

# TRAVAUX DU COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGÉO)

TROISIÈME SÉRIE, t. XXVIII, 2014, n° 5  
(séance du 10 décembre 2014)

Jean-Pierre VALET

## *L'essor et l'apport du paléomagnétisme*

Résumé. Le paléomagnétisme a eu une importance considérable pour les sciences de la Terre. Il a joué un rôle fondamental dans la découverte de la tectonique des plaques et il permet de reconstituer le ballet des continents à la surface du Globe au cours du temps. La seconde contribution majeure concerne l'histoire du champ magnétique terrestre dans le passé grâce à l'archéomagnétisme et au magnétisme des sédiments et des roches volcaniques. L'existence des inversions a été l'une des découvertes marquantes de la discipline. L'échelle de polarité géomagnétique est bien établie pour les derniers 160 Ma tandis que la magnétostratigraphie fournit des informations cruciales sur les périodes plus anciennes. On y distingue notamment des alternances entre les périodes riches en inversions et les superchrons durant lesquels aucune inversion ne se produit pendant au moins 30 millions d'années. Le développement des études de paléointensité, qui permettent d'accéder à l'évolution de l'intensité du champ dans le passé, apporte des données fondamentales aux théoriciens du champ magnétique et à la compréhension du fonctionnement de sa dynamo. Durant les trente dernières années, le paléomagnétisme a ouvert de nouveaux champs de recherche. Le magnétisme dit extraterrestre connaît un développement de grande ampleur notamment par l'étude magnétique détaillée des météorites et micrométéorites, afin de déterminer leur provenance et les variations du flux de matière extraterrestre. Le magnétisme environnemental constitue un axe privilégié qui s'intègre dans la plupart des études portant sur notre environnement présent et passé. Son domaine s'étend du magnétisme des sols jusqu'aux propriétés magnétiques des sédiments océaniques. Enfin les études portant sur les bactéries magnétotactiques utilisent nombre d'outils du paléomagnétisme et ont des retombées potentielles de première importance.

Mots-clés : paléomagnétisme – magnétisme – dérive continentale – champ géomagnétique – aimantation – XX<sup>e</sup> siècle.

Abstract. Contributions of paleomagnetism have been essential to Earth's Sciences. Paleomagnetism has played a key role in the discovery of Plate Tectonics and reconstructions of plate motions at the earth's surface. The second aspect has been the temporal evolution of the geomagnetic field with archeomagnetism and the remanent magnetization of sediments and

volcanic rocks. The existence of polarity reversals has also been a major discovery of the discipline. The geomagnetic polarity time scale is now well established for the past 165 Ma. Beyond this period, magnetostratigraphy provided crucial information and allowed us to detect periods of frequent reversals against very long intervals of 30 Ma at least, with the same polarity which has been referred as superchrons. Paleointensity studies have been extensively developed during the past 30 years and yielded crucial information on the evolution of field intensity for dynamo models and theory. Over the past thirty years, paleomagnetism has generated new applications in other areas. Extraterrestrial magnetism has become a favoured topic with exciting contributions from lunar and meteoritic material. Environmental magnetism is another avenue of research in close relationship with other disciplines dealing with environmental studies for the past and the present. The contributions cover a large range of fields, from soil magnetism up to magnetic properties of marine sediments. Finally, a complete new area has been opened by magnetism dealing with magnetotactic bacteria and their potential applications.

Key words: paleomagnetism – magnetism – continental drift – champ géomagnétique – magnetization – 20<sup>th</sup> century.

## Introduction

Le paléomagnétisme est une discipline récente des sciences de la Terre. Il repose sur la mesure de l'aimantation rémanente des roches. On peut donc y voir une certaine analogie avec l'aimant, connu depuis la plus haute Antiquité. L'aimant est d'ailleurs le nom commun donné à la magnétite, cet oxyde de fer présent dans les roches en quantité variable, et qui, soit seul, soit en présence d'autres oxydes, participe à leur aimantation rémanente. L'alignement de particules aimantées dans la direction du champ magnétique ambiant constitue d'ailleurs une des démonstrations tangibles de l'existence du champ magnétique terrestre. La première application des aimants a certainement été l'usage de la boussole qui a longtemps été un outil primordial pour les navigateurs. On a souvent attribué la découverte de la boussole aux Chinois. Toutefois, aucun document n'indique qu'elle aurait été transmise des Chinois aux Européens par les navigateurs arabes (voir Le Mouël et Poirier (2013) pour une documentation détaillée sur l'histoire du magnétisme). Comme l'attestent les textes relatant l'usage de la boussole dès le XII<sup>e</sup> siècle en Chine comme en Europe, il semble bien que cette dernière ait été découverte indépendamment dans les deux contrées.

## Les roches aimantées

Les premières observations portant sur l'aimantation des roches ont concerné les terres cuites et plus spécifiquement les briques. En 1646, Sir Thomas Browne (1605-1682) consignait par écrit que les terres cuites gardent l'empreinte du champ magnétique terrestre : « *il est possible de se tromper lorsque, pour chercher le méridien, on pose une aiguille sur un mur car certaines de ces briques sont suffisamment magnétisées pour distraire la polarité de l'aiguille* » et, en 1691, Robert Boyle affirma qu'une brique chauffée dans le feu,

puis refroidie, s'aimante dans la direction du champ magnétique terrestre. Près de deux siècles plus tard, Silvestro Gherardi (1802-1879) publia trois mémoires en 1862 et 1863 pour témoigner que les briques des fours et autres terres cuites étaient aimantées. Il émit l'hypothèse que cette aimantation persiste depuis la dernière chauffe du matériau, et qu'elle est son « *âme, son esprit* ». Macedonio Melloni (1798-1854) montra à cette époque que les roches volcaniques étaient elles aussi magnétiques, tandis que, plus tard, Giuseppe Folgheraiter (1856-1913) défendit l'idée que les terres cuites des fouilles archéologiques fournissaient un enregistrement du champ géomagnétique à l'époque et à l'endroit de leur cuisson. Nous sommes passés de l'observation des effets à l'étude des mécanismes physiques mis en jeu dans l'aimantation, ouvrant la voie à toutes les applications futures reposant sur le magnétisme des roches.

