

> boussoles pour la navigation. Puis l'innovation technique s'est propagée vers l'Europe, où la première mention se trouve dans l'ouvrage *De Naturis Rerum*, du philosophe anglais Alexandre Neckham, en 1190.

On sait aujourd'hui que l'orientation de la boussole est liée à la présence d'un champ magnétique global, à l'échelle de la planète (voir l'encadré ci-contre). Mais l'origine de ce champ est longtemps restée inexpliquée. Elle a intrigué de nombreux savants, comme René Descartes, Edmond Halley ou encore André-Marie Ampère. Mais c'est en 1919, il y a tout juste cent ans, que le Britannique Joseph Larmor a posé les bases expliquant l'origine du champ magnétique terrestre. Depuis, notre compréhension de la dynamo terrestre a bien progressé, grâce à des approches tant théoriques et mathématiques qu'expérimentales et numériques.

L'intérêt d'étudier la dynamo terrestre ne se limite pas à la Terre. D'autres planètes, les étoiles et même les galaxies sont dotées de champs magnétiques dont le mécanisme sous-jacent est similaire. La Terre constitue dès lors un bon modèle pour comprendre ce phénomène complexe.

LA TERRE, UN AIMANT GÉANT ?

On attribue les premières expériences systématiques sur le champ magnétique terrestre à William Gilbert. Vers 1600, cet astronome anglais cherchait à comprendre les causes de l'alignement des boussoles. L'idée la plus naturelle est de supposer que la Terre comporte un aimant gigantesque en son centre. Les lignes de champ magnétique émergent du sol dans l'hémisphère Sud et remontent vers l'hémisphère Nord en suivant les méridiens, avant de replonger dans la planète. Pour tester cette hypothèse, le savant anglais a conçu un aimant sphérique, qu'il a nommé *terrella* («petite terre» en latin). Lorsqu'il en approchait une boussole, l'aiguille pointait vers le pôle nord de la sphère. Il rendait aussi compte du fait, observé par ailleurs, que l'aiguille ne reste pas horizontale par rapport au sol mais s'incline en pointant vers le nord.

Mais si un aimant géant, c'est-à-dire un dipôle magnétique présentant un pôle sud et un pôle nord, explique bien le comportement d'une boussole, le modèle est trop simple. Il n'explique pas les variations du champ magnétique terrestre au cours du temps. En effet, en 1634, Henry Gellibrand, professeur d'astronomie au Gresham College, à Londres, a montré que le pôle nord du dipôle magnétique indiqué par la boussole se déplace. Il avait mesuré une déclinaison (l'angle entre le pôle nord magnétique et le pôle Nord géographique défini par l'axe de rotation de la Terre) de $4,1^\circ$ vers l'est ; or des mesures de ses

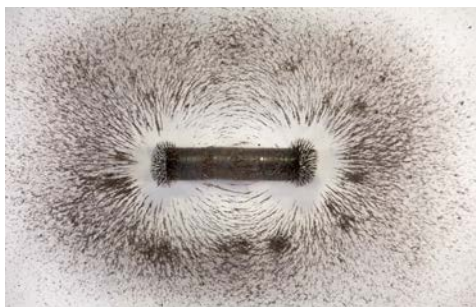
REPRÉSENTER LE CHAMP MAGNÉTIQUE

La force qui oriente la boussole agit à distance, sans contact avec l'aiguille. Le phénomène peut sembler mystérieux, bien qu'il en aille de même avec la force gravitationnelle lorsque nous sautons en l'air. Cela nous surprend moins car nous rencontrons la gravité et l'expérimentons dès le plus jeune âge.

Le parallèle entre gravité et magnétisme ne s'arrête pas là. Pour étudier ces deux forces, on utilise la notion de champ. Un champ indique en tout point de l'espace l'intensité d'une grandeur, comme la température ou la vitesse des vents sur une carte météorologique. Pour

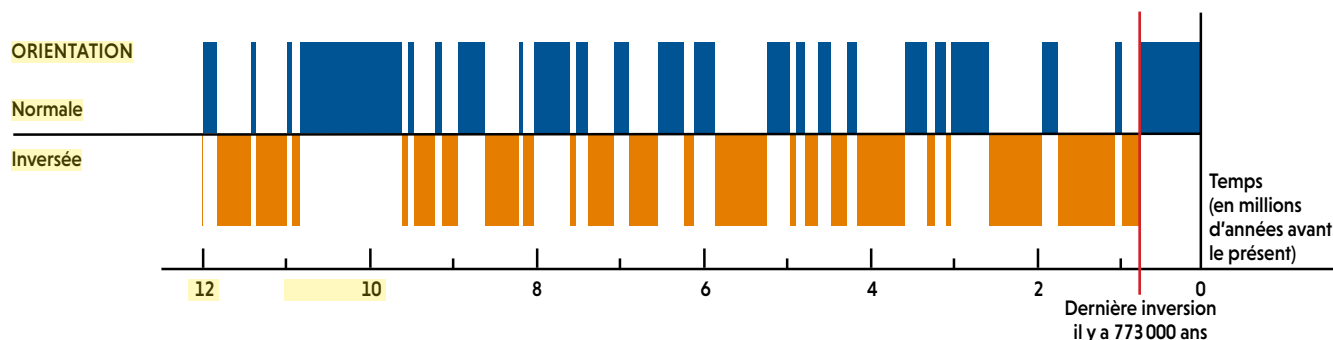
les vents, il faut aussi indiquer la direction ; on utilise alors un champ de vecteurs. C'est aussi le cas pour le champ gravitationnel : il faut indiquer, en tout point de l'espace, dans quelle direction la force s'exerce (vers le centre de la Terre pour faire simple). Pour le champ magnétique, en chaque point, le vecteur indique la direction dans laquelle s'orienterait une boussole imaginaire placée en ce point. La longueur de chaque vecteur indique l'intensité de la force en ce point. Dans le cas de la gravité, son intensité décroît à mesure que l'on s'éloigne de la Terre. À la surface de la Terre, elle est constante en première approximation. On peut la mesurer avec un pendule que l'on écarte de sa position d'équilibre. Si l'amplitude des oscillations n'est pas trop grande, leur période ne dépend que de la longueur du balancier et de la force de gravité locale (c'est ce qui a fait le succès des horloges à balancier au XIX^e siècle).

