'activité (Principe et al., 1987). Ces échantillons parfaitement datés sont précieux pour calibrer la courbe de VS dans une période où, même en France, les données archéologiques de bonne qualité sont rares.

Au voisinage immédiat de la grande ville de Naples, le Vésuve a fait aussi l'objet de citations plus nombreuses, y compris au Moyen Âge. On sait en particulier qu'une

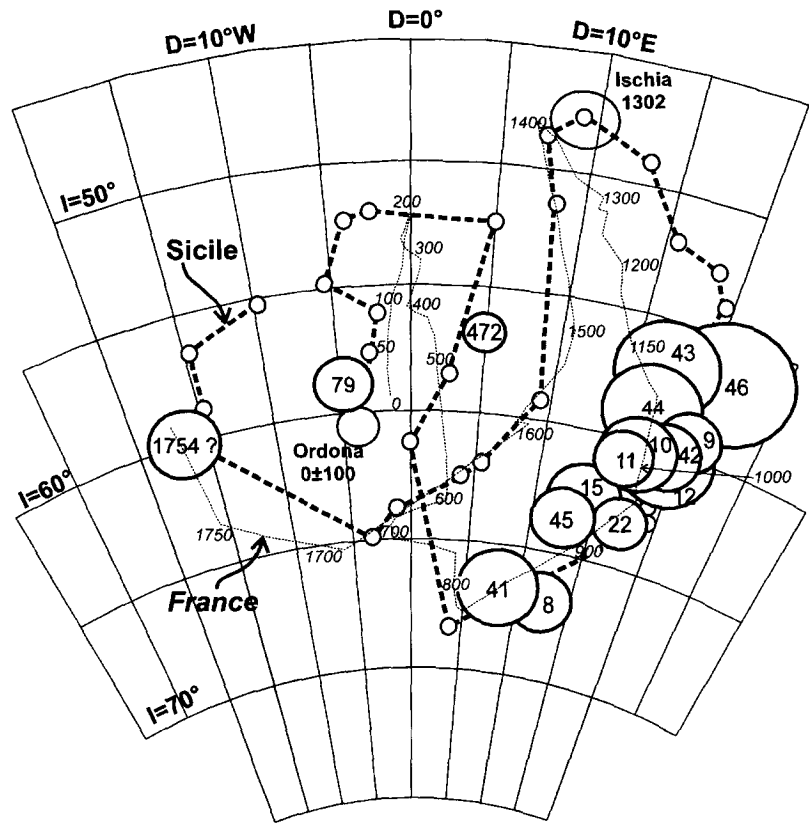


Figure 3. Variation de la direction géomagnétique d'après les laves du Vésuve (voir légendes du tableau II et de la figure 2). La courbe en tireté gras est celle de l'Etna, en tireté fin la courbe française, toutes deux réduites aux latitude et longitude du Vésuve.

Geomagnetic secular variation curve from the Vesuvius lavas (see caption in table II and figure 2). Heavy and light dashed curves are, respectively, those of Etna and France recalculated at the latitude and longitude of Vesuvius.

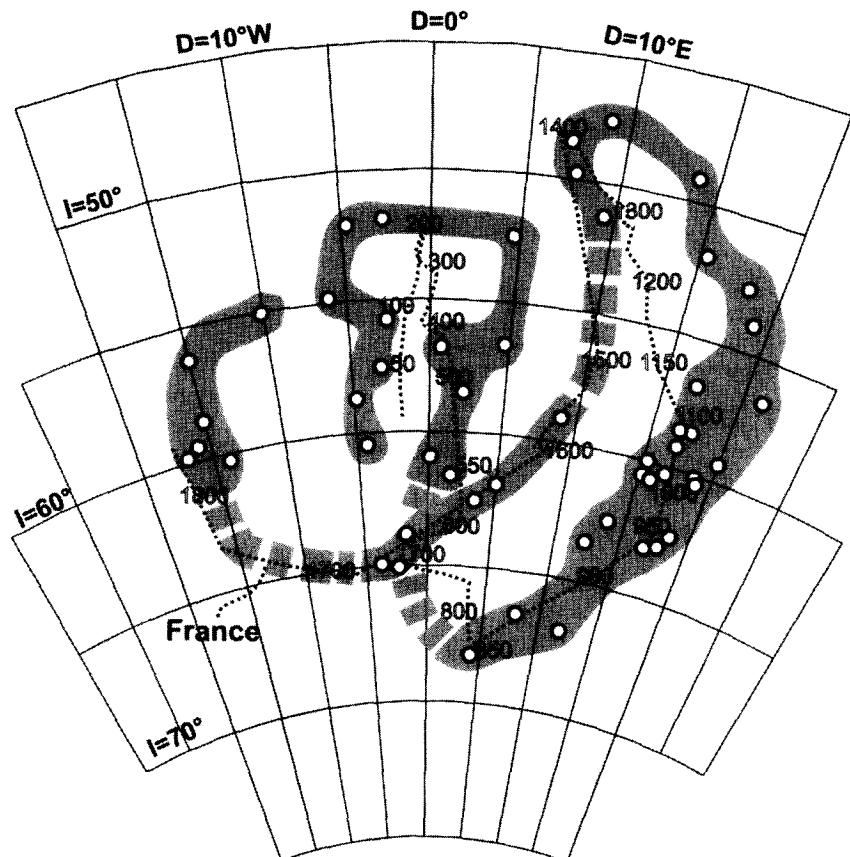


Figure 4. Courbe de variation géomagnétique proposée aux latitude et longitude de Naples (d'après les figures 2 et 3, ainsi que d'après les résultats archéomagnétiques français).

Geomagnetic secular variation at the latitude and longitude of Naples, from figures 2 and 3 and French archaeomagnetic data.

intense activité effusive s'est produite entre 968 et 1139, avec d'énormes coulées de lave s'épanchant à partir de bouches excentriques, jusque dans la mer. Ces coulées forment aujourd'hui la majeure partie de la côte entre Portici et Torre Annunziata. Les résultats archéomagnétiques, s'appuyant sur la courbe française, confirment des dates d'éruptions antérieures à 1150. Ils montrent toutefois que les coulées de lave ont commencé vers l'an 800, plus tôt que ne le mentionnent les documents historiques. Bien que certaines de ces coulées aient été parfois attribuées à la grande éruption de 1631, aucune ne présente d'orientation paléomagnétique compatible avec cette date, ce qui confirme le caractère uniquement explosif du paroxysme (Rosi et al., 1993).

On remarquera enfin que la cartographie des produits postérieurs à 1631 est elle-même imparfaite. Un front de coulée récente ne figurant pas sur la carte géologique doit, de par sa déclinaison fortement occidentale, être attribué aux éruptions de 1754 ou 1767, la précision de la méthode ne permettant pas de trancher en faveur de l'une ou l'autre de ces deux dates.

5. Conclusions

L'étude archéomagnétique de gros échantillons de laves de l'Etna et du Vésuve, orientés avec une grande

précision pendant le prélèvement et les mesures au laboratoire, permet une reconstitution très fine de la direction du CMT en Europe méditerranéenne pendant les deux derniers millénaires. Ces résultats sont en excellent accord avec ceux de la courbe de variation séculaire en France, obtenue à partir de matériaux archéologiques, sauf pour deux courtes périodes (100 à 400 et 1100 à 1300), où nous soupçonnons un biais dû à de mauvaises datations de certains sites de la courbe française.

Réciproquement, une étude similaire appliquée à des matériaux archéologiques ou à des laves dont l'âge est douteux permet une datation de ces produits dans l'intervalle de temps considéré, la seule ambiguïté se situant aux époques voisines de 650 et 1650, où le CMT présentait la même orientation. Une synthèse de ces résultats est présentée dans la *figure 4*. Il faut souligner que la précision est ici indépendante de l'âge, étant liée uniquement à une bonne détermination de chaque paléodirection et à la vitesse de variation de la VS. Par exemple, pour le dernier millénaire, les formations peuvent être datées avec une marge d'erreur maximale d'environ ± 40 ans. Les applications de cette méthode sont évidentes, tant en archéologie qu'en volcanologie : succession des éruptions, évolution magmatique, mécanismes de l'activité volcanique, évaluation des risques pour les populations avoisinantes, etc.

6. Références

- Alexandrescu M., Courtillot V. et Le Mouél J.-L. 1996. Geomagnetic field direction in Paris since the mid-sixteenth century, *Phys. Earth Planet. In.*, 98, 321–360
- Alexandrescu M., Courtillot V. et Le Mouél J.-L. 1997. High-resolution secular variation of the geomagnetic field in western Europe over the last 4 centuries: comparison and integration of historical data from Paris and London, *J. Geophys. Res.*, 102 (B9), 20245–20258
- Audunsson H. et Levi S. 1989. Drilling-induced remanent magnetization in basalt drill cores, *Geophys. J. Int.*, 98, 613–622
- Bucur I. 1994. The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries: recent progress, *Phys. Earth Planet. In.*, 87, 95–109
- Bucur I. 1997. Étude archéomagnétique d'un foyer à Ortona, in : Ortona IX, *Inst. Historique belge de Rome*, XXXIV, 373–382
- Carracedo J.C., Principe C., Rosi M. et Soler V. 1993. Time correlation by palaeomagnetism of the 1631 eruption of Mount Vesuvius. Volcanological and volcanic hazard implications, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 58, 203–209
- Chevallier R. 1925. L'aimantation des laves de l'Etna et l'orientation du champ terrestre en Sicile du XII^e au XVII^e siècle, *Thèse*, Masson, Paris, 163 p.
- Fisher R.A. 1953. Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. London*, A217, 295–305
- Irving E. 1964. *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*, John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, 399 p.
- Lauer J.-P. 1978. Création d'aimantations rémanentes de sciage et forage au cours de la préparation d'échantillons de roche destinés à une étude paléomagnétique, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 287, série D, 1–4
- Le Goff M. 1975. Inductomètre à rotation continue pour la mesure des faibles aimantations rémanentes et induites en magnétisme des roches, *Dipl. Ing. Cnam*, Paris
- Principe C., Rosi M., Santacroce R. et Sbrana A. 1987. Explanatory notes to the Geological map, in : Somma-Vesuvius, *Quaderni de La Ricerca Scientifica*, CNR, Rome, 114, 11–51
- Rolph T.C., Shaw J. et Guest J.E. 1987. Geomagnetic field variations as a dating tool: application to Sicilian lavas, *J. Archaeol. Sci.*, 14, 215–225
- Romano R. et al. (éds). 1982. Mount Etna volcano, *Mem. Soc. Geol. Ital.*, 23, 1–205
- Rosi M., Principe C. et Vecchi R. 1993. The 1631 Vesuvius eruption. A reconstruction based on historical and stratigraphical data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 58, 151–182
- Tanguy J.-C. 1980. L'Etna : étude pétrologique et paléomagnétique ; implications volcanologiques, *Thèse*, Université Paris-6, 618 p.
- Tanguy J.-C. et Pozzi J.-P. 1972. Étude archéomagnétique dans l'île d'Ischia, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 274, série D, 352–354
- Tanguy J.-C., Bucur I. et Thompson J.F.C. 1985. Geomagnetic secular variation in Sicily and revised ages of historic lavas from Mount Etna, *Nature*, 318, 453–455
- Tanguy J.-C. et Patané G. 1996. *L'Etna et le monde des volcans*, Diderot Éditeur, Paris, 280 p.
- Thellier E. 1971. Magnétisme interne, in : *Géophysique, encyclopédie de la Pléiade*, Gallimard, Paris, 235–376
- Thellier E. 1981. Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Phys. Earth Planet. In.*, 24, 89–132