L'étude du magnétisme des roches s'attache à comprendre les mécanismes mis en jeu dans les aimantations. Cette discipline est étroitement liée au paléomagnétisme puisqu'elle fournit non seulement les supports théoriques indispensables, mais également la plupart des outils qui permettent d'analyser et de reconnaître les aimantations. Elle connaît un très grand regain depuis une dizaine d'années, car la plupart des processus de premier ordre étant maintenant déchiffrés, les études magnétiques portent sur des aspects beaucoup plus délicats qui requièrent donc une connaissance détaillée des mécanismes impliqués dans les aimantations à de petites échelles.

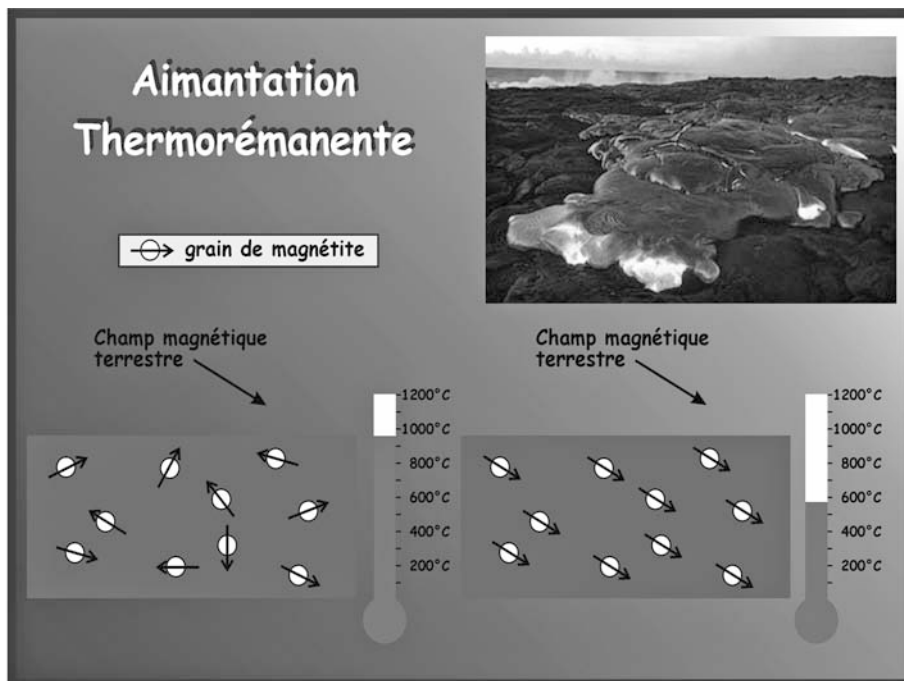


Fig. 1. Principe de l'acquisition d'une aimantation thermorémanente. Les moments magnétiques désordonnés par l'agitation thermique s'orientent dans la direction du champ en deçà de la température de Curie du minéral.

Les roches volcaniques, comme les matériaux archéologiques sont porteurs d'une aimantation dite thermorémanente parce qu'elle est acquise lors de leur refroidissement dans le champ ambiant (Fig. 1). Le moment magnétique de la roche résulte de l'alignement des spins

des atomes d'oxydes de fer. Il est préservé grâce à des couplages et des interactions entre les ions qui permettent de conserver l'orientation des moments magnétiques pendant des milliards d'années. L'élévation de la température désordonne les moments, et se traduit par une diminution progressive de l'aimantation jusqu'à sa disparition totale à la température de Curie du minéral (580°C pour la magnétite).

Louis Néel (1955) a décrit d'un point de vue théorique comment l'action du temps déstabilise les moments magnétiques. Temps et température ont en fait des effets similaires : à titre d'exemple, une élévation de température de 200°C déstabilise les moments magnétiques de la même manière que si ces derniers étaient restés à température ambiante pendant un million d'années. Un matériau naturel étant par essence hétérogène, il incorpore toute une gamme de grains magnétiques, certains très stables dans le temps, d'autres beaucoup moins. L'aimantation d'une roche intègre donc fréquemment plusieurs composantes en fonction de la distribution des grains magnétiques qui la composent. Le premier défi d'une étude archéomagnétique ou paléomagnétique consiste à isoler les différentes composantes d'aimantation portées par l'échantillon archéologique ou par la roche, afin de remonter à la composante initiale portée par les grains les plus stables.

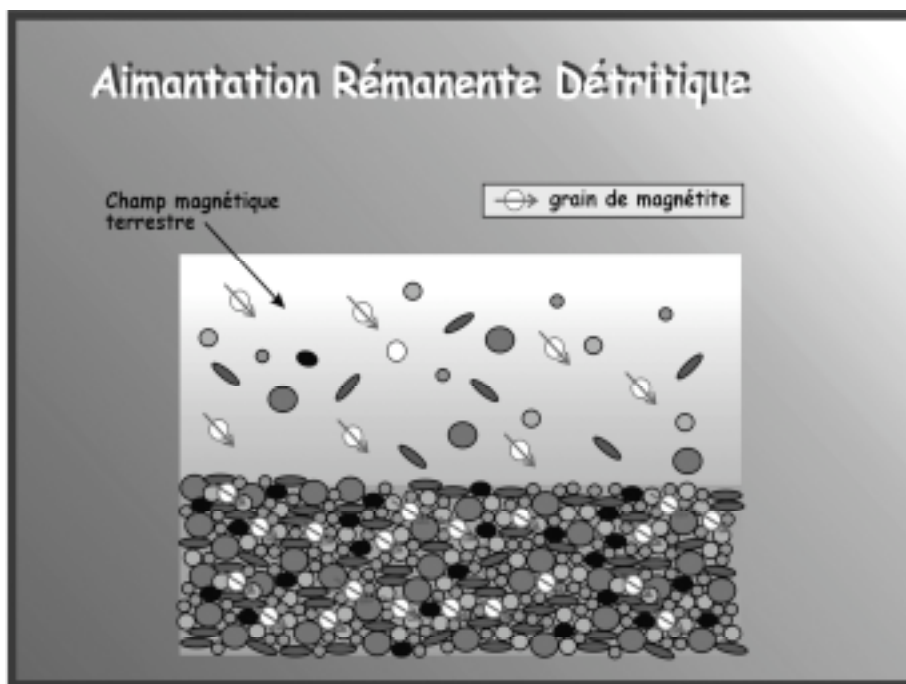


Fig. 2. Principe de l'aimantation détritique ou post-détritique des sédiments. Les grains magnétiques s'orientent comme des boussoles, la qualité de l'alignement dans le champ étant contrainte par l'environnement sédimentaire.

L'aimantation rémanente des sédiments est acquise lors de leur dépôt. Une grande partie des particules magnétiques provient de l'érosion de roches plus anciennes, notamment volcaniques. Les moments magnétiques s'alignent dans la direction du champ comme des aiguilles de boussoles (Fig. 2), tant que leur rotation mécanique n'est pas gênée. On pense que les perturbations engendrées par l'activité biologique dans les premiers 15-20 cm de la colonne sédimentaire sont sans effet notable, car à cette profondeur, les particules restent

libres de se réorienter. Dans la plupart des cas, l'orientation des moments ne serait donc définitivement bloquée que 10 à 15 cm sous la surface du sédiment, engendrant un léger décalage potentiel entre l'âge du signal magnétique et celui de la sédimentation. La concentration en vides interstitiels, la formation d'amas magnétiques, la présence de forces électrostatiques notamment dans des sédiments argileux, sont également des paramètres inhibant l'alignement des grains magnétiques qui expliquent pourquoi, en définitive, seulement 1 % des moments magnétiques est impliqué dans l'aimantation rémanente, qui a donc une faible intensité. Ce nombre reste néanmoins suffisant pour que, statistiquement, la direction du moment résultant coïncide avec celle du champ. Comme dans le cas de l'aimantation thermorémanente, l'aimantation d'un sédiment évolue dans le temps au gré de la stabilité des moments magnétiques qui la composent.

### **Les variations du champ magnétique**

La découverte de l'empreinte du champ magnétique fossile dans certains matériaux a ouvert la porte à l'exploration des variations du champ magnétique terrestre dans le passé. Ce fut en particulier la naissance de l'archéomagnétisme qui repose sur la mesure de l'aimantation rémanente de matériaux archéologiques et qui couvre donc les derniers millénaires. La plupart des matériaux archéologiques chauffés tels que les vases ou les poteries sont utilisés en archéomagnétisme. Il est néanmoins préférable qu'ils aient conservé leur position depuis la dernière cuisson si l'on s'intéresse à la paléodirection du champ. Pour cette raison, un intérêt particulier est porté aux briques des fours de potier qui sont restées en place depuis leur dernière chauffe et ont donc enregistré avec précision la direction du champ magnétique.

En mesurant l'inclinaison de vases dont il connaissait la position, Folgheraiter avait observé le déplacement de l'équateur magnétique (c'est-à-dire de la ligne d'inclinaison nulle) entre -650 et +550 ans, conséquence de la variation séculaire du champ magnétique terrestre. Prenant en France le relais de ces travaux précurseurs, Émile et Odette Thellier commencèrent à reconstruire les variations du champ magnétique en Europe lors des derniers millénaires, dont on peut voir la courbe la plus récente pour Paris sur la figure 3.

Mais la contribution majeure d'Émile et Odette Thellier est liée aux études sur l'intensité du champ dans le passé. Grâce à leur découverte des lois d'addition de l'aimantation thermorémanente des argiles, ils ont inventé et développé la seule technique fiable qui permette de déterminer la valeur de la « *paléointensité* » du champ magnétique (Thellier et Thellier, 1959). L'archéomagnétisme permet donc, non seulement, de remonter aux variations de la direction du champ, mais également à celles de son intensité avec un taux de succès important car les artefacts archéologiques subissent peu de transformations minéralogiques lors des traitements en laboratoire.

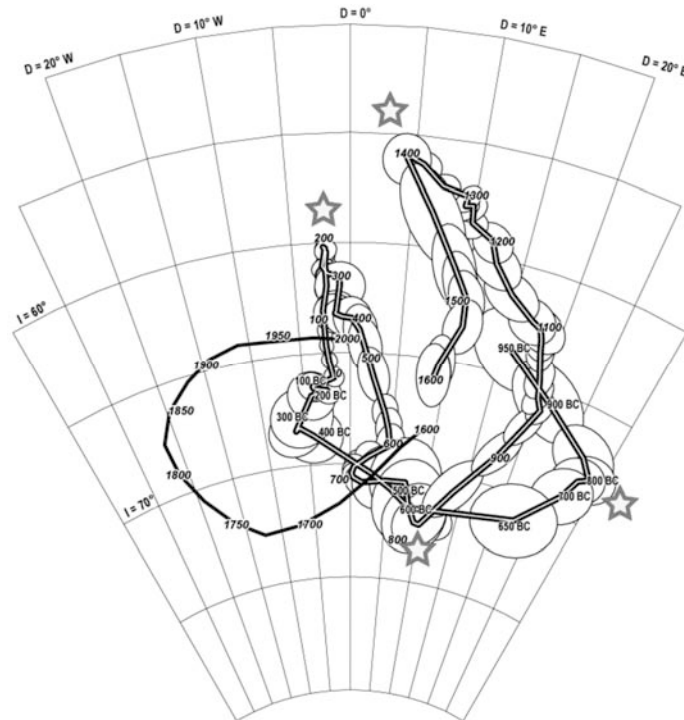


Fig. 3. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison du champ magnétique à Paris à partir des données archéomagnétiques. Les étoiles correspondent à des périodes de forte intensité (Bucur, 1994 ; Gallet *et al.*, 2003).

Cette discipline, un peu délaissée à la fin du siècle dernier, connaît à l'heure actuelle un énorme regain d'intérêt qui a permis d'acquérir de nouvelles données, non seulement en Europe mais également un peu partout dans le monde, avec néanmoins un déficit dans l'hémisphère Sud. Ces acquisitions permettent de développer les premiers modèles de champ magnétique terrestre pour les dix derniers millénaires (Korte et Constable, 2011). Cette période est cruciale car elle concerne une grande partie du spectre des variations du champ qui ne sont pas liées à sa composante dipolaire. Elle permet de faire le lien entre les données transmises par les observatoires magnétiques (et maintenant les satellites magnétiques) pour la période historique, et le paléomagnétisme pour les très longues périodes de temps. Parmi les observations on peut mentionner la présence de changements directionnels rapides appelés jerks archéomagnétiques (Gallet *et al.*, 2003) qui semblent se produire en phase avec des pics d'intensité.

La deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle a vu le développement d'appareils de mesure de plus en plus performants qui ont amélioré la précision des données pour les roches bien aimantées comme les laves volcaniques et ont donné accès aux faibles aimantations des sédiments océaniques et lacustres. C'est alors le plein essor du paléomagnétisme. D'une part, la gamme temporelle des études a été considérablement étendue, d'autre part les séquences sédimentaires ont permis de remonter aux variations de l'histoire du champ terrestre à partir des variations de la déclinaison (qui mesure la déviation de la composante horizontale de l'aimantation par rapport à la direction du Nord géographique) et de l'inclinaison (qui indique l'angle de l'aimantation avec l'horizontale) ou bien en calculant les positions du pôle correspondant aux directions d'aimantation.

Le champ magnétique terrestre trouve son origine dans les mouvements du liquide conducteur d'électricité qui constitue le noyau externe de la Terre. Il s'agit d'un phénomène d'induction auto-entretenu d'où le terme de dynamo terrestre. Les mouvements du fluide par rapport aux lignes de champ engendrent un courant électrique qui, circulant dans un conducteur, induit à son tour un champ magnétique. On comprend donc que le champ terrestre contraint par ces mouvements assez rapides évolue constamment en direction et en intensité. La première description mathématique du champ géomagnétique par Gauss en 1830 a montré qu'il était à 90 % dominé par un dipôle dont l'axe est actuellement incliné d'environ 11° par rapport à l'axe de rotation terrestre. Les 10 % restants ont une structure complexe multipolaire.

En 1904, Bernard Brunhes et son élève et assistant Pierre David s'intéressaient à l'aimantation des coulées et à celle des argiles sous-jacentes qui ont été réchauffées lors de la mise en place de la coulée. Avec son élève, Brunhes mesura l'orientation complète de l'aimantation de coulées volcaniques. Le géologue Philippe Glangeaud attira son attention sur l'existence de « *briques naturelles* » (porcelanites) résultant du thermométamorphisme d'argiles par des coulées de lave. Brunhes récolta des cubes orientés et constata que leur aimantation était homogène mais différente de la direction du champ actuel (Brunhes, 1905). Le fait d'observer les mêmes directions « *anormales* » dans des matériaux aussi différents ne laissait pas de place à une autre interprétation que celle d'une origine géomagnétique. Il nota alors : « *Ce qui ressort de ces nombres, c'est d'abord que le pôle Nord est, dans ces échantillons, tourné vers le sud ; c'est surtout que ce pôle Nord est ici en haut au lieu d'être en bas. L'inclinaison est négative. Donc, si la direction d'aimantation de l'argile métamorphisée nous donne la direction du champ terrestre à l'époque de la coulée, nous savons qu'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* ». Brunhes venait de découvrir et de comprendre que le champ magnétique de la Terre s'est renversé. Il a fallu attendre une cinquantaine d'années pour que l'hypothèse des inversions soit admise dans la communauté scientifique.

La première échelle décrivant la succession des inversions (Cox *et al.*, 1963) fut restreinte aux cinq derniers millions d'années (Ma). Elle indiquait une alternance de périodes de polarité dites « *normales* », pendant lesquelles le champ a l'orientation actuelle, et de périodes dites « *inverses* », pendant lesquelles l'aiguille de la boussole pointe vers le sud. Les anomalies magnétiques de la croûte océanique et les mesures paléomagnétiques de coulées volcaniques datées effectuées sur différents continents ont permis de construire progressivement la séquence complète des inversions lors des 165 derniers Ma (Fig. 4). On peut considérer cette partie de l'échelle comme quasiment définitive, hormis quelques incertitudes sur certains âges.

