



HAL
open science

L'hypothèse des impulsions géomagnétiques pendant un renversement du champ : confrontation des données paléomagnétiques avec un modèle de refroidissement des laves

Pierre Camps, Michel Prévôt, Robert S Coe

► To cite this version:

Pierre Camps, Michel Prévôt, Robert S Coe. L'hypothèse des impulsions géomagnétiques pendant un renversement du champ : confrontation des données paléomagnétiques avec un modèle de refroidissement des laves. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 1995, 320 (série 2 a), pp.801-807. hal-04493689

HAL Id: hal-04493689

<https://hal.science/hal-04493689>

Submitted on 7 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

L'hypothèse des impulsions géomagnétiques pendant un renversement du champ : confrontation des données paléomagnétiques avec un modèle de refroidissement des laves

Pierre Camps, Michel Prévot et Robert S. Coe

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 801 à 807,
1995

Résumé L'hypothèse selon laquelle le champ géomagnétique, lorsqu'il se renverse, peut subir des variations brusques, ou impulsions, est examinée. Une modélisation numérique simple du refroidissement par conduction est appliquée à une coulée qui semble s'être refroidie pendant une impulsion. La combinaison des observations paléomagnétiques, qui indiquent la présence de composantes de directions parfois très différentes selon la température de déblocage et la position verticale de l'échantillon, et des durées de refroidissement calculées à l'aide du modèle, montre qu'à quelques exceptions près, les directions d'aimantation évoluent progressivement avec le temps de refroidissement. La vitesse angulaire de la variation du champ, apparemment constante pendant 10 à 20 jours, aurait été de 4 à 8° par jour, selon la variante du modèle utilisée.

Mots-clés : Géomagnétisme, Paléomagnétisme, Inversions, Impulsions.

P. C. et M. P. : Laboratoire
de Géophysique et Tectonique,
URA CNRS n° 1760,
Université de Montpellier-II,
Case 060,
34095 Montpellier Cedex 05,
France ;

R. S. C. : Earth Sciences Board,
University of California,
Santa Cruz, CA 95064, USA.

Abstract **The hypothesis of transitional geomagnetic impulses: combining palaeomagnetic data with a cooling model of lava flows**

The suggestion that extremely rapid field changes, called geomagnetic impulses, occur during a geomagnetic reversal is investigated. A quite simple cooling model, which nonetheless takes into account latent heat of crystallization and variable heat capacity and thermal conductivity, was applied to a flow that appears to have cooled during an impulsive change in the transitional field. Thermal and palaeomagnetic data are compatible with the hypothesis that the large changes in remanence directions observed within this flow result from a rapid field change recorded as successive partial thermal remanent magnetizations acquired during the initial cooling. Reasonable variants of the model suggest that the rate of change of the field would have been approximately constant, with extremely rapid speeds ranging from 8 to 4° per day for cooling intervals between 10 and 20 days, respectively.

Keywords: Geomagnetism, Palaeomagnetism, Reversals, Jerks.

**Abridged
English
Version**

INTRODUCTION

PREVIOUS palaeomagnetic studies (Mankinen *et al.*, 1985; Prévot *et al.*, 1985 a; Coe and Prévot, 1989) of the Steens Mountain geomagnetic polarity transition (Oregon) suggested the existence of two very fast field

changes, each of them partially recorded within a single lava flow and expressed in the reversal record as large (some 90°) directional jumps. This interpretation assumes that within these flows the distribution of the directions of remanence according to their unblocking temperature interval (for a single sample) and

Note

présentée par
Jean-Louis Le Mouél.

remise le 14 février 1995,
acceptée après révision
le 16 mars 1995.

according to the vertical position of the sample within the flow (for a given temperature interval) result from a change of the field direction during the flow cooling. This interpretation can be checked in two steps by: (i) calculating from a cooling model the time needed for a sample drilled at a specific vertical position within the flow to reach a specified temperature, and (ii) examining if a correlation exists between the computed cooling times and the associated directions of remanence, which are assumed to correspond to PTRMs (partial thermoremanent magnetizations). This is the check which will be carried out using new palaeomagnetic data now in press which seem to qualitatively support the rapid field change hypothesis (Coe *et al.*, 1995).

PALAEOMAGNETIC DATA

87 oriented cores collected from seven flows (called D46 to D40 upwards) located at the level of the second jump, in the new section D situated 250 m north of the original one (figure 1), were subjected to progressive thermal demagnetization (Coe *et al.*, 1995). The thermal demagnetization curves obtained for flows D46 to D42 show the occurrence of a single magnetization direction beyond 300°C (figure 2 a). This suggests that the field direction remained stable while these flows were cooling. The low-temperature component is presumably of viscous origin. For flows D41 and D40, on the contrary, the palaeodirections observed above 300°C for a given temperature interval depend on the vertical position of the sample and, for a given specimen, a progressive change in direction is commonly observed as the heating temperature is increased (figure 2 b, c). Rock magnetic and opaque mineralogy studies summarized elsewhere (Coe *et al.*, 1995) show that no simple remagnetization process can explain the observed distribution of remanence directions.