De la même façon, lorsque l'on écarte l'aiguille de la boussole de sa position d'équilibre, elle oscille avec une période qui dépend de l'intensité du champ magnétique local. Plus celle-ci est élevée, plus l'aiguille oscille vite. C'est ainsi que Carl Friedrich Gauss a effectué les premières mesures d'intensité du champ magnétique terrestre, en 1832. Dans le cas d'un petit aimant, on peut visualiser le champ magnétique à l'aide de limaille de fer (voir l'image ci-contre).



prédécesseurs indiquaient respectivement une déclinaison de 6° vers l'est en 1622, et un angle de $11,3^\circ$ vers l'est en 1580. En supposant que ces relevés étaient fiables, Gellibrand a conclu que le champ magnétique terrestre évoluait dans le temps, contrairement à celui d'un simple dipôle.

La seconde raison qui permet d'exclure un aimant géant est plus fondamentale. On sait, depuis les travaux de thèse de Pierre Curie, en 1895, qu'au-delà d'une certaine température, dite «de Curie» (habituellement de quelques centaines de degrés), les matériaux ferromagnétiques, telle la magnétite, perdent leur aimantation permanente à cause de l'agitation thermique. Or la température à l'intérieur de la Terre augmente rapidement avec la profondeur (c'est le «gradient géothermique») et est estimée dans le noyau à quelques milliers



Le champ magnétique terrestre s'est inversé de nombreuses fois au cours de son histoire. Le pôle nord magnétique se retrouve alors à proximité soit du pôle Nord géographique, soit du pôle Sud géographique. L'étude des roches volcaniques permet d'établir la chronologie des époques où le champ était orienté de façon normale (en bleu) ou inversée (en orange). Le pôle de polarité nord de l'aimant terrestre est actuellement situé près du pôle Sud géographique, on dénote par convention cette configuration comme « normale ».

de degrés, bien au-delà de la température de Curie du fer. Impossible d'avoir un aimant permanent dans ces conditions.

Mais alors, d'où provient le champ magnétique terrestre ? Au XIX^e siècle, Ampère a proposé une nouvelle piste en s'appuyant sur les expériences de Hans Christian Ørsted, qui découvrit en 1820 un lien entre électricité et magnétisme. Ce physicien danois montra qu'en faisant circuler un courant électrique dans un conducteur, on dévie l'aiguille d'une boussole placée à proximité : un courant électrique produit un champ magnétique. Deux ans plus tard, Ampère proposa que le magnétisme terrestre était lié à des courants électriques à l'intérieur de la Terre : « L'idée la plus simple, et celle qui se présenterait immédiatement à celui qui voudrait expliquer cette direction constante de l'aiguille, ne serait-elle pas d'admettre dans la Terre [...] un courant électrique perpendiculaire au méridien magnétique ? » L'origine dudit courant électrique restait cependant à déterminer.

Serait-ce un courant momentané ? On peut calculer qu'un courant électrique non entretenu se dissiperait sous forme de chaleur en quelque dix mille ans, à cause de la résistivité électrique de la planète. Mais la Terre a un champ magnétique depuis

plusieurs milliards d'années, montrent les enregistrements fossiles...

Ces enregistrements fossiles consistent en des coulées volcaniques qui contiennent des minéraux ferrières (comme la magnétite). En se refroidissant, elles produisent des roches dont l'aimantation s'oriente selon la direction du champ magnétique de l'époque et du lieu de la coulée (un mécanisme comparable existe dans les sédiments au fond des lacs). Or en 1906, le géophysicien français Bernard Brunhes a mis en évidence que des coulées successives en un même lieu indiquaient parfois un nord géomagnétique proche du nord géographique, parfois un nord géomagnétique proche du sud géographique. Il venait de découvrir les inversions du champ magnétique terrestre (voir la figure ci-dessus). S'il a fallu près d'un demi-siècle pour que sa découverte soit acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique, elle est aujourd'hui bien établie : le champ magnétique de la Terre s'est inversé plusieurs fois au cours de son histoire.

LA VALSE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Ces inversions se produisent de façon irrégulière. Une période dure en moyenne quelques centaines de milliers d'années, mais la planète a aussi connu des périodes de plus de 30 millions d'années sans inversion. La dernière inversion date d'il y a 773 000 ans. La durée d'une inversion peut être déterminée soit par la lente décroissance de l'intensité qui la précède, soit par le changement de direction plus rapide. En 2012, l'équipe de Jean-Pierre Valet, de l'institut de physique du globe de Paris, a montré que cette étape durait environ mille ans. En 2019, Brad Singer, de l'université du Wisconsin, aux États-Unis, et ses collègues ont proposé qu'elle puisse durer jusqu'à vingt-deux mille ans. D'autres analyses seront nécessaires pour trancher ce débat.

Ce faisceau d'observations indique qu'un mécanisme complexe doit être à l'origine du champ magnétique terrestre. C'est finalement Joseph Larmor, professeur de l'université de Cambridge, qui trouva en 1919 la solution du problème. Il proposa pour la première fois un ➤

La dernière inversion date d'il y a 773 000 ans et la période de transition a duré quelques milliers d'années