

Les cellules cancéreuses ne sont pas des démons darwiniens

qui n'auraient eu aucun effet sur la grande population, terminent le travail, sans sélectionner de résistance. En juillet dernier, en s'appuyant sur un modèle mathématique, l'équipe de Robert Gatenby a proposé d'utiliser la même stratégie contre des cancers métastatiques : on commencerait par frapper fort avec une thérapie drastique. On l'arrêterait avant que les cellules cancéreuses développent des résistances et on appliquerait ensuite une multitude de petites thérapies sublétales pour le cancer.

Pour James DeGregori, de l'université du Colorado à Denver, le problème du cancer n'est pas tant la survenue de mutations que l'apparition d'un microenvironnement favorable à la croissance des cellules qui les portent. La difficulté survient lorsque le paysage sélectif change et avantage les cellules porteuses de ces mutations. C'est ce qui se passe quand on vieillit ou quand on modifie son habitat, en fumant par exemple. L'idée de James DeGregori est de rétablir les paramètres de l'habitat pour diminuer l'avantage sélectif des cellules porteuses de mutations en jouant sur le microenvironnement, et non sur les cellules elles-mêmes.

D'autres pistes visent non pas à tuer le cancer, mais à réduire sa vitesse d'évolution en diminuant le taux de mutation ou de division cellulaire, ou en réduisant les différences entre cellules cancéreuses. On parle même d'écologie tumorale pour décrire le fait qu'une tumeur qui grossit est le résultat net d'un ensemble d'interactions variées : coopération, parasitisme, compétition, prédation par le système immunitaire... Comprendre cette écologie tumorale nous aidera peut-être à manipuler ces interactions pour déstructurer les tumeurs. Par exemple, comme un parasite, le cancer repose sur l'exploitation des cellules saines alentour. Or ces cellules sont beaucoup plus faciles à tuer car elles ne varient pas. C'est certainement une voie intéressante.

Pourquoi les tumeurs produisent-elles parfois des métastases ?

On ne sait pas pourquoi, brusquement, des cellules cancéreuses quittent la tumeur. Est-ce un problème purement physique ? Des conditions

écologiques locales devenues désastreuses ? Pas assez de nourriture, un métabolisme particulier qui rend la situation intenable ? L'équipe de Robert Gatenby a observé qu'en nourrissant les tumeurs avec de petites quantités, très régulièrement, on diminue leur propension à produire des métastases. En revanche, si on les affame, avec par exemple un traitement qui bloque la croissance des vaisseaux sanguins, et si un vaisseau réussit quand même à s'installer dans la tumeur, les cellules cancéreuses s'échappent massivement.

Qu'étudiez-vous plus spécifiquement ?

Toute une partie de nos recherches est consacrée au rôle des processus cancéreux chez les espèces animales et dans le fonctionnement des écosystèmes. Le cancer a façonné le vivant depuis plus d'un milliard d'années et certaines espèces ont développé des défenses. L'éléphant possède 20 copies d'un gène suppresseur de tumeurs là où l'humain n'en a qu'une. Le rat-taube nu, particulièrement résistant au cancer, le doit en partie à l'acide hyaluronique qui encercle les cellules de sa peau et les empêche de se multiplier de façon anarchique. Nous essayons de comprendre comment le cancer influence le vivant. Par exemple, les individus plus vulnérables au cancer ont-ils besoin de plus de sommeil ? Nous avons aussi récemment proposé que le cancer soit à l'origine du sexe : comme il a plus de chances de passer chez un embryon identique à la mère, l'évolution aurait privilégié la reproduction sexuée, qui brasse les gènes.

Nous avons par ailleurs soumis un article sur l'évolution de la ménopause : pourquoi seuls les humains et deux espèces de baleines ont un arrêt de la reproduction avant l'arrêt de la vie ? On s'est aperçu qu'à chaque grossesse, les tumeurs déjà présentes chez une femme grossissent. Donc plus elle se reproduit tard, plus le risque que ces tumeurs deviennent cancéreuses est grand. La sélection naturelle aurait ainsi favorisé les femmes qui avaient une cessation de reproduction, ce qui non seulement diminuait le risque de développer un cancer, mais permettait de prodiguer des soins aux petits-enfants.

Nous avons aussi un projet de recherche sur les cancers transmissibles avec l'Australie, et plein d'autres très variés, comme étudier les cancers d'origine infectieuse, examiner si les souris détectent une congénère atteinte d'un cancer ou encore comprendre l'évolution des cancers chez les hydres – des animaux immortels chez qui le cancer se transmet de mère en fille. Plus que jamais, les équipes interdisciplinaires sont prometteuses contre le cancer et, plus que jamais, il faut faire confiance aux médecins et aux chercheurs, et garder espoir. ■

Propos recueillis par
Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

J. F. Lemaitre et al., **Eco-evolutionary perspectives of the dynamic relationships linking senescence and cancer**, *Functional Ecology*, sous presse.

F. Thomas et al., **Transmissible cancer and the evolution of sex**, *Plos Biology*, vol. 17, article e3000275, 2019.

F. Thomas et al., **Is adaptive therapy natural ?**, *Plos Biology*, vol. 16, article e2007066, 2018.

C. Maley et al., **Classifying the evolutionary and ecological features of neoplasms**, *Nature Reviews Cancer*, vol. 17, pp. 605-619, 2017.

