

Les inversions du champ magnétique terrestre : Auvergne, Terre d'élection ! Hommage à Bernard Brunhes, Norbert Bonhommet et Jean Babkine


Jacques Kornprobst, professeur, ancien directeur de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC), Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), UCA (Université Clermont-Auvergne).

Résumé

Les inversions géomagnétiques sont des renversements plus ou moins rapides et de durée plus ou moins longue de la polarité du champ magnétique terrestre. Leur existence a été prouvée pour la première fois par Bernard Brunhes, en 1905, sur la base des caractéristiques magnétiques de basaltes et de brique naturelle provenant de Pontfarcin (maintenant Pont Farin), près de Saint-Flour, en Auvergne. Cette découverte, d'abord ignorée, eut des conséquences capitales pour la compréhension de la dynamique terrestre. Près de soixante dix ans plus tard, en 1967, Norbert Bonhommet et Jean Babkine montrent l'existence d'une inversion récente, très rapide et de durée limitée, du type de celles qui seront désignées plus tard (1972) sous le nom d'excursions géomagnétiques. Ce résultat a été obtenu par l'étude systématique des caractéristiques magnétiques des laves et des projections des appareils volcaniques de la chaîne des Puys, à un jet de pierre de Clermont-Ferrand, dans le département du puy-de-Dôme (Auvergne), et spécialement au voisinage de Laschamps et d'Olby. Plusieurs excursions seront mises en évidence ultérieurement au cours de la période de Brunhes. L'article ci-dessous retrace les conditions techniques de ces découvertes dans le contexte scientifique du début du XX^e siècle et de la fin des années 60. Il montre que, dans les deux cas, il a été difficile de convaincre la communauté scientifique, mais que la multiplication des observations a finalement conduit à un accord presque total sur la réalité de ce phénomène qui résulte du fonctionnement du noyau de la Terre, à plus de 2900 km de profondeur.

■ Avant-propos

Que l'aiguille de la boussole puisse parfois indiquer le sud au lieu du nord, c'est-à-dire qu'il puisse se produire des inversions de polarité magnétique au cours du temps, est une éventualité qui a été pour la première fois envisagée par le physicien italien Giuseppe Folgheraiter (1899) sur la base de l'observation d'inclinaisons négatives portées par des poteries étrusques et grecques. Ce concept a été considéré comme erroné, voire fantaisiste par la plupart de ses contemporains. Dès 1905 cependant, Bernard Brunhes mettait en évidence des directions magnétiques inversées dans des laves et des « briques naturelles » du Cantal. Restée sceptique pendant plusieurs décennies, la communauté scientifique a fini par considérer les inversions magnétiques comme une constante de l'histoire de la Terre. Leur succession au cours du temps a servi à construire des « échelles magnéto stratigraphiques » dont l'utilisation a été capitale pour la compréhension de l'expansion océanique (Vine et Matthew, 1963; Vine, 1966). Il est apparu rapidement que les « périodes » (ou « époques ») principales de ces échelles ont été interrompues par des événements de relativement courte durée (de polarité normale au cours des périodes inverses, et de polarité inverse au cours des périodes normales); mais il a fallu



attendre 1967 pour constater que des « excursions » très courtes (quelques milliers d'années) pouvaient traduire des inversions de polarité rapides; la première d'entre elle a été découverte dans la chaîne des Puys par Norbert Bonhommet et Jean Babkine. Ces inversions, qu'elles soient majeures, ou au contraire très localisées dans le temps, sont les unes et les autres des processus qui affectent en réalité le globe terrestre tout entier, même si elles ne sont identifiées que dans un nombre restreint de localités; il est intéressant de souligner, pour l'histoire de notre région, que la première inversion majeure et la première excursion ont l'une et l'autre été initialement mises en évidence en Auvergne. Le présent article se propose de revenir sur les auteurs de ces découvertes et sur les conditions dans lesquelles celles-ci ont été réalisées.

■ Introduction

Avant d'en venir au fait, il paraît nécessaire de rappeler les principales caractéristiques du magnétisme terrestre et la façon dont ces concepts ont pu être cernés. Les principales étapes de l'histoire du magnétisme sont ainsi brièvement rappelées ci-dessous. Après Cox et al. (1964), un historique très détaillé est donné par Courtillot et Le Mouél (2007), par Laj et Channel (2007) puis par Courtillot (2009); des éléments plus facilement accessibles à des lecteurs non spécialisés peuvent être trouvés in Kornprobst (2013; 2017; pdf disponibles sur demande à l'auteur).

L'existence d'un champ magnétique terrestre d'origine interne a été établie par William Gilbert en 1600, sur la base des variations d'inclinaison de l'aiguille de la boussole tout autour du globe. La plupart des magnéticiens pensent aujourd'hui que, suivant l'hypothèse de Walter Elsasser (1946), ce champ magnétique a sa source dans le noyau terrestre et résulte principalement du fonctionnement d'une dynamo liée aux mouvements turbulents de l'alliage liquide Fe-Ni dans le noyau externe (entre 2900 et 5000 km de profondeur). Dès 1635, Henry Gellibrand a montré que l'orientation (inclinaison et déclinaison) du champ magnétique varie au cours du temps en un lieu déterminé. Les observations systématiques menées depuis le début du XVIII^e siècle par les Observatoires de Londres, puis de Paris, ont fait apparaître une variation « séculaire » (au cours des 3 derniers siècles) de près de 25° pour la déclinaison, et d'environ 10° pour l'inclinaison (Alexandrescu et al., 1997).

De son côté, Achille Delesse (1849) observait que des fragments de basalte possèdent toutes les caractéristiques des aimants permanents, propriété qu'il attribuait à l'orientation des grains de magnétite contenus par ces roches. Un peu plus tard (1853) Macedonio Melloni publie une étude magistrale sur le magnétisme des laves du Vésuve et de quelques autres sites volcaniques italiens; il montre que les roches récentes ont une orientation magnétique à peu près parallèle à celle du champ contemporain, tandis que les échantillons plus anciens ont des orientations magnétiques qui diffèrent parfois fortement de celle du champ terrestre du lieu et de l'époque. Il en déduit que les laves ont acquis, au cours de leur refroidissement, la direction magnétique du champ qui régnait au moment de leur éruption, et que celle-ci a changé au cours du temps. À partir de 1896, Giuseppe Folgheraiter effectue des mesures d'orientation magnétique sur des roches et des poteries antiques; ses données confirment que les directions magnétiques dépendent de l'âge des matériaux; elles montrent qu'elles sont moins dispersées dans les céramiques que dans les roches volcaniques. Ces observations ont conduit au développement de méthodes de datation des roches volcaniques et des poteries antiques basées sur leurs caractéristiques magnétiques, respectivement le « paléomagnétisme » et « l'archéomagnétisme ». Elles sont fondées sur le travail théorique de Pierre Curie (1895) qui démontre que les éléments ferromagnétiques perdent toute aimantation au-dessus d'une température caractéristique dite « température (ou point) de Curie »; lorsque la température est progressivement

abaissée, ces matériaux réacquièrent une aimantation rémanente dont l'orientation est parallèle à celle du champ magnétique ambiant. Au-dessous d'une certaine température, les directions magnétiques des matériaux sont définitivement fixées, à condition de ne pas les chauffer à nouveau au-dessus de cette température dite de « débloccage » (Néel, 1955). Ces expériences confirment les observations de Melloni (1853) et de Folgheraiter (1896) qui avaient montré l'un et l'autre que des moellons d'édifices anciens (amphithéâtre de Pompéi et mur antique de la ville de Rome) présentent des orientations magnétiques aléatoires n'ayant donc pas été réorientées par le champ magnétique au cours des deux derniers millénaires. Une observation identique a été faite par David (1904), sur les dalles du Temple de Mercure, au sommet du puy de Dôme ; curieusement, David ne cite pas ses prédécesseurs.

Certaines poteries étrusques et grecques (800-1000 ans BC) ont fourni à Folgheraiter (1899) des valeurs insolites de l'inclinaison, légèrement négatives (c'est-à-dire orientées vers le haut, jusqu'à -5°), ce qui a incité cet auteur à imaginer la possibilité d'un renversement du champ magnétique. Cette hypothèse a été fortement contestée et l'idée d'un renversement naturel du champ magnétique terrestre a été rejetée pendant de nombreuses décennies.

■ Bernard Brunhes et l'inversion magnétique de Pontfavein

Lorsqu'il prend ses fonctions de professeur de Physique à l'Université de Clermont-Ferrand, Bernard Brunhes est un chercheur confirmé, déjà titulaire de la chaire de physique à l'Université de Dijon (pour une biographie complète consulter l'article de Jean Didier et Alexandre Roche, 1999). Il est spécialiste d'optique, de la propagation des rayonnements dans les solides, et de thermodynamique. Il ne s'est jamais préoccupé de magnétisme mais sa nouvelle responsabilité de directeur de l'Observatoire du puy de Dôme l'oblige à s'y mettre ; en effet son prédécesseur Louis Hurion, ancien élève d'Euléthère Mascart au Collège de France, avait initié des mesures systématiques du champ terrestre au sommet du puy de Dôme et Bernard Brunhes entendait les poursuivre. Pour cela, il lit tout ce qui se rapporte au magnétisme terrestre et s'imprègne notamment des travaux Folgheraiter ; il n'a pas eu entre les mains l'ouvrage fondamental de Macedonio Melloni (1853), mais il en connaît la substance à travers ce qu'en a écrit Folgheraiter.

► La double chance de Bernard Brunhes

Le bureau de Brunhes à l'université (située alors dans les locaux de l'actuel rectorat de Clermont-Ferrand) jouxte celui de Philippe Glangeaud, jeune professeur de géologie passionné de volcanisme. Dans le feu de la discussion, Glangeaud fait connaître à Brunhes l'existence des « porcelanites » : fragments d'argile plio-quadernaire ayant été cuits par certaines coulées basaltiques issues de la chaîne des Puys. Il s'agit, en quelque sorte de « briques naturelles », étroitement associées aux laves ; Bernard Brunhes voit dans cette association l'opportunité de comparer les mesures faites sur les deux types de matériaux. Deuxième chance, Brunhes rencontre à l'Université un jeune préparateur très habile techniquement, Pierre David, qu'il embauche immédiatement à l'Observatoire. Ils mettent au point une procédure de prélèvement et d'étude magnétique des échantillons collectés dans les environs de Clermont-Ferrand (à Boisséjour notamment, et à Royat) sous le pilotage de Philippe Glangeaud, grand connaisseur de la géologie locale. (Fig. 1)



Figure 1

À gauche, Bernard Brunhes vers 1900 ; photographe inconnu. À droite, Philippe Glangeaud ; buste en bronze de Maurice Vaury, Jardin Lecoq, Clermont-Ferrand ; photo Jules Rhin.

