

La boussole dans les glaces polaires

Chacun sait qu'une aiguille aimantée mobile pointe automatiquement vers le Nord et permet donc de s'orienter sur les terrains inconnus ou dans les conditions de mauvaise visibilité. Le principe de la boussole magnétique est connu depuis plus de 1000 ans et a rendu des services inestimables à l'humanité pour tout ce qui touche à la navigation. Les oiseaux migrateurs et bien d'autres animaux semblent disposer eux aussi d'un système d'orientation magnétique interne qui leur permet de se diriger avec précision vers leur but. Notre système de boussole magnétique semble donc parfaitement fiable, mais s'il avait existé il y a plusieurs milliers d'années, il n'aurait pas toujours indiqué le pôle Nord géographique. En effet, au cours de son histoire, la Terre a connu toute une série d'inversions de la polarité de son champ magnétique.

Bien que le champ magnétique terrestre (Fig. 1) soit étudié très en détail depuis déjà 300 ans, Einstein le désignait comme l'un des plus grands problèmes non résolus de la science moderne. Certaines questions concernant son origine et son orientation (Fig. 2) ont pu être élucidées (voir encadré). Mais on ignore encore les raisons des inversions de polarité qu'il a connues à plusieurs reprises au cours des temps géologiques (Fig. 3). Pour tenter d'éclaircir ce mystère, il faut tout d'abord retracer l'évolution de l'intensité et de la polarité du champ géo-

magnétique d'époques très anciennes à nos jours. L'EAWAG a pu montrer que la mesure de radioisotopes dans les carottes de glace constituait une nouvelle méthode de détermination du champ magnétique terrestre.

L'inscription du champ magnétique terrestre dans les paléo-archives

Les paléomagnéticiens se servent traditionnellement des sédiments et des coulées volcaniques pour reconstituer l'histoire du magnétisme terrestre. Dans les sédiments, l'information est fournie par les particules aimantées qui s'y sont déposées couche après couche au cours des temps géologiques. Tant que ces particules étaient encore mobiles dans le sédiment, elles pouvaient s'aligner sur la polarité magnétique à la manière de l'aiguille d'une boussole. Leur alignement est d'autant plus strict que l'intensité du champ magnétique était forte au moment de la solidification du sédiment. Il est ainsi possible de reconstituer aussi bien l'intensité que l'orientation de ce champ géomagnétique passé par l'étude de carottes sédimentaires. L'étude des coulées volcaniques est basée sur un principe similaire. Lors d'une éruption volcanique, des masses rocheuses extrêmement chaudes sont propulsées de l'intérieur de la Terre vers la surface. Tant que la lave est encore en fusion, sa température est trop élevée

pour permettre l'aimantation des particules qu'elle contient. Lorsqu'elle se refroidit, ces particules ferro-magnétiques s'aimantent et s'alignent sur le champ magnétique terrestre dont la direction et l'intensité se trouvent enregistrées et fossilisées.

Ces méthodes de reconstitution du champ magnétique sont particulièrement efficaces pour les périodes de fort magnétisme terrestre et pour les sédiments homogènes et riches en particules aimantées dans lesquels l'enregistrement du géomagnétisme n'a pas été perturbé par des processus ultérieurs.

La méthode radioisotopique

La nouvelle méthode radioisotopique se base sur l'analyse de carottes de glace polaires. Bien que cette glace soit constituée presque exclusivement d'eau pure et ne contienne que très peu de particules aimantées, elle renferme une information très précieuse sur l'histoire du champ magnétique terrestre. Cette information est livrée par la quantité de radioisotopes tels que le béryllium 10 (^{10}Be) ou le chlore 36 (^{36}Cl) contenue dans un gramme de glace. Le champ magnétique terrestre forme une sorte de bouclier qui protège la Terre du rayonnement cosmique. Quand il est fort, la production de radionucléides dans l'atmosphère se trouve donc limitée. Par contre, le taux

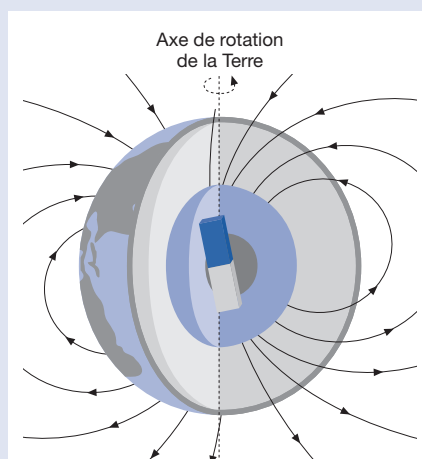


Fig. 1: Le champ magnétique terrestre peut être représenté de façon simplifiée par un champ dipolaire généré par un barreau aimanté imaginaire placé au centre de la Terre. Toutefois, l'axe de ce barreau est légèrement décalé par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