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

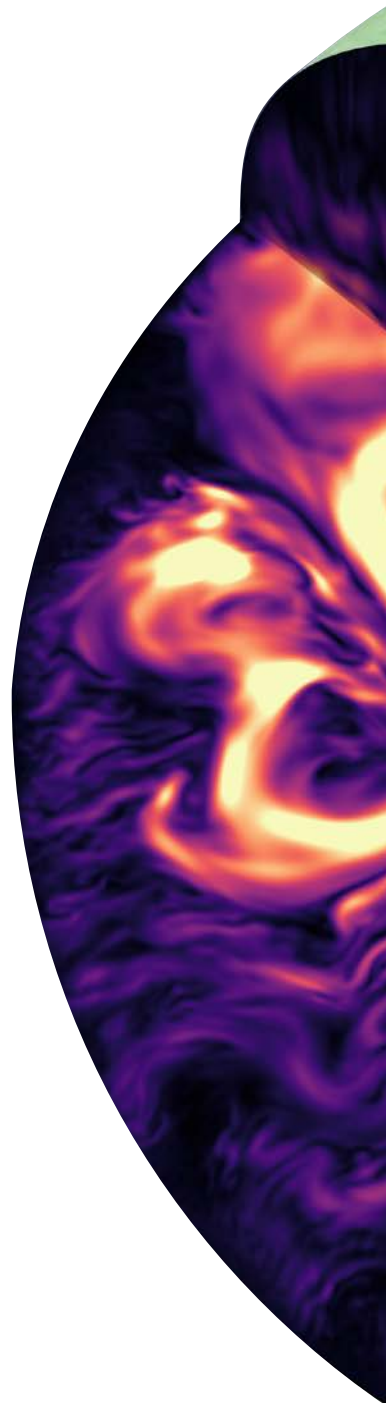
La dynamo terrestre, un défi centenaire

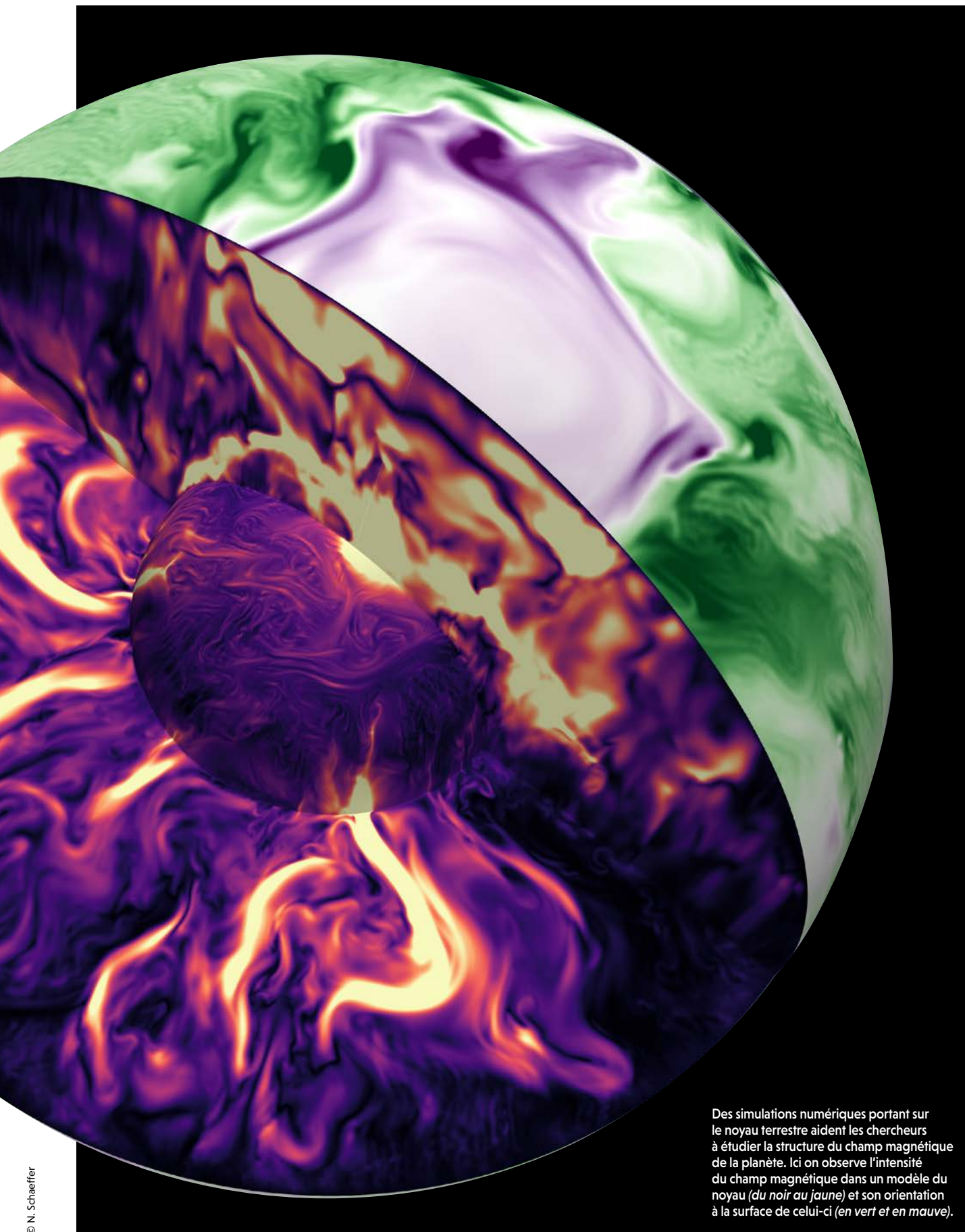
D'où provient le champ magnétique de la Terre ? Il y a cent ans, Joseph Larmor proposait une réponse : un effet dynamo dû aux mouvements du fer liquide au sein du noyau terrestre. En dépit des difficultés mathématiques et techniques, calculs théoriques, simulations numériques et expériences de laboratoire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

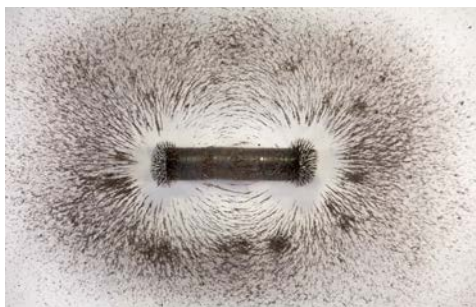
REPRÉSENTER LE CHAMP MAGNÉTIQUE

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

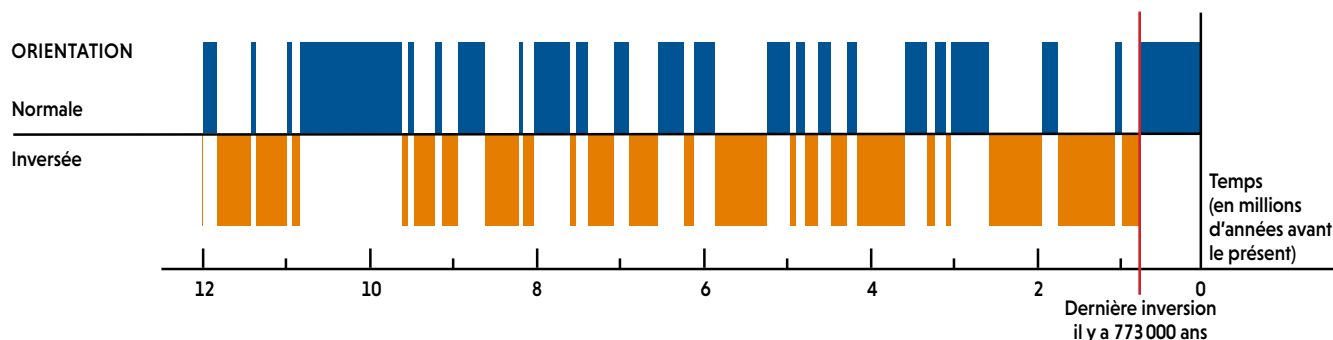
les vents, il faut aussi indiquer la direction ; on utilise alors un champ de vecteurs. C'est aussi le cas pour le champ gravitationnel : il faut indiquer, en tout point de l'espace, dans quelle direction la force s'exerce (vers le centre de la Terre pour faire simple). Pour le champ magnétique, en chaque 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



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

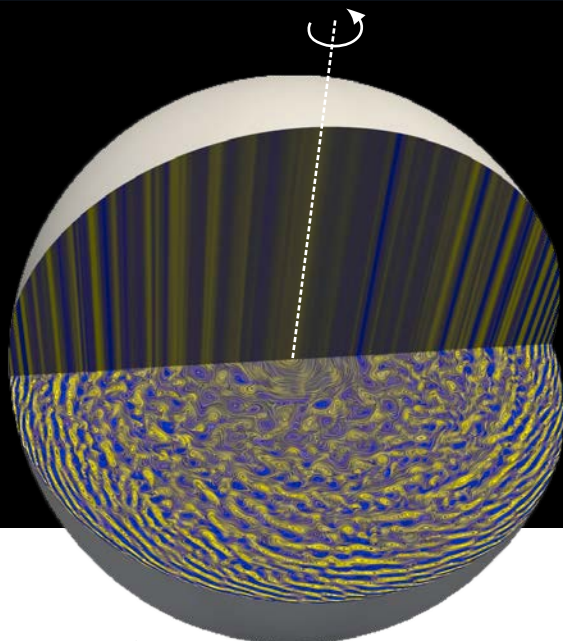
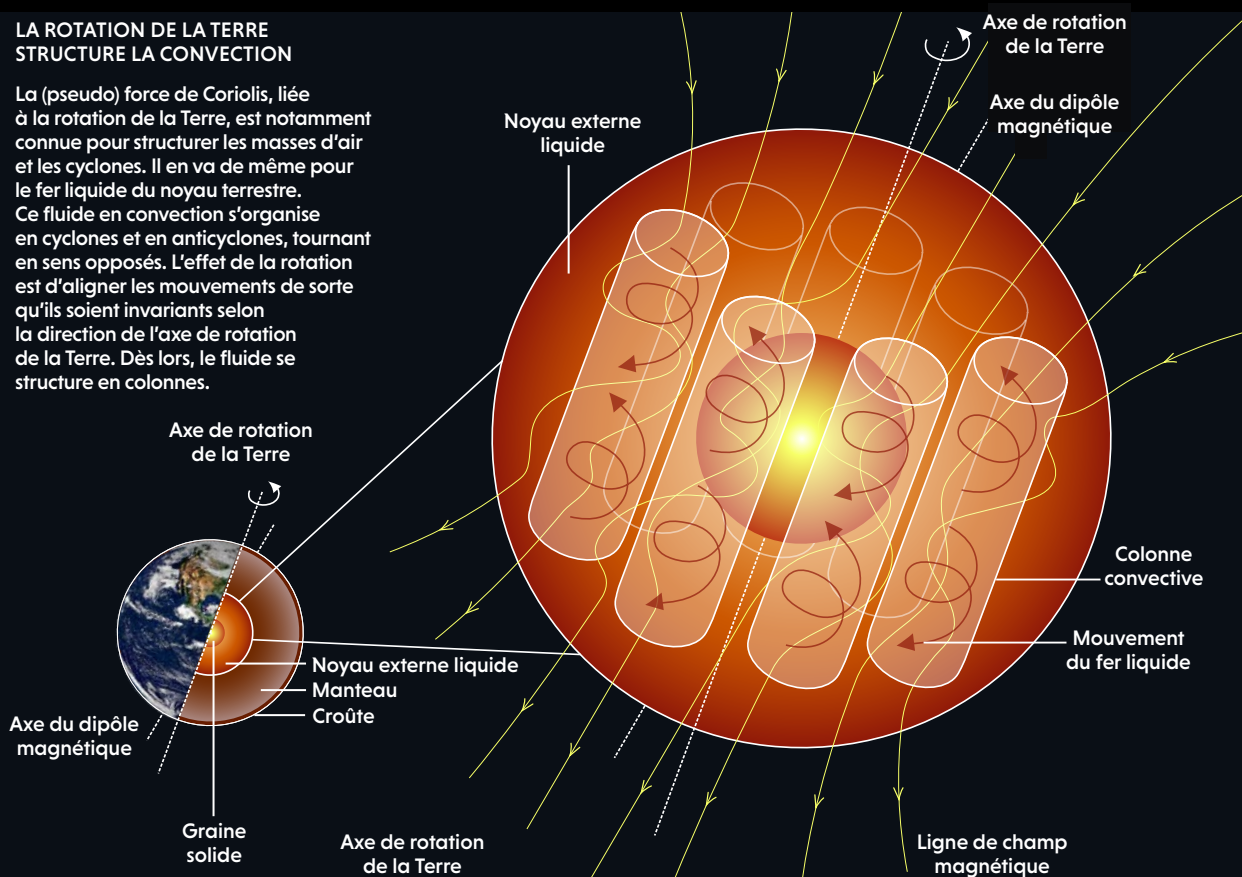
DES COLONNES DE FER LIQUIDE AU CENTRE DE LA TERRE

Pour que la dynamo terrestre fonctionne, le fer liquide du noyau de la Terre doit être animé de mouvements. C'est le cas notamment grâce à la convection thermique : le liquide plus profond étant plus chaud, il est moins dense et tend donc à monter vers la surface, tandis que le fer plus froid plonge. La croissance de la graine solide, à mesure que le noyau se refroidit, contribue aussi aux mouvements de convection. Pour bien décrire

la convection, il faut prendre en compte la rotation de la Terre sur elle-même, dont résulte une force inertielle, la force de Coriolis. On montre alors que les mouvements de convection du fer liquide se structurent en colonnes parallèles à l'axe de rotation de la planète. À mesure que le champ magnétique produit par l'effet dynamo s'intensifie, les forces associées entrent en compétition avec la force de Coriolis et détruisent la structure en colonnes.

LA ROTATION DE LA TERRE STRUCTURE LA CONVECTION

La (pseudo) force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre, est notamment connue pour structurer les masses d'air et les cyclones. Il en va de même pour le fer liquide du noyau terrestre. Ce fluide en convection s'organise en cyclones et en anticyclones, tournant en sens opposés. L'effet de la rotation est d'aligner les mouvements de sorte qu'ils soient invariants selon la direction de l'axe de rotation de la Terre. Dès lors, le fluide se structure en colonnes.



UNE SIMULATION RÉALISTE DE LA CONVECTION

Les simulations numériques permettent de mieux comprendre la structure des colonnes en l'absence de champ magnétique. En 2019, Céline Guervilly, de l'université de Newcastle, et ses collègues ont réalisé une simulation avec des paramètres les plus réalistes possible (ci-contre en coupes équatoriale et méridionale, les couleurs indiquant la vitesse de rotation du fluide dans le sens horaire ou antihoraire). Ces colonnes ont un diamètre typique de l'ordre de 30 kilomètres et se répartissent sur plusieurs couches concentriques. Ici, le noyau ne présente pas de graine solide, car les chercheurs étudient la dynamique préalable à la formation de la graine et du champ magnétique.

> mécanisme où une partie de l'énergie mécanique des mouvements d'un fluide conducteur d'électricité est convertie en énergie électrique et donc en champ magnétique. Son raisonnement ne fait appel à aucun aimant permanent pour engendrer les courants électriques et est novateur, car il repose sur une instabilité. L'idée est que l'interaction du fluide en mouvement avec un infime champ magnétique ou courant électrique fortuitement présent crée un courant électrique et un champ magnétique qui se renforcent et s'entretiennent mutuellement. C'est l'effet dynamo autoexcité (voir l'encadré page 46).

Larmor a d'abord appliqué son idée au Soleil, car l'existence de mouvements fluides en son sein était déjà connue au début du xx^e siècle. Mais il a noté que ce mécanisme s'appliquerait aussi à la Terre si l'intérieur de celle-ci était fluide. À cette époque, grâce à l'étude des ondes sismiques, les géophysiciens avaient montré que la planète présentait un noyau distinct du manteau terrestre. Mais il a fallu attendre encore une dizaine d'années pour savoir qu'il est en partie liquide.

Lors de sa formation, la Terre s'est différenciée: le fer (plus dense) s'est accumulé au centre de la planète pour former le noyau, entouré d'un manteau rocheux (moins dense). À quelque 3000 kilomètres sous nos pieds, ce noyau est constitué à 80% de fer en fusion, mélangé à des éléments plus légers, principalement du nickel, l'ensemble étant à une température de plusieurs milliers de degrés. Du fait des pressions extrêmes, une «graine» solide, constituée de fer presque pur, s'est formée au centre du noyau. C'est de la partie liquide du noyau qu'émergerait l'effet dynamo.

UN BRASSAGE EFFICACE

Parce qu'elle se refroidit depuis sa surface, la Terre présente un gradient radial de température. Dès lors, le fer liquide au plus profond est plus chaud, et donc moins dense, que celui jouxtant le manteau. D'où la mise en place de mouvements de convection: la poussée d'Archimède entraîne le fer liquide chaud vers le haut et le fer liquide plus froid descend.

À cela s'ajoute une convection liée à la composition: avec le refroidissement de la planète, le rayon de la graine croît lentement; le fer cristallise tandis que les éléments légers restent dans le noyau liquide, mais du fait de leur densité moindre, ils remontent vers le

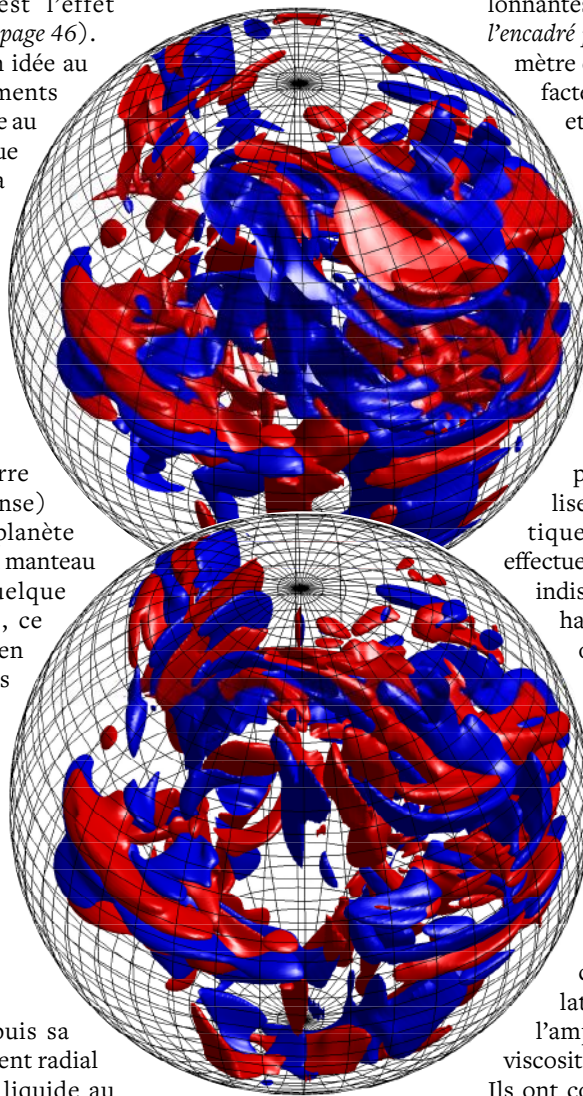
manteau et contribuent ainsi au mouvement de convection. Et la cristallisation de la graine libère de la chaleur, qui amplifie l'effet de convection thermique du noyau liquide.

La rotation de la Terre et la (pseudo)force de Coriolis qui lui est associée jouent aussi un rôle. En l'absence de champ magnétique, cette force contraint le fluide subissant la convection à s'organiser en cyclones et anticyclones, et s'oppose à toute variation de la vitesse dans la direction de l'axe de rotation de la planète. Le fluide se structure alors en colonnes tourbillonnantes parallèles à l'axe de rotation (voir l'encadré page ci-contre). Le nombre et le diamètre de ces colonnes dépendent de divers facteurs comme la viscosité du fer liquide et la vigueur des mouvements.

Les chercheurs utilisent notamment des simulations numériques pour étudier la dynamo terrestre. Mais les caractéristiques de la Terre rendent difficiles la résolution de modèles réalistes. Quand certains paramètres sans dimension sont petits, les effets de certains termes sur l'écoulement apparaissent à de toutes petites échelles. Cette finesse implique une plus grande quantité de calculs à réaliser et donc des ressources informatiques plus puissantes pour espérer effectuer des simulations réalistes. Il est alors indispensable de faire appel au calcul de haute performance, c'est-à-dire à des ordinateurs massivement parallèles.

Par exemple, on pensait que le diamètre des colonnes de convection dépendait surtout de la viscosité du fluide et était de l'ordre de la dizaine de mètres de diamètre, à comparer au diamètre de plusieurs milliers de kilomètres du noyau. Mais, en 2019, Céline Guervilly, de l'université de Newcastle, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré à l'aide de simulations numériques que c'est plutôt l'amplitude des mouvements, et non la viscosité, qui fixe l'échelle de ces colonnes. Ils ont conclu que le diamètre des colonnes était plutôt de l'ordre de 30 kilomètres (voir la figure en bas de l'encadré page ci-contre). Ce résultat réduit le problème des échelles et ouvre la perspective de concevoir des modèles plus réalistes et moins gourmands en ressources de calcul.

Néanmoins, malgré des ordinateurs toujours plus performants, les paramètres des simulations restent assez éloignés de ceux du noyau fluide de la Terre. Les chercheurs essaient toutefois de déduire de leurs modèles certaines caractéristiques robustes du champ >



Une fois la dynamo enclenchée, le fer liquide du noyau est soumis à la force de Laplace et celle de Coriolis. Ces simulations de l'auteur montrent comment les deux forces s'équilibrent. La force de Coriolis s'exerce sur le fer liquide (en haut) est représentée en isocontours (en rouge pour une valeur positive, en bleu pour une valeur négative); elle tend à s'équilibrer avec la force de Laplace (en bas).

> magnétique et malgré tout de s'approcher d'un régime le plus réaliste possible.

Ces simulations numériques ont mis en évidence la possibilité d'enclencher l'effet dynamo dans des modèles du noyau liquide terrestre. Tous les éléments de la théorie de Larmor semblent donc réunis. Et une fois que l'effet dynamo s'enclenche, l'intensité du champ magnétique augmente jusqu'à ce que la force – dite « de Laplace » – que ce champ exerce sur le fluide conducteur rivalise avec la force de Coriolis. On atteint, alors, un régime d'équilibre où le champ magnétique compense les contraintes de la rotation rapide: les colonnes de convection disparaissent, comme on l'observe dans mes simulations de 2016 (voir les figures page 45).

UN SYSTÈME NON LINÉAIRE

Ce type de simulations s'appuie sur des équations que l'on résout par des méthodes numériques, donc par des méthodes d'approximation. L'étude rigoureuse de ces équations est aussi un défi pour les mathématiciens. Leur analyse commence au lendemain de la Seconde

Guerre mondiale, lorsque le physicien d'origine allemande Walter Elsasser en a donné l'expression moderne sous la forme d'un système d'équations magnétohydrodynamiques qui décrivent l'instabilité proposée par Larmor. Le système comprend trois équations: l'équation de Navier-Stokes (intrinsèquement non linéaire), qui régit le mouvement du fluide, l'équation d'induction du champ magnétique, qui décrit la formation du champ magnétique et les effets de l'induction, et une troisième équation, qui porte sur les transferts thermiques au sein du fluide. Le système de ces trois équations est difficile à résoudre, car il est non linéaire – notamment parce que le mouvement du fluide donne naissance au champ magnétique, qui agit en retour, par la force de Laplace, sur l'écoulement du fer liquide.

Comme pour les simulations numériques, la difficulté de résolution de ces équations réside en partie dans les valeurs prises par leurs paramètres, associées à des caractéristiques, parfois extrêmes, de la Terre. Par exemple, la force de Coriolis est plusieurs milliards de fois plus intense que celles liées à la

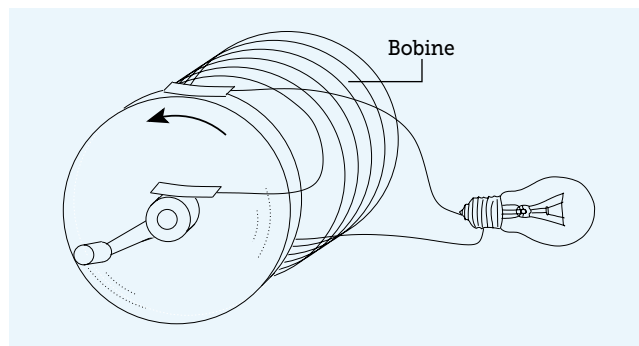
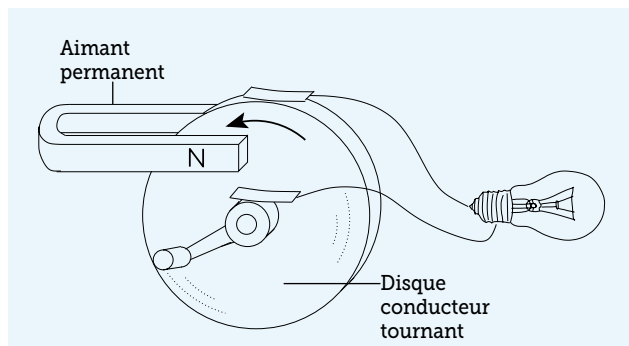
EFFET DYNAMO AUTOEXCITÉ: LE RÔLE DE L'INSTABILITÉ

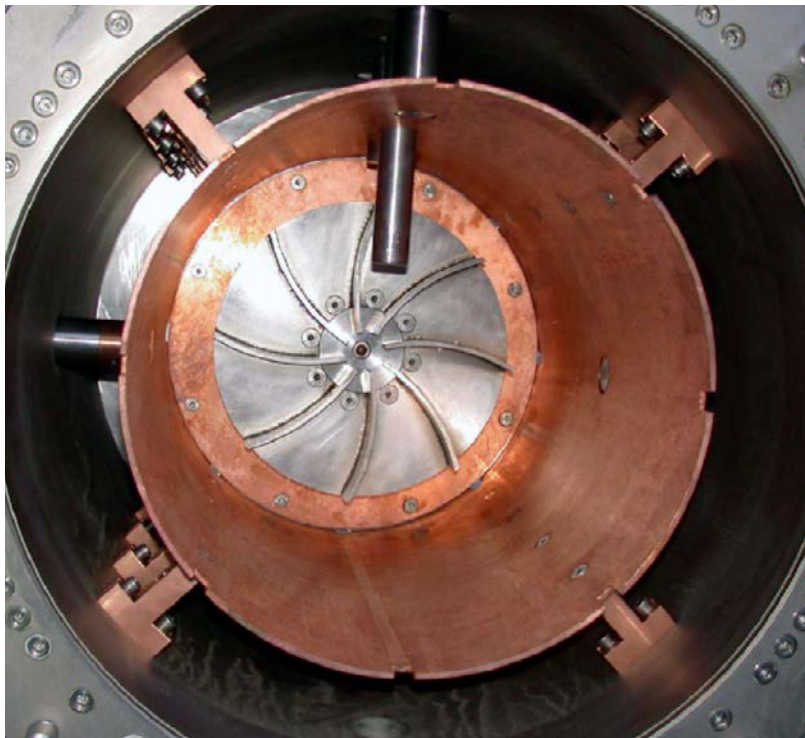
Dans une dynamo de vélo, le mouvement de la roue entraîne un aimant permanent dans un bobinage. D'après les lois de l'électromagnétisme, les variations du champ magnétique créent un courant électrique dans la bobine. Dans un dispositif équivalent (ci-dessous, à gauche), le courant est produit grâce au mouvement d'un disque conducteur tournant dans un champ magnétique fixe. Mais comment produire un courant électrique sans aimant permanent, comme cela semble être le cas pour la Terre ? Joseph Larmor a proposé une solution en 1919 : l'effet dynamo autoexcité. Pour illustrer l'idée, reprenons le dispositif précédent et remplaçons l'aimant par une bobine. Lorsqu'un courant circule dans la bobine, il crée un champ magnétique qui peut jouer le rôle de l'aimant du montage précédent. Dès lors, on obtient une dynamo ; un courant électrique est produit et, si le bobinage s'enroule dans le bon sens, ce courant créera à son tour un champ magnétique qui viendra renforcer le champ initial, etc. C'est par une telle

amplification qu'on obtiendrait un champ magnétique à l'échelle d'une planète !

Mais une question se pose, celle dite « de l'œuf et de la poule » : lequel, du champ magnétique ou du courant électrique, était là en premier ? Il s'agit en fait d'une fausse question. Au-delà d'une certaine vitesse de rotation du disque conducteur, tout courant ou champ magnétique, aussi petit soit-il, pourvu qu'il soit non nul, sera amplifié. C'est ce que l'on nomme une instabilité. Divers phénomènes ou sources extérieures au dispositif peuvent provoquer cet élément déclencheur (effet thermoélectrique, source externe de champ magnétique, etc.).

Un exemple plus familier d'instabilité est l'« effet Larsen ». Au-delà d'une certaine amplification, un son, aussi petit soit-il, pourvu qu'il soit non nul, est capté par le micro, amplifié par le haut-parleur et croît jusqu'à devenir strident. L'origine du son initial n'a pas d'importance : au-delà d'une certaine amplification, l'effet est systématique.





En 2006, l'expérience VKS (pour *Von Karman sodium*), à Cadarache, en France, a reproduit l'effet dynamo autoexcité. Le fluide, du sodium liquide, était brassé dans un cylindre par deux disques munis de pales (au fond, en gris) et mis en rotation à ses extrémités, les deux disques tournant en sens inverses. En faisant tourner les deux disques à des vitesses différentes, les chercheurs ont observé pour la première fois le phénomène d'inversion du champ magnétique.

viscosité du fluide. De telles différences d'échelles se retrouvent aussi dans l'évolution temporelle: la rotation propre de la Terre, sur vingt-quatre heures, influe de façon évidente sur la génération du champ géomagnétique (en conférant à celui-ci sa structure principalement dipolaire alignée en moyenne sur l'axe de rotation de la planète), mais l'évolution du champ magnétique présente des temps caractéristiques qui s'expriment plutôt en siècles, voire plus (comme pour les inversions de polarité). Ces différences d'échelle rendent très difficile l'étude de ces équations.

DES ÉQUATIONS RAIDES

Si l'on néglige, en première approximation, tous les petits paramètres (des rapports adimensionnels plus petits que le millionième), on obtient des équations simplifiées, mais que l'on ne sait en général pas résoudre à l'heure actuelle. On n'a même pas démontré, pour ces équations, l'existence de solutions « régulières » (c'est-à-dire physiquement acceptables et non aberrantes, exemptes par exemple d'oscillations infiniment rapides). Obtenir la solution dans cette limite négligeant les petits paramètres, nommée « état de Taylor » (introduite en 1963 par le physicien britannique John Bryan Taylor), constitue aujourd'hui encore un formidable défi mathématique.

En 2015, Paul Roberts et Cheng-Chin Wu, de l'université de Californie à Los Angeles, ont

réalisé les premiers modèles numériques pour l'état de Taylor, et dans une configuration simplifiée. En 2017, Isabelle Gallagher, de l'École normale supérieure, à Paris, et David Gérard-Varet, de l'université Paris-Diderot, ont étudié la régularité mathématique d'un cas particulier de l'état de Taylor où les équations non linéaires sont prises dans une limite linéarisée et dans une géométrie idéalisée.

De façon surprenante, en réintroduisant les petits paramètres que l'on avait négligés (on parle de développement asymptotique), on peut obtenir des solutions. Mais les équations restent particulièrement difficiles à étudier (on parle de systèmes raides).

En 2015, Michael Calkins, de l'université du Colorado à Boulder, aux États-Unis, et une équipe internationale ont combiné l'approche asymptotique avec l'approche numérique, dans le cas où le champ magnétique est assez faible. En 2016, j'ai développé une simulation de dynamo à champ fort (c'est-à-dire pour lesquelles le champ magnétique s'équilibre avec la force de Coriolis), évoquée précédemment. Diverses équipes dans le monde se livrent toujours à une course aux paramètres le plus réalistes possible.

Une autre approche repose sur la démonstration expérimentale de l'effet dynamo autoexcité. La tâche est complexe, car elle nécessite de mettre en mouvement de gros volumes de métaux liquides; en effet, pour de petits volumes, la dissipation des courants électriques est trop efficace pour être compensée par le mouvement du fluide. À ce jour, seules trois expériences ont reproduit l'effet dynamo autoexcité dans un fluide conducteur en laboratoire.

UNE DYNAMO EN LABORATOIRE

Les deux premières ont fonctionné à quelques mois d'écart en 1999 en Allemagne, à Karlsruhe, et en Lettonie, à Riga. Dans les deux cas, l'écoulement d'un métal liquide (du sodium, qui fond juste en dessous de 100 °C) était fortement contraint à l'aide de tuyaux. Les géométries de ces écoulements ont été choisies pour s'approcher d'écoulements connus analytiquement dont on connaissait les propriétés dynamo. Ces deux premières expériences ont confirmé que le mécanisme de Larmor est réalisable. Les champs magnétiques produits ont augmenté jusqu'à ce que la force de Laplace freine assez l'écoulement pour cesser leur amplification. Ces expériences n'exhibaient cependant pas d'inversions, car la géométrie des écoulements était trop contrainte.

En 2006, la troisième expérience, nommée VKS et réalisée en France, à Cadarache, a permis d'obtenir l'effet dynamo autoexcité dans un écoulement turbulent peu contraint. Le sodium liquide était brassé dans une cavité ➤

LA TERRE PERD-ELLE LE NORD ?



En pinçant légèrement la nappe, la bille peut rouler assez loin. C'est un phénomène équivalent qui explique pourquoi le pôle nord magnétique se déplace si vite.

Le champ magnétique sert depuis longtemps de référence. Les boussoles que nous utilisons pour nous orienter n'indiquent-elles pas inmanquablement le Nord, ou du moins une zone proche du pôle Nord géographique ? À ce titre, on pourrait penser que le champ magnétique est stationnaire et immuable. Pourtant, il n'est ni immuable ni stationnaire.

Les registres géologiques ont ainsi montré que l'orientation du champ magnétique s'est souvent inversée au cours de l'histoire de la Terre. Le champ magnétique s'est donc retrouvé la tête en bas. Mais sans aller jusqu'à une situation aussi radicale, le pôle nord magnétique n'est pas immobile et se déplace. Ces vingt dernières années, il a ainsi migré sur plusieurs centaines de kilomètres. Ce phénomène est parfaitement normal.

Pour offrir des cartes précises du champ magnétique, même près du pôle Nord, le modèle magnétique mondial (WMM), qui est d'habitude revu tous les cinq ans, a eu droit à une mise à jour anticipée d'un an en 2019. Y a-t-il lieu de s'inquiéter que le pôle nord magnétique se déplace actuellement à une vitesse d'environ 55 kilomètres par an, contre moins de 10 kilomètres par an il y a cinquante ans ? Cette accélération est-elle le signe d'un phénomène exceptionnel en train de se produire dans le noyau

terrestre ? Faut-il craindre une inversion imminente de la polarité du champ magnétique ? Il n'en est rien.

La Terre présente trois « pôles nord » distincts. Le premier, le « pôle Nord géographique », indique la position de l'axe de rotation de la planète. Le deuxième, le « pôle nord géomagnétique », indique la position du grand aimant dipolaire qui caractérise en première approximation le champ magnétique terrestre. Proche du pôle géographique (ce qui confère à la boussole son utilité), il est, par construction, à l'antipode du pôle sud géomagnétique. Le troisième pôle est le

et le pôle sud magnétique n'ont donc aucune raison d'être exactement à l'antipode l'un de l'autre.

C'est ce dernier pôle, le pôle magnétique, qui fait parler de lui. S'il est vrai que ses mouvements sont complexes et difficiles à anticiper, ils se restreignent à un bassin bien délimité près du pôle géographique (*voir ci-dessous*). Sur une vaste zone (*en bleu clair*), le champ magnétique est quasiment vertical. Le pôle nord magnétique (*cercle rouge*) s'est rapidement déplacé entre 2000 et 2019, mais on note que la tache claire s'est, en revanche, peu déplacée, tout comme le pôle nord géomagnétique (*carré rouge*).

Le pôle nord magnétique est peu contraint. De toutes petites variations du champ engendrent donc un grand déplacement de celui-ci. Un phénomène analogue à celui d'une bille posée sur une nappe : en soulevant à peine la nappe (*voir ci-dessus*), la bille roule loin.

La structure du champ magnétique au pôle Sud apparaît plus contrainte et limite la dérive du pôle sud magnétique. Il se déplace tranquillement à moins de 10 kilomètres par an, sans aucun signe d'accélération. Il n'y a donc pas lieu de s'inquiéter d'une inversion imminente !

Les mouvements rapides du pôle nord magnétique ne sont pas pour autant sans intérêt. Ils nous informent sur la dynamique du champ magnétique et sur les mouvements du fer liquide au sein du noyau terrestre.

Le pôle nord magnétique se déplace actuellement à une vitesse d'environ 55 kilomètres par an

« pôle nord magnétique ». C'est le lieu où l'aiguille d'une boussole, libre de s'orienter selon ses trois axes, se tiendrait parfaitement verticale, comme pour indiquer : « C'est ici ! ».

Évidemment, le pôle magnétique prend en compte toute la complexité du champ, lequel a des composantes « multipolaires » qui le différencient d'un simple dipôle. Le pôle nord magnétique



► cylindrique par deux disques situés à chaque extrémité et tournant en sens contraires (voir la photographie page 47). Cette expérience a permis, pour la première fois, d'observer en laboratoire des inversions spontanées de polarité et de mieux comprendre comment elles se déroulent à l'échelle de la planète.

Les équations d'Elsasser montrent que ce changement de polarité est possible: si un écoulement peut maintenir un champ magnétique d'une polarité donnée, il peut, sans être modifié, maintenir aussi le champ de polarité opposé! En revanche, la question de la transition entre les polarités est longtemps restée mystérieuse. L'expérience VKS a permis de mettre en évidence le rôle des symétries: le champ magnétique engendré par les deux disques contrarotatifs ne s'inverse que si la symétrie de l'écoulement est brisée, c'est-à-dire si les deux disques ne tournent pas à la même vitesse.

En 2009, François Pétrélis, de l'École normale supérieure, à Paris, et trois collègues, dont je faisais partie, ont modélisé la dynamique de l'inversion sur un système de basse dimension (impliquant peu de degrés de liberté). Nous avons pu modéliser les aspects essentiels de l'inversion du champ magnétique terrestre: une décroissance lente de l'intensité du champ (qui ne disparaît cependant pas complètement, mais devient chaotique) suivie d'une inversion rapide de la polarité, et enfin un rétablissement rapide de l'intensité. Les tout récents travaux de Brad Singer sur les registres géologiques, évoqués précédemment, ont confirmé ce scénario pour la dernière inversion du champ géomagnétique.

DES DÉFIS TECHNIQUES

Dans l'expérience VKS, les disques tournants qui produisent l'écoulement étaient en fer. Or ce matériau peut s'aimanter, ce qui pourrait contribuer à la génération du champ magnétique, et donc fausser les mesures. Plusieurs équipes essaient à présent de réaliser des expériences dans des géométries plus proches de celle de la Terre et sans utiliser de fer.

C'est le cas de Daniel Lathrop, de l'université du Maryland, qui a mené un projet reposant sur une enceinte sphérique de 3 mètres de diamètre en rotation. Mais en raison des difficultés techniques, il n'y a pas eu de résultats. Cary Forest, de l'université du Wisconsin, à Madison, élabore une expérience utilisant un plasma plutôt qu'un métal liquide. Enfin, à Dresde, la plateforme Dresdyn (*Dresden sodium facility for dynamo and thermohydraulic studies*) permettra d'étudier plusieurs configurations, dont une dynamo de 2 mètres de diamètre forcée par les mouvements de précession.

Ces expériences encore en développement devraient, dans les années à venir, aider à mieux comprendre le phénomène de dynamo



Le champ magnétique d'une galaxie polarise la lumière provenant de celle-ci ou de sources plus lointaines. En analysant cette lumière, il est alors possible de cartographier le champ magnétique, comme ici pour la galaxie M51.

autoexcité. L'enjeu ne se limite pas au géomagnétisme. Dans son article de 1919, Larmor s'était avant tout intéressé au champ magnétique du Soleil. L'étoile, dont le diamètre est cent fois plus grand que celui de la Terre, produit aussi un champ magnétique organisé. L'intensité de son champ de grande échelle est assez comparable à celle du champ terrestre (environ 10 gauss pour l'étoile et 0,5 gauss pour la planète), sauf dans les régions des taches solaires, où il peut atteindre plusieurs milliers de gauss. Autre différence, la polarité du champ magnétique solaire s'inverse de façon quasi périodique tous les onze ans. En fait, une grande partie des objets astrophysiques produisent un champ magnétique. C'est le cas de la plupart des planètes du Système solaire, mais pas toutes (Vénus, par exemple, n'a pas de champ magnétique).

DES DYNAMOS GALACTIQUES

Les galaxies produisent aussi un champ magnétique (voir la figure ci-dessus) de l'ordre du microgauss (un million de fois moins que le champ terrestre). Là encore, l'effet dynamo est la seule explication pour l'origine de ce champ organisé à grande échelle. Il prend sa source dans les mouvements du milieu interstellaire liés à la rotation de la galaxie et aux chocs provoqués par les explosions de supernovæ. L'étude des différents champs magnétiques n'est pas simple, car ils interagissent les uns avec les autres. Ainsi, le vent solaire interagissant avec la magnétosphère terrestre produit les spectaculaires aurores boréales. En cent ans, les chercheurs ont compris plusieurs aspects de la dynamo terrestre, mais il reste des questions ouvertes, sur Terre comme ailleurs dans l'Univers... ■

BIBLIOGRAPHIE

K. Moffatt et E. Dormy, **Self-Exciting Fluid Dynamos**, Cambridge University Press, 2019.

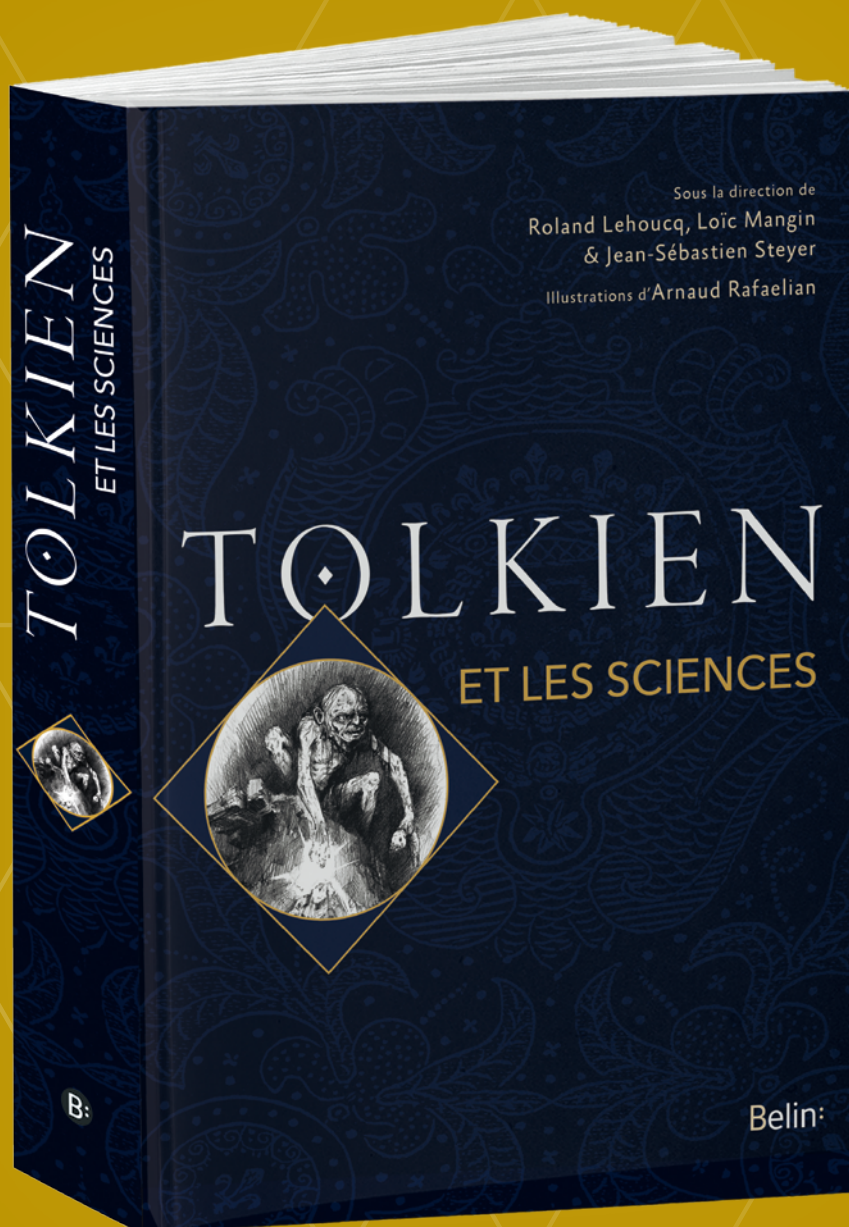
C. Guervilly et al., **Turbulent convective length scale in planetary cores**, *Nature*, vol. 570, pp. 368-371, 2019.

N. Schaeffer et al., **Turbulent geodynamo simulations: a leap towards Earth's core**, *Geophysical Journal International*, vol. 211(1), pp. 1-29, 2017.

E. Dormy, **Strong-field spherical dynamos**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 789, pp. 500-513, 2016.

E. Dormy, **The origin of the Earth's magnetic field: fundamental or environmental research?**, *Europhysics news*, vol. 37(2), pp. 22-25, 2006.

QUAND LA SCIENCE NOUS ÉMERVEILLE...



Belin: