

L'ESSENTIEL

> Les mouvements au sein du noyau de fer liquide de la Terre créent un effet dynamo, à l'origine du champ magnétique de la planète.

> Si Joseph Larmor a esquissé les grandes lignes de ce mécanisme il y a cent ans, le phénomène reste encore un domaine de recherche

actif, à la frontière de diverses disciplines : la géophysique, les mathématiques et la physique expérimentale.

> De prochaines expériences visent à mieux comprendre les mécanismes de génération du champ magnétique et la dynamique d'inversion des pôles.

L'AUTEUR



EMMANUEL DORMY
directeur de recherche du CNRS
à l'École normale supérieure,
à Paris, et professeur à l'École
polytechnique, à Palaiseau

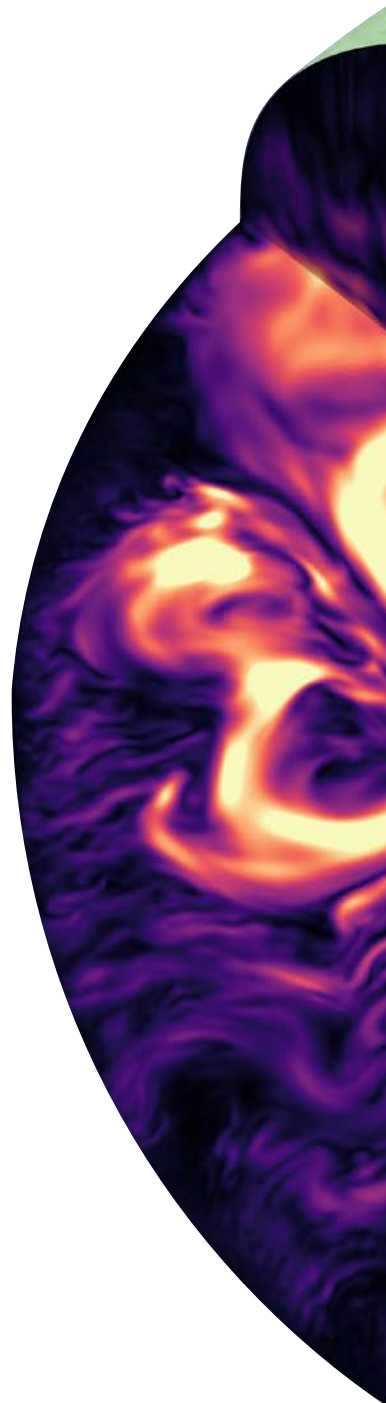
La dynamo terrestre, un défi centenaire

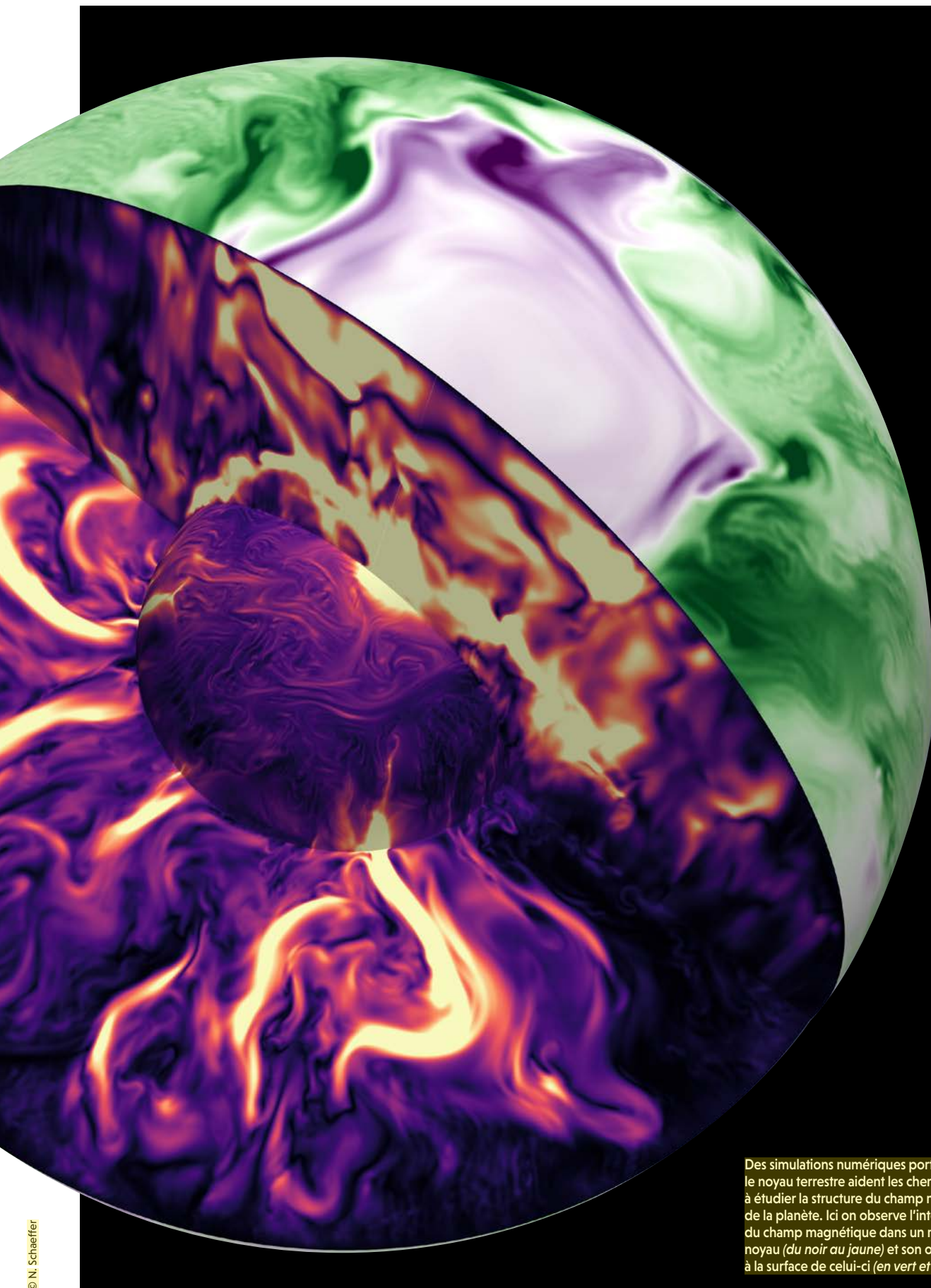
D'où provient le champ magnétique de la Terre ? Il y a cent ans, Joseph Larmor proposait une réponse : un effet dynamo dû aux mouvements du fer liquide au sein du noyau terrestre. En dépit des difficultés mathématiques et techniques, calculs théoriques, simulations numériques et expériences de laboratoire confirment ce scénario.

Nous avons tous joué un jour avec une boussole. L'expérience, bien que simple, est fascinante. L'aiguille s'oriente systématiquement dans une direction privilégiée, le « Nord ». Lorsqu'on cherche à l'en dévier, elle oscille et revient dans sa direction d'origine. Si l'on approche un aimant, elle se met à osciller rapidement et finit par s'orienter vers l'aimant. Cette expérience à la portée de tous ne manque pas de surprendre