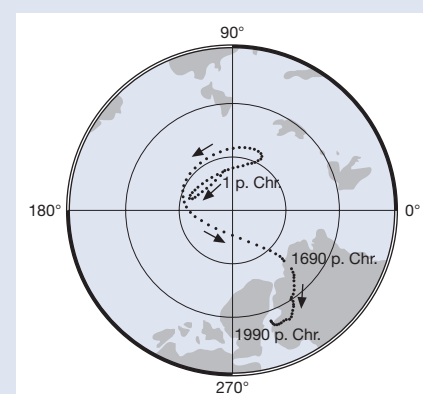


Fig. 2: Migration du pôle Nord magnétique à travers la région arctique au cours des 2000 dernières années [1]. Le voyage continue.

Origine, direction et intensité du champ magnétique terrestre

La Terre est entourée d'un champ magnétique (Fig. 1) qui trouve son origine dans les courants convectifs de fer en fusion dans le noyau. Un peu comme dans le cas de l'eau, le fer le plus chaud monte vers la périphérie du noyau tandis que le fer le plus froid descend vers le cœur.

L'orientation du champ magnétique terrestre ne suit pas tout à fait l'axe de rotation de la Terre, ce qui fait que les pôles magnétiques ne correspondent pas aux pôles géographiques (Fig. 1). De plus, les pôles magnétiques se déplacent en permanence. Ainsi, le pôle Nord magnétique s'est déplacé de plusieurs milliers de kilomètres dans la région arctique au cours des deux derniers millénaires (Fig. 2). Il a atteint le Groenland il y a environ 300 ans et se trouve actuellement au Canada. Personne ne sait où l'amènera son voyage.

Le champ géomagnétique ne change pas seulement de direction mais également d'intensité au cours du temps. A certains moments de l'histoire de la Terre, il arrive que l'intensité du champ s'approche de zéro et que lorsqu'elle remonte, la polarité retrouvée soit l'inverse de la précédente. A la suite d'une telle inversion de polarité le pôle Nord magnétique se retrouve dans l'hémisphère Sud. Il s'y maintient en général dans les 100 000 ans avant de regagner l'hémisphère Nord à l'occasion d'une nouvelle inversion. Le rythme de ces inversions géomagnétiques est irrégulier et ne semble obéir à aucune règle. Il est donc impossible d'en prévoir la prochaine. La dernière inversion, celle de Brunhes-Matuyama, s'est produite il y a 780 000 ans (Fig. 3).

ans, d'un événement géomagnétique caractérisé par une inversion avortée. Après un affaiblissement du champ de 90 % par rapport à sa valeur actuelle, le système est revenu à son état d'origine au lieu de basculer en polarité inversée. La méthode radioisotopique a donc ainsi passé son baptême du feu avec succès. Elle pourra dorénavant être appliquée à l'ensemble de la période couverte par les carottes glaciaires, ce qui devrait permettre de reconstituer l'intensité du champ magnétique terrestre du dernier million d'années.

Mais que nous réserve l'avenir? A quand la prochaine inversion géomagnétique? La force du champ magnétique terrestre est à nouveau en baisse constante depuis environ 2000 ans, ce qui, si la vitesse se maintient, pourrait conduire à une inversion dans à peu près 2000 ans. Ce changement ne devrait pas être perceptible au niveau des êtres humains, mais qu'en est-il par exemple des oiseaux migrateurs? Seront-ils encore capables de retrouver leur destination?

Jürg Beer, portrait p. 5.

- [1] Hongre L., Hulot G., Khokhlov A. (1998): An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 106, 311–335.
- [2] Wagner G., Masarik J., Beer J., Baumgartner S., Imboden D., Kubik P.W., Synal H.-A., Suter M. (2000): Reconstruction of the geomagnetic field between 20 and 60 kyr BP from cosmogenic radionuclides in the GRIP ice core. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 172, 597–604.
- [3] Tric E., Valet J.P., Tucholka P., Paterne M., LaBeyrie L., Guichard F., Tauxe L., Fontugne M. (1992): Paleointensity of the geomagnetic field during the last 80,000 years. *Journal of Geophysical Research* 97, 9337–9351.

de formation moyen de radionucléides augmente de plus du double quand le champ magnétique terrestre s'annule. Si encore, on part du principe que les variations lentes des teneurs en ^{10}Be et en ^{36}Cl de la glace sont uniquement liées au magnétisme terrestre et que les variations plus rapides liées à l'activité solaire s'annulent en moyenne sur ces périodes, on dispose d'une toute nouvelle méthode pour reconstituer l'évolution de l'intensité du champ magnétique terrestre au cours des âges. Et contrairement aux autres, cette méthode radioisotopique est d'autant plus sensible que le géomagnétisme est faible. Autre avantage,

les variations locales du champ magnétique n'ont pas d'influence notable sur les résultats.

Fiabilité des résultats de la méthode radioisotopique

Pour juger de la fiabilité des résultats livrés par la nouvelle méthode de l'EAWAG, nous avons comparé l'approche sédimentologique et l'approche radioisotopique. La figure 4 présente les valeurs de l'intensité du champ magnétique terrestre reconstituées à partir des teneurs en ^{10}Be et en ^{36}Cl déterminées dans la carotte glaciaire GRIP du Groenland d'une part [2] et des mesures traditionnelles effectuées dans une carotte sédimentaire de Méditerranée d'autre part [3]. A quelques exceptions près, les deux méthodes livrent des résultats similaires. Ainsi, les dosages de radionucléides ont confirmé l'occurrence, il y a environ 40 000

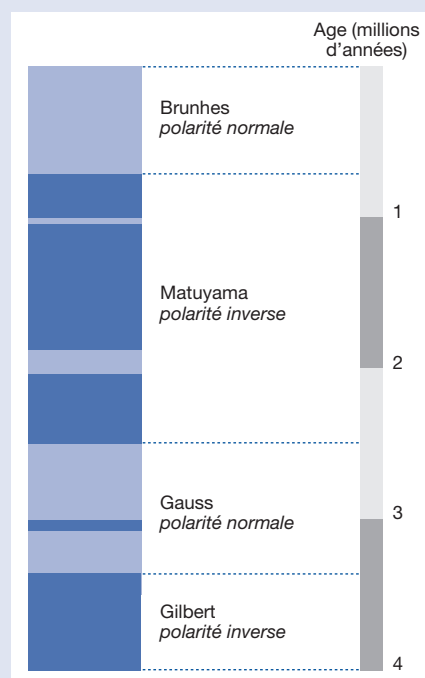


Fig. 3: Succession des inversions de polarité du champ magnétique terrestre au cours des derniers 4 millions d'années. Les périodes en bleu clair sont caractérisées par la même polarité qu'aujourd'hui, celles en bleu foncé par une polarité inverse. Certaines époques portent le nom de grands pionniers de l'étude du magnétisme terrestre.

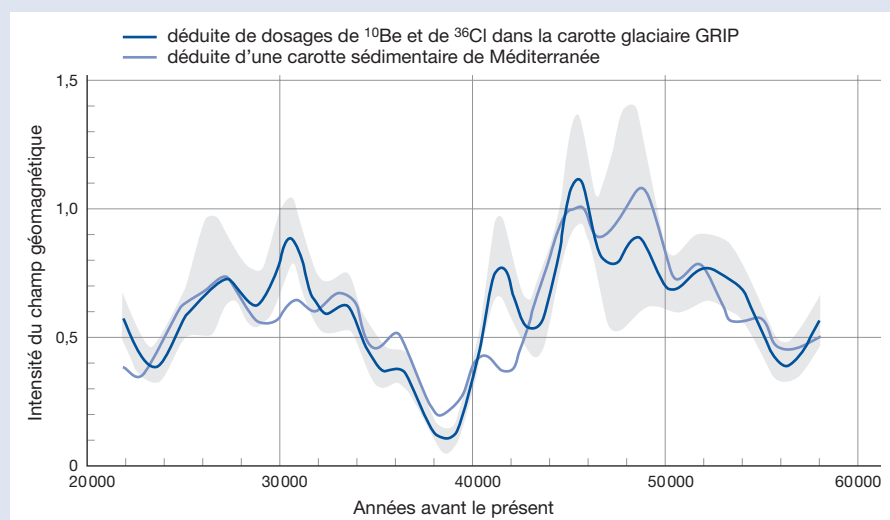


Fig. 4: Reconstruction de la force du champ magnétique de 20 000 à 60 000 ans avant le présent. Comparaison de la nouvelle méthode radioisotopique (courbe bleu foncé: données combinées de ^{10}Be et de ^{36}Cl de la carotte GRIP [2]) avec la méthode traditionnelle (courbe bleu clair: orientation des particules aimantées dans une carotte sédimentaire de Méditerranée [3]). La zone grise correspond à l'intervalle d'erreur de la méthode radioisotopique. La bande d'erreur de la méthode traditionnelle n'est pas représentée.