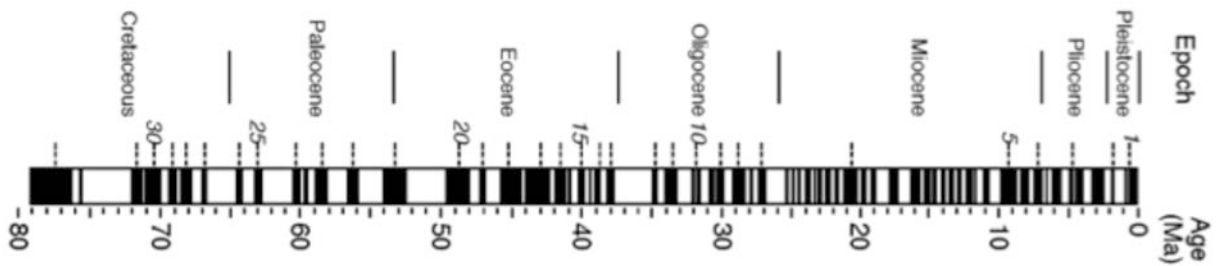


Fig. 4. Échelle de polarité géomagnétique indiquant la succession des inversions lors des derniers 80 Ma.

Les magnéticiens ont souvent essayé de trouver des périodicités ou des récurrences dans la succession des inversions. Les analyses s'accordent pour conclure qu'en tout état de cause elles apparaissent de façon aléatoire.

Au-delà de 165 Ma, le plancher océanique a disparu dans les zones de subduction. Il faut se tourner vers la magnétostratigraphie, qui consiste à retracer et corrélérer la succession des intervalles de polarité dans des séquences de sédiments. Une observation frappante est la présence de longues périodes sans inversion appelées superchrons, comme au Crétacé (entre 110 et 80 Ma) ou encore au Permien (entre 300 et 260 Ma). Leur origine reste discutée entre ceux qui y voient une caractéristique intrinsèque de la dynamo terrestre et ceux qui défendent l'influence du manteau inférieur sur l'évolution à long terme du champ. En effet, les mouvements lents du manteau par rapport à ceux du noyau pourraient affecter à long terme la circulation du fluide conducteur du noyau et induire une variation significative de la fréquence des inversions.

Les variations de l'intensité du champ requièrent une attention particulière. Malgré le nombre croissant de données obtenues par la méthode Thellier-Thellier à partir de coulées volcaniques, les résultats sont souvent délicats à interpréter en raison des incertitudes sur les âges. Les séquences sédimentaires ont, par contre, permis d'obtenir un très grand nombre d'enregistrements, mais restreints aux derniers millions d'années et donc de produire une courbe composite globale des variations d'intensité (Fig. 5) qui retrace les variations de l'intensité du champ dipolaire lors des deux derniers millions d'années (Valet *et al.*, 2005). On y observe la forte amplitude des variations du champ mais aussi que les changements les plus importants coïncident toujours avec une inversion. Durant la période qui précède l'inversion, l'intensité du dipôle s'effondre progressivement sur une durée d'environ 60 à 80 ka tandis que le regain qui suit le changement de polarité est beaucoup plus rapide et intense. Cette asymétrie suggère que les mécanismes sont différents durant les deux phases, la diffusion du champ étant le facteur dominant durant la décroissance.

La courbe indique de nombreux autres intervalles de faible intensité. Durant ces courtes périodes les directions dévient de la direction du nord (ou du sud) puis reviennent à la polarité initiale. Ces évènements appelés « *excursions* » géomagnétiques sont beaucoup plus fréquents que les inversions. On en compte environ 25 pour les 2,5 derniers millions d'années, et leur fréquence semble aussi plus régulière (Fig. 5). Etant donné qu'il s'agit d'évènements très courts, leur étude est délicate, mais les enregistrements les plus complets



indiquent que ces excursions sont associées à un court épisode durant lequel le champ s'est effectivement renversé. On peut donc les apparenter à des inversions avortées.

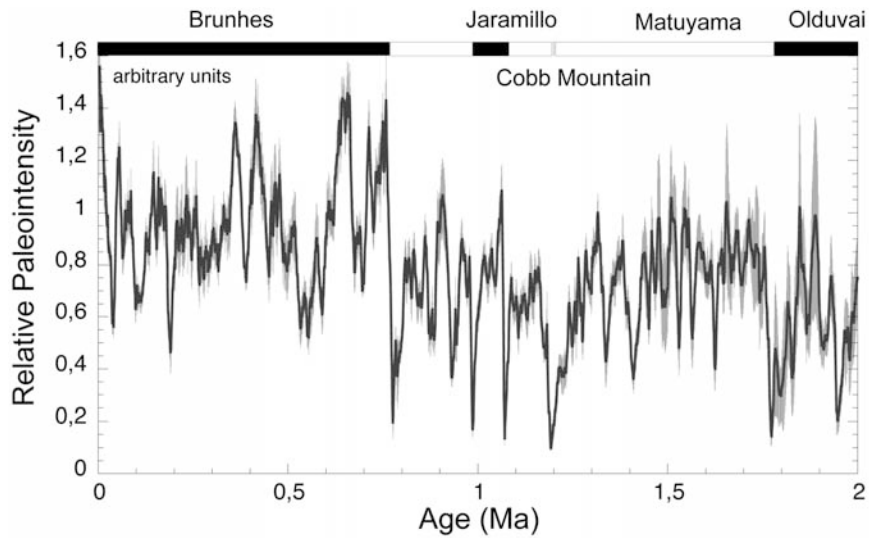


Fig. 5. Variations du moment dipolaire lors des deux derniers millions d'années. Les barres horizontales noires et blanches correspondent, respectivement, aux intervalles de polarité normale et inverse.

Ces résultats donnent l'image d'un champ magnétique beaucoup plus instable que ce qui était imaginé. Ils indiquent également que les inversions sont associées à des réorganisations majeures dans le noyau et que leur taux de succès est en fait assez faible. Enfin, si les mêmes processus physiques entrent en jeu durant les excursions et les inversions, il faut alors traiter la succession temporelle des deux types d'évènements dans son ensemble et ne pas se limiter aux seules inversions. Malheureusement, notre connaissance détaillée de la succession des excursions reste succincte au-delà de 2 millions d'années, mais si l'on se réfère à cette période, l'apparition des évènements semble beaucoup plus régulière.

Il est très important de connaître l'évolution du champ lors des inversions. Étant donné les difficultés pour trouver des enregistrements correspondant à ces périodes de basculement entre les deux polarités, on a rapidement émis l'hypothèse que le renversement est de très courte durée (quelques milliers d'années). Les données obtenues pour la dernière inversion en des sites très différents ont indiqué que le pôle passait du Sud au Nord en suivant des chemins différents à chaque site. Le champ n'est donc plus dipolaire lorsqu'il se renverse, sinon la même trajectoire aurait été enregistrée à tous les sites. Les données des séquences volcaniques témoignent de la complexité du renversement et suggèrent que des composantes multipolaires dominent durant les inversions. Ces caractéristiques sont d'ailleurs identiques à celles qui sont obtenues par les simulations.

Une autre caractéristique concerne la dynamique de l'inversion. Le basculement d'une polarité à l'autre semble se décliner en trois phases successives (Fig. 6) : un événement précurseur, suivi du renversement lui-même et un rebond (Valet *et al.*, 2012). Les deux premières phases reflètent sans doute l'émergence du champ non dipolaire (les fameux 10 % mentionnés précédemment) à la faveur de la forte diminution du dipôle, tandis que le transit

entre les deux polarités est lié à une réorganisation des mouvements dans le noyau liquide de la Terre qui entraîne la géométrie complexe du champ mentionnée plus haut.

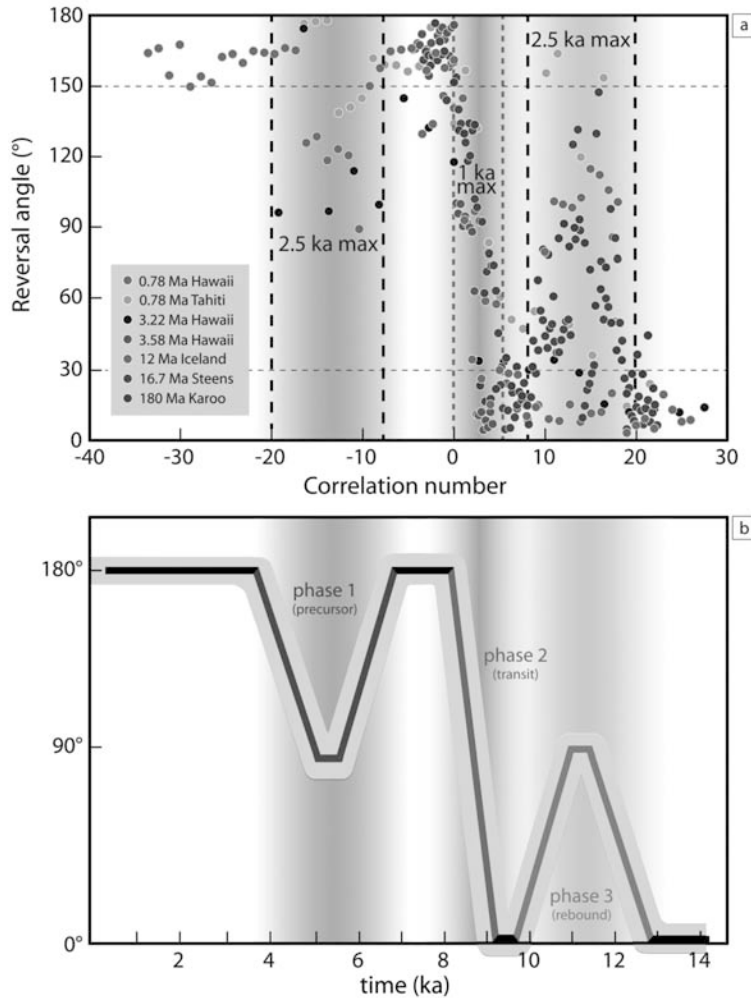


Fig. 6. Les trois phases du processus de l'inversion (décrits schématiquement en b), la première et la dernière phase reflétant la variation séculaire du champ en présence d'un dipôle très faible, alors que le transit entre les deux polarités est très rapide et pourrait refléter un mécanisme différent.

### Le paléomagnétisme et la dérive continentale

Il s'agit de la première application fondamentale du paléomagnétisme qui a contribué à démontrer la validité de la théorie de la tectonique des plaques. Si l'on moyenne l'évolution du champ sur plusieurs milliers d'années, sa géométrie se résume simplement à celle d'un dipôle axial géocentré dont l'axe est confondu avec l'axe de rotation terrestre. Pôles magnétiques et géographiques sont alors confondus. Par ailleurs, l'inclinaison du dipôle axial centré étant directement liée à la latitude du site d'observation, la mesure de l'inclinaison permet de retrouver sa latitude. Si cette dernière ne correspond pas à la position actuelle, le site a, par conséquent, migré en latitude. Quant à la déclinaison magnétique, elle doit en principe être nulle puisque les pôles magnétiques et géographiques sont confondus. Une déviation de la

déclinaison moyenne sur une tranche d'âge indique donc la rotation du site dans le plan horizontal. Ces deux informations rendent compte du déplacement en latitude et de la rotation d'un site (mais elles ne permettent pas d'évaluer son mouvement en longitude).

Grâce à ce repère fixe et absolu du champ géomagnétique, on a pu étudier le mouvement des continents dans le passé. Si ces derniers ont dérivé au cours du temps, la succession des pôles pour chaque intervalle temporel définit la courbe de dérive des pôles qui permet de reconstituer leur position géographique. Les paléomagnéticiens ont rapidement remarqué que les formations récentes du Quaternaire et du Tertiaire fournissaient des pôles effectivement confondus avec le pôle géographique. En revanche, pour les époques plus reculées, chaque continent présentait une courbe différente. Par exemple, les courbes de dérive des pôles pour l'Amérique et l'Europe sont différentes, mais elles coïncident si l'on referme l'Atlantique avant le Crétacé. Elles retracent donc la séparation progressive des deux continents depuis cette période. De la même façon, la courbe de dérive apparente du pôle obtenue pour l'Inde permet de montrer comment cette dernière s'est détachée du continent de Gondwana il y a environ 130 millions d'années, puis a remonté progressivement vers le nord jusqu'à entrer en collision avec le continent eurasiatique et former la chaîne himalayenne.

Une grande activité de recherche a été consacrée aux mouvements des différents blocs et microblocs qui composent l'évolution de la mosaïque continentale, en liaison étroite avec la géologie. Ces outils du paléomagnétisme, conjointement avec les études géologiques et paléo-géographiques, ont permis de reconstituer la dérive des continents avec une bonne précision pendant les 300 derniers millions d'années. Au-delà, les formations géologiques sont plus rares, et les déformations rendent les interprétations et les reconstructions plus délicates. Cependant, on observe des alternances de périodes pendant lesquelles les continents sont disloqués, puis assemblés. Ce ballet des plaques à la surface du Globe est décrit sous le terme de cycle de Wilson. Le super-continent le plus connu par les données paléomagnétiques, est la Pangée, entre 200 et 300 Ma. Un autre super-continent assez bien étudié est le Rodinia entre 1100 et 750 Ma.

Depuis une vingtaine d'années, grâce à la tomographie sismique, il est devenu possible de visualiser la lente pénétration des plaques océaniques dans le manteau. L'association du paléomagnétisme, de la sismologie, et de la dynamique du manteau permet maintenant de faire le lien fondamental entre la surface et les couches les plus profondes de notre planète.

### **Quelques autres applications du paléomagnétisme en sciences de la Terre**

Les développements récents du paléomagnétisme, dont nous n'avons présenté que quelques exemples, sont évidemment associés au magnétisme des roches et trouvent des applications dans différents domaines.

### ***Le magnétisme extraterrestre***

L'étude des processus de formation et d'évolution de la matière solide du système solaire et la reconstitution des champs magnétiques dans le système solaire primitif ont des implications pour la planétologie et la cosmologie. Les premières études détaillées en magnétisme des roches extraterrestres ont porté sur les échantillons lunaires, puis sur des météorites. Elles connaissent un regain considérable depuis une quinzaine d'années et des sessions spéciales leurs sont consacrées dans tous les colloques internationaux.

Environ 40 000 tonnes de matière extraterrestre par an atteignent la surface de la Terre, sous forme de poussières (micrométéorites) ou de météorites. Les études de leur magnétisme apportent des informations cruciales sur la composition du flux, mais permettent aussi de contraindre la provenance et la classification des micrométéorites et météorites. Les études de l'intensité d'aimantation peuvent également apporter des informations sur l'intensité du champ magnétique au moment de leur formation. Plusieurs autres thèmes tels que l'étude des cratères d'impact sur Terre connaissent également un grand intérêt.

### ***Le magnétisme environnemental***

Le magnétisme environnemental (et paléoenvironnemental), discipline en essor depuis une vingtaine d'années, est destiné à mesurer l'impact des processus environnementaux sur les minéraux magnétiques. Ces derniers sont en effet sensibles aux conditions naturelles lors de leur formation, mais surtout lors de leur évolution postérieure. Les thématiques abordées sont multiples. Elles concernent par exemple la pollution des sols, des eaux et de l'atmosphère en quantifiant les retombées d'oxydes magnétiques liées à la pollution. Une partie importante porte sur des aspects paléocéanographiques et paléoclimatiques en étudiant l'évolution des dépôts sédimentaires, la taille des grains magnétiques, la nature des oxydes magnétiques, ou encore leur degré d'altération en fonction des périodes climatiques, sans parler de tous les aspects diagénétiques qui sont des traceurs des conditions environnementales. La figure 7 montre un exemple frappant de la relation entre les profils de susceptibilité mesurés dans des carottes de l'océan Indien et la succession des variations climatiques révélées par les variations isotopiques de l'oxygène 18.

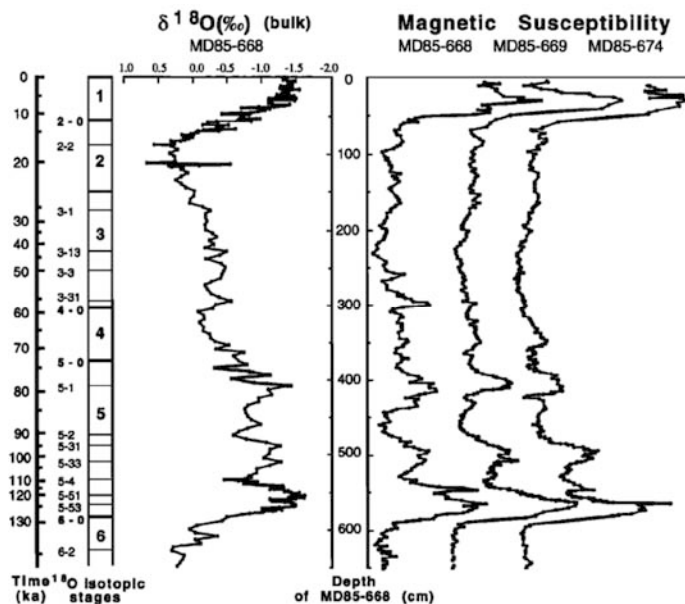


Fig. 7. Profils des changements climatiques et des variations de la susceptibilité magnétique enregistrés dans trois séquences de sédiments du bassin de Somalie.

Ce type de relation permet d'étudier les facteurs océanographiques et environnementaux responsables, par exemple le niveau des eaux, les changements dans les apports sédimentaires ou dans le transport, les changements dans les sources, dans les courants océaniques, etc. On retrouve également des relations similaires dans certaines séquences de loess continentaux qui sont d'autant plus importantes que notre connaissance et nos indications sur la variabilité du climat et de l'environnement continental sont souvent fragmentaires.

De façon générale, la caractérisation des écosystèmes est l'un des objectifs recherchés. L'évolution des sols est également une branche importante de cette discipline. Les propriétés magnétiques peuvent permettre d'étudier différents types de transport de sédiments et donc de s'intéresser à l'érosion, mais aussi aux conditions de dépôt et à l'évolution des séquences de loess qui sont des traceurs primordiaux du climat continental. Il est néanmoins important de noter que cette large palette d'applications requiert souvent l'association d'études minéralogiques, géochimiques, climatiques et de plus en plus biologiques, notamment pour tout ce qui concerne les processus de biominéralisation.

### ***Le biomagnétisme***

Le biomagnétisme constitue une autre facette thématique du paléomagnétisme. Cette discipline est associée à la découverte des bactéries magnétotactiques qui ont la capacité de synthétiser des cristaux de magnétite chimiquement très purs et dont la taille correspond exactement au domaine de stabilité maximum attendu pour l'aimantation. On est toujours incapable de synthétiser de tels cristaux et les applications potentielles sont donc multiples. De nombreuses équipes se consacrent à l'étude de ces bactéries et en particulier à la synthèse et à la croissance des cristaux. On attend donc des avancées importantes dans la compréhension des processus de biominéralisation et dans plusieurs domaines de la

physique portant sur les études de nanoparticules. Il faut attendre également des développements en médecine. Une application potentielle remarquable concerne le traitement de tumeurs cancéreuses. Le principe consiste à injecter puis amener des bactéries à proximité d'une tumeur cancéreuse puis à chauffer localement par application d'un champ alternatif. Plusieurs essais cliniques opérés sur des souris sont d'ores et déjà très concluants.

Porteurs d'une aimantation rémanente très stable, les grains de magnétite biogénique sont probablement aussi impliqués dans l'aimantation rémanente de certains sédiments, en particulier loin de toute source volcanique. Toutefois, l'ampleur de leur contribution reste incertaine, faute de pouvoir distinguer clairement les grains biogéniques fossiles de ceux d'origine détritique. Ce domaine d'étude important devrait permettre de mieux caractériser l'origine des cristaux de magnétite dans les sédiments.

## Références

- BRUNHES, B. (1905). Sur la direction de l'aimantation permanente dans une argile de Pontfavein (Cantal). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **141**, p. 567-568.
- BUCUR, I. (1994). The direction of the terrestrial magnetic field in France during the last 21 centuries, recent progress. *Physical Earth Planetary Interiors*, **87**, (1-2), p. 95.
- COX, A., DOELL, R.R., DALRYMPLE, G.B. (1963). Geomagnetic polarity epochs and Pleistocene geochronometry. *Nature*, **198**, n° 488, p. 1049-1052.
- GALLET, Y., GENEVEY, A., COURTILLOT, V. (2003). On the possible occurrence of archeomagnetic jerks in the geomagnetic field over the past 3 millenia. *Earth and Planetary Science Letters*, **214** (1-2), p. 237-242.
- KORTE, M., CONSTABLE, C. (2011). Improving geomagnetic field reconstructions for 0-3 ka. *Physical Earth Planetary Interiors*, **188**, p. 247-259.
- LE MOUËL, J.-L., POIRIER, J.-P. (2013). *Une brève histoire du magnétisme, de l'aimant à la Terre*. Éditions Belin, Paris, 222 p.
- NÉEL, L. (1955). Some theoretical aspects of rock magnetism. *Advances in Physics*, **4**, p. 191-243.
- THELLIER, E., THELLIER, O. (1959). Sur l'intensité de champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Annales de Géophysique*, **15**, p. 285-376.
- VALET, J.-P., MEYNADIER L., GUYODO, Y. (2005). Geomagnetic field strength and reversal rate over the past 2 Million years. *Nature*, **435**, p. 802-805.
- VALET, J.-P., FOURNIER, A., COURTILLOT, V., HERRERO-BERVERA, E. (2012). Dynamical similarity of geomagnetic field reversals, *Nature*, **490**, n° 7418, p. 89-94.