Flow D40, which has been largely remagnetized by the thick post-jump overlying flow D39 (Coe *et al.*, 1995), will not be considered here. For each sample from flow D41, a set of palaeodirections was obtained from every NRM segment of the thermal demagnetization curve (beyond 300°C), as defined by two (or more, when aligned) consecutive points. Thus

each direction corresponds to a specific core position and unblocking temperature interval. All these directions lie approximately between the field directions before and after the jump (figure 3).

THERMAL MODEL

Assuming cooling by conduction, we calculated the cooling time range that can be associated to each specified unblocking temperature interval. The heat transfer is computed numerically using the explicit cell balances method for a one-dimensional model (Shaw *et al.*, 1977). Unlike the analytical solutions (Jaeger, 1967), this model takes into account latent heat of crystallization, variable heat capacity, variable thermal conductivity and the effect of the vesicularity of the top of the flow. The flow is instantaneously emplaced at a uniform temperature T_m and cooled. Boundary conditions are a zero flux at a distance equal to ten times the flow thickness below the bottom surface and constant ambient temperature at the flow top. The thermal parameters used (table I) stem from mean values for lava lakes or experimental determinations (Touloukian *et al.*, 1981).

RESULTS

As a result of this calculation, and assuming that the unblocking and blocking temperatures of the PTRMs are identical, each palaeodirection can be associated with a corresponding cooling time interval (table II). Figure 4 illustrates the strong correlation between the palaeofield direction and the calculated cooling time. Most of the few anomalous points come from the very top of flow D41 which appears to have been reheated by the overlying flow. Different variants of the thermal model provide similar diagrams, all suggesting that the rate of change of the field has been approximately constant over 10 to 20 days with corresponding speeds of 8 to 4° per day.

DISCUSSION

Such a simple conductive thermal model remains somewhat unrealistic (Stasiuk *et al.*, 1993), as attested by the fact that the calculated basement heating is commonly much larger than observed (Audunsson and Levi,

1988). However, a more sophisticated thermal model which could take this observation into account would still provide similar cooling times. Thus, the present study demonstrates that the remanence directions and their corresponding unblocking temperature ranges are compatible with the cooling of flow D41 in a

rapidly changing Earth's field. Taking into account the angular rate of change (4 to 8°/day) and the palaeointensity estimates from adjacent flows (appr. 7 μ T; Prévot *et al.*, 1985 *b*), the rate of change of the field vector found equal to 450-900 γ /day, as already suggested for the first impulse (Coe and Prévot, 1989).

INTRODUCTION

Une étude paléomagnétique détaillée de la transition de polarité géomagnétique enregistrée dans les basaltes miocènes de la Steens Mountain (Orégon) a conduit à suggérer l'existence de deux impulsions géomagnétiques, qui se traduisent par des sauts directionnels de l'ordre de 90°, chacun partiellement enregistrés à l'intérieur d'une coulée (Mankinen *et al.*, 1985 ; Prévot *et al.*, 1985 *a*). Des travaux ultérieurs ont suggéré que la première impulsion aurait duré 2 semaines environ (Coe et Prévot, 1989).

Dans le but d'étudier la seconde impulsion, nous avons ré-échantillonné en détail, selon cinq verticales voisines et décalées en hauteur, 7 coulées (D40 à D46) centrées sur le second saut. Le nouveau site, appelé D, est à 250 m au Nord de la coupe A originelle (figure 1). La coulée 38 se suit aisément d'un site à l'autre et servira de référence

commune. La délimitation et la continuité des différentes unités au site D ne présente aucune ambiguïté. La coupe inférieure couvre les unités D46-44 et la base de D43 (épaisseur totale de 11 m) ; celles-ci étant créditées *a priori* d'un intérêt mineur par rapport aux unités suivantes, seulement 15 carottes orientées ont été prélevées. Les quatre autres coupes, espacées latéralement de quelques mètres, ont fourni 72 carottes échantillonnées dans les coulées D43-40 (épaisseur totale de 8,3 m).

ANALYSE PALÉOMAGNÉTIQUE

Les principaux résultats de l'analyse paléomagnétique sont présentés dans Coe *et al.* (1995). L'analyse des trajectoires de désaimantation thermique des échantillons des coulées D46 à D42 montre l'absence de changement de la direction d'aimantation rémanente au-delà de 300°C (figure 2 a). La

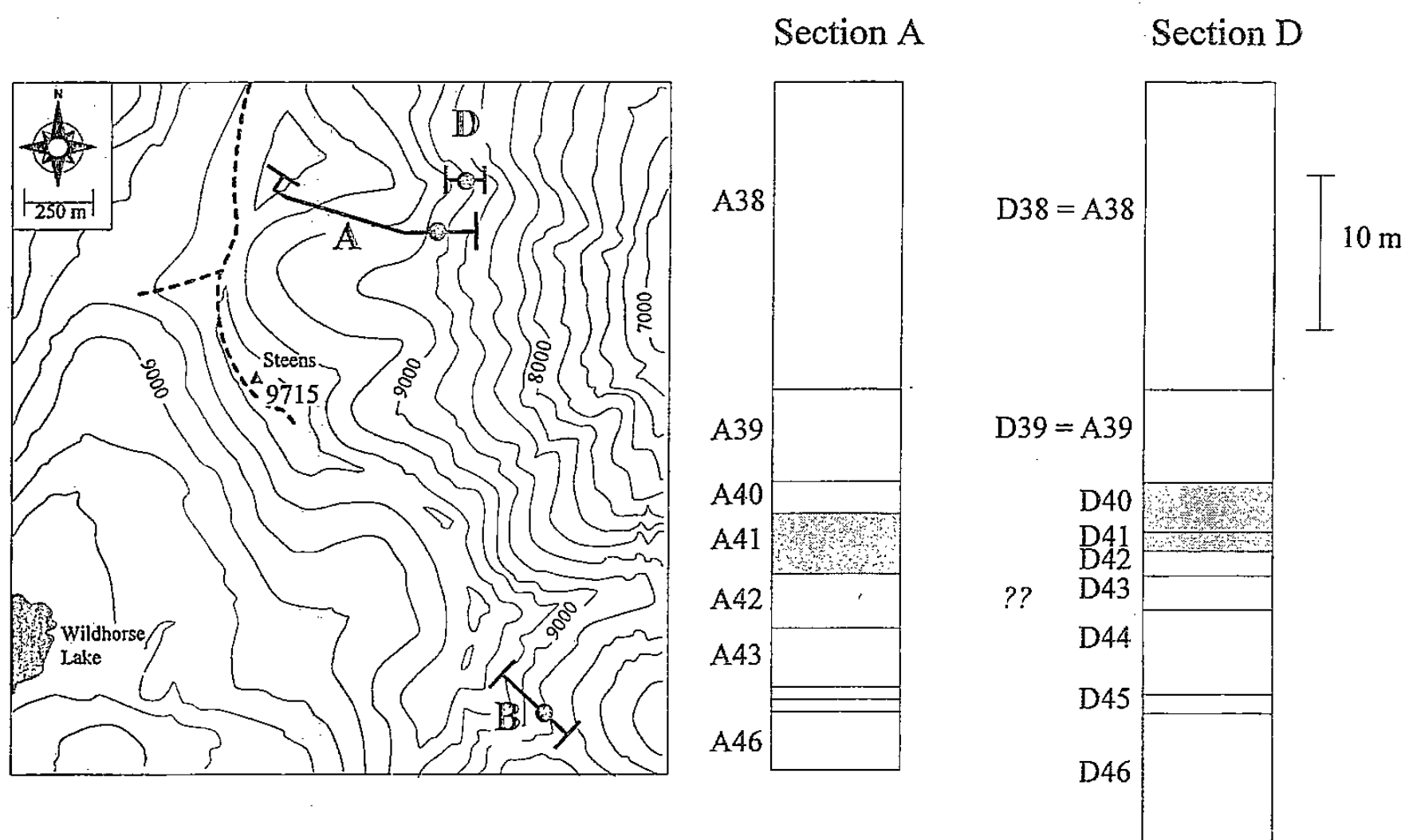


Figure 1 Localisation des sections échantillonnées. Les sections A et B correspondent aux sections originelles, la section D à cette étude. Les ronds noirs montrent la localisation approximative des coulées susceptibles d'avoir enregistré les impulsions géomagnétiques. Celles-ci sont représentées en grisé sur les logs stratigraphiques des sections A et D au niveau du deuxième saut.

Sketch showing locations of the sampled sections. A and B are the original sections; D this study. Solids dots show approximate locations of the flows which have suggested the geomagnetic impulses. These flows are shaded on the stratigraphic sequence.