et de réveiller la curiosité scientifique qui nous anime. Dans son autobiographie, Albert Einstein a écrit qu'à l'âge de quatre ou cinq ans, alors qu'il était malade, son père lui a offert une boussole. Il était captivé : « Que l'aiguille se comporte de façon aussi précise

sans qu'on la touche ne rentrait pas dans mes schémas de compréhension du monde... Je me souviens, ou je crois me souvenir, que cet événement me laissa une impression profonde et durable. Il devait y avoir un ordre caché derrière l'apparence des choses. » Ce besoin de comprendre a amené le jeune Einstein à faire des découvertes spectaculaires. Mais qu'en est-il de cette boussole si fascinante ?

Dès le IV^e siècle avant notre ère, les Chinois utilisaient un « indicateur austral » (les boussoles chinoises indiquaient de préférence le sud) pour se repérer. À l'époque Han, la boussole était constituée d'une cuillère en magnétite (un oxyde de fer présentant une aimantation permanente) dont la queue pointe vers le sud. Il faut attendre le XI^e siècle pour voir les premières références à l'utilisation de >





Des simulations numériques portant sur le noyau terrestre aident les chercheurs à étudier la structure du champ magnétique de la planète. Ici on observe l'intensité du champ magnétique dans un modèle du noyau (du noir au jaune) et son orientation à la surface de celui-ci (en vert et en mauve).

➤ 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

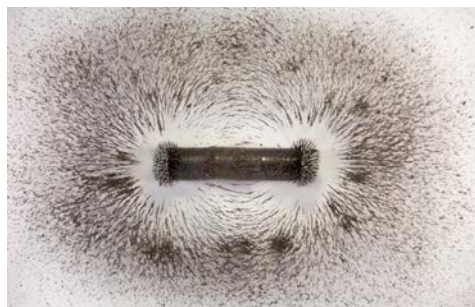
REPRÉSENTER LE CHAMP MAGNÉTIQUE

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