► **Élaboration d'une méthodologie**

La méthode de prélèvement et d'étude des échantillons de brique naturelle et de lave est décrite dans un premier article, signé Brunhes et David, présenté à l'Académie des Sciences en 1901, puis rappelée dans un article plus complet (Brunhes, 1906).

- Prélèvement des échantillons

Melloni (1853), puis Folgheraiter (à partir de 1896) donnent quelques détails sur la façon dont ils ont procédé, mais Brunhes et David se montrent particulièrement précis, tout au moins lorsqu'il s'agit d'échantillonner les briques naturelles. Ils sont moins clairs pour les basaltes. Mais laissons la parole à Bernard Brunhes : « On commence par dresser, au niveau, une face horizontale supérieure ; sur cette face horizontale on place une petite boussole de déclinaison et l'on trace sur la roche une flèche parallèle à la direction actuelle de l'aiguille de déclinaison, la pointe de la flèche étant dirigée vers le Nord magnétique. On découpera dans la face horizontale un carré dont les côtés sont respectivement parallèles et perpendiculaires à la direction de cette flèche. Avant de détacher l'échantillon de la roche on dresse une des faces (...) par exemple la face Nord ou la face Sud, suivant la disposition de la carrière. On détache ensuite un bloc plus gros que l'échantillon à conserver, et on en achève la taille à l'atelier ou au laboratoire en s'astreignant absolument à ne retoucher, dans aucun cas, la face horizontale supérieure où est tracée la flèche ». Les argiles cuites par les laves sont découpées en cubes d'environ 8 cm d'arête ; l'une des arêtes est parallèle au Nord magnétique ; les deux autres arêtes sont respectivement orientées E-O et verticalement. Les échantillons obtenus sont sensiblement plus petits que ceux sur lesquels ont travaillé les auteurs précédents et leur forme cubique permettra à Brunhes de procéder aux vérifications décrites ci-dessous. La brique naturelle, assez tenace, peut néanmoins se tailler avec des outils de carrier : marteau et burin pour le dressage de la face horizontale ; elle peut même être découpée avec une scie à métaux. En revanche, le basalte est beaucoup plus difficile à façonner. Brunhes et David ne donnent aucune indication sur la façon dont ils ont procédé. Il est possible d'imaginer qu'ils ont échantillonné de gros spécimens sur le terrain en repérant soigneusement la direction du nord magnétique et en matérialisant (avec du plâtre ?) une face horizontale. Il était alors possible de fabriquer des cubes orientés de 8 cm d'arête en utilisant les meules à émeri que Philippe Glangeaud devait posséder dans son laboratoire pour tailler des lames minces de roche ; mais ça n'est qu'une supposition.

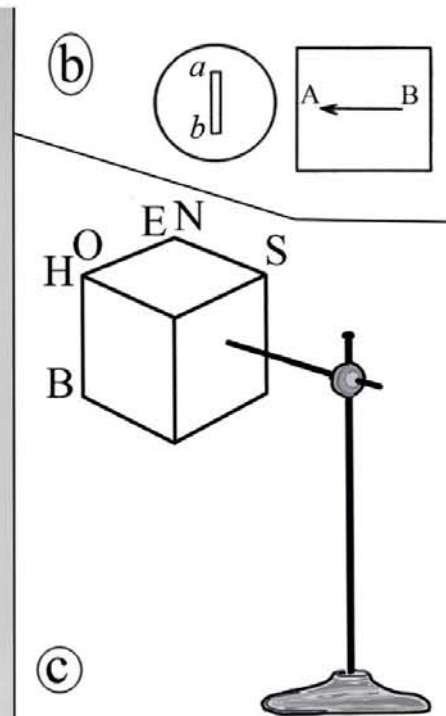
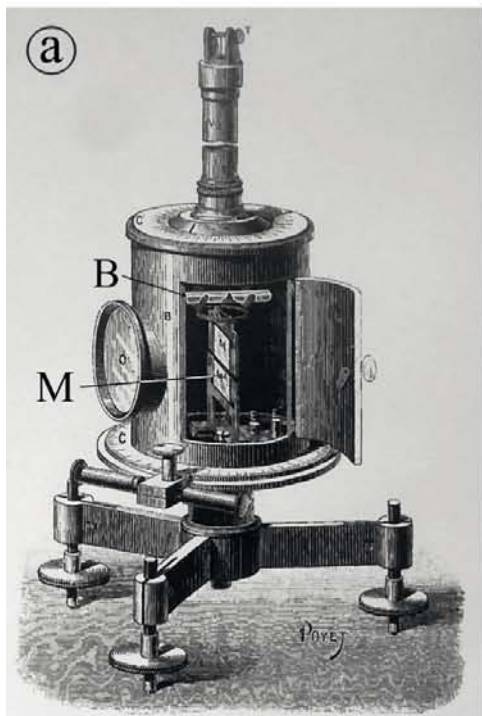
Bernard Brunhes souligne les limites de la précision des prélèvements orientés à l'aide d'une boussole. L'aiguille de cet instrument est en effet plus ou moins fortement sollicitée par les roches environnantes, en particulier par les basaltes qui possèdent un magnétisme rémanent assez intense.

- Mesure des caractéristiques magnétiques des échantillons

Melloni (1853) avait évalué la déclinaison magnétique de ses échantillons en étudiant la déviation qu'ils provoquaient sur les barreaux d'un galvanomètre astatique de Nobili. Folgheraier utilisait un magnétomètre de Gauss et Weber; il s'est surtout intéressé aux variations d'inclinaison car, dans l'étude paléomagnétique des briques et poteries, il n'avait aucun moyen de vérifier l'orientation de ces céramiques par rapport au nord magnétique de l'époque de la cuisson, c'est-à-dire d'accéder aux valeurs de la paléo déclinaison; en revanche, postulant que vases et amphores avaient été cuits debout, l'inclinaison restait sauvegardée dans tous les cas (sauf si le potier, par commodité, avait installé la poterie à l'envers !). Brunhes et David décrivent dès 1901 un protocole de mesure qui permet d'accéder à l'orientation du vecteur magnétique des échantillons étudiés, c'est-à-dire à l'orientation du champ magnétique à l'époque du refroidissement des briques naturelles et des laves.

Figure 2
a) Déclinomètre de Mascart (dessiné et gravé par Louis Poyet), **B** : barreau aimanté suspendu; **M** : miroir. **b)** Utilisation du déclinomètre comme un magnétomètre de Gauss et Weber, selon Brunhes (1906); **ab** : barreau aimanté solidaire du miroir; **AB** : composante du moment magnétique de l'échantillon à mesurer.
c) Présentation de l'échantillon; **NS, OE** et **HB** : composantes du moment magnétique, respectivement nord-sud, ouest-est et haut-bas; voir texte pour le détail des manipulations.

Ils utilisent le matériel qu'ils ont sous la main à l'Observatoire: un « déclinomètre de Mascart » qui sert quotidiennement à observer les variations diurnes du champ magnétique terrestre. Ce déclinomètre (Fig. 2a) peut aussi jouer le rôle d'un magnétomètre de Gauss et Weber (Fig. 2b). L'appareil comporte un barreau aimanté de 5 cm de longueur suspendu à un « fil de cocon » (c'est-à-dire de la soie naturelle); il est fixé à un étrier et entraîne, dans sa rotation, un cercle gradué et un miroir; la lecture de la déviation peut être faite directement sur le cercle ou bien, de façon plus précise, grâce à un rayon lumineux qui, réfléchi sur le miroir, est focalisé par une lentille sur une échelle située à un mètre environ de l'appareil. Cet appareil est très sensible et sa précision est très supérieure à celle qui est demandée par les expériences menées par Brunhes et David. Le protocole est décrit ci-dessous (Brunhes et David, 1901; Brunhes, 1906).



Il s'agit d'estimer l'orientation et la valeur des composantes N-S, E-O et selon la verticale HB du vecteur magnétique de l'échantillon. Lisons ce qui concerne les premières mesures sur briques naturelles: « On obtient la valeur de la composante nord-sud en plaçant le cube de telle sorte que son axe nord-sud soit dans la première position de Gauss (c'est-à-dire que le prolongement de cet axe passe par le centre du barreau), à quelques centimètres du barreau du déclinomètre de Mascart. On retourne le cube de manière à échanger les faces nord et sud, et l'on note le déplacement de l'échelle. On s'assure que ce déplacement reste sensiblement le même pour les quatre positions que l'on peut donner au cube, en laissant toujours les faces nord et sud aux mêmes places. Si cette condition n'était pas réalisée, c'est qu'il y aurait défaut d'homogénéité dans le bloc, et l'on ne pourrait faire entrer les mesures faites sur ce cube en

ligne de compte (cela arrive fréquemment, par suite d'interposition de morceaux assez gros de granit (sic) ou de quartz à l'intérieur de la brique). On opère de même pour la composante est-ouest et pour la composante verticale ». Le reste est une simple question de trigonométrie (Fig. 3).

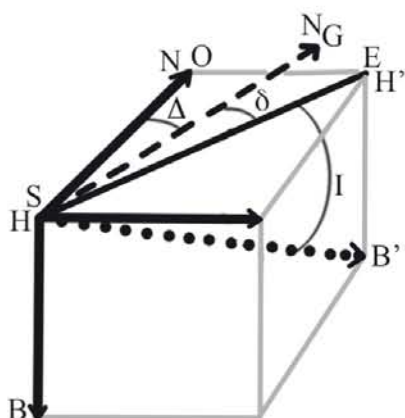
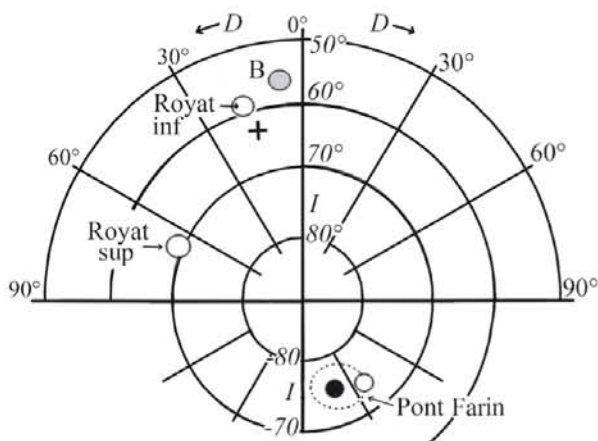


Figure 3

La déviation du barreau aimanté du déclinomètre de Mascart donne les valeurs des composantes (flèches grasses) NS, OE et verticale HB du vecteur magnétique de l'échantillon (pointillé gras). Tiré gras NG : nord géographique. Δ est la déclinaison au moment de la mesure, sur le lieu de la mesure ; δ est la déclinaison affichée par la composante horizontale du vecteur magnétique au moment de la mesure [Δ et δ sont comptés positivement vers l'est, négativement vers l'ouest]. La déclinaison au moment du refroidissement de l'échantillon est égale à $|\delta - \Delta|$. On a : Déclinaison au moment du refroidissement : $\tan |\delta - \Delta| = EO/NS$, et : Inclinaison au même moment : $\cos I = NS/\cos \delta \cdot HB$

► Les premiers résultats : efficacité de la méthode

Brunhes et David (1901), avec l'aide de Philippe Glangeaud, font un petit galop d'essai qui leur montre que les mesures effectuées sur des briques naturelles fournissent des valeurs cohérentes de la déclinaison et de l'inclinaison au moment de la cuisson des matériaux argileux par les coulées de lave qui les recouvrent. En effet, plusieurs prélèvements faits dans des carrières de Boisséjour et de Royat donnent des valeurs de la déclinaison comprises entre 7 et 9°30'ouest pour des inclinaisons situées entre 56°30'et 58°30' (Fig. 4). La valeur de la déclinaison indiquée par la composante horizontale du vecteur magnétique des échantillons est significativement différente de celle du champ magnétique de l'époque (les auteurs ne la précisent pas mais nous savons, grâce au site des Ressources Naturelles du Canada, que la déclinaison était de l'ordre de 16° ouest à Royat en 1901).



Dans une publication ultérieure (Brunhes et David, 1903), les auteurs présentent les données obtenues sur une coupe reconstituée de la vallée de la Tiretaine, à Royat; cette coupe comporte une coulée supérieure de basalte, reposant sur un niveau d'argile dont la partie supérieure est cuite, transformée en brique naturelle; la partie inférieure du niveau argileux n'est pas transformée en brique et repose directement sur une coulée inférieure. Les mesures effectuées sur cet ensemble (Fig. 4) montrent d'abord que les directions magnétiques observées dans les basaltes de la coulée supérieure sont en parfaite cohérence avec celles obtenues sur les échantillons de brique naturelle sous-jacents. Par conséquent, les laves peuvent être utilisées pour déterminer les caractéristiques du champ magnétique terrestre à l'époque des éruptions. Seconde observation importante: sur le

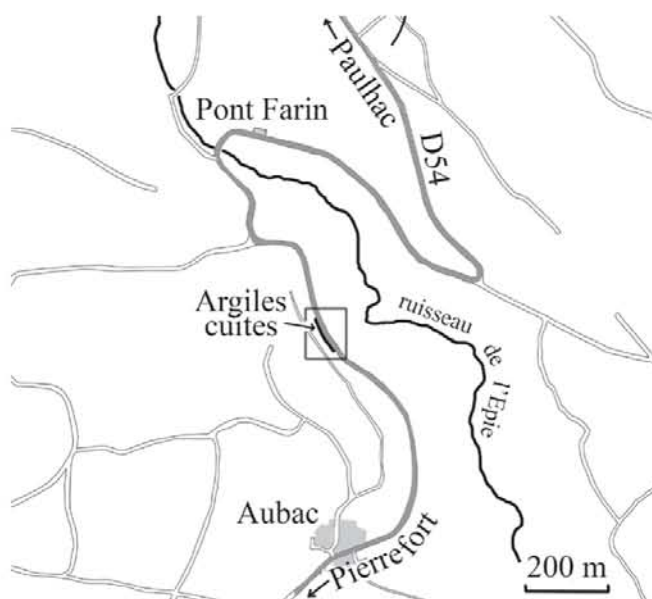
Figure 4

Résultats obtenus par Brunhes et David (1901; 1903) et par Brunhes (1905) présentés sur une projection stéréographique. Les valeurs de l'inclinaison I sont cotées du centre (verticale) vers la périphérie de la figure; elles sont positives (dirigées vers le bas) dans le demi-cercle supérieur, négatives (dirigées vers le haut) dans le demi-cercle inférieur. Les valeurs de la déclinaison D (est ou ouest) figurent à l'intersection des rayons et des cercles concentriques de la figure. Les vecteurs magnétiques de la coulée de Boisséjour (grisé, B) et de la coulée inférieure de Royat (Royat inf) présentent des orientations qui ne sont pas radicalement différentes de celle du champ au moment de la mesure [croix : valeurs de I et de D en 1901 selon le calculateur des ressources naturelles du Canada]; en revanche, les orientations des vecteurs des échantillons de la coulée supérieure de Royat et de la brique naturelle associée sont très significativement différentes. À Pont Farin, les mesures (rond blanc : brique naturelle; rond noir : lave) indiquent clairement une inversion du champ; la surface délimitée par le tiré cerne les valeurs obtenues par Laj et al (2002) sur le même site.

même site, les deux coulées superposées (séparées par une intercalation argileuse) ont des caractéristiques magnétiques qui diffèrent fortement l'une de l'autre, la coulée supérieure ainsi que les argiles cuites, montrant déclinaisons et inclinaisons très différentes (Fig. 4) de celles qui sont observées aujourd'hui, et de celles qui régnaient au début du XX^e siècle lorsque Brunhes et David avaient entrepris leurs mesures. Les auteurs ne sont pas du tout étonnés par ce résultat surprenant; ils se contentent de souligner que « la première coulée n'est pas contemporaine de l'autre, et que cette autre est contemporaine de la cuisson de l'argile ». Ils rejoignent ainsi les conclusions de Macedonio Melloni (1853), mais ne jugent pas utile de le citer.

► **La brique naturelle de Pontfarein : première évidence d'une inversion de polarité du champ magnétique terrestre**

Figure 5
Localisation de l'affleurement de Pontfarein (aujourd'hui Pont Farin), au sud-ouest de Saint-Flour (Cantal). Il est aujourd'hui en très triste état et il faut beaucoup d'attention pour ne pas le manquer. Il est conseillé de se munir d'une pelle ou d'une pioche.



- Un résultat inattendu

Au début du siècle (du XX^e !), l'ingénieur M. Vinay (souvent qualifié d'ingénieur des Ponts et Chaussées, mais il n'apparaît pas dans la liste des anciens élèves de l'École Nationale) dirige des travaux de traçage d'un chemin vicinal sur la commune de Cézens, dans le Cantal (Fig. 5), chemin devenu depuis lors, la D54 qui relie Paulhac à Pierrefort; entre les lieux dits Pontfarein (maintenant Pont Farin, ou Pontfarin sur la carte Michelin n° 76) et Aubac, le terrassement met à jour sur une centaine de mètres, une couche d'argile cuite située sous une coulée de basalte d'âge miocène de quelques mètres d'épaisseur. M. Vinay informe Bernard Brunhes qui fait le voyage depuis Clermont-Ferrand pour opérer quelques prélèvements orientés; Pierre David n'est pas de la fête. Les résultats sont assez étonnants (Fig. 4): « De nombreux échantillons prélevés tant sur la brique que sur le basalte qui la surmonte... ont présenté une direction d'aimantation uniforme, avec le pôle nord actuel du côté sud et en haut » (Brunhes, 1905). Bernard Brunhes ajoute en 1906: «... en un moment de l'époque miocène, aux environs de Saint-Flour, le pôle Nord était dirigé vers le haut; c'est le pôle sud de la Terre qui était le plus voisin de la France centrale ». Ces observations rejoignent ainsi l'opinion déjà formulée par Folgheraiter (1899) sur la possibilité d'une inversion du champ magnétique terrestre, mais ce dernier fondait ses certitudes sur des mesures jugées erronées à l'époque, basées sur des poteries antiques dont l'orientation réelle par rapport au champ magnétique n'était pas assurée.

- Impact scientifique de la découverte de Bernard Brunhes

La démonstration très convaincante de l'inversion probable du champ magnétique terrestre dans le passé n'a eu aucun retentissement à l'époque. Sans doute la disparition prématurée de Bernard Brunhes en 1910 a-t-elle empêché une large diffusion de ses idées. Toutefois, plusieurs chercheurs ont suivi sa voie. Citons le Suisse Paul-Louis Mercanton (1926) qui identifie des inclinaisons négatives dans plusieurs échantillons du Groenland et du Spitzberg, collectés au cours de la croisière du Pourquoi Pas? Le Japonais Motonori Matuyama (1929), à partir d'échantillons collectés au Japon, en Corée et en Mandchourie, réalise une première tentative pour mettre en relation polarité magnétique du champ terrestre et chronologie. En dépit des évidences, deux prix Nobel de physique marquent plus que du scepticisme à l'égard des inversions: Patrick Blackett (1947) lie directement la polarité du champ au sens de rotation de la Terre et juge avec raison que celui-ci ne peut pas s'inverser; Louis Néel (1950) expose plusieurs bonnes raisons pour expliquer les inversions observées dans les échantillons naturels, à l'exclusion d'une inversion de polarité du champ terrestre. Mais, le nombre de paléomagnéticiens augmentant à partir des années 50, il devient impossible de nier l'évidence, et le développement de méthodes performantes de datation des laves permet d'aboutir à la notion d'échelle magnéto stratigraphique et à l'acceptation quasi générale du processus d'inversion. Bernard Brunhes est reconnu internationalement et son nom est porté par la période magnétique actuelle, qui dure depuis 780 000 ans (Fig. 6).

■ Norbert Bonhommet et Jean Babkine : l'excursion de Laschamps

Dès la fin des années 50, les paléomagnéticiens ont commencé à accumuler les données sur les âges des inversions magnétiques afin d'élaborer une échelle chronologique utilisable pour la datation des séries volcaniques (Fig. 6). La première qui tienne debout fut sans doute celle de Cox et al. (1964); elle présente 4 périodes (ou époques): deux sont normales et deux sont inverses, se déroulant sur environ 4 Ma. Ces périodes ont reçu les noms de savants illustres dans le domaine du magnétisme et du paléomagnétisme: Brunhes pour la plus récente (normale), Matuyama (inverse), Gauss (normale), et enfin Gilbert (inverse) pour la plus ancienne. Cox et al. notent l'existence d'évènements de plus courte durée, de polarité directe au cours de l'époque inverse de Matuyama, et de polarité inverse au cours de l'époque directe de Gauss; ces évènements portent le nom des localités où ils

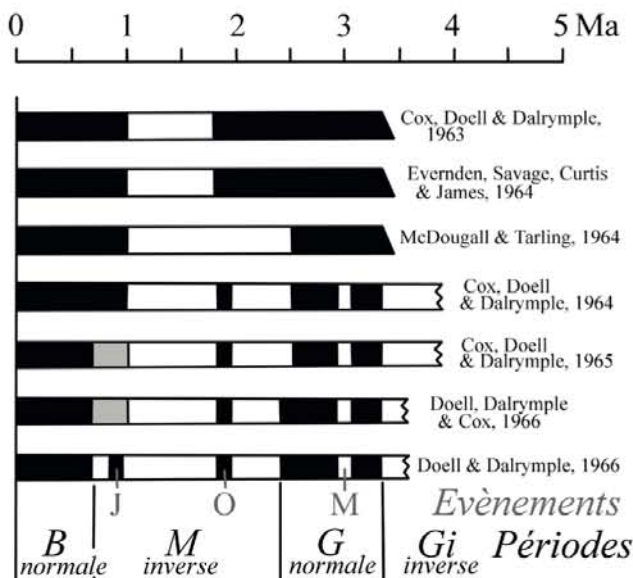


Figure 6
Les échelles magnéto stratigraphiques successives publiées entre 1963 et 1966. Les données actuelles, notamment acquises en mer, permettent de prolonger valablement l'échelle sur plus de 200 Ma (par exemple Gradstein et Ogg, 2004).

ont été identifiés: respectivement Olduvai (en Tanzanie), et Mammoth (en Californie). Les mêmes auteurs présentent en 1966 une échelle magnéto stratigraphique plus complète; la période de Matuyama s'étend vers les âges plus récents mais un événement de polarité directe (Jaramillo, défini au Nouveau Mexique) apparaît à la fin de cette époque. Aucun événement n'a été identifié au cours de la période normale de Brunhes qui couvre les 780 derniers milliers d'années. Or, en 1967, Norbert Bonhommet et Jean Babkine mettent en évidence une inversion de très courte durée dont il sera prouvé ultérieurement qu'elle est effectivement d'âge très récent.

► Norbert Bonhommet

Il est né à Paris en 1936 (Fig. 7); il a suivi à la fin des années 50, un cursus Maths-Physique-Chimie (MPC), d'abord rue Cuvier, puis à la Sorbonne. Il souhaitait s'orienter vers la recherche académique mais il n'avait pas encore choisi une direction précise lorsque, à 24 ans, après une expérience d'enseignement comme moniteur, il part en Algérie où il reste 27 mois ! À son retour de la guerre, attiré par la géophysique, il rend visite à Émile Thellier, célèbre géomagnéticien, directeur de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Ce dernier l'adresse à Alexandre Roche, directeur de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, qui propose à Norbert un sujet de thèse d'État (correspondant à ce que nous appelons aujourd'hui une « habilitation à diriger les recherches »). Celui-ci en effet, à 26 ans passés, n'était plus d'âge à se lancer dans une thèse de 3^e cycle. Le 1^{er} octobre 1964, il obtient un poste d'assistant qui va lui permettre de mener à bien son travail avec des moyens financiers suffisants; il deviendra maître-assistant (maître de conférences aujourd'hui) le 1^{er} janvier 1970. Le sujet proposé par Roche à Norbert porte sur l'étude de l'évolution du champ magnétique terrestre au cours du temps (déclinaison, inclinaison et intensité) telle qu'elle peut être restituée par les caractéristiques magnétiques des laves de la chaîne des Puys. À cette époque, Norbert n'a aucune expérience du terrain; il n'a peut-être jamais touché un caillou de sa vie. Mais, par chance, Norbert rencontre Jean Babkine qui va lui apporter un soutien considérable.


Figure 7

À gauche, Norbert Bonhommet au début des années 70; photo. Micheline Bonhommet.
À droite, Jean Babkine vers 1960; photo. Jean-Claude Vilminot.



► Jean Babkine

Il est né à Paris (Fig. 7) en 1934, dans une famille d'émigrés russes (en fait son père était de Kharkov en Ukraine). Il a suivi des études supérieures, SPCN d'abord rue Cuvier (tout comme Norbert; ils s'y sont peut-être croisés !), puis en géologie à la Sorbonne. Il était particulièrement intéressé par la minéralogie et la pétrographie et, après avoir obtenu



une licence de géologie en 1958, il a entrepris une thèse de 3^e cycle sur les « minéraux opaques » des basaltes du Velay et leurs caractéristiques magnétiques. Il travaille à Paris d'abord, au laboratoire de pétrographie, sous la direction de Jean Jung et de Jean Ravier, puis à l'Institut de Minéralogie de l'Université de Nancy, avec Joseph Bolfa (Pépite !). Nommé assistant, il devint l'un des rares Français à pratiquer de façon professionnelle l'étude des minéraux opaques en lumière réfléchie en suivant les principes de Paul Rahmdor et de Paul Picot. Il soutint sa thèse fin 1960. En bout de sursis, il refuse d'intégrer l'EOR et de participer au « maintien de l'ordre » en Algérie; il passera près de 27 mois, en France, « en position sous les drapeaux », notamment dans une escouade chargée de surveiller Paris depuis le sommet de l'Arc de Triomphe. De retour à Nancy, et en accord avec Joseph Bolfa, il décide d'attaquer une thèse d'état sur les propriétés optiques et magnétiques des minéraux opaques des laves de la chaîne des Puys.

Conscient des lacunes de Norbert en volcanologie et en pétrologie, Alexandre Roche suscite une rencontre entre les deux hommes. Ils avaient des personnalités plutôt contrastées, l'un étant assez réservé et l'autre, Jean Babkine, parfois très expansif; mais ils avaient en commun le goût du travail bien fait et un sens de l'humour bien développé. Ils ont collaboré en très bonne intelligence pendant 5 années et ont apporté conjointement un résultat scientifique majeur. Le maître d'œuvre de cette découverte a incontestablement été Norbert Bonhommet, car le paléomagnétisme était directement son affaire; il était appuyé sur une structure technique puissante (l'IPG de Strasbourg) qui lui a permis de faire réaliser (notamment grâce à Raymond Wicker) la plupart des instruments dont il avait besoin. Mais le rôle de Jean Babkine a été essentiel au cours de cette période pour tout ce qui concernait l'approche naturaliste indispensable, volcanologique, pétrologique et minéralogique.

► Les méthodes

Depuis les travaux de Brunhes et David, beaucoup d'eau a coulé dans la Tiretaine et les méthodes du paléomagnétisme ont considérablement évolué.

- Prélèvement des échantillons

La technique la plus utilisée au début des années 60 est celle qui a été développée par Émile Thellier dès 1936: celle du « chapeau de plâtre ». On casse à la masse un gros échantillon (environ 1 kg) dans une coulée; on le remet soigneusement en place et on l'enrobe de plâtre; on trace alors sur le plâtre frais, au niveau, une surface horizontale sur laquelle on plante verticalement une aiguille; on trace l'ombre de cette aiguille portée par le soleil sur la surface en notant l'heure avec grande précision. On trace également la direction du nord magnétique donnée par la boussole, bien qu'elle soit généralement perturbée par le magnétisme rémanent de la roche volcanique. S'il n'y a pas de soleil, on peut se débrouiller de plusieurs façons (voir par exemple Gough, 1967); soit en définissant un azimut à l'aide d'un théodolite, en profitant d'une courte apparition du soleil, azimut qui sera utilisé pour tous les prélèvements réalisés dans un secteur donné; soit, si le temps est vraiment couvert, en utilisant des balises naturelles ou artificielles (points cotés, châteaux d'eau, maisons) visibles sur une carte raisonnablement précise permettant une précision de la mesure d'au moins 0,5°.

Une grande nouveauté dans les méthodes de prélèvement apparaît au cours des années 60: les foreuses portables dont un grand nombre de modèles sont développés par différents laboratoires de paléomagnétisme (voir l'ouvrage édité par Collinson et al. en 1967). Norbert profite des capacités techniques de l'Observatoire de Strasbourg pour faire construire son propre appareillage (Bonhommet, 1972, p. 55) sur le modèle de celui qui a été décrit par Richard Doell et Allan Cox (1967). Dès 1967, Bonhommet et Babkine

contribuent ainsi à la perforation systématique des affleurements le long des routes, du plus mauvais effet esthétique selon Geissman et al. (1987). Ces foreuses ont l'avantage de procurer un échantillonnage très sain en général, propre à dater les carottes, parallèlement à la détermination de leurs caractéristiques magnétiques. Selon Norbert, l'appareillage de Strasbourg permet une cadence d'échantillonnage supérieure de 50 % à celle obtenue avec la méthode du chapeau de plâtre. L'inconvénient principal est lié au poids du dispositif auquel il faut ajouter une importante réserve d'eau pour le refroidissement de l'outil; Geissman et al (1987), sans doute inspirés par Alphonse Allais, appellent de leurs vœux la mise sur le marché « d'eau déshydratée » pour alléger ce fardeau. On obtient des carottes cylindriques orientées de 25 mm de diamètre, dont il est tiré par sciage plusieurs échantillons de 25 mm de longueur directement disponibles pour les mesures.

- Démagnétisation

À côté de l'aimantation rémanente naturelle (ARN) acquise par les roches et les poteries au cours de leur refroidissement au-dessous du point de Curie, des aimantations secondaires peuvent apparaître dans les matériaux sous l'effet de différents processus (voir Gough, 1967). Norbert Bonhommet en retient deux principaux: l'action séculaire du champ magnétique terrestre qui conduit à une aimantation rémanente « visqueuse » (à court terme l'ARV semble « solide » mais à long terme elle s'écoule comme un liquide visqueux et sa mémoire est perdue); les « coups de foudre » qui frappent les affleurements et causent une aimantation secondaire sur plusieurs mètres. Ces aimantations « parasites » (auxquelles peut aussi s'ajouter une aimantation acquise au moment du forage) obscurcissent le message délivré par l'aimantation rémanente naturelle. Elles sont généralement moins intenses et il est possible de les éliminer par chauffage des échantillons au-dessus de la température de blocage (Néel, 1955; température au-dessous de laquelle les caractéristiques magnétiques d'un échantillon sont figées, aux environs de 200 °C) dans un espace amagnétique. Une autre méthode consiste à soumettre les éprouvettes à un courant alternatif développant un champ coercitif capable d'éliminer plus ou moins complètement les champs parasites (par exemple Roquet, 1954, Cox, 1957, Creer, 1959; c'est ainsi que les sous-marins sont débarrassés de leur signature magnétique pour échapper à la détection par des magnétomètres remorqués ou aéroportés). Norbert choisit cette option et fait construire à l'IPG de Strasbourg un appareillage analogue à celui qui a été développé à l'École des pétroles (Rimbert, 1959). Ce dispositif (ses caractéristiques sont décrites en détail par Bonhommet, 1972, p. 68) a parfaitement rempli son rôle (Bonhommet et Babkine, 1966).

- Mesure de l'aimantation rémanente naturelle (ARN) des échantillons

Le développement du paléomagnétisme et de l'archéomagnétisme au cours des années 50 et au début des années 60 a favorisé l'apparition d'un grand nombre d'appareils de mesure de l'ARN. Si les magnétomètres astatiques restent utiles pour leur très grande sensibilité et leur précision, d'autres matériels plus rustiques, adaptés aux mesures sur le terrain et en nombre, sont préférés par les paléomagnéticiens. C'est ainsi que Norbert met en œuvre 3 appareils différents: sur le terrain, il utilise un « fluxgate » (il n'y a pas de nom français) pour une estimation rapide des directions magnétiques; au laboratoire, c'est un inductomètre qui sert pour les échantillons prélevés à la main, et un « spinner » pour ceux qui ont été récupérés par forage. Le fluxgate, auquel on doit la mise en évidence de la « peau de zèbre » des fonds océaniques (Mason, 1958; Vine et Matthews, 1963) comporte deux barreaux ferromagnétiques identiques et parallèles placés sous l'effet de courants alternatifs de sens opposés circulant dans des enroulements; dans un espace amagnétique, le champ magnétique induit résultant est nul à chaque instant; si le dispositif est soumis à un champ magnétique extérieur (champ magnétique terrestre ou ARN d'un échantillon), la composante de ce champ parallèle aux barreaux s'ajoute au champ induit

de l'un et se soustrait au champ induit de l'autre: le cycle aimantation-désaimantation de l'un des barreaux est à chaque instant en avance (ou en retard) sur celui de l'autre; cette variation de champ magnétique dans le système est source d'un courant électrique induit dans un enroulement ceinturant le dispositif dont les variations d'intensité permettent de calculer intensité et orientation du champ extérieur. L'inductomètre utilisé par Norbert Bonhomme a été construit à l'IPG de Strasbourg (Lauer, 1964), suivant le modèle développé par Émile Thellier (1936). Il fonctionne suivant le principe du spinner, héritier du magnétomètre de Wild (vers 1883): la rotation continue d'un échantillon magnétique dans un enroulement génère un courant alternatif; pour un appareil donné, le voltage est proportionnel à la composante du moment magnétique de l'échantillon perpendiculaire à l'axe de rotation; la mesure est répétée suivant 3 axes perpendiculaires entre eux et permet d'obtenir direction et intensité du champ magnétique propre à l'échantillon.

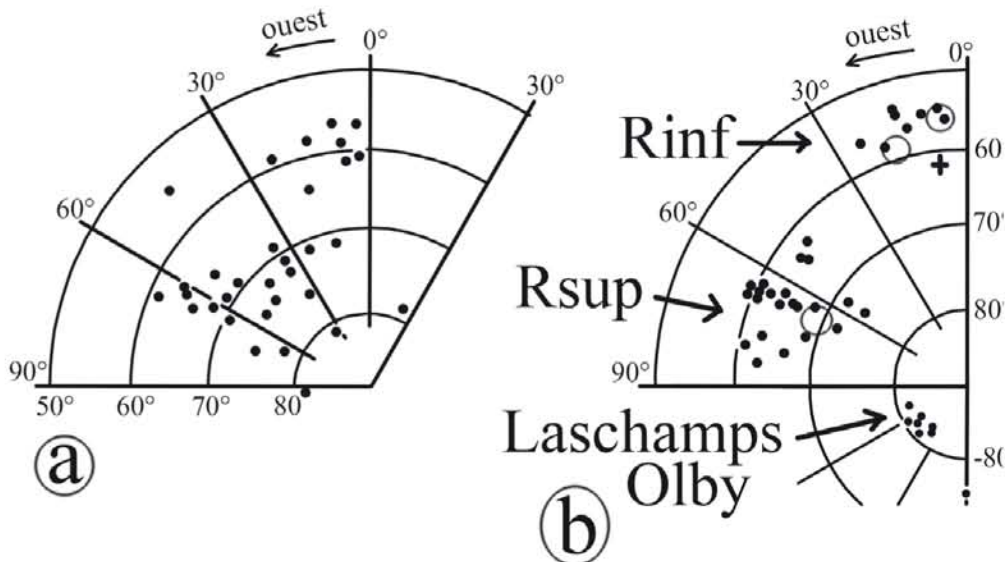
► Résultats scientifiques

- Les basaltes de la Tiretaine: confirmation des valeurs insolites de la déclinaison et de l'inclinaison dans les environs de Royat

Comme il a été rappelé ci-dessus, Brunhes et David (1903) avaient mis en évidence des valeurs inhabituelles de la déclinaison et de l'inclinaison dans la coulée supérieure de la carrière qu'ils avaient étudiée (Fig. 4), valeurs qui d'ailleurs n'avaient pas spécialement interpellé ces auteurs. Bonhomme et Babkine n'ont pas retrouvé le site exact décrit par Brunhes et David, mais ils ont effectué un échantillonnage assez serré des affleurements le long de la vallée de la Tiretaine, depuis Fontanas jusqu'à Royat. Ils citent deux coulées superposées au Pont des Soupirs et rappellent la description faite par Louis Glangeaud (1954) de deux coulées, séparées par 31 mètres d'alluvions, identifiées lors d'un forage hydrologique effectué dans la ville de Royat. Au Pont des Soupirs, Bonhomme et Babkine mesurent dans la coulée inférieure des orientations plutôt proches de celles du champ régnant en 1966; les valeurs qui caractérisent la coulée supérieure sont franchement différentes (Fig. 8); ils confirment ainsi les observations faites par Brunhes et David (1903). Les échantillons prélevés sur les autres sites de la Tiretaine ont des caractéristiques voisines de l'une ou de l'autre de ces deux coulées (en moyenne: $D = 18^\circ$ ouest et $I = +57^\circ$ pour la coulée inférieure; $D = 65^\circ$ ouest et $I = +65^\circ$ pour la coulée supérieure); Bonhomme et Babkine les attribuent à l'une ou à l'autre de ces entités, sur la base de ce qu'ils nomment le « critère du Pont des Soupirs », là où la superposition des deux coulées est nettement visible. Ce choix apparaît pertinent après « nettoyage » magnétique des échantillons (Fig. 8b): la coulée supérieure a réellement des caractéristiques magnétiques insolites, attribuées « à l'image d'un champ instantané au cours de la divagation séculaire » (Bonhomme et Babkine, op.cit.). Notons que les données présentées par Brunhes et David, pour les basaltes comme pour les briques naturelles, figurent bien dans les domaines attendus (Fig. 8b).

Figure 8

Résultats obtenus par Bonhomme et Babkine [1966; 1967]; les valeurs des inclinaisons et des déclinaisons (points noirs) sont représentées sur une projection stéréographique, de la même façon que dans la Figure 4. a) Vallée de la Tiretaine, entre Fontanas et Royat; valeurs brutes, avant démagnétisation. b) valeurs après démagnétisation; Rinf: coulée inférieure de Royat; Rsup: coulée supérieure de Royat [distinction fondée sur le critère du Pont des Soupirs]; Laschamps-Olby: valeurs livrées par le cône de scories et la coulée Nord-Est du puy de Laschamps et par la coulée du puy de Barme. Croix: déclinaison et inclinaison magnétiques à Royat en 1966, d'après le calculateur des Ressources Naturelles du Canada; cercles vides: données de Brunhes et David [1961; 1963] tirées de la Figure 4.



- La belle surprise de l'inversion de Laschamps

Norbert et Jean ont continué à écumer la chaîne des Puys et bien leur en a pris, car ils ont été récompensés par une découverte de taille : les échantillons du cône de scories du puy de Laschamps, de sa coulée Nord-Est, ainsi que ceux provenant de la coulée d'Olby-Monteribeyre issue du puy de Barme, ont en effet fourni des aimantations de type inversé ! Les points correspondants aux mesures sont représentés sur la figure 8, après nettoyage des échantillons de l'aimantation rémanente visqueuse par le dispositif à courant alternatif. Très prudents, ils exposent (Bonhomet et Babkine, 1967) les trois hypothèses qui peuvent être tirées de leurs observations : 1) Existence d'une inversion magnétique très jeune, au sein de la période directe de Brunhes ; 2) Conséquence d'un processus d'auto-inversion, suivant les idées développées par Louis Néel (1951) et par Takesi Nagata (1951) ; 3) « ou bien certaines formations de la chaîne des Puys seraient beaucoup plus anciennes qu'on ne l'a supposé jusqu'ici » (Bonhomet et Babkine, op.cit) et se seraient épanchées au cours de l'époque inverse de Matuyama. Les thèses développées par Néel et Nagata en 1951 n'étaient pourtant plus guère crédibles en 1967, la démonstration de la réalité des inversions magnétiques ayant largement été faite à cette époque, notamment par Vine et Matthews (1963). Par ailleurs, considérer le puy de Laschamps et le puy de Barme comme des édifices antérieurs à 780 000 ans était en totale contradiction avec leur morphologie actuelle et, d'une façon plus générale, avec les âges radiométriques déjà obtenus sur les laves et projections de la chaîne des Puys (Pelletier et al., 1959 ; Brousse et al., 1966). Restait donc à admettre l'existence d'une réelle inversion de polarité du champ magnétique terrestre au cours d'un passé récent.

- Âge de l'inversion de Laschamps

Un bon moyen de connaître l'âge de l'éventuelle inversion de Laschamps consiste à dater les roches qui présentent ce changement de polarité. Depuis l'apparition du protocole analytique développé par Evernden et al. (1957), les paléomagnéticiens utilisent de façon exhaustive la méthode K-Ar, vers laquelle se tourne effectivement Norbert qui fait appel à Joseph Zähringer du Max Planck Institute d'Heidelberg. Trois échantillons à polarité inverse sont analysés ; l'un a été prélevé dans la coulée inférieure du puy de Barme, deux autres proviennent de la coulée du puy de Laschamps. Compte tenu des très faibles quantités d'argon radiogénique présentes dans ces roches, seules les limites supérieures des âges K-Ar ont pu être déterminées : 20 000 ans pour la fin de l'événement de Laschamps ; la limite inférieure est fournie par l'âge ^{14}C à 8730 ans des retombées domitiques sur le puy de Laschamps qui, à cette époque, ont carbonisé quelques buissons (Brousse et al., 1966). Ces datations confirment le caractère très récent de cette éventuelle inversion de Laschamps ; elle apparaît toutefois aujourd'hui exceptionnellement jeune par rapport à celles qui ont été réalisées depuis. Laj et Channel (2007) ont fait une revue des âges publiés pour Laschamps par différentes méthodes et, sur cette base, ils considèrent des valeurs proches de 40 kA ; ils présentent eux-mêmes une série de nouvelles données K-Ar et ^{40}Ar - ^{39}Ar et aboutissent à un âge moyen de $40,4 \pm 2,0$ kA, très voisin de celui qui est proposé par Channel et al. (2017) : 41,4 kA, âge modèle fondé sur des datations au radiocarbone de prélèvements effectués sur la ride médio-Atlantique Sud.

- L'inversion Olby/Laschamps correspond-t-elle réellement à une inversion de polarité du champ magnétique terrestre ?

Friedrich Heller (1980), plus tard accompagné de Nikolai Petersen (1982), défend l'hypothèse d'une inversion spontanée affectant certains échantillons, en liaison avec le comportement de titano-magnétites diversement oxydées et sans aucune relation avec une inversion du champ terrestre ; cette hypothèse est confortée aux yeux de ces auteurs, par l'absence de toute trace d'inversion récente dans des coupes de loess d'âge quaternaire de différentes régions du monde. Norbert, qui a passé une année à Stanford dans le

laboratoire d'Alan Cox, est, depuis la rentrée 1974, professeur à Rennes où il a fondé un laboratoire de paléomagnétisme ; il décide de procéder à une étude détaillée de l'ARN des coulées de Laschamps et d'Olby afin de vérifier si, comme dans le cas de Steens Mountain en Oregon (Prévoit et al., 1985), l'inversion du champ est caractérisée par un effondrement de son intensité. Il confie ce travail à Pierrick Roperch. Celui-ci applique la méthode de Thellier & Thellier (1959), qui consiste à chauffer les échantillons par paliers successifs, et à les faire refroidir en champ nul puis sous un champ déterminé. Roperch et al. (1988) démontrent ainsi que la RMN des échantillons étudiés est très faible (en moyenne $7,7 \pm 1,6 \mu\text{T}$, au lieu de 20 à 25 μT à la latitude de la chaîne des Puys) ce qui correspond bien à ce qui est attendu de la valeur du champ au cours d'une inversion ; elle est d'ailleurs si faible que les auteurs estiment que la polarité inverse n'a pas été complètement établie au cours de l'inversion de Laschamps, ce qui pourrait expliquer, pour répondre à Heller (1980), qu'elle n'ait pas été observée partout dans le monde. Roperch et al. (1988) apportent en outre un argument supplémentaire de poids : des fragments de sédiments argileux cuits trouvés sous la coulée à polarité inversée d'Olby, présentent eux-mêmes des directions magnétiques inverses et une intensité magnétique très faible du champ ; ce « test du contact » (Laj et al. 2002 ; Laj et Channel, 2007) démontre bien, de même que la répartition de mesures concordantes sur une assez vaste surface, la réalité d'une inversion du champ de courte durée à l'époque considérée. Des travaux ultérieurs sur la coulée de Louchadière, à quelques km de Laschamps (Chauvin et al., 1989), confirment totalement ces interprétations.

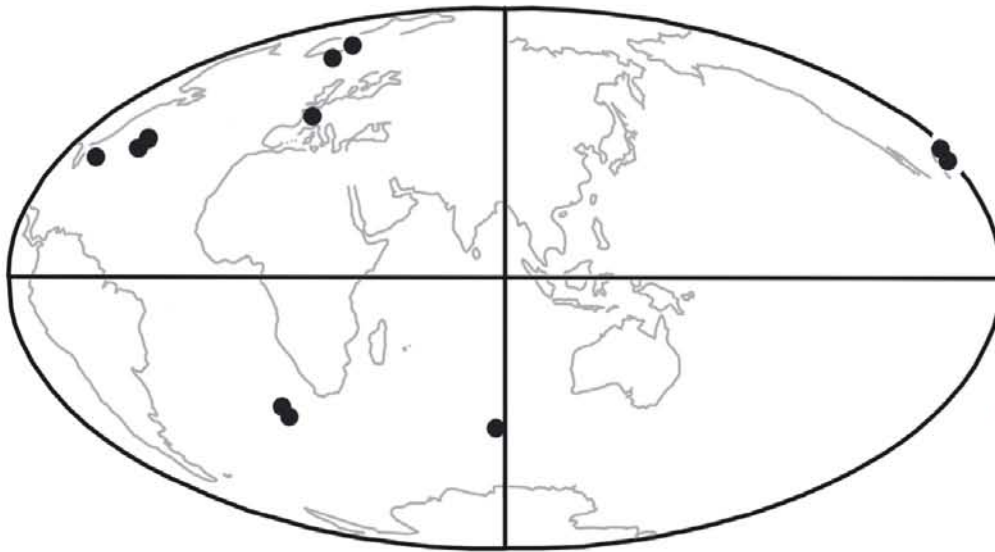


Figure 9
Les différents sites où l'inversion de polarité de Laschamps a été identifiée. Il s'agit principalement de sites de forages océaniques (d'après Laj et Channel, 2007). Leur répartition dans le monde entier garantit le caractère planétaire de cette inversion.

- L'inversion Laschamps-Olby : des observations dans le monde entier

Une inversion du champ magnétique terrestre doit naturellement être ressentie sur l'ensemble du Globe. Il était donc important de mettre en évidence inversion et/ou effondrement de l'intensité du champ en d'autres lieux que la chaîne des Puys. Roperch et al. (1988) ont tenté une première approche qui reste assez sommaire et peu convaincante. En revanche, Laj et Channel (2007), qui disposent alors d'un beaucoup plus grand nombre de données, citent plusieurs localités – 11 en tout - ayant enregistré des inversions de polarité magnétique dont les âges correspondent approximativement à celui de Laschamps (Fig. 9). Cette généralisation sur toute la surface de la Terre de l'observation

de cette courte inversion de polarité garantit qu'elle tire son origine d'une inversion même du champ magnétique terrestre. L'un des sites de forage, parmi d'autres (MD95-2034, dans l'Atlantique), a fourni un échantillonnage de sédiments quaternaires dont les caractéristiques magnétiques ont permis de suivre les déplacements à la surface du Globe du « pôle géomagnétique virtuel » (VGP) au cours de l'inversion de Laschamps (Fig. 10); il est clair qu'il s'agit effectivement d'une inversion de polarité, brève mais réelle, même si le VGP ne stationne pas côté pôle sud.

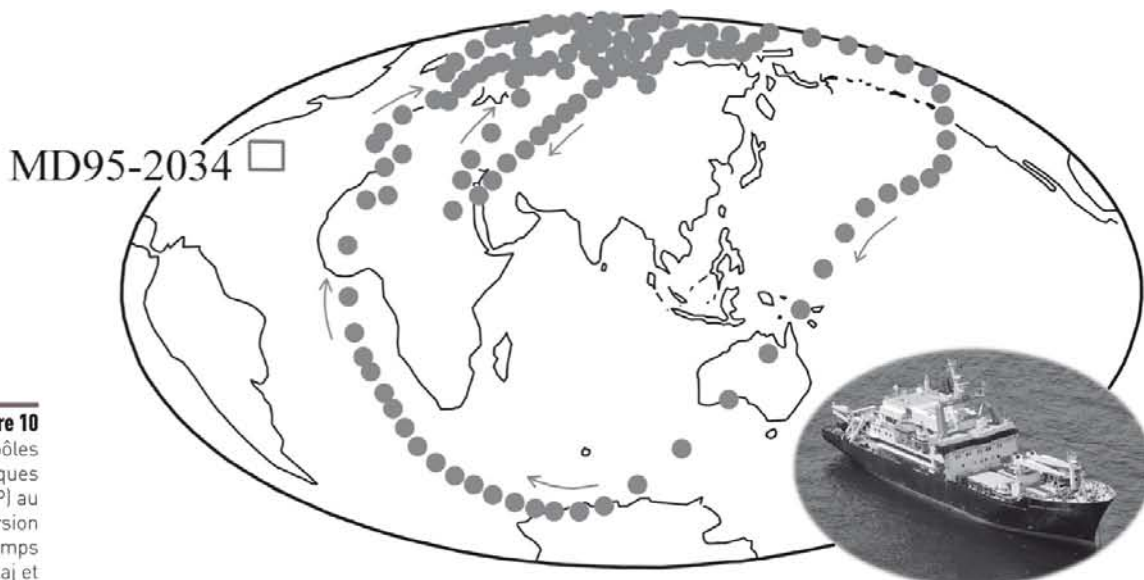


Figure 10
Trajectoire des pôles géomagnétiques virtuels (VGP) au cours de l'inversion de Laschamps [d'après Laj et Channel, 2007]. Données tirées des carottages MD95-2034 du Marion Dufresne, navire des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF). Le Marion Dufresne apparaît dans la cartouche. Pour la construction des VGP, voir Tauxe (2014).

Un argument supplémentaire est apporté par les concentrations en ^{10}Be dans les sédiments récents. En effet, l'une des conséquences de la diminution de l'intensité du champ magnétique terrestre au cours d'une inversion magnétique est la pénétration plus massive des particules cosmiques dans la haute atmosphère. Un bombardement accru des molécules constitutives de l'air, notamment de N^2 , provoque la spallation de l'azote 14 et donc la production de béryllium 10 (^+4He). Des carottes de sédiments récoltées en mer (Ménabréaz et al., 2012) ont montré une forte anomalie en ^{10}Be vers 41 000 ans, c'est-à-dire au moment même de l'inversion de Laschamps (Fig. 11).

- L'inversion de polarité magnétique de Laschamps-Olby : première « excursion géomagnétique » répertoriée

Dans leur publication de 1967, Bonhommet et Babkine font état « d'aimantations inversées » qui pourraient correspondre à « un épisode durant lequel le champ magnétique terrestre aurait eu un caractère inversé à l'intérieur de la période de Brunhes à caractère normal ». Plus tard, Bonhommet et Zähringer (1969) parlent d'un événement (the « Laschamp polarity event »). Il faut attendre l'article de Roperch, Bonhommet et Levi (1988), puis celui de Chauvin et al. (1989), pour que le terme excursion soit utilisé par cette équipe à propos de Laschamps. À qui doit-on la création de ce vocable dans cette acception ? C'est difficile à dire. Il semble que les premiers à l'avoir utilisé sont les Australiens Mike Barbetti et Michael McElhinny (1972), à propos de restes humains carbonisés retrouvés dans une dune au bord du Lac Mungo (NSW, Australie); mais une mention antérieure peut avoir échappé à l'auteur de ces lignes. Quoiqu'il en soit, l'utilisation de ce terme a été formalisée par plusieurs auteurs (Merril and McFadden, 1994; Vandamme, 1994; etc.) et l'inversion de Laschamps lui correspond parfaitement bien, même si, selon Laj et Channel (2007) cette excursion pourrait intégrer la catégorie des microchrones dans la mesure où

elle correspond effectivement à une véritable inversion, même de courte durée. C'est donc bien une découverte majeure dans le domaine du magnétisme terrestre qui a été faite dans la chaîne des Puys par Norbert Bonhommet et Jean Babkine. Depuis leur travail, plusieurs excursions géomagnétiques ont été découvertes (7 en tout, au cours de la période de Brunhes, sont jugées suffisamment documentées par Laj et Channel, 2007); l'excursion de Laschamps n'est pas la plus récente puisque celle de Mono Lake est datée de 24 à 33 kA selon les auteurs.

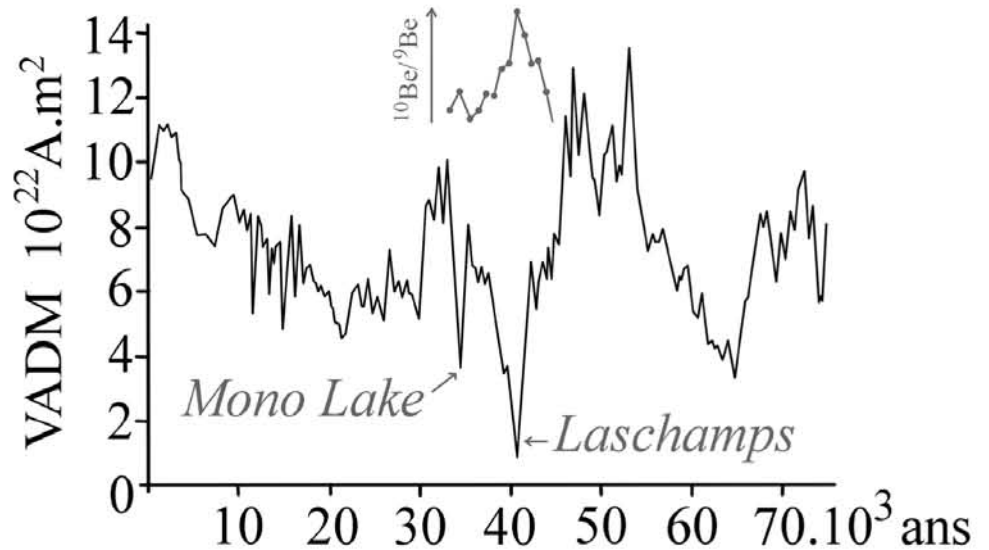


Figure 11

Évolution de l'intensité du champ magnétique terrestre [VADM: Virtual Actual Dipole Moment, en Ampère.m²] au cours des derniers 75 000 ans mesurée sur les sédiments récents de l'ensemble des océans (Laj et al., 2004). Noter les très faibles valeurs du champ correspondant à l'excursion de Laschamps et la corrélation inverse avec le rapport $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ témoignant d'une forte pénétration du rayonnement solaire dans la haute atmosphère à cette époque (Ménabréaz et al., 2012). La faible valeur du VADM observée vers 34 000 ans correspond à l'excursion découverte à Mono Lake (Denham and Cox, 1971); elle est également anti corrélée à une légère anomalie du rapport $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$.

■ Conclusion

Les inversions magnétiques sont une constante du fonctionnement du globe terrestre. Leur déroulement a pu être suivi avec une relative précision dans des empilements de laves et de sédiments (par exemple Prévot et al., 1985; Mankinen et al., 1985; Valet et al., 1989; 2005; 2012). La compréhension de leur origine n'est pas encore totalement maîtrisée mais leur analyse apporte des données essentielles sur le fonctionnement du noyau terrestre. En outre, leur succession dans le temps a permis d'aborder la chronologie de l'expansion océanique et donc d'explicitier le fonctionnement d'un mécanisme capital dans la dynamique de la Terre. Ceux, fussent-ils prix Nobel de physique, qui en ont nié l'existence ont eu bien tort ! C'est pourquoi il est particulièrement satisfaisant pour notre Revue de rappeler que la première inversion magnétique convenablement documentée a été décrite à partir de roches situées en terre auvergnate, à Pont Farin (Cantal), et Bernard Brunhes a tiré de sa découverte une notoriété universelle, à l'égal de Matuyama, Gauss et Gilbert. Mais ça n'est pas tout. En effet, la mise en évidence des excursions géomagnétiques souligne le fait que les inversions de polarité peuvent se produire dans des intervalles de temps beaucoup plus brefs qu'imaginé, et que la découverte de ces excursions est elle aussi capitale pour la compréhension de la dynamo terrestre. C'est également le terroir auvergnat qui a fourni les premières informations sur l'existence des excursions (Bonhommet et Babkine, 1967), rendant ainsi mondialement connu le nom du village de Laschamps (pour l'orthographe réelle de ce nom propre, voir Kornprobst, 2018 et Kornprobst et Lénat, 2019).

Remerciements

L'auteur tient à remercier toutes les personnes qui lui ont facilité la rédaction de cet article, en espérant n'en avoir oublié aucune: Françoise Babkine, Marie Babkine, Gilbert Boillot, Pierre Boivin, Micheline Bonhommet, Annick Chauvin, Vincent Courtillot, Dominique Gibert, Sylvaine Jouhannel, Laurence Jouniaux, Jean-Pierre Lefort, Jean-François Lénat, Frédéric Masson, Félix Nolleau, Ariel Provost, Pierre Rochette, Pierrick Roperch, Nicolas Thouveny, Jean-Pierre Valet, Danielle Velde, Philippe Vidal, Jean-Louis Vignerresse.

Références -

- 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. Research*, 102, 20245-20258.
- Babkine, J., 1960 – Contribution à l'étude pétrographique des basaltes de la région de Monistrol d'Allier (Haute Loire) et plus particulièrement de leurs minéraux opaques. Thèse inédite, Paris, 145 pp.
- Barbetti, M. et McElhinny, M.W., 1972 – Evidence of a geomagnetic excursion 30,000 yr BP. *Nature*, 239 (5371), 327.
- Blackett, P.M.S., 1947 – The magnetic field of massive rotating bodies. *Nature*, 159, 658-666.
- Bonhommet, N., 1972 – Sur la direction d'aimantation des laves de la Chaîne des Puys, et le comportement du champ terrestre en France au cours de l'événement du Laschamp. Thèse inédite, Strasbourg, 233 pp.
- Bonhommet, N. et Babkine, J., 1966 – Sur une direction anormale du champ magnétique terrestre au cours du Quaternaire récent. *C. R. Acad. Sci.*, B, 262,13, p. 919-921.
- Bonhommet, N. et Babkine, J. 1967 – Sur la présence d'aimantations inversées dans la Chaîne des Puys. *CR Acad. Sci.*, 264, B, 92-94.
- Bonhommet, N. et Zähringer, J., 1969 – Paleomagnetism and Potassium Argon age determinations of the Laschamp geomagnetic polarity event. *Earth Planet. Sci. Letters* 6, 43-46
- Brousse, R., Delibrias, G., Labeyrie, J. et Rudel, A., 1966 – Datation par la méthode du carbone 14 d'une éruption domitique de la Chaîne des Puys. *C. R. Acad. Sci.*, 263, 1812.
- Brunhes, B., 1905 – Sur la direction de l'aimantation permanente dans une argile métamorphique de Pontfavein (Cantal). *C.R. Acad. Sci.*, 141, 167-168.
- Brunhes, B., 1906 – Recherches sur la direction aimantation des roches volcaniques. *J. Phys. Théor. Appl.*, 5 (1), 705-724.
- Brunhes, B. et David, P., 1901 – Sur la direction d'aimantation dans des couches d'argile transformées en brique par les coulées de lave. *C.R. Acad. Sci.*, 133, 155-157.
- Brunhes, B. et David, P., 1903 – Sur la direction de l'aimantation permanente dans diverses roches volcaniques. *C.R. Acad. Sci.*, 137, 975-977.
- Channel, J.E.T., Vazquez Riveiros, N., Gottschalk, J. et Skinner, L.C., 2017 – Age and duration of Laschamp and Iceland Basin geomagnetic excursions in the South Atlantic Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 167, 1-13.
- Chauvin, A., Duncan, R.A., Bonhommet, N. et Levi, S., 1989 - Paleointensity of the Earth's magnetic field and K-Ar dating of the Louchadière volcanic flow (Central France): new evidence for the Laschamp excursion. *Geophys. Res. Letters*, 16, 10, 1189-1192.
- Collinson, D.W., Creer, K.M. et Runkorn, F.R.S., 1967 – Methods in palaeomagnetism. *Developments in Solid Earth Geophysics*, 3, Elsevier Pub. Cie., Amsterdam, London, New-York, 609 pp.
- Courtillot, V., 2009 – Nouveau voyage au centre de la Terre. Odile Jacob éd., collection Sciences, 352 pp.
- Courtillot, V. et Le Mouél, J.-L., 2007 – The study of Earth's magnetism (1269 – 1950) : a foundation by Peregrinus and subsequent development of geomagnetism and paleomagnetism. *Reviews Geophysics*, 45, 3, 1-31.
- Cox, A., 1957 – Remanent magnetisation of Lower to Middle Eocene basalts from Oregon. *Nature*, 179, 685-686.
- Cox, A., Doell, R.R. et Dalrymple, G.B., 1963 – Geomagnetic polarity epochs and Pleistocene geochronometry. *Nature*, 198 (4885), 1049.
- Cox, A., Doell, R.R. et Dalrymple, G.B., 1964 – Reversals of the earth's magnetic field. *Science*, 144 (3626), 1537-1543.
- Creer, K.M., 1959 – AC demagnetization of unstable Triassic Keuper marls of SW England. *Geophys. J. Intern.*, 2(4), 261-275.
- Curie, P., 1895 – Les propriétés magnétiques des corps à diverses températures. Thèse inédite, Paris.
- David, P., 1904 – Sur la stabilité de la direction d'aimantation dans quelques roches volcaniques. *C.R. Acad. Sci.* 138, 41-42.

- Delesse, A., 1849 – Sur le magnétisme polaire dans les minéraux et dans les roches. *Ann. Chimie Phys.*, 25, 194-209.
- Denham, C.R. et Cox, A., 1971 – Evidence that the Laschamp polarity event did not occur 13.300-34.000 years ago. *Earth Planet. Sci.* 13, 181-190.
- Didier, J. et Roche, A., 1999 - Vie et œuvre d'un physicien : Bernard Brunhes (1867-1910), pionnier du géomagnétisme. *C.R. Acad. Sci.*, 328, 141-152.
- Doell, R.R., Dalrymple, G.B. et Cox, A., 1966 – Geomagnetic polarity epochs : Sierra Nevada data, 3. *J. Geophys. Research*, 71 (2), 531-541.
- Doell, R.R. et Cox, A., 1967 – Palaeomagnetic sampling with a portable coring drill. In : Collinson, D.W., Creer, K.M. & Runkorn, S.K., eds, *Methods in Palaeomagnetism, Dev.Solid Earth Geophysics* 3, Elsevier Pub., 21-25.
- Elsasser, W.M., 1946 – Induction effects in terrestrial magnetism. *Physical Review*, 69, 106-116.
- Everdnen, J.F., Curtis, G.H. et Lipson, J., 1957 – Potassium-argon dating of igneous rocks. *AAPG Bull.*, 41 (9), 2120-2127.
- Everdnen, J.F., Savage, D.E. et Curtis, G.H., 1964 – Potassium-argon dates and the Cenozoic mammalian chronology of North America. *Am. J. Sci.*, 262 (2), 145-198.
- Folgheraiter, G., 1896 – Variazione secolare dell' inclinazione magnetica. *Atti della reale accademia dei Lincei*, V, 66-74.
- Folgheraiter, G., 1899 – Sur les variations séculaires de l'inclinaison magnétique dans l'antiquité. *J. Phys.theor. app.*, 3, 8, 660-667.
- Geissman, J.W., Smyers, M. et Marion, R., 1987 – Paleomagnetic sampling using portable drilling equipment : Virtue, vice, and/or criminal offense ? *EOS*, 68, 30, 650.
- Gellibrand, H., 1635 – A Discourse Mathematical on the Variation of the Magneticall Needle. Réédit. 1969, Kraus-Thompson éd., Liechtenstein.
- Gilbert, W., 1600 – De magnete. English transl. P. Fleury Motteley, 1893, Lancaster Univ., Gilbert Internet site.
- Glangeaud, L., 1954 – Relations entre les phases éruptives du Petit Puy de Dôme, de Gravenoire et de Clermont-Ferrand. *C. R. Acad. Sci.*, 239 (9), 614-615.
- Gough, D.I., 1967 – Notes on rock sampling for paleomagnetic research. In : Collinson, D.W., Creer, K.M. & Runkorn, S.K., eds, *Methods in Paleomagnetism, Dev.Solid Earth Geophysics* 3, Elsevier Pub., 3-7.
- Gradstein, F. M. et Ogg, J.G., 2004 – Geologic Time Scale 2004 – why, how and where next ? *Lethaia*, 37, 175-181.
- Heller, F., 1980 – Self-reversal of natural remanent magnetization in the Olby-Laschamp lavas. *Nature*, 284, 334-335.
- Heller, F. et Petersen, N., 1982 – Self-reversal explanation for the Laschamp/Olby geomagnetic field excursion. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 30, 358-372.
- Kornprobst, J., 2013 – Le champ magnétique terrestre et ses variations. *Bull. Hist. Sci. Auvergne*. Tome CXIV/2, 49-88.
- Kornprobst, J., 2017 – Le champ magnétique terrestre et ses variations : une menace pour l'humanité ? *Auvergne Sciences*, 89, 1-6.
- Laj, C., Kissel, C. et Guillou, H., 2002 – Brunhes's research revisited : magnetization of volcanic flows and baked clays. *EOS*, 83, 35, 381 and 386-387.
- Laj, C., Kissel, C. et Beer, J., 2004 – High resolution global paleointensity stack since 75 ky (GLOPIS - 75) calibrated to absolute values. *Timescales of the Paleomagnetic Field*, 255-265.
- Laj, C. et Channel, J.E.T., 2007 – Geomagnetic excursions. In : Gerald Schubert ed., *Treatise on Geophysics*, 5, Elsevier Pub., 373-416.
- Mankinen, E.A., Prévot, M., Sherman Grommé, C. et Coe, R.S., 1985 – The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition. 1- Directional history, duration of episodes, and rock magnetism. *J. Geophys. Research*, 90, B12, 10393-10416.
- Mason, R.G., 1958 - A magnetic survey off the west coast of the United-states between latitudes 32-degrees-N and 36-degrees-N longitudes 121-degrees-W 128-degrees-W. *Geophys.J.Royal Astronomical Soc.*, 1(4), 320.
- Matuyama, M., 1929 – On the direction of magnetisation of basalt in Japan, Tyosen and Mandchuria. *Japan. Acad. Proc.*, 5, 203-205.

- McDougall, I. et Tarling, D.H., 1964 – Dating geomagnetic polarity zones. *Nature*, 202 (4928), 171.
- Melloni, M., 1853 – Ricerche intorno al magnetismo delle rocce. *Mem. Scienze Naturali*, 119-140.
- Ménabréaz, L., Bourlès, D.L. et Thouveny, N., 2012 – Amplitude and timing of the Laschamp geomagnetic dipole low from the global atmospheric ^{10}Be overproduction : Contribution of authigenic $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios in west equatorial Pacific sediments. *J. Geophys. Research*, 117, B11, 101.
- Mercanton, P.L., 1926 – Inversion de l'inclinaison magnétique terrestre aux âges géologiques. *J. Geophys. Research*, 31, 4, 187-190.
- Merrill, R.T. et McFadden, P.L., 1994 – Geomagnetic field stability : Reversal events and excursions. *Earth and Planetary Sciences Letters* 121, 57-69.
- Néel, L., 1951 – L'inversion de l'aimantation permanente des roches. *Ann. Geophys.*, 7, 90-102.
- Néel, L., 1955 – Some theoretical aspects of rock-magnetism. *Advances in Physics*, 4(14), 191-243.
- Pelletier, H., Delibrias, G., Labeyrie, J., Perguis, M.T. et Rudel, A., 1959 – Mesure de l'âge de l'une des coulées volcaniques issues du Puy de la Vache (Puy-de-Dôme) par la méthode du C-14. *C. R. Acad. Sci.*, 249 (21), 2221-2222.
- Prévot, M., Mankinen, E.A., Coe, R.S. et Grommé, C.S., 1985 – The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition : 2 Field intensity variations and discussion of reversal models. *J. Geophys. Research*, 90 (B12), 10417-10448.
- Rimbert, F., 1959 – Contribution à l'étude de l'action de champs alternatifs sur les aimantations rémanentes des roches : applications géophysiques. *Rev. Inst. franç. pétrole*, 14.
- Roperch, P., Bonhommet, N. et Levi, S., 1988 – Paleointensity of the earth's magnetic field during the Laschamp excursion and its geomagnetic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 88, 209-219.
- Roquet, J., 1954 – Sur les rémanences magnétiques des oxydes de fer et leur intérêt en géomagnétisme. *Ann. Géophys.*, 10, 282-323.
- Tauxe, L., 2014 – Essentials of palaeomagnetism : Second Web Edition.
http://magician.ucsd.edu/Essentials_2/WebBook2.html#WebBook2li1.html
- Thellier, E., 1936 – Détermination de la direction de l'aimantation permanente des roches. *C.R. Acad. Sci.*, 203, 743-744.
- Thellier, E., 1942 – Sur l'intensité du champ magnétique terrestre en France, trois siècles avant les premières mesures directes. *C.R. Acad. Sci.*, 214, 382-384.
- Thellier, E. et Thellier, O., 1959 – Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Géophys.*, 15, 285-376.
- Valet, J.-P., Tauxe, L. et Clément, B.M., 1989 – Equatorial and mid-latitudes records of the last geomagnetic reversal from the Atlantic Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 94, 371-384.
- Valet, J.-P., Meynadier, L. et Guyodo, Y., 2005 – Geomagnetic field strength and reversal rate over the past two millions years. *Nature*, 435, 802-805.
- Valet, J.-P., Fournier, A., Courtillot, V. et Herrero-Bervera, E., 2012 – Dynamical similarity of geomagnetic reversals. *Nature*, 490, 7418.
- Vandamme, D., 1994 – A new method to determine paleosecular variation. *Physics Earth Planet. Int.* 85, 131-142.
- Vine, F.J., 1966 – Spreading of the Ocean Floor : new evidence. *Science*, 154, 3755, 1405-1415.
- Vine, F.J. et Matthews, D.H., 1963 – Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, 4897, 947-949.

In: Histoire de la découverte géologique du Massif Central Français. Mém. Soc. Hist. Nat. Auvergne, n° 8, 2019, 214-229.

J. Kornprobst mcjkorn@wanadoo.fr