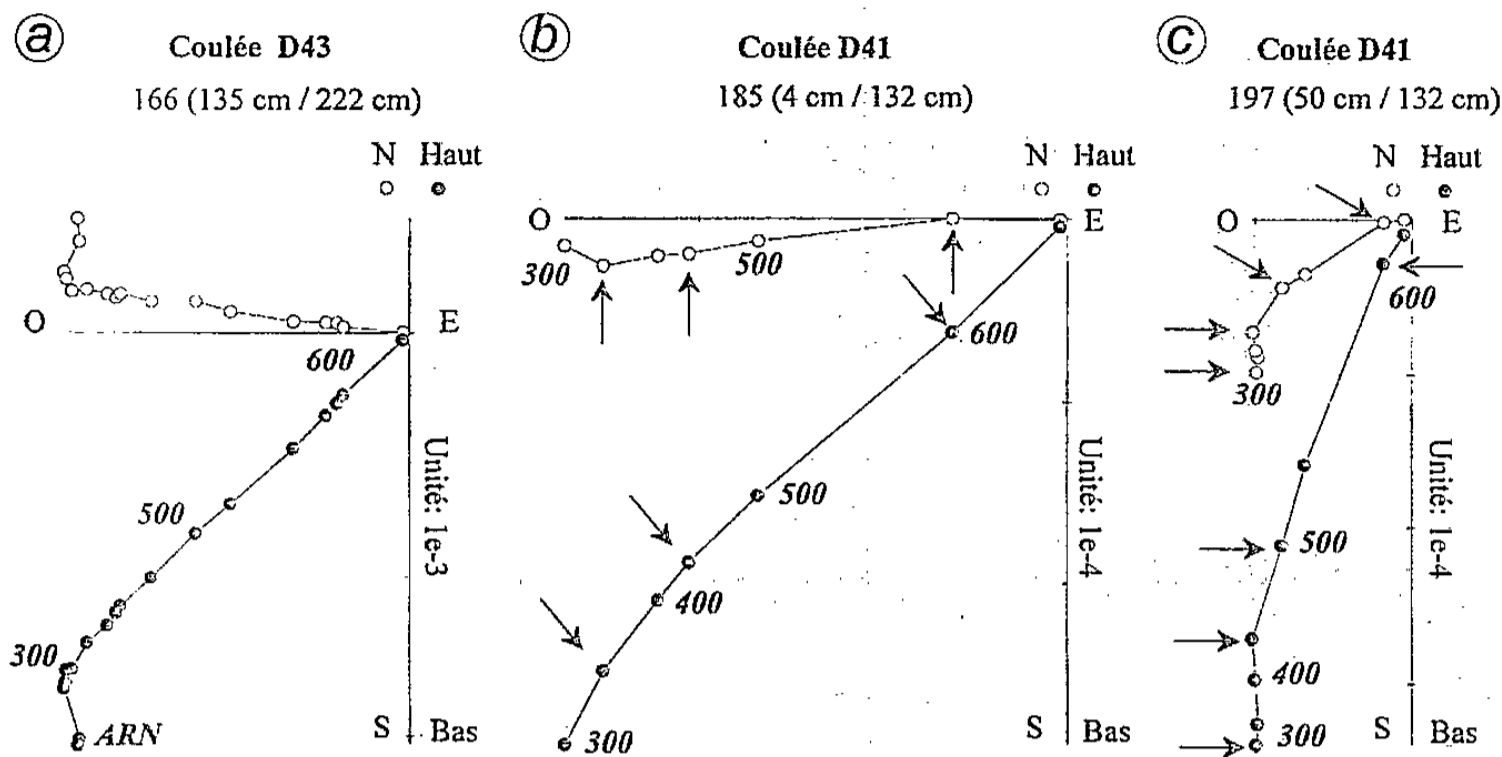


Figure 2 (d'après Coe et al., 1995)
Exemple de désaimantations thermiques représentées sur des diagrammes en projection orthogonale. a. Type de courbes obtenues pour les échantillons des coulées D46 à D42 montrant une direction stable au-delà de 300°C. b et c. Type de courbes obtenues pour les échantillons des coulées D41 et D40 montrant une direction variable au-delà de 300°C. Pour chaque diagramme, le numéro de la carotte est suivi, entre parenthèses, de la distance entre cette carotte et la base de la coulée et de l'épaisseur de cette dernière. Les chiffres auprès de certains points indiquent les températures correspondantes. Les flèches indiquent les limites des intervalles choisis pour la détermination des paléodirections.

(from Coe et al., 1995) Examples of thermal demagnetization shown in orthogonal projection diagrams. a. Typical curve obtained in flows D46 to D42: stability of the magnetization direction throughout the thermal treatment beyond 300°C. b and c. Typical curves obtained in flows D41 and D40: continuous change in direction beyond 300°C. On each diagram, the core number is followed (within parentheses) by the distance of the core from the lava flow bottom contact and the flow thickness. Figures by the dots indicate temperature. The arrows show the boundaries of the unblocking temperature intervals from which the palaeodirections are calculated.

direction du champ était donc stable au cours du refroidissement de ces coulées. Au-dessous de 200-300°C, les variations observées sont imputables à la présence d'une aimantation secondaire de nature visqueuse (ARV). Pour beaucoup d'échantillons des coulées D41 et D40, au contraire, de larges variations de la direction d'aimantation sont observées jusqu'à des températures très élevées (600-650°C) (figure 2 c). En l'absence de tout indice magnétique en faveur d'un processus de réaimantation, nous suggérons (Coe et al., 1995) que ces variations de direction traduisent une variation extraordinairement rapide du champ géomagnétique pendant le refroidissement de ces coulées. C'est cette hypothèse que nous nous proposons de tester ici, quantitativement et globalement. La coulée D40 paraissant largement réaimantée par les épaisses coulées D39 et D38 qui la surmontent (Coe et al., 1995), nous nous bornerons dans ce qui suit à analyser les données de la coulée D41, qui n'est que superficiellement réaimantée par la coulée

D40. Pour chaque échantillon de la coulée D41, la courbe de désaimantation (au-dessus de la température de destruction de l'ARV) a été décomposée en segments consécutifs, correspondant chacun à une direction significativement différente de celle des segments adjacents (figure 2). Chaque direction correspond donc à un intervalle de température et une position verticale (dans la coulée) spécifiques. On constate (figure 3) que ces directions sont distribuées au voisinage du plan passant par la direction moyenne de la coulée D42 et celle de la coulée A39-D39 (Mankinen et al., 1985). Les directions voisines de celle de D42 s'observent, d'une part à très haute température ($T > 600^\circ\text{C}$) dans toute l'épaisseur de la coulée et, d'autre part, à toutes températures à la base et dans la partie supérieure. Les directions s'approchant le plus de celle de A39 sont observées pour des températures de déblocage moyennes dans la partie centrale de la coulée. Ces observations, voisines de celles précédemment rapportées pour le premier saut directionnel (Coe et Prévot, 1989), sont qualitativement compatibles avec l'hypothèse d'une variation rapide du champ pendant le refroidissement de cette coulée (Coe et al., 1995).

MODÉLISATION THERMIQUE

Une modélisation du refroidissement de la coulée D41 permet d'associer un temps, compté depuis le début du refroidissement, à chaque direction observée. Il devient ainsi possible de vérifier plus rigoureusement cette hypothèse, qui implique que les directions, éventuellement multiples, obtenues

Nom	Valeur	
	zone poreuse	Zone massive
Température initiale.....	1 140°C	
Capacité calorifique.....	$2,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	$2,8 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
Conductivité thermique.....	1,0 W/m.K	1,7 W/m.K
Chaleur latente.....	$7,4 \cdot 10^8 \text{ J/m}^3$	$9,4 \cdot 10^8 \text{ J/m}^3$
Intervalle de cristallisation.....	1 140-980°C	

Tableau II N° : Numéro du spécimen ; d : distance en mètre entre la carotte et la base de la coulée ; $T_{\min}-T_{\max}$: intervalle de température de déblocage ; I, D : Inclinaison, Déclinaison ; α : déviation angulaire voir figure 4 ; $t_{\max}-t_{\min}$: intervalle de temps de refroidissement, en heures.
 N° : Specimen number; d: distance in meters from the lava flow bottom contact to the core position; $T_{\min}-T_{\max}$: Unblocking temperature interval; I, D: Inclination, Declination; α : angular deviation see figure 4; $t_{\max}-t_{\min}$: cooling time interval, in hours.

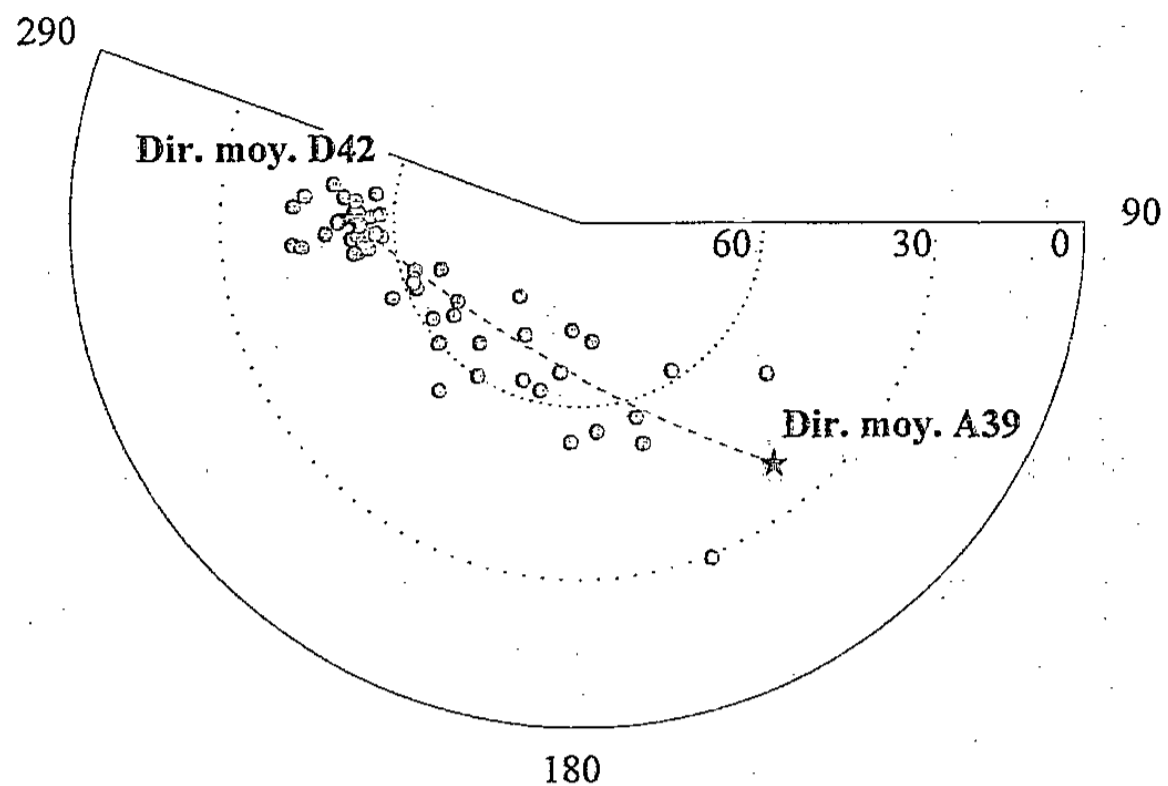
N°	d	$T_{\min}-T_{\max}$	I	D	α	$t_{\max}-t_{\min}$
85P185B	0,04	200-400	53,8	262,4	4,4	863,2-474,0
		400-680	42,7	265,5	-5,1	474,0-14,9
85P187B	0,23	300-450	52,4	163,7	58,8	594,3-420,5
85P193B	0,03	400-450	62,9	199,3	37,4	474,0-411,6
		450-500	54,4	219,7	27,1	411,6-353,0
		500-600	61,7	247,9	15,4	353,0-221,0
		600-680	56,9	267,0	5,0	221,0-14,6
85P194A	0,11	350-450	72,6	183,2	39,9	539,7-420,3
		450-525	69,9	205,4	33,8	420,3-346,6
		525-600	60,1	229,2	23,1	346,6-278,1
		600-680	55,1	264,2	4,6	278,1-193,0
85P195B	0,23	400-600	65,6	186,8	41,7	468,7-306,0
		600-680	56,8	278,2	1,3	306,0-255,4
85P196A	0,36	425-525	62,1	192,8	40,5	427,8-354,6
		525-575	29,5	158,4	79,0	354,6-324,4
		575-680	62,4	253,9	13,5	324,4-270,1
85P197B	0,50	300-450	70,6	173,4	43,5	517,2-380,8
		450-500	60,2	213,3	31,0	380,8-349,1
		500-600	66,7	237,0	22,0	349,1-297,1
		600-680	57,9	266,0	6,1	297,1-263,1
85P198A	0,60	300-450	55,8	175,1	51,5	478,6-354,0
		450-525	64,8	219,2	28,5	354,0-312,2
		525-575	59,9	229,0	23,1	312,2-288,7
		575-680	55,6	263,1	5,5	288,7-247,3
85P199B	0,73	300-400	54,1	182,1	48,9	419,5-339,0
		400-500	61,6	250,3	14,4	339,0-283,4
		500-550	54,1	272,6	0,8	283,4-261,0
		550-680	51,5	276,4	-2,6	261,0-213,9
85P200A	0,84	525-575	53,0	262,2	4,0	225,8-205,9
		575-680	52,8	265,9	2,3	205,9-167,1
85P201B	0,95	450-550	44,3	264,9	-3,6	194,4-146,8
		550-680	56,2	271,5	2,8	146,8-104,4
85P202B	1,02	350-400	61,6	147,7	57,1	195,4-162,6
		400-500	48,5	267,3	-1,6	162,6-115,5
		500-550	42,9	273,1	-8,5	115,5-99,2
		550-680	44,8	275,5	-7,9	99,2-70,1
85P203A	1,20	400-680	54,4	269,2	2,2	31,6-13,9
85P204B	1,30	250-350	50,5	128,7	71,8	7,4-4,5
		350-450	74,8	218,5	29,8	4,5-3,4
		450-500	66,5	251,3	16,9	3,4-2,8
		500-680	57,8	272,3	3,9	2,8-1,8
85P206A	0,58	350-575	57,0	163,5	55,7	435,6-293,4
		575-680	64,9	233,3	22,7	293,4-251,1
85P207A	1,10	200-350	53,5	275,7	-0,8	245,7-113,5
		350-450	61,8	236,6	20,2	113,5-76,4
		450-680	49,4	278,9	-5,3	76,4-39,5
85P208A	1,27	300-425	53,9	266,7	2,8	13,6-8,3
		425-525	57,3	247,9	13,1	8,3-6,1
		550-680	50,6	270,0	-1,0	5,7-4,0

Figure 3 Représentation en projection à surface égale des directions des composantes d'aimantation obtenues par désaimantation thermique pour tous les échantillons de la coulée D41 (cercles). Ces directions sont approximativement réparties entre les directions moyennes (étoiles) des coulées D42 (sous-jacente) et D39 (sus-jacente à D40).

Equal area projection of the directions of the magnetization components obtained from the thermal demagnetization curves from all samples of flow D41 (circles). The directions lie approximately between the average directions (stars) of flows D42 (underlying D41) and D39 (overlying D40).

Figure 4 Déviation angulaire des directions de la coulée D41 (**figure 3**), comptée à partir de la direction de la coulée sous-jacente (D42) vers la direction de la coulée sus-jacente (D39), représentée en fonction du temps écoulé depuis le début du refroidissement. Chaque barre représente l'intervalle de temps de blocage de l'aimantation (les tirets correspondent à des échantillons du sommet de D41, réchauffés par la coulée D40). Les directions bloquées moins de 200 h après le début du refroidissement indiquent la stabilité initiale du champ dans la direction enregistrée par la coulée D42. Le saut directionnel complet est de 80° environ. Son enregistrement couvre 60°.

Angular deviation of the direction obtained from samples of flow D41 measured from the underlying (D42) flow direction toward the overlying (A39) flow direction, as a function of the time elapsed since the beginning of cooling. Each bar indicates the cooling time interval during which each direction of magnetization was blocked (dashed bars correspond to core from the flow top, reheated by flow D40). The directions recorded less than 200 hrs. after the beginning of cooling correspond to a period of field stability (along the direction recorded by flow D42). The full directional jump is close to 80°. It is recorded over 60°.



pour chaque échantillon, s'ordonnent régulièrement en fonction du temps.

Modèle thermique

Le refroidissement de la coulée est modélisé numériquement selon la méthode implicite d'équilibre cellulaire (Shaw *et al.*, 1977), dont la simplicité de mise en œuvre n'interdit pas d'envisager différents scénarios non prévus par les solutions analytiques classiques (Jaeger, 1967). La modélisation est réalisée à une dimension (coulées tabulaires d'extension latérale infinie). Une diminution de la conductivité thermique au sommet des coulées, induite par une forte vésicularité (20 % de porosité) et par un mauvais contact entre les coulées (jointures irrégulières), est prise en compte.

Conditions aux limites et conditions initiales

Une température constante ($T = 0^{\circ}\text{C}$) est maintenue à la surface de la coulée. Une condition de flux nul est imposée à la limite inférieure de l'espace modélisé. Diverses modélisations ont montré qu'une limite inférieure, située à une profondeur égale à dix fois l'épaisseur de la coulée, permet de ne pas influencer la propagation de la chaleur dans le substratum pour les temps de calculs envisagés. Au temps $t = 0$, la coulée se met en place instantanément à une température T_m uniforme, le substratum étant alors à 10°C . L'épaisseur relativement faible de D41 (1,30 m) ne nécessite pas d'envisager un

écoulement interne postérieur à sa mise en place.

Les différents cas examinés consistent à intégrer ou non dans la modélisation la variation de la conductivité thermique en fonction de la température et la chaleur latente de cristallisation. Cela conduit à quatre scénarios possibles. Les paramètres thermiques, issus de valeurs moyennes mesurées pour les laves basaltiques (Touloukian *et al.*, 1981), sont données dans le tableau I.

RÉSULTATS

La modélisation thermique permet d'associer un intervalle de temps à chaque intervalle de température de déblocage (supposée égale à la température de blocage) et par là même, de « dater » chaque direction représentée sur la figure 3 (tableau II). La figure 4 illustre la forte corrélation qui existe entre la direction du paléochamp et le temps. La déviation angulaire est mesurée entre chaque direction de la coulée D41, projetée sur le plan contenant les directions moyennes des coulées D42 et D39 (**figure 3**), et la direction moyenne de D42. Les données provenant des échantillons situés jusqu'à 20 cm du sommet de la coulée paraissent avoir été affectées par la coulée sus-jacente (angles forts pour des temps faibles). Les autres données, à l'exception de trois d'entre elles, témoignent d'une corrélation nette entre la paléodirection et le temps. Cette corrélation s'inscrit bien

dans l'hypothèse avancée. Les différents cas de refroidissement envisagés n'interviennent pas sur la dispersion du nuage mais uniquement sur sa pente, laquelle est égale à la vitesse angulaire de la variation du champ.

Celle-ci, apparemment constante pendant 10 à 20 jours, varie de 4 à 8° par jour selon la modélisation envisagée. La coulée D41, qui se serait mise en place avant le début de l'impulsion, semble avoir enregistré le début et la majeure partie de celle-ci, mais pas sa phase terminale.

DISCUSSION

La vitesse de variation du champ trouvée ici est du même ordre de grandeur que celle précédemment obtenue pour la première impulsion de cette transition (Coe et Prévot, 1989). Cependant, même si la cohérence de la variation de la direction du champ en fonction du temps trouvée ici justifie la présente interprétation, il faut souligner que certains aspects de la modélisation thermique utilisée ne sont pas conformes à la réalité. Ceci vaut tout particulièrement pour l'effet de réchauffement d'une coulée par celle sus-jacente : il est beaucoup moins marqué dans la réalité. D'autres études (Audunsson et Levi, 1988) se sont heurtées aux

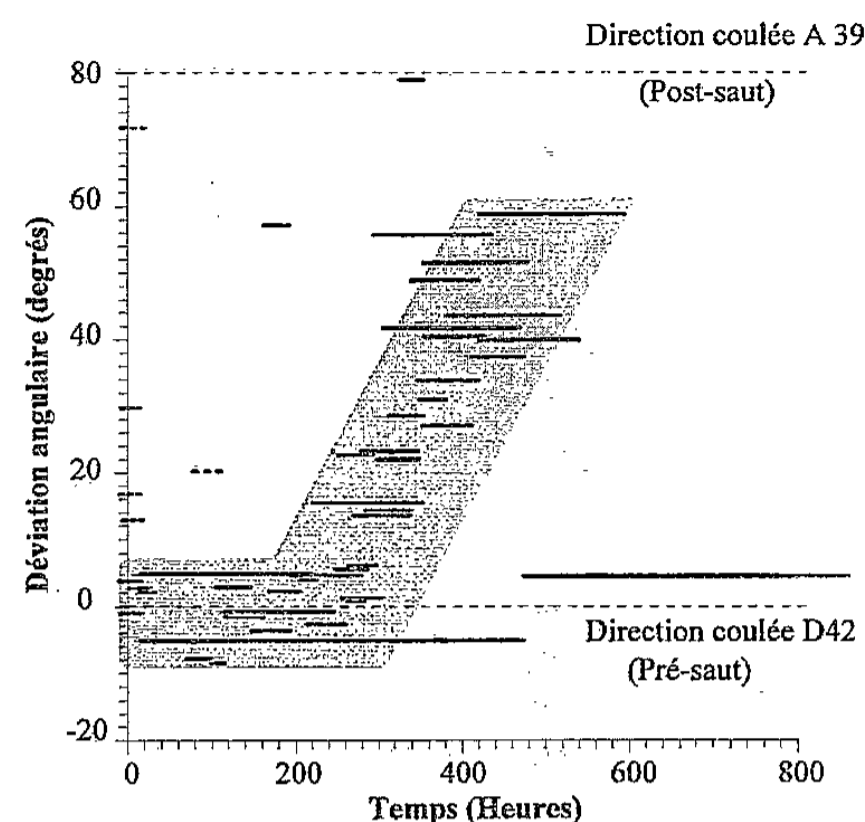


Figure 4 Légende page précédente.

Legend on previous page.

mêmes incompatibilités. La prise en compte de cette observation nécessiterait un modèle plus élaboré (Stasiuk *et al.*, 1993), qui ne devrait pas toutefois modifier l'ordre de grandeur des temps calculés. Un tel modèle est en cours d'élaboration (C. Jaupart communication personnelle).

Compte tenu de la vitesse angulaire et de l'intensité du paléochamp (approximativement 7 μ T ; Prévot *et al.*, 1985 *b*), cette seconde impulsion géomagnétique transitionnelle correspondrait à une variation vectorielle de 450 à 900 γ /jour. Son origine, qui reste énigmatique, est discutée par ailleurs (Coe *et al.*, 1995).

Publication n° 10 du Programme CNRS-INSU Dynamique et Bilan de la Terre 2 (Terre Profonde).

AUDUNSSON, H. et LEVI, S., 1988. Basement heating by a cooling lava: Palaeomagnetic constraints, *J. Geophys. Res.*, 93, B4, p. 3480-3496.

COE, R. S. et PRÉVOT, M., 1989. Evidence suggesting extremely rapid field variation during a geomagnetic reversal, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 92, p. 292-298.

COE, R. S., PRÉVOT, M. et CAMPS, P., 1995. New evidence for extraordinarily rapid change of the geomagnetic field during a geomagnetic reversal, *Nature* (à l'impression).

JAEGER, J. C., 1967. Cooling and solidification of igneous rocks, In HESS, H. H. et POLDERVAART, A., éd., *Basalts* (2), Intersciences Publishers, New York, p. 503-536.

MANKINEN, E. A., PRÉVOT, M., GROMMÉ, C. S. et COE, R. S., 1985. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition, 1, Directional variation, duration of episodes, and rock magnetism, *J. Geophys. Res.*, 90, B12, p. 10393-10416.

PRÉVOT, M., MANKINEN, E. A., GROMMÉ, C. S. et COE, R. S., 1985 *a*. How the geomagnetic field vector reverses polarity, *Nature*, 316, p. 230-234.

PRÉVOT, M., MANKINEN, E. A., COE, R. S. et GROMMÉ, C. S., 1985 *b*. The Steens Mountain (Oregon) Geomagnetic polarity transition, 2, Field intensity variations and discussion of reversal models, *J. Geophys. Res.*, 90, B12, p. 10417-10448

SHAW, H. R., HAMILTON, M. S. et PECK, D. L., 1977. Numerical analysis of lava lake cooling model, part 1, *Am. J. Science*, 277, p. 384-414.

STASIUK, M. V., JAUPART, C. et SPARKS, R. S. J., 1993. Influence of cooling on lava-flow dynamics, *Geology*, 21, p. 335-338.

TOULOUKIAN, Y. S., JUDD, W. R. et ROY, R. F., éd., *Physical properties of rocks and minerals*, New York, McGraw-Hill, 